

Document public



Projet de recherche ARK Amélioration de la connaissance de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne



Région
Provence
Alpes
Côte d'Azur



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Projet de recherche ARK Amélioration de la connaissance de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne

Rapport final

BRGM/RP-65884-FR

Février 2017

Étude réalisée dans le cadre du projet de
recherche du BRGM PDR13PAC01

B. Dewandel – B. Ladouche – S. Lanini

Avec la collaboration de

V. Bailly-Comte – P. Vigouroux

Vérificateur :

Nom : Jean-Christophe Maréchal
Responsable Unité de Recherche
Date : 25 février 2017

Signature :



Approbateur :

Nom : Claire Arnal
Directrice du BRGM PACA
Date : 16 mars 2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Région
Provence
Alpes
Côte d'Azur



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Hydrosystème complexe – géologie – hydrogéologie - géochimie - modélisation

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

Dewandel B. – Ladouche B. – Lanini S. (2017) – Projet de recherche ARK - Amélioration de la connaissance de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne. Rapport final BRGM/RP-65884-FR, 177 p., 75 ill., 11 ann..

Synthèse

Le projet ARK, mené en partenariat entre l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (Agence RMC), le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte-D'azur (CR-PACA), le Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône (CD13), la Société du Canal de Provence (SCP) et le BRGM, a pour objectif l'acquisition d'une meilleure connaissance du système aquifère karstifié profond, sous couverture, des calcaires fuvelo-jurassiques du bassin d'Aix-Gardanne.

Le projet ARK a permis, notamment par la mise en œuvre d'un pompage de gros débit pendant plus de 4 mois sur les Puits de l'Arc (implantés dans le Fuvélien) d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère des calcaires fuvelo-jurassiques dont la ressource est identifiée stratégique AEP dans le SDAGE. Le présent rapport, dit final, fait suite à un rapport intermédiaire de présentation des données acquises (RP-64610-FR de mai 2015). Ce rapport présente les résultats du projet selon trois approches, (i) hydrogéologique, (ii) fonctionnelle et géochimique et (iii) modélisation.

Pour l'approche hydrogéologique, les conclusions majeures peuvent se résumer ainsi :

- les connexions hydrauliques du Fuvelo-Jurassique avec le Bégudien (sus-jacent) et l'Hauterivien (sous-jacent) traduisent un système stratifié horizontalement et compartimenté latéralement ;
- un pompage en continu sur les puits de l'Arc induira, même au débit limité de 0,55 m³/s, un rabattement important de la nappe sur tout le secteur. Le risque de conflit que cela peut occasionner avec des ouvrages proches est réel. Les effets d'éventuels phénomènes de subsidence, liés aux forts rabattements qui induisent une baisse de l'artésianisme, méritent également de faire partie de la réflexion à plus long terme (même si le risque semble réduit). Ces aspects doivent guider la définition des conditions d'exploitation du gisement ;
- les différentes simulations réalisées au cours du projet sont à prendre avec précaution en l'absence de points suffisants pour caler, sur l'ensemble du gisement, le comportement hydraulique sur de grandes échelles de temps et d'espace et en raison d'une durée de pompage somme toute limitée dans le temps ;
- les résultats obtenus laissent envisager la possibilité d'une exploitation à forts débits de l'aquifère des calcaires jurassiques, notamment dans le secteur des puits de l'Arc. Toutefois les essais réalisés n'ont permis d'apprécier que de façon relative (indirecte) la productivité réelle de l'aquifère des calcaires jurassiques.

Pour l'approche fonctionnelle et géochimique, les conclusions majeures peuvent se résumer selon :

- la qualification du fonctionnement du karst jurassique et la ré-évaluation du bilan hydrogéologique permettent de préciser que l'emprise de l'impluvium où se produit la recharge du Jurassique sous couverture, dont une part contribue à l'alimentation du Fuvélien du bassin d'Aix Gardanne, est estimée à 95 km² environ (81 km² pour la Sainte-Victoire et 14 km² pour Regagnas) ;
- l'aquifère jurassique sous-couverture impose ou contrôle la signature géochimique du réseau de fissures/draines du réservoir Fuvélien mobilisé par le pompage ;
- les eaux pompées résultent d'un mélange entre une eau ancienne (anté1930) et une eau récente. La part récente est liée à la recharge par le jurassique ;
- dans le Jurassique, le(s) réseau(x) de drain(s) karstique(s) qui contribuent à alimenter les puits de l'Arc apparaissent bien connectés à leur zone de recharge, les transferts de masse sont rapides lors des crues (mobilisation d'une eau récente subactuelle <1an).

Pour l'approche modélisation, les conclusions majeures peuvent se résumer selon :

- le modèle développé confirme les conclusions des autres approches : (i) le réservoir Fuvélien exploité est connecté au Bégudien et au Jurassique, (ii) il y a une forte inertie du réservoir (lié à son volume important), (iii) il y a un transfert rapide de pression du Jurassique vers le Fuvélien (quelques jours), (iv) les valeurs des paramètres hydrodynamiques sont cohérentes ;
- le bilan hydrologique apporté par l'approche modélisation indique (i) une alimentation du Fuvélien par le Jurassique de 12 à 15 Mm³/an, (ii) une fuite du Jurassique de 2.5 à 5 Mm³/an et (iii) une vidange du Fuvélien de 1.5 à 2 Mm³/an.

Compte tenu de ces éléments, les conclusions générales du projet peuvent s'énoncer selon :

- on dispose d'une caractérisation très sensiblement renforcée du bassin d'Aix-Gardanne. Celui-ci est constitué de plusieurs aquifères de caractéristiques très distinctes, avec un aquifère majeur, celui des calcaires jurassiques ;
- le droit d'eau attribué actuellement sur les puits de l'Arc (1,1 m³/s) est très surévalué pour un pompage en continu. Un tel pompage (en continu) doit être limité dans le temps. Il peut cependant servir à des situations d'urgence (exploitation temporaire de quelques jours à quelques semaines) ;
- la gestion durable des eaux souterraines de l'aquifère des calcaires jurassiques nécessite de disposer d'un réseau de suivi adapté (inexistant à l'heure actuelle) ;
- le moteur du fonctionnement hydrogéologique du système (le bassin d'Aix-Gardanne) est le Jurassique. Les résultats acquis permettent d'affirmer que la capacité d'exploitation de ce gisement des calcaires jurassiques est très importante ;
- l'estimation de l'impact d'une exploitation des calcaires jurassiques reste mal contrainte. La définition du volume prélevable ou l'incidence sur le débit de fuite vers Gardanne d'une exploitation des calcaires jurassiques restent des éléments qu'il conviendra de mieux préciser ;
- la ressource renouvelable en eau souterraine des calcaires jurassiques est estimée à environ 17 Mm³/an, dont 14 Mm³/an alimentent le réservoir Fuvélien dans lesquels ils sont prélevés (pompage et surverse). L'eau du gisement des calcaires est de très bonne qualité ;
- le comportement karstique du gisement des calcaires jurassiques est désormais clairement établi, compte tenu des valeurs de transmissivité très élevées qui ont été calculées et des valeurs de transit rapide d'eau récente.

L'avancée notable dans la compréhension du fonctionnement de l'aquifère des calcaires jurassiques du bassin d'Aix-Gardanne ouvre diverses perspectives pour poursuivre l'action engagée. Les 4 points suivants pourraient guider ces futures actions :

1. optimisation de l'exploitation du gisement. Il s'agit de travailler à augmenter la productivité des puits de l'Arc en cherchant à mobiliser plus directement l'aquifère profond des calcaires jurassiques. Plusieurs hypothèses de travail pourraient être étudiées (nettoyage des puits, surfuration en fond de puits, réalisation d'un nouvel ouvrage...) ;
2. qualification, au plan réglementaire notamment, de la "gestion durable" de l'aquifère des calcaires jurassiques et du "volume prélevable". Cette problématique nécessite de disposer d'un réseau de suivi de l'aquifère plus étendu qu'actuellement ;
3. caractérisation de la possibilité (ou non) d'utiliser l'aquifère karstique des calcaires jurassiques dans la gestion active des ressources en eau du secteur ;
4. définition, aux plans technique et réglementaire, des conditions de protection du gisement pour répondre à l'objectif SDAGE relatif aux ressources stratégiques AEP, à la définition des zones de sauvegarde et à la préservation des ressources pour l'AEP.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CADRE GENERAL DU PROJET	11
1.1.1. Situation du projet ARK – Contexte partenarial	11
1.1.2. Les puits de l'Arc	12
1.2. DONNEES ACQUISES.....	13
1.3. OBJECTIF	13
2. Approche hydrodynamique	15
2.1. RAPPEL DES DONNEES ACQUISES.....	15
2.2. INTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE	15
2.2.1. Interprétation des essais par paliers de débit.....	15
2.2.2. Diagnostic de l'essai de longue durée réalisé aux puits de l'Arc.....	20
2.3. MODELISATION DES ESSAIS AUX PUIITS DE L'ARC	21
2.3.1. Modèle mathématique utilisé pour interpréter les essais	21
2.3.2. Résultats des modélisations	25
2.4. SCENARIOS DE SIMULATIONS DU DEBIT D'EXPLOITATION.....	33
2.4.1. Simulation d'un pompage en continu sur 365 jours – Scénarios 1 & 2	34
2.4.2. Simulation pompage ponctuel sur 10 jours	37
2.5. CONCLUSIONS ET SYNTHESE	39
3. Approche fonctionnelle et géochimie	45
3.1. AVANT-PROPOS	45
3.2. RAPPELS SUCCINCTS - GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	45
3.3. FONCTIONNEMENT DE LA SOURCE DE L'ARGENS / GARDENIA	50
3.3.1. Présentation de l'approche de modélisation.....	50
3.3.3. Données utilisées pour la modélisation de la source de l'Argens	52
3.3.4. Examen des résultats de modélisation du débit de la source de l'Argens.....	53
3.3.5. Estimation du bilan hydrogéologique du massif calcaire de la Sainte-Victoire.....	57
3.4. FONCTIONNEMENT DES PUIITS DE L'ARC / GARDENIA	60
3.4.1. Schéma conceptuel de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement hydrogéologique des Puits de l'Arc.....	60
3.4.3. Données utilisées pour la modélisation du puits de l'Arc.....	62

3.4.4. Examen des résultats du modèle du puits de l'Arc	65
3.4.5. Confrontation des résultats des composantes QG1 et QG2 du modèle au débit d'exhaure du puits Gérard de la mine de Gardane.....	68
3.4.6. Synthèse et discussion de l'approche de modélisation Gardania.....	69
3.5. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE	70
3.5.1. Informations apportées par le suivi chimique et isotopique	71
3.5.2. Informations apportées par la datation des eaux à partir des Gaz dissous (CFC et SF6)	76
3.5.3. Informations apportées par le Tritium :	83
3.5.4. Confrontation des informations apportées par le tritium et les gaz dissous (CFC/SF6).....	87
3.5.5. Conclusions/Synthèse sur le plan hydrochimique	89
4. Approche modélisation	91
4.1. MODELISATION DU SYSTEME FUVELO-JURASSIQUE.....	91
4.1.1. Principe de la méthode des réseaux de réservoirs	91
4.1.2. Modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique du système	91
4.1.3. Modèle mathématique et expression des différents flux	93
4.1.4. Modèle numérique.....	94
4.2. CALAGE DU MODELE NUMERIQUE	95
4.2.1. Paramètres du modèle et valeurs de référence	95
4.2.2. Comparaison observations / simulations	96
4.3. APPLICATIONS DU MODELE	98
4.3.1. Bilan hydrologique du système exploité par les puits de l'Arc	98
4.3.2. Simulation de scénarios d'exploitation	100
4.4. CONCLUSION.....	100
5. Conclusions / Perspectives.....	105

Liste des illustrations

<i>Illustration 1 : Carte de situation du site du projet de recherche ARK et des ouvrages suivis lors de l'essai de longue durée.</i>	11
<i>Illustration 2 : Tableau de référence des points d'eau utilisés dans le cadre du projet ARK.</i>	12
<i>Illustration 3 : Problématique d'un essai par paliers de débit lorsque le niveau initial n'est pas connu (forage artésien avant l'essai ou déjà pompé).</i>	16
<i>Illustration 4 : Méthode de Hantush-Bierschenk, paliers enchainés à débit croissant.</i>	16
<i>Illustration 5 : Interprétation des essais par paliers de débit du puits de l'Arc avec la méthode des différences de débit.</i>	18
<i>Illustration 6 : Méthode classique avec variations du niveau d'eau initial ($s_{inc.}$) pour estimer sa valeur optimale (adaptation de la méthode de Hantush-Bierschenk).</i>	19
<i>Illustration 7 : Interprétation des premiers paliers de débit des puits de l'Arc avec la méthode classique ($s=BQ+CQ^2$), recherche du niveau d'eau initial ; calage optimal pour $s_{inc.}=0.65$ m.</i>	19
<i>Illustration 8 : Interprétation indépendante des quatre essais par paliers de débit avec la méthode de Hantush-Bierschenk, $s_{inc.}$ fixé à 0.63 m.</i>	20
<i>Illustration 9 : Diagnostic des essais réalisés en 1994 et 2014 aux puits de l'Arc.</i>	20
<i>Illustration 10 : Modèle à effet de drainance d'un aquitard supérieur avec anisotropie de perméabilité 3-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales et captage partiel du puits.</i>	22
<i>Illustration 11 : Paramètres des modèles à effet de drainance (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007).</i>	23
<i>Illustration 12 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence du facteur de drainance du semi-perméable ($Br^{1/2}$).</i>	24
<i>Illustration 13 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de l'emmagasinement de l'aquitard (Sy).</i>	24
<i>Illustration 14 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de la transmissivité de l'aquitard (T_0).</i>	25
<i>Illustration 15 : Vue en plan de l'aquifère. Différentes surfaces sont proposées en fonction de l'endroit (piézomètre) où est fait la modélisation.</i>	27
<i>Illustration 16 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc - modélisation aux puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.</i>	28
<i>Illustration 17 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc, aux forages de Peynier, Meyreuil, Ark2, puits Gérard, Y et Z et au piézomètre de Kirbon. Modèle = Hunt & Scott modifié.</i>	29
<i>Illustration 18 : Modélisation de l'essai du 02/08 au 06/09/1994 au puits de l'Arc. Modèle = Hunt & Scott modifié.</i>	30
<i>Illustration 19 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations aux puits de l'Arc.</i>	31
<i>Illustration 20 : Position actuelle des pompes et du travers banc pour le calcul du rabattement maximum admissible.</i>	34
<i>Illustration 21 : Simulations au puits de l'Arc pompage 24h/24, 7j/7 pendant un an, scénarios 1 & 2.</i>	35

<i>Illustration 22 : Simulations au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant un an). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 0,55 m³/s (scénarios 1 & 2).</i>	36
<i>Illustration 23 : Simulations au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant un an). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 1,1 m³/s (scénarios 1 & 2).</i>	36
<i>Illustration 24 : Simulations au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant 10 jours). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 1,1 m³/s (scénarios 1 & 2).</i>	37
<i>Illustration 25 : Simulation au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant 10 jours). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 1,85 m³/s (scénario 3).</i>	38
<i>Illustration 26 : Simulation au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant 10 jours). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 2,9 m³/s (scénario 3).</i>	38
<i>Illustration 27 : Synthèse des informations hydrodynamiques dans le secteur des puits de l'Arc, vue en plan.</i>	42
<i>Illustration 28 : Origine des flux d'eaux souterraines durant le pompage sur les puits de l'Arc (essai de pompage de longue durée, été 2014).</i>	43
<i>Illustration 29. Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des essais dans le cadre du projet ARK (Extrait rapport BRGM/RP-64610-FR).</i>	44
<i>Illustration 30 : Situation des puits de l'Arc sur fond géologique simplifié et position des coupes géologiques.</i>	47
<i>Illustration 31 : Coupes interprétatives nord-sud et est-ouest du bassin hydrogéologique.</i>	47
<i>Illustration 32 : Carte hydrogéologique simplifiée du massif karstique de la Sainte Victoire (extrait de la Thèse de Cavalera, 2007).</i>	48
<i>Illustration 33 : Bilans hydrogéologiques révisés du massif karstique de la Sainte-Victoire (extrait de la Thèse de Cavalera, 2007).</i>	49
<i>Illustration 34 : Schématisation hydrogéologique adoptée pour décrire le fonctionnement hydrogéologique de la source d'Argens</i>	50
<i>Illustration 35 : Emprise des mailles Safran sur la masse d'eau FRDG210 du massif calcaire de la Sainte-Victoire, fond IGN 100000.</i>	52
<i>Illustration 36 : Source de l'Argens : évolution des débits simulés par le modèle Gardenia sur la période 1985-2013.</i>	53
<i>Illustration 37 : Evolution de la piézométrie simulée par le modèle Gardenia sur la période 1985-2015.</i>	54
<i>Illustration 38 : Evolution des flux de pluie efficace et de recharge et des composantes de l'écoulement de la source de l'Argens calculés par le modèle Gardenia.</i>	54
<i>Illustration 39 : Réponse impulsionnelle de l'aquifère à 100 mm de pluie efficace</i>	55
<i>Illustration 40 : Paramètres du modèle Gardenia de la source de l'Argens</i>	56
<i>Illustration 41 : Comparaison des débits mesurés aux principales sources du Massif de la Sainte Victoire au débit simulé à la source de l'Argens.</i>	57
<i>Illustration 42 : Délimitation des différents impluviums au sein du massif calcaire de la Sainte-Victoire, fond géologique harmonisé au 1/50000.</i>	58
<i>Illustration 43 : Bilan des prélèvements AEP sur le sous-système dit de la « Sainte Victoire Est »</i>	59
<i>Illustration 44 : Schéma de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement du système fuvélo-jurassique à l'aide des chroniques du puits de l'Arc</i>	61
<i>Illustration 45 : Evolution du débit de débordement (A) et de la piézométrie (B) calculés par le modèle GARDENIA en considérant la chronique de pompage (C). L'influence des pompages sur la piézométrie est également reportée (D).</i>	64

<i>Illustration 46 : Paramètres du modèle Gardenia du puits de l'Arc.</i>	66
<i>Illustration 47 : Réponses impulsionnelles du débit et de la piézométrie à 100 mm de pluie efficace.</i>	67
<i>Illustration 48 : Evolution des flux (journaliers) de pluie et de pluie efficace (A) et des composantes de l'écoulement calculées par le modèle GARDENIA (B et C). L'évolution temporelle du réservoir G1 est reportée (D).</i>	67
<i>Illustration 49 : Modélisation (Gardenia) de l'évolution des débits pompés au puits Gérard.</i>	69
<i>Illustration 50 : Evolution des teneurs en chlorure des eaux du puits de l'Arc et report des signatures chimiques mesurées dans les ouvrages profonds et les sources échantillonnées lors de la campagne spatiale.</i>	71
<i>Illustration 51 : Evolution des rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des eaux des puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les ouvrages profonds et les sources échantillonnées lors de la campagne spatiale.</i>	72
<i>Illustration 52 : Evolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$).</i>	73
<i>Illustration 53 : Evolution de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) en fonction de la signature isotopique du bore ($\delta^{11}\text{B}$).</i>	74
<i>Illustration 54 : Evolution de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) en fonction de la signature isotopique du lithium ($\delta^7\text{Li}$).</i>	75
<i>Illustration 55 : Estimation de la température moyenne de la recharge.</i>	77
<i>Illustration 56 : Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau.</i>	77
<i>Illustration 57 : Comparaison des concentrations en CFC mesurées dans l'eau en 2014 et 2015 aux évolutions théoriques calculées.</i>	78
<i>Illustration 58 : Comparaison des concentrations en CFC et SF6 mesurées dans l'eau en 2014 et 2015 aux évolutions théoriques calculées.</i>	79
<i>Illustration 59 : Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les résultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982).</i>	80
<i>Illustration 60 : Synthèse des interprétations avec les gaz dissous.</i>	83
<i>Illustration 61 : Evolution des teneurs en tritium à Marseille-Marignane (GNIP) et à Thonon-les-Bains (GNIP) et confrontation des évolutions mesurées.</i>	84
<i>Illustration 62 : Synthèse des données des isotopes de l'eau des puits de l'Arc (Tritium, $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$).</i>	85
<i>Illustration 63 : Evolutions théoriques de l'activité tritium de la recharge calculée par l'utilisation du modèle exponentiel ($\text{TRM} = 1 \text{ an}$) et report des activités mesurées dans les eaux.</i>	86
<i>Illustration 64 : Evolutions du SF6 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge et report des concentrations en gaz dissous et des activités tritium mesurées dans les eaux des puits de l'Arc.</i>	87
<i>Illustration 65 : Evolution de la fonction objectif versus temps de résidence moyen (TRM) de la composante récente et report des % des contributions (Pôle ancien/Pôle récent) et estimation de l'âge apparent de la composante récente calculée par la fonction objectif Chi^2.</i>	89
<i>Illustration 66 : Schéma conceptuel du système Fuvélo-Jurassique exploité par les puits de l'Arc (version 1, non retenue).</i>	92
<i>Illustration 67 : Schéma conceptuel du système Fuvélo-Jurassique exploité par les puits de l'Arc (version 2).</i>	92
<i>Illustration 68 : Tableau des paramètres du modèle global et des valeurs de référence</i>	96

<i>Illustration 69 : Comparaison des niveaux piézométriques observé et simulé au puits de l'Arc sur la période 01/01/1970 – 31/12/2014 (avec un zoom sur les périodes d'observation 1970 – 1994 et 2004 – 2014).</i>	98
<i>Illustration 70 : Comparaison du débit de débordement observé et simulé au puits de l'Arc sur la période 01/01/1970 – 31/12/2015.</i>	98
<i>Illustration 71 : Gamme de variation des jeux de paramètres calés du modèle</i>	99
<i>Illustration 72 : Bilan hydrologique du système fuvélo-jurassique exploité par les puits de l'Arc</i>	99
<i>Illustration 73 : Bilan hydrologique du réservoir Fuvélien selon différents scénarios de pompage ...</i>	100
<i>Illustration 74 : Comparaison des volumes annuels de fuite du Jurassique et d'exhaure au puits Gérard</i>	102
<i>Illustration 75 : Comparaison des flux mensuels de fuite du Jurassique et d'exhaure au puits Gérard</i>	102

Liste des annexes

<i>Annexe 1 Eléments de bibliographie</i>	111
<i>Annexe 2 Rappel des résultats du pompage d'essai 2014</i>	115
<i>Annexe 3 Méthodologie de diagnostic des pompages d'essai</i>	121
<i>Annexe 4 Coupe géologique et technique simplifiée des puits de l'Arc (document d'archive)</i>	125
<i>Annexe 5 Modélisation des essais aux puits de l'Arc</i>	127
<i>Annexe 6 Résultats des simulations</i>	137
<i>Annexe 7 Rappels sur le contexte hydrogéologique</i>	147
<i>Annexe 8 Informations complémentaires du modèle Gardenia de la source de l'Argens</i>	151
<i>Annexe 9 Informations complémentaires relative au modèle Gardenia du puits de l'Arc</i>	159
<i>Annexe 10 Annexe géochimique</i>	165
<i>Annexe 11 Simulation de scénarios d'exploitation par modélisation</i>	175

1. Introduction

1.1. CADRE GENERAL DU PROJET

1.1.1. Situation du projet ARK – Contexte partenarial

Le projet ARK concerne les puits de l'Arc situés au niveau de la commune de Rousset (13). La carte de l'illustration 1 ci-après permet de visualiser la position relative du site du projet, à proximité d'Aix-en-Provence, au sud de la montagne Sainte-Victoire.

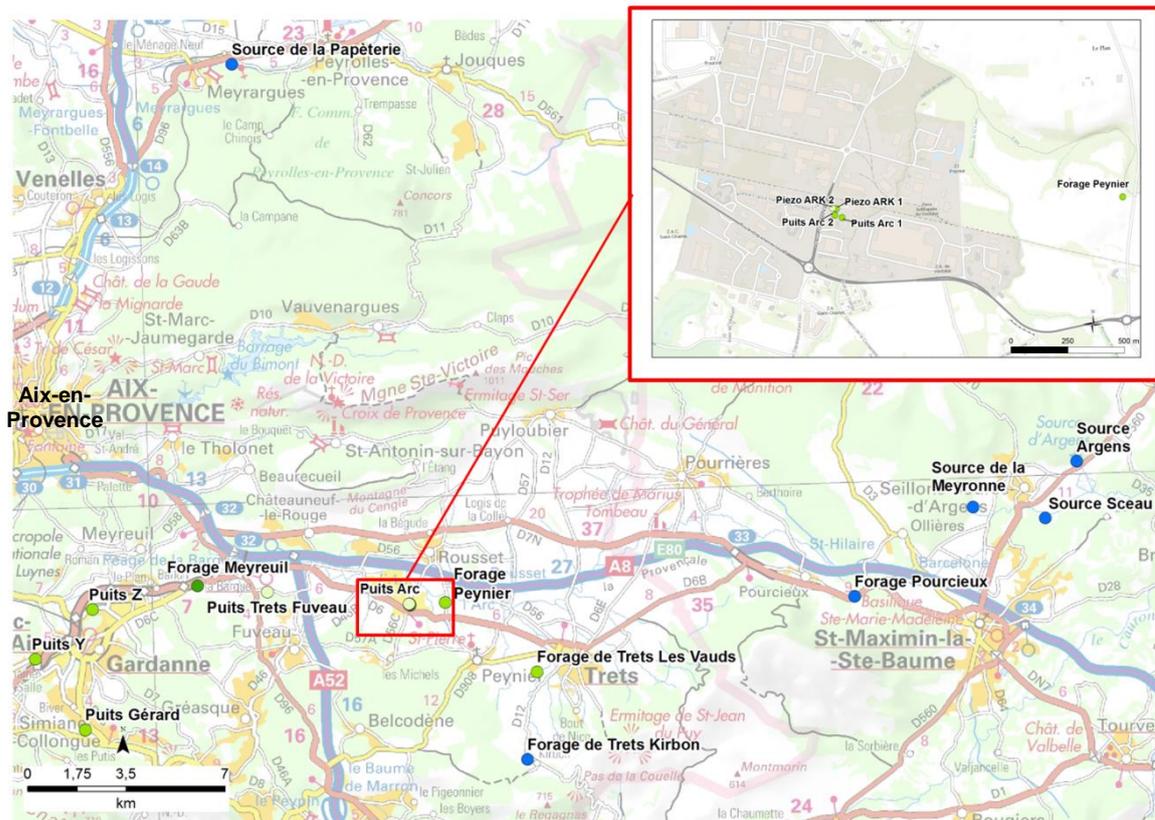


Illustration 1 : Carte de situation du site du projet de recherche ARK et des ouvrages suivis lors de l'essai de longue durée.

Ce projet est mené en partenariat entre l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (Agence RMC), le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte-D'azur (CR-PACA), le Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône (CD13), la Société du Canal de Provence (SCP) et le BRGM.

Le projet a pour objectif de faire progresser la connaissance sur les grands aquifères de la région, souvent karstiques, dont certains sont méconnus, en particulier lorsqu'ils sont sous couverture et profonds, et qui représentent une ressource en eau souterraine considérable. Le système aquifère karstifié visé par le projet ARK est celui du bassin d'Aix-Gardanne.

Cet aquifère correspond à la masse d'eau souterraine FRDG210 « Formations variées et calcaires fuvéliens et jurassiques du bassin de l'Arc » du référentiel masse d'eau souterraine du SDAGE, identifiée ressource stratégique AEP, et aux entités hydrogéologiques 563AA01 « Formations calcaires du Crétacé supérieur du bassin de l'Arc » et 567AB00 « Calcaires jurassiques du Bassin de l'Arc » du référentiel national BD LISA.

Le projet ARK a été défini sur la base d'un pompage de gros débit sur les Puits de l'Arc (Q>1000 l/s) afin d'acquérir des données pertinentes pour modéliser le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère capté par les puits de l'Arc. L'objectif in fine est d'acquérir une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique du bassin d'Aix-Gardanne.

Les forages et sources utilisés sur le secteur pour la réalisation du projet ARK sont listés dans le tableau de l'illustration 2 ci-après.

Nom du point	N° BSS	Coordonnées (Lamb. III)		Profondeur* (m)	Aquifère	
		X (m)	Y (m)			
Puits ARC 1	10217X0233/P57	865055	134782	411	Fuvélien	
Puits ARC 2	10217X0088/S	865023	134792	350	Fuvélien	
Piézomètre Ark1	10217X0268/ARK1	865011	134823	316	Fuvélien	
Piézomètre Ark2	10217X0269/ARK2	865028	134821	140	Bégodien	
Forage Peynier	10217X0270/F	866290	134883	450	Fuvélien	
Forage Meyreuil	10212X0012/S	857510	135425	913,5	Hauterivien	
Mine de Gardanne	Puits Gérard	10215X0107/PUITSG	853570	130256	723	Fuvélien
	Puits Z	10215X0187/PUITSZ	853795	134545	880	Fuvélien
	Puits Y	10215X0186/PUITSY	815783	132764	1109	Fuvélien
Forage Pourcieux	10225X0089/F	880806	135193	215	Jurassique	
Puits Trets Fuveau	10212X0029/P1	859996	135216	7,5	Bégodien	
Forage de Trets Kirbon	10217X0223/P1	869257	129306	150	Jurassique	
Forage de Trets Les Vauds	10218X0195/F	869561	132436	60	Fuvélien	
Source de la Meyronne	10222X0009/HY	884980	138420	sol	Jurassique	
Source Argens	10222X0007/SOU	888650	140070	sol	Jurassique	
Source Sceau	10222X0006/S	887540	138050	sol	Jurassique	
Source de la Papèterie	09956X0032/SO	858600	154030	sol	Jurassique	

* Pour les forages, la profondeur = ouvrage équipé. Pour les puits de l'Arc, la profondeur = niveau atteint.

Illustration 2 : Tableau de référence des points d'eau utilisés dans le cadre du projet ARK

1.1.2. Les puits de l'Arc

L'un des réservoirs karstifiés du secteur est traversé par les puits de l'Arc à Rousset (Bouches-du-Rhône). C'est autour de ces anciens puits de mine, déjà exploités pour l'alimentation en eau industrielle, que se focalise le projet ARK.

Les puits de l'Arc sont d'anciens puits de mine jumeaux dont l'exploitation a été éphémère, au début du XXème siècle.

Creusé entre les années 1908 et 1918, cet ouvrage minier qui comprend deux puits jumeaux de 4 mètres de diamètre, un travers-banc et des amorces de galeries, a accidentellement été noyé en 1918 lors de la tentative d'exploitation des niveaux situés à l'Est du gisement de lignite de Gardanne-Fuveau, à 400 mètres de profondeur (-180 m NGF environ).

Selon les données de l'époque, la forte venue d'eau rencontrée noya les deux puits en quelques heures et créa un artésianisme dont le débit s'est stabilisé vers 600 l/s. L'exploitation minière a alors cessé et les eaux ont depuis servi à l'alimentation (Alimentation en Eau Industrielle (AEI)) de la centrale thermique de Gardanne et de l'usine Péchiney (volume de 9 à 13 Mm³/an au cours des dernières années) et à la zone industrielle de Rousset qui s'est développée autour des puits (Alimentation en eau potable (AEP) volume estimé à 0.3-0.5 Mm³/an ces dernières années).

Depuis 2004, les puits de l'Arc sont entrés dans la concession régionale confiée à la SCP. La situation de cette ressource, au cœur de la vallée de l'Arc, à proximité des axes majeurs alimentant en eau Marseille et Toulon, lui confère un rôle stratégique dans les politiques de diversification et de sécurisation de la ressource en eau en Provence.

La SCP, jusqu'en 2010, valorisait les eaux des Puits de l'Arc comme leur ancien exploitant les Charbonnages de France par pompage vers la centrale thermique de Meyreuil. Depuis cette date, la centrale est alimentée gravitairement par les réseaux SCP dérivés du Verdon, et l'objectif est d'utiliser la ressource des Puits de l'Arc comme une alimentation de secours pour les réseaux du Sud des Bouches-du-Rhône (Gardanne, Marseille) ou du Sud du Var (Toulon).

1.2. DONNEES ACQUISES

La plus grande partie des données acquises au cours du projet de recherche ARK a été présentée, sous forme assez brute et sans interprétation globale, par le rapport d'étape du projet dit « rapport intermédiaire » référencé BRGM-RP-64610-FR et édité en mai 2015.

Les différentes données suivantes ont été acquises :

- sur le plan géologique, réalisation de deux piézomètres pour compléter les données des niveaux superficiels et mission terrain pour mieux définir le contexte géologique local au regard, notamment, des affleurements disponibles dans le secteur ;
- sur le plan hydrogéologique, traçage pour qualifier deux secteurs présumés d'infiltration des eaux de pluies dans le système, pompage d'essai de longue durée et de forte intensité ainsi que traitement des données acquises lors de différents pompages sur différents ouvrages du secteur ;
- sur le plan géochimique, analyses spécifiques pour définir l'origine de l'eau exhaurée par les puits de l'Arc et apprécier le comportement du système, et prélèvements tout au long du projet (avant l'essai, pendant et après) sur de multiples points pour qualifier la ressource.

1.3. OBJECTIF

L'objet du présent rapport est de présenter le travail d'interprétation de l'ensemble des données acquises par le projet ARK avec, notamment, les premiers éléments du modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère et les résultats de différents scénarios d'exploitation.

Les conclusions présentées sont issues de l'interprétation de toutes les données disponibles. Les points d'interrogation qui relativisent la fiabilité de ces conclusions sont exposés ainsi que les pistes de progrès qui pourraient permettre, demain, d'améliorer la connaissance de l'hydrosystème par de nouvelles investigations.

2. Approche hydrodynamique

2.1. RAPPEL DES DONNEES ACQUISES

Les essais par pompage menés sur le puits de l'Arc se sont déroulés du 30/06/2014 au 18/09/2014. Ceux-ci se sont déroulés en deux phases : une phase d'essais par paliers de débit (du 30/06 au 03/07/2014), puis un essai de pompage de longue durée du 22/07 au 18/09/2014, soit 58 jours. Les données acquises ont été présentées par le rapport BRGM/RP-64610-FR de mai 2015 intitulé « *Projet de recherche ARK - Données acquises – Rapport intermédiaire* ». Ces données sont présentées pour rappel à l'annexe 2 du présent rapport.

2.2. INTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE

2.2.1. Interprétation des essais par paliers de débit

Les essais de puits ou essais par paliers de débit sont destinés à estimer les pertes de charge quadratiques liées au puits. Celles-ci se traduisent par un rabattement de pression additionnel dû à l'équipement du forage et/ou à la qualité des échanges hydrauliques entre le forage et la formation réservoir.

Les puits de l'Arc étant artésiens avant les essais (débit d'artésianisme : 85 l/s), le niveau initial avant pompage n'est donc pas connu. Il n'est donc pas possible de calculer le rabattement réel lié à chaque palier de débit. Par ailleurs, le protocole d'essai classiquement utilisé pour estimer les pertes de charge avec interruption du pompage entre chaque palier de débit (utilisation de la relation : $s=BQ+CQ^2$; Cooper et Jacob, 1946) est particulièrement inadéquat dans ce contexte d'artésianisme, puisque chaque palier ne permettrait d'estimer que des valeurs apparentes du rabattement et ne serait par conséquent interprétable. C'est pourquoi il a été décidé de réaliser des essais par paliers de manière enchaînée (Cf. illustration 3), soit sans interruption du pompage entre deux paliers successifs. Ceci a donc permis de disposer de couples de valeurs de rabattements relatifs (Δs) associées à des augmentations de débit. En somme, on raisonne en différences de rabattement et de débit.

Afin d'être le plus précis possible sur l'estimation des pertes de charges quadratiques, il a été décidé de tester trois méthodes pour interpréter ces essais :

- la première est une adaptation de la méthode de Hantush-Bierschenk (Hantush, 1964 dans Kruseman et Ridder, 2000) adaptée aux paliers de débit enchaînés ;
- la deuxième est l'analyse classique (Cooper et Jacob, 1946) où seuls les premiers paliers de chaque essai ont été utilisés ; on se situe donc dans la configuration de paliers non-enchaînés ;
- la troisième est la méthode de Hantush-Bierschenk appliquée à chaque essai par paliers (4) afin de juger d'une éventuelle évolution des pertes de charges linaires et quadratiques. Ces méthodes ont permis l'estimation des pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère) et quadratiques (liées à l'ouvrage), mais aussi du niveau statique initial avant pompage.

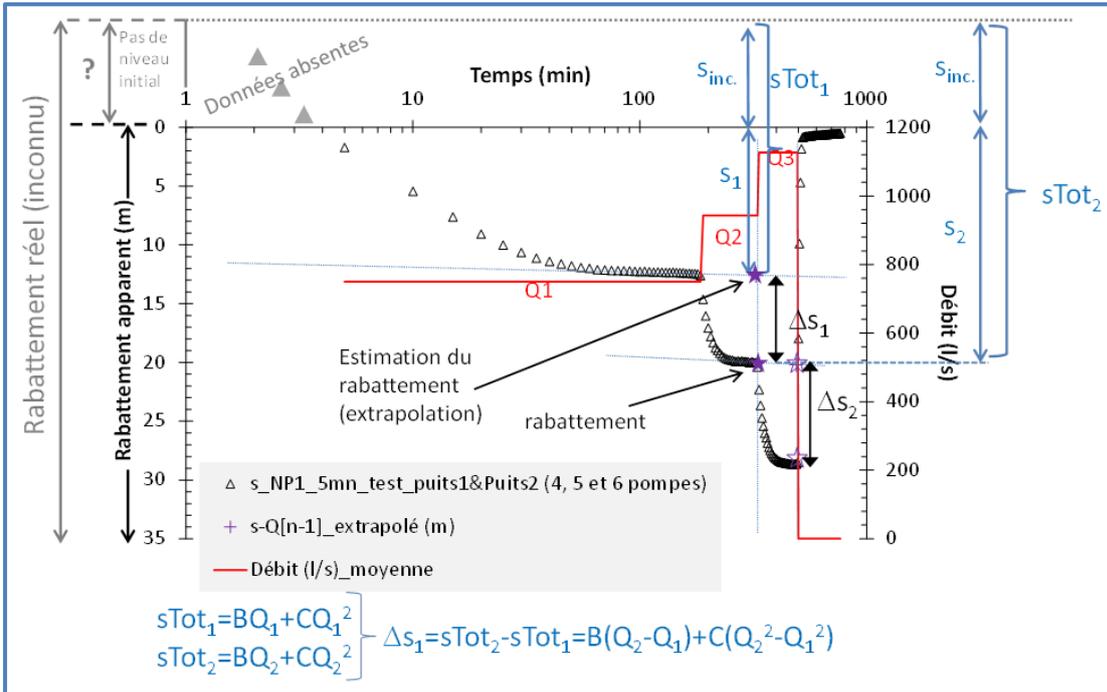


Illustration 3 : Problématique d'un essai par paliers de débit lorsque le niveau initial n'est pas connu (forage artésien avant l'essai ou déjà pompé).

Nota : sur l'illustration précédente s_1 et s_2 = rabattements apparents mesurés, s_{Tot} = rabattement réel inconnu. $s_{inc.}$ = différence entre le niveau initial et le niveau réel avant pompage, Q = débit des paliers.

a) Adaptation de la méthode de Hantush-Bierschenk

Cette méthode est celle de l'analyse par différences de débit. Il s'agit d'une adaptation de la méthode de Hantush-Bierschenk (Cf. illustration 4), lorsque le rabattement réel n'est pas connu à cause de l'artésianisme de l'ouvrage (seuls les rabattements apparents le sont, cf. illustration 2) et où l'on dispose de plusieurs essais par paliers de débit.

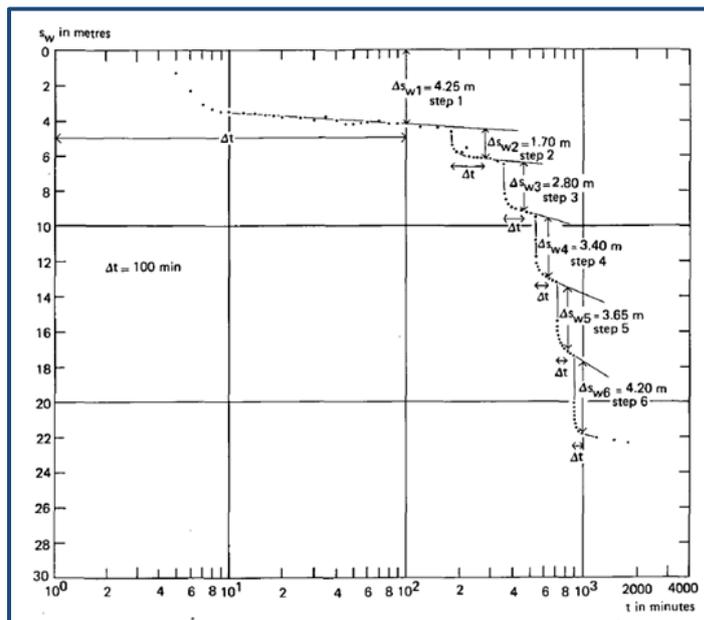


Illustration 4 : Méthode de Hantush-Bierschenk, paliers enchainés à débit croissant.

Dans le cas de paliers de débit enchainés, le rabattement total (s_{Totn}) à la fin du nième palier a pour expression (Hantush, 1964 dans Kruseman et Ridder, 2000 ; illustration 4) :

$$s_{Totn} = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i-1})B(t - t_i) + CQ_n$$

où t est le temps, t_i le temps à partir duquel le nième palier débute, Q_i les débits de chacun des paliers, $B(t-t_i)$, le coefficient de pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère ; en $m^{-3}.s$) qui est différent suivant la phase de débit considérée, et C le coefficient de pertes de charge quadratiques (liées au puits ; en $m^{-5}.s^2$).

En pratique et pour des paliers à durée constante (Δt ; dans le cas présent elle est de 2 heures), on ne prendra pas la valeur du rabattement à la fin du palier mais celle extrapolée à la fin du palier suivant (s_{Totn}), ceci permet d'annuler les termes BQ_i précédant la phase de débit Q_n à analyser. La somme des incréments de rabattement (pour le premier palier $s_{Totn}=s_{Tot1}$, pour le 2^{ième} : $s_{Totn}=s_{Tot1}+\Delta s_1$, et ainsi de suite ; Cf. illustration 3 et 4) prend donc la forme (Hantush, 1964 dans Kruseman et Ridder, 2000) :

$$\sum_{i=1}^n \Delta s_{Tot_i} = s_{Totn} = B(\Delta t)Q_n + CQ_n^2$$

Cette seconde formulation est celle utilisée dans la méthode de Hantush-Bierschenk où il suffit de reporter sur un graphe en arithmétique les débits Q_n en fonction de s_{Totn}/Q_n pour en déduire les paramètres B et C . Cependant, cette méthode nécessite la connaissance des rabattements ce qui n'est pas le cas ici. En effet dans le cas des essais par paliers de débit réalisés sur les puits de l'Arc, s_{Totn} est inconnu puisque l'ouvrage est artésien, et est égal à $s_{inc.}$ (différence entre le niveau initial et le niveau réel avant pompage) + s_n (rabattement apparent) ; $s_{Totn}=s_{inc.}+s_n$ (Cf. illustration 3). Cependant, l'application de l'expression précédente à deux paliers successifs permet d'annuler le terme $s_{inc.}$, et on obtient :

$$\Delta s_n = s_{Tot_n} - s_{Tot_{n-1}} = B(Q_{Tot_n} - Q_{Tot_{n-1}}) + C(Q_n^2 - Q_{n-1}^2) \Rightarrow \Delta s_n / (Q_n - Q_{n-1}) = B + C(Q_n + Q_{n-1})$$

Cette solution, de forme affine dans un graphe $f(Q_n + Q_{n-1})$, permet donc d'estimer les coefficients B (intercepte à l'origine) et C (pente).

L'illustration 5 ci-après présente les résultats dans lequel l'ensemble des données des essais par paliers de débit (4 essais) a été reporté. Notons que seules les variations entre les premiers et 2^{ième} paliers, et entre les 2^{ième} et 3^{ième} peuvent être utilisées. On obtient, pour B , $5,8 m^{-3}.s$, et pour $C=19,1 m^{-5}.s^2$.

En appliquant ces paramètres au débit d'artésianisme, qui est en somme le tout premier pompage de chaque essai par palier (85 l/s), on obtient une valeur de rabattement (Δs suivant la formulation précédente) de 0,63 m. Donc au moment des essais, le niveau d'eau avant pompage était situé 0,63 m au-dessus du niveau mesuré dans les puits hors pompage, donc 0,63 m au-dessus de la côte de surverse.

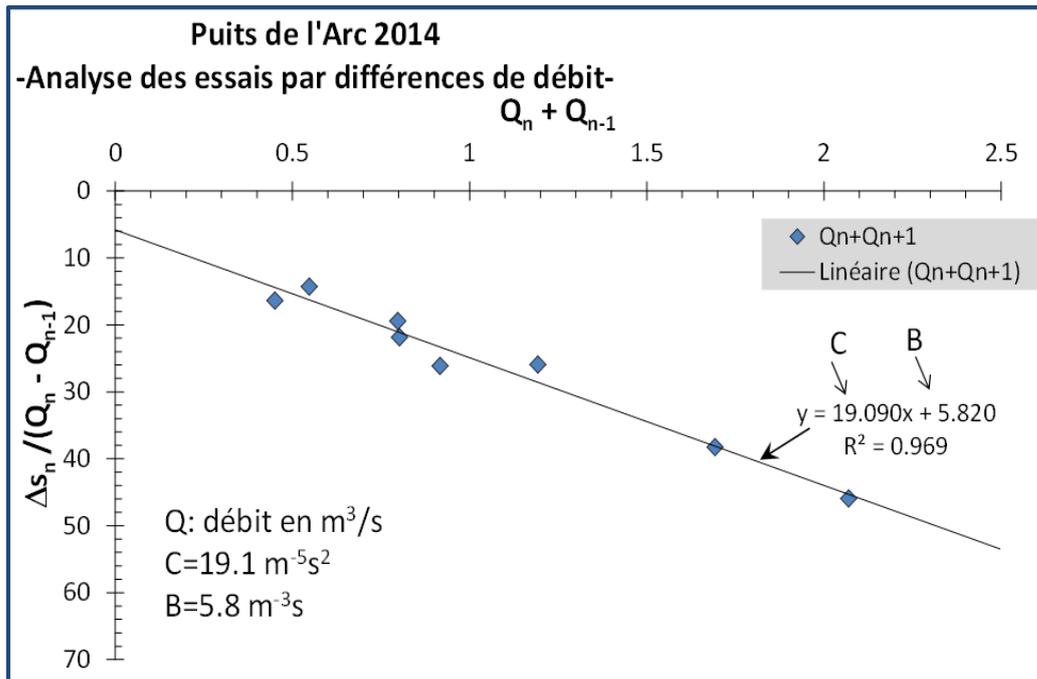


Illustration 5 : Interprétation des essais par paliers de débit du puits de l'Arc avec la méthode des différences de débit.

b) Méthode classique ($s = BQ + CQ^2$)

Les premiers paliers de chaque essai par paliers, ainsi que la donnée du pompage de longue durée au bout de 120 minutes de pompage, ont été utilisés afin d'estimer le niveau initial avant pompage. Cependant, le rabattement associé à ces phases de débit n'étant pas connu nous avons cherché à optimiser la relation $s = BQ + CQ^2$ en imposant différentes valeurs pour s_{inc} ($s = s_1 + s_{inc}$, $s_1 = \text{rabat. apparent à la fin du premier palier}$). L'illustration 6 présente le résultat. La valeur optimale de s_{inc} est obtenue pour le moins d'erreur possible sur l'estimation des coefficients B et C par rapport aux estimations précédentes mais aussi en minimisant les erreurs entre les rabattements simulés et observés ($\sum |s_{sim.} - (s_1 + s_{inc.})| / (s_1 + s_{inc.})$). Le calage optimal (Cf. illustration 7) est obtenu pour $s_{inc.} = 0,65$ m soit, aux erreurs d'incertitude près, une valeur quasi équivalente à celle estimée précédemment. Les coefficients B et C sont estimés respectivement à $5,8 \text{ m}^3\text{s}$, et $C = 17,1 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$, soit des valeurs très proches de celles estimées précédemment.

c) Méthode de Hantush-Bierschenk

Une fois le niveau statique estimé ($s_{inc.}$ fixé à 0,63 m), la méthode de Hantush-Bierschenk a pu être utilisée pour chacun des essais par paliers afin de voir si les pertes de charge linéaires (coefficient B) et quadratiques (coefficient C) évoluaient d'un essai à l'autre. L'illustration 8 présente les résultats, les valeurs déduites pour les coefficients C et B sont conformes aux estimations précédentes, ce qui implique que la valeur estimée pour $s_{inc.}$ a été bien estimée. Pour les quatre essais, B est estimé à $5,95 \pm 0,17 \text{ m}^3\text{s}$ et C à $18,65 \pm 0,44 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$. Les écarts sont faibles et traduisent vraisemblablement l'incertitude de l'estimation des débits. Néanmoins, le coefficient C pourra être affiné par la modélisation complète de ces essais.

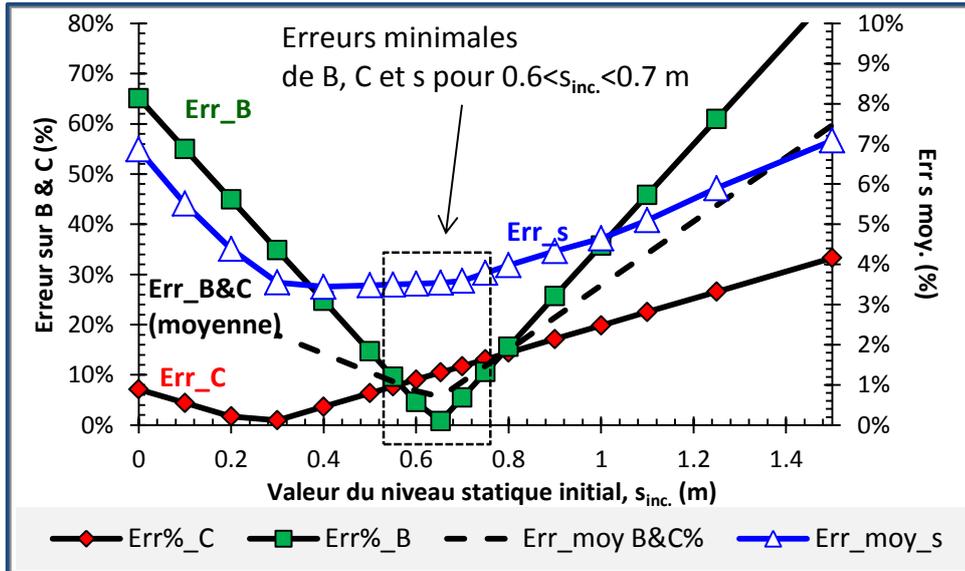


Illustration 6 : Méthode classique avec variations du niveau d'eau initial ($s_{inc.}$) pour estimer sa valeur optimale (adaptation de la méthode de Hantush-Bierschenk).

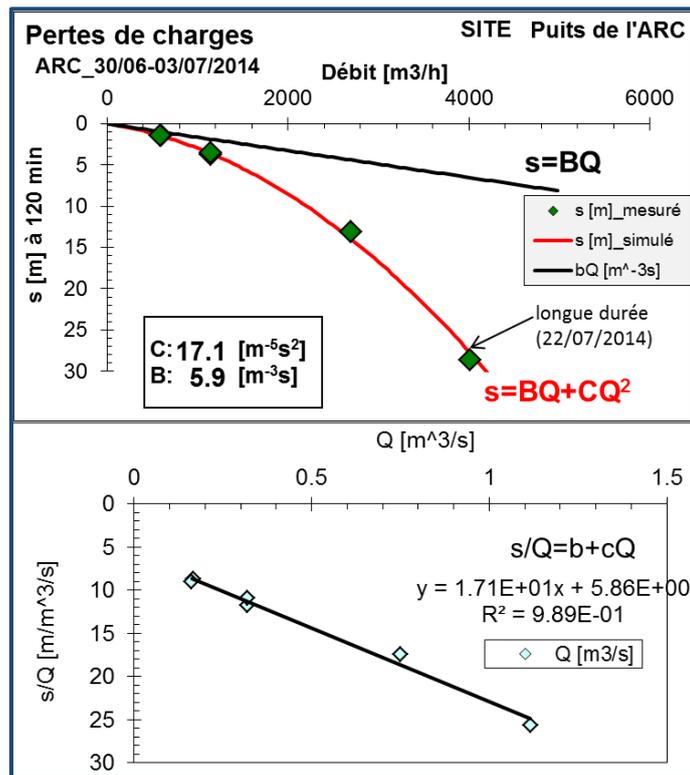


Illustration 7 : Interprétation des premiers paliers de débit des puits de l'Arc avec la méthode classique ($s=BQ+CQ^2$), recherche du niveau d'eau initial ; calage optimal pour $s_{inc.}=0.65$ m.

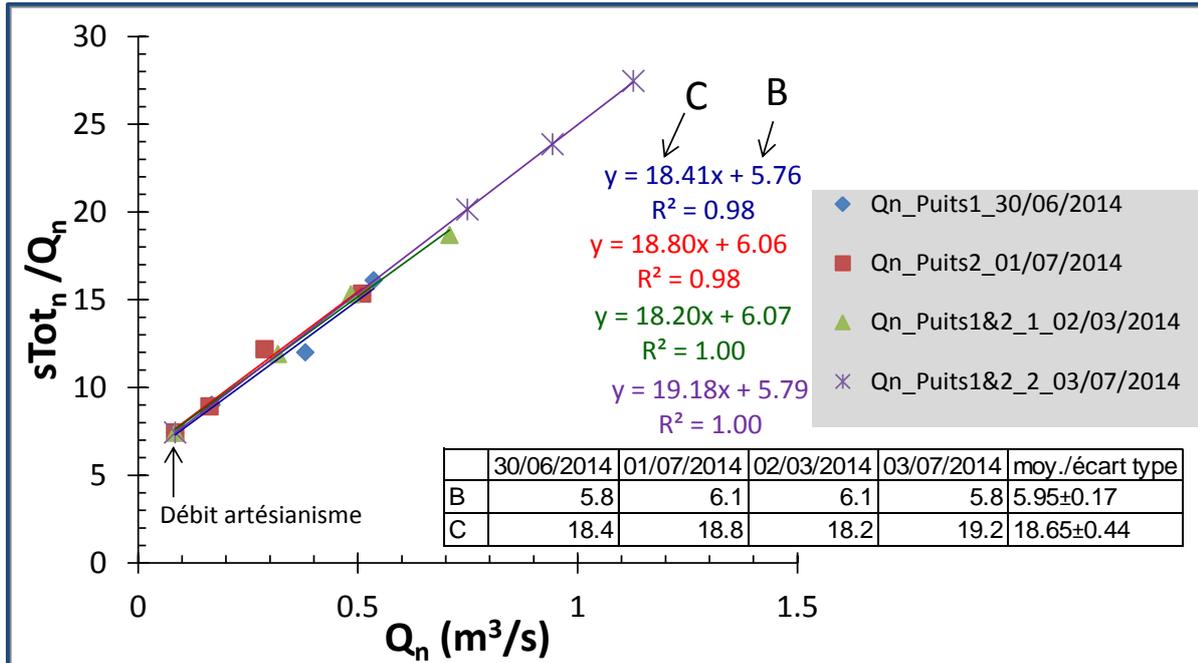


Illustration 8 : Interprétation indépendante des quatre essais par paliers de débit avec la méthode de Hantush-Bierschenk, s_{inc} fixé à 0.63 m.

2.2.2. Diagnostic de l'essai de longue durée réalisé aux puits de l'Arc

L'approche méthodologique utilisée pour interpréter les essais est présentée en annexe 3.

L'illustration 9 ci-après présente les rabattements normalisés et dérivées des essais de longue durée réalisés aux puits de l'Arc en 1994 (02/08-06/09/1994) et en 2014 (22/07-18/09/2014). Ce graphe montre aussi la valeur des dérivées à la remontée des niveaux des deux essais.

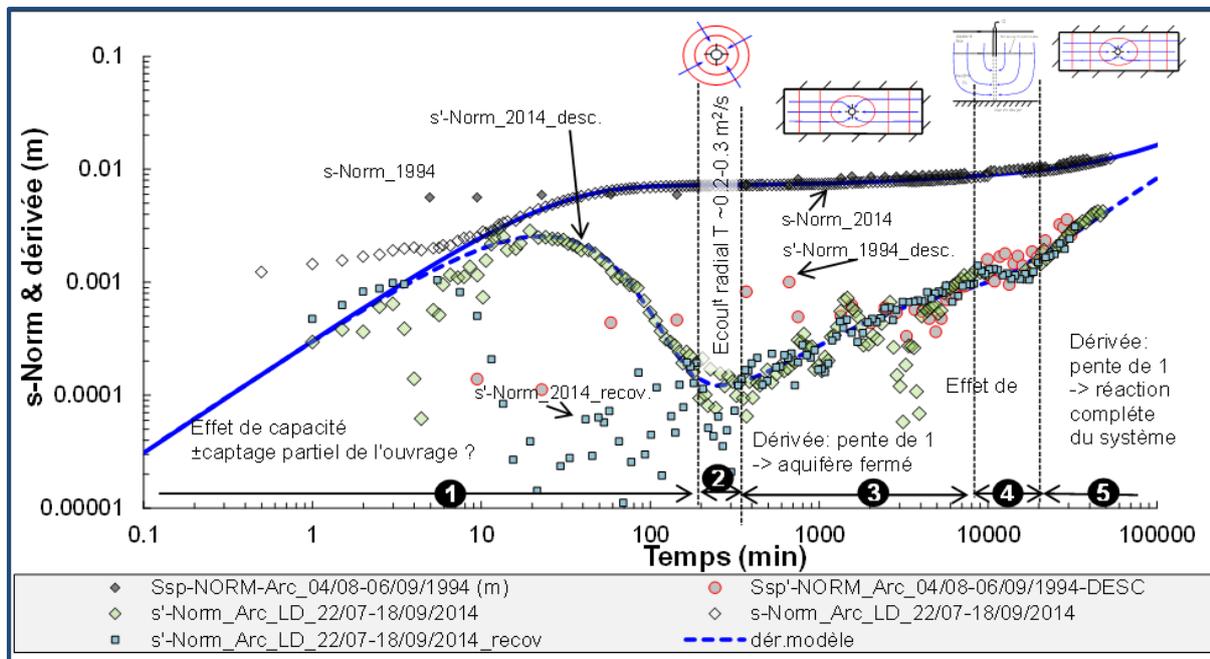


Illustration 9 : Diagnostic des essais réalisés en 1994 et 2014 aux puits de l'Arc.

Nota : Sur l'illustration 9 précédente : desc = descente et recov = remontée.

Excepté pour l'essai de 1994 où la courbe de dérivée est plus bruitée en raison du faible nombre de mesures, notamment pour les temps courts (<1000 min), les courbes des deux essais sont de formes semblables et montrent :

- 1- du début de l'essai à environ 200 minutes, elles traduisent l'effet de capacité des puits avec éventuellement un effet de captage partiel des ouvrages ;
- 2- de 200 à environ 400 minutes, la dérivée se stabilise et forme un pseudo plateau que l'on peut attribuer à un écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère peut être évaluée, aux environs de 0,2-0,3 m²/s ;
- 3- de 400 à environ 8 000 minutes, les dérivées suivent une pente de 1, typique de la réaction d'un aquifère fermé, signifiant l'atteinte de plusieurs limites étanches ;
- 4- de 8 000 à environ 20 000 minutes, les dérivées montrent une légère incurvation, qui se traduit par un ralentissement de la progression des rabattements. Ce type d'écoulement est typique de la réaction d'aquifère sus- et/ou sous-jacents donnant un flux de drainance. Ce comportement est conforme à la réaction de l'aquifère de surface (Bégudien) observé dans le forage Ark2 (Cf. figure c) de l'annexe 2) ;
- 5- de 20 000 minutes à la fin des essais, les dérivées suivent à nouveau une pente de 1, montrant la réaction complète du système multicouche (aquifère des puits de l'Arc [Fuvélien] + aquifères drainés [Bégudien + Jurassique ?]).

Ce diagnostic montre que les puits de l'Arc captent un aquifère de transmissivité voisine de 0,2-0,3 m²/s mais qu'il est limité dans l'espace. Cet aquifère est soumis à des effets de drainance provenant au moins de l'aquifère sus-jacent du Bégudien comme l'a montré la réaction au forage Ark2. Il n'est pas exclu que l'aquifère Jurassique profond contribue aussi à cette drainance ; le Jurassique superficiel, quant à lui, a montré une réaction à l'essai (piézomètre de Kirbon n°BSS 10217X0223/P1 ; ouvrage superficiel implanté dans le Jurassique). Il est aussi possible que l'aquifère ne soit capté que partiellement, la modélisation des différents essais permettra, si le cas se présente, de fournir des indications sur l'épaisseur de l'aquifère.

L'ensemble des essais réalisés aux puits de l'Arc - essai de longue durée sur les puits de l'Arc et observations sur les ouvrages ayant réagi à l'essai¹ de 2014 (forage de Peynier (Fuvélien), Meyreuil (Hauterivien), Ark2 (Bégudien), puits Gérard, Y et Z (Fuvélien) et le piézomètre de Kirbon (Jurassique), voir figures A2 de l'annexe 2), ainsi que les essais par paliers (2014) et essai de longue durée de 1994 - ont été modélisés avec la solution modifiée de Hunt & Scott (2007). Cette solution, qui répond au diagnostic établi, permet entre autre de prendre en compte l'effet de limites étanches ainsi que la drainance d'un niveau supérieur.

2.3. MODELISATION DES ESSAIS AUX PUIITS DE L'ARC

2.3.1. Modèle mathématique utilisé pour interpréter les essais

Le modèle mathématique choisi pour modéliser les essais est un modèle générique pouvant prendre en compte un certain nombre de paramètres, notamment l'effet de limites étanches, jusqu'à quatre limites orthogonales permettant de modéliser les rabattements au sein d'un aquifère fermé.

Le modèle à effet de drainance utilisé est issu de la solution de Hunt et Scott (2007) où le niveau piézométrique de l'aquitard, défini par une transmissivité T_0 et un emmagasinement S_y , diminue durant le pompage. Ce modèle a été étendu par le BRGM aux phénomènes d'anisotropie 3-D, de limites étanches, de captage partiel et d'effets de puits.

¹ Le ouvrages de Trets n'ont pas réagi au pompage sur les puits de l'Arc (Voir figures AE de l'annexe 2).

Le modèle présente les caractéristiques suivantes :

- aquifère multicouche : un aquifère principal (profond) pompé, surmonté d'un aquitard (dénommé Aquifère Sup sur l'illustration 10) séparé du premier par un niveau semi-perméable ;
- prise en compte d'une anisotropie de perméabilité (ou transmissivité) 3-D. L'anisotropie verticale est définie par le ratio T_h/T_v (T_h : transmissivité horizontale et T_v , verticale), et l'anisotropie dans le plan horizontal x,y par le ratio T_{yy}/T_{xx} (T_{yy} : selon l'axe des y et T_{xx} selon l'axe des x). Cette dernière option n'a pas été utilisée car nécessitant plusieurs piézomètres d'observation dans le même réservoir ;
- captage partiel du puits et du piézomètre dans l'aquifère pompé ;
- jusqu'à 4 limites étanches orthogonales. Deux parallèles à l'axe des x et y , et deux perpendiculaires ;
- positionnement quelconque du puits et du piézomètre dans l'aquifère ;
- et prise en compte des effets liés au puits (capacité de puits, skin, pertes de charge quadratiques).

Cette solution permet le calcul du rabattement sur un point quelconque de l'aquifère capté, et ce quelque soit la longueur captée par l'ouvrage (puits ou piézomètre). Cependant, le code de calcul du rabattement dans l'aquifère de surface ne peut se faire que lorsque le puits pompé capte complètement l'aquifère principal. Ceci n'est néanmoins pas gênant pour des ouvrages situés suffisamment loin du puits de pompage (à minima 2 fois l'épaisseur de l'aquifère).

Les illustrations 10 et 11 ci-après présentent le modèle et ses paramètres.

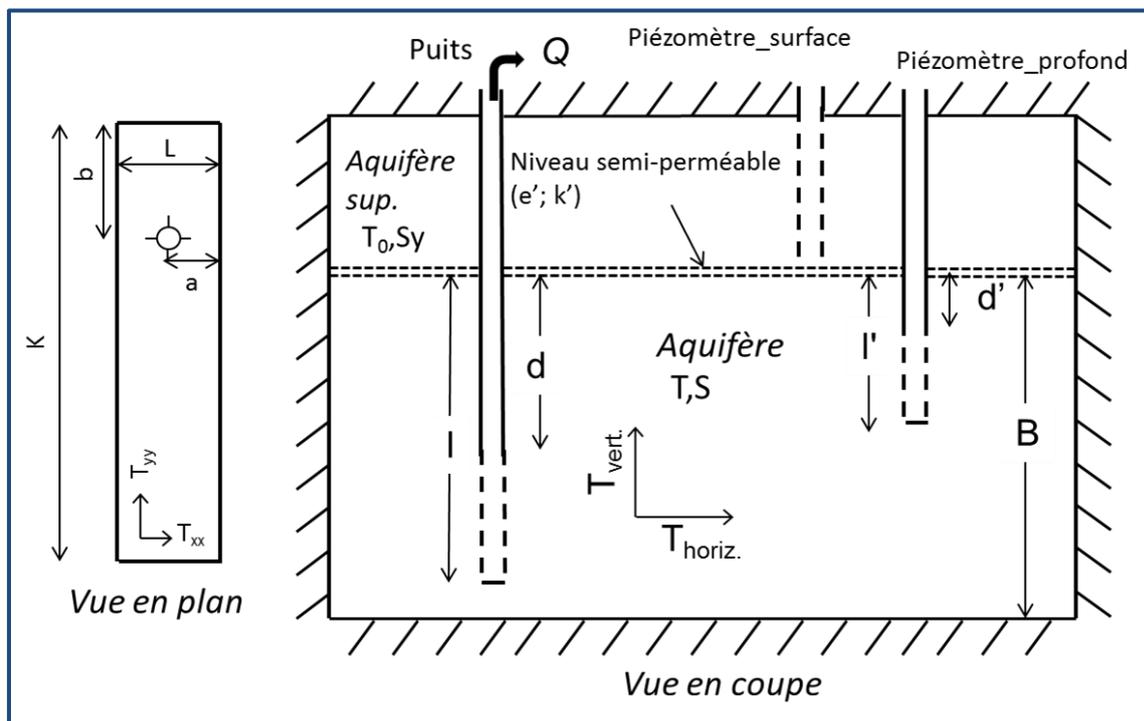


Illustration 10 : Modèle à effet de drainage d'un aquitard supérieur avec anisotropie de perméabilité 3-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales et captage partiel du puits.

Nota : Le modèle utilisé pour l'illustration précédente correspond à la solution de Hunt et Scoot (2007) avec rabattement dans un piézomètre de surface et captage complet de l'aquifère pompé. Au niveau de l'aquifère superficiel, le rabattement calculé est un rabattement moyen.

Paramètres du modèle modifié de Hunt et Scott, 2007	
Distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m²/s)
Coordonnées	x, y (m)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'éponte	e' (m)
Transmissivité de l'aquitard	T₀ (m²/s)
Emmagasinement de l'aquitard	S_y (-)
Longueur du puits	l (m)
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)
Longueur du piézomètre	l' (m)
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère du piézomètre	d' (m)
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)
Anisotropie de transmissivité dans le plan x,y	Tyy/Txx (-)
Dist. à la 1^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (min et m)
Dist. à la 2^{ème} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (min et m)
Dist. à la 3^{ème} limite (b)*	Dist.lim. 3 (min et m)
Dist. à la 4^{ème} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (min et m)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C (m⁻⁵s²)

* Les distances aux limites sont données par rapport au puits de pompage.

Illustration 11 : Paramètres des modèles à effet de drainage (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007).

Les illustrations 12 à 14 présentent des courbes types de ce modèle. Elles correspondent aux rabattements au puits de pompage pour un puits complet situé dans un aquifère isotrope (c.à.d. $Th/Tv=Tyy/Txx=1$) et limité dans l'espace par quatre limites étanches orthogonales perçues successivement au cours du pompage ($t_{D_lim}^2$: 6 000, 300 000 ; 4 500 000 et 4 500 000). Pour ces cas d'études, la drainage de l'aquitard n'intervient qu'après l'atteinte de la première limite.

L'illustration 12 présente l'effet du facteur de drainage, soit la capacité qu'a le semi-perméable à laisser passer l'eau. On notera qu'une fois que le rabattement dans l'aquitard a atteint ses limites (dans ce cas les deux limites sont à équidistance du puits de pompage), on a une reprise du rabattement qui est liée à la baisse de stock dans l'aquifère de surface.

Les illustrations 13 et 14 suivantes présentent l'allure des courbes pour des variations des paramètres de l'aquitard (T_0 ; et S_y). On notera que S_y est un paramètre très sensible, plus que la transmissivité (T_0), et qu'il a pour principal effet de décaler de façon apparente l'atteinte des limites du système ; quand S_y augmente les limites sont perçues plus tardivement. Ceci est dû au soutien au pompage par un aquitard qui a plus de stock d'eau (aquitard plus capacitif).

² Temps sans dimension – Cf. illustration 14.

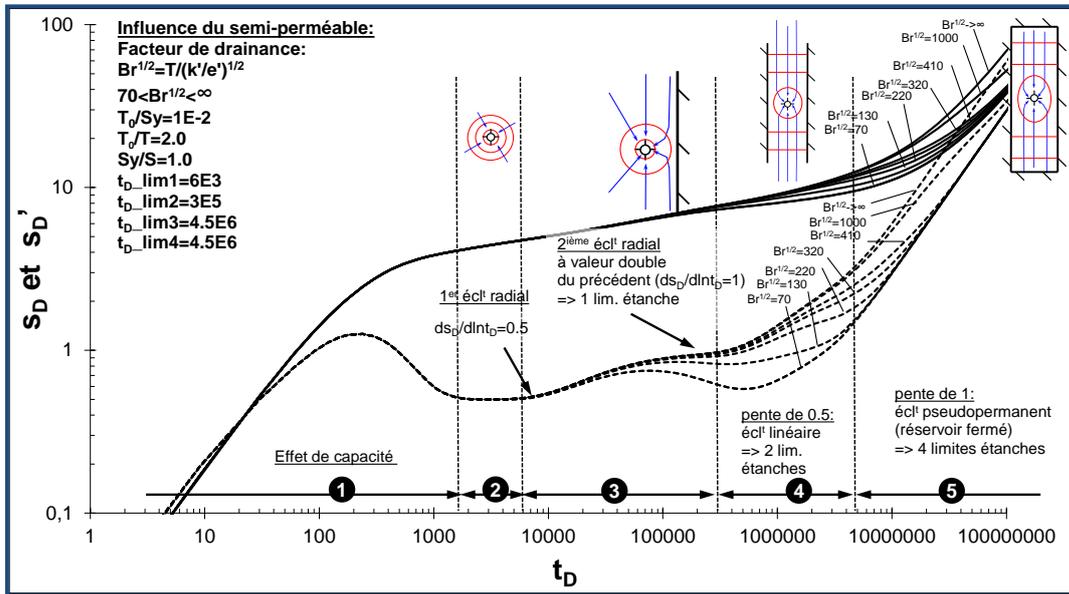


Illustration 12 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence du facteur de drainage du semi-perméable ($Br^{1/2}$).

Nota : Sur l'illustration précédente, s_D et s'_D = rabattement et dérivée sans dimension ; t_D = temps sans dimension.

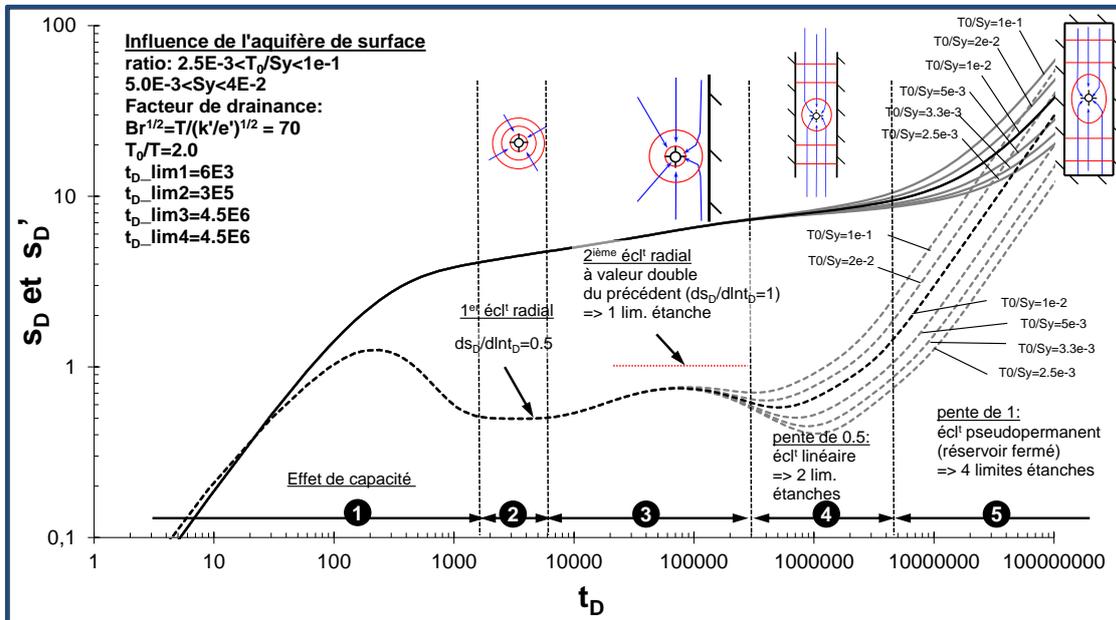


Illustration 13 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de l'emmagasinement de l'aquitard (Sy).

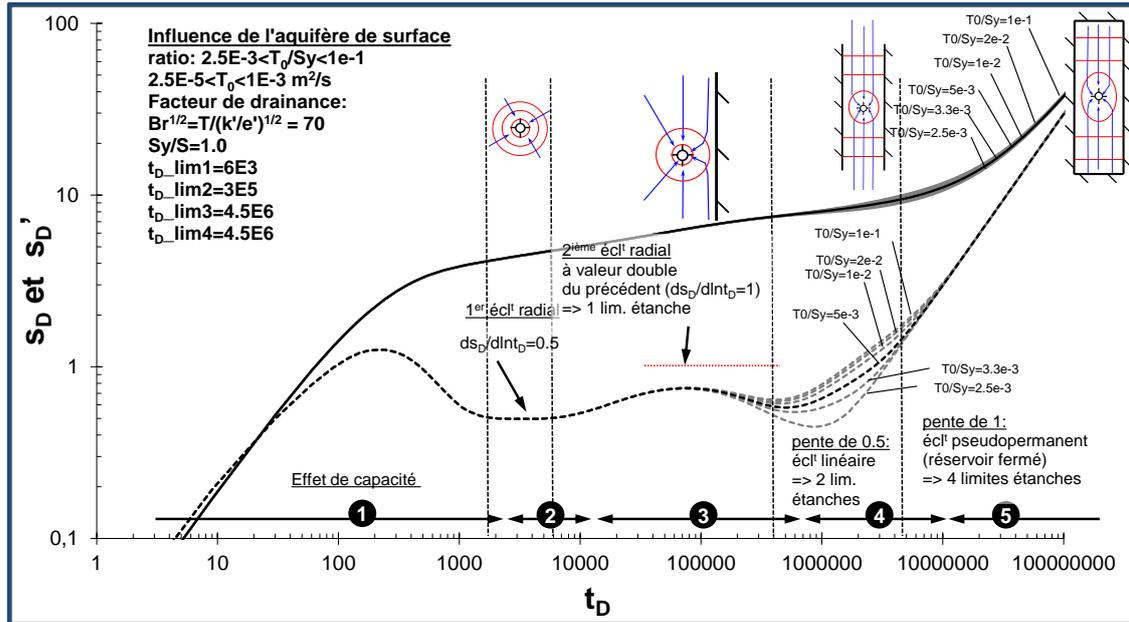


Illustration 14 : Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence de la transmissivité de l'aquifère (T_0).

2.3.2. Résultats des modélisations

Les puits de l'Arc ont des venues d'eau importantes entre -183 m et -190 m NGF (Cf. schéma des puits en annexe 4). C'est cette partie de l'aquifère, captée par les ouvrages, qui est imposée dans le modèle.

a) Essais de 2014

Les illustrations 15 à 17 présentent les modélisations durant l'essai de 2014. D'autres figures ainsi que les essais par paliers de débit sont disponibles en annexe 5. L'illustration 19 synthétise l'ensemble des paramètres hydrodynamiques. L'ensemble des modélisations sont de bonne qualité, et ont été réalisées avec des paramètres hydrodynamiques et de géométrie proches. L'observation du rabattement au niveau de Ark1 (Fuvélien ; distant de 51 m des puits de l'Arc), n'a pas pu être modélisée avec le modèle proposé. Ceci est lié à la réaction au pompage identique à celle observée sur les puits de l'Arc. On peut donc en déduire que cet ouvrage, même si caractérisé par un Fuvélien très peu perméable (transmissivité : $1,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s) est en très bonne connexion hydraulique avec les puits de l'Arc, voire très proche de la structure très perméable qu'ils ont recoupée.

Le meilleur calage pour l'ensemble des tests (longue durée, paliers) et ouvrages captant le Fuvélien (puits de l'Arc, Peynier : aquifère principal) et le Bégudien (Ark2 : aquifère de surface) a été obtenu pour une épaisseur totale aquifère de 330 m (Fuvélien). Cette épaisseur est conforme aux précédentes estimations sur le forage de Peynier (300 m) et à celles observées aux mines de Gardanne et au forage de Meyreuil (230 à 430 m ; Bailly-Comte et al., 2015). Sa transmissivité est estimée à 0,28 m²/s et son emmagasinement, relativement bien estimé grâce aux suivis sur Peynier et aux essais à débit variable sur les puits, est estimé à $5 \cdot 10^{-4}$.

La géométrie de l'aquifère (Cf. illustration 15), ici imposée rectangulaire, correspond à une surface estimée à 170 km². Elle s'étend sur environ 17 km en E-O et 10 km en N-S. Ce qui explique la réaction des forages dans un rayon de plusieurs kilomètres autour des puits de l'Arc.

La transmissivité et l'emmagasinement de l'aquifère de surface (Bégudien, T0 et Sy) sont estimées à 3.10^{-5} m²/s et de 0,8 à 3.10^{-3} . Cet aquifère est séparé du principal par une éponte semi-perméable d'épaisseur arbitrairement unitaire et de perméabilité voisine de 3.10^{-10} m/s, qui traduit vraisemblablement la forte hétérogénéité verticale de perméabilité du Bégudien (juxtaposition de niveaux perméables et très peu perméables). On notera que la valeur de transmissivité de l'aquifère de surface est conforme à celle estimée lors de l'essai par pompage sur l'ouvrage Ark 2 ($2,9.10^{-5}$ m²/s, Bailly-Comte et al., 2015).

Par contre, la valeur de Sy est probablement surestimée (3.10^{-3}) en raison de l'incertitude sur le rayon entre les puits de l'Arc et ce piézomètre (Ark2), probablement plus proche des venues d'eau que la distance puits-piézomètre de surface à l'instar d'Ark1. Il en est de même pour l'estimation de la perméabilité de l'éponte du semi-perméable faite en ce point ($k' : 1,5.10^{-9}$ m/s).

Par ailleurs, les rabattements mesurés au forage de Meyreuil (835 m de profondeur, géologie captée : Hauterivien), pourtant distant de 7,6 km, étant beaucoup plus importants, environ 12,6 m à la fin de l'essai, que ceux mesurés à Ark2 situé qu'à une cinquantaine de mètres des puits (profondeur 226 m, géologie captée : Bégudien), avec un rabattement de 7,7 m, indiquent un phénomène de drainance plus important en provenance d'aquifères sous-jacents au Fuvélien. En effet pour Meyreuil, l'application de la solution type aquifère de surface trouve son explication dans le fait que cet ouvrage est situé dans une formation située en dessous du Fuvélien, l'Hauterivien, montrant que cet aquifère est sollicité par les puits de l'Arc. En fait, la solution utilisée est valide aussi bien pour un aquifère drainé situé au-dessus (cas de Ark2, Bégudien) qu'au-dessous (cas de l'Hauterivien). Dans le cas de Meyreuil, la perméabilité de l'éponte semi-perméable, située entre le Fuvélien et l'Hauterivien, est estimée à 5.10^{-10} m/s (pour une épaisseur arbitraire de 1 mètre).

Concernant les suivis sur Gardanne (Puits Gérard, Y et Z) et le Piézomètre de Kirbon, il a fallu les interpréter comme s'ils n'appartenaient pas à l'aquifère principal mais à l'aquifère de surface (solution « Modèle_Eta » ; illustrations 17 et 19). En effet le cas contraire donnait des valeurs de rabattements beaucoup trop importantes. Notons que pour Meyreuil le même constat a été fait. Pour ces ouvrages, ce choix montre qu'ils sont situés dans des compartiments latéraux en connexion avec l'aquifère du Fuvélien, mais que leurs propriétés hydrodynamiques sont différentes de celles du Fuvélien. Il montre ainsi des connexions hydrauliques Fuvélien – Jurassique, du moins en surface (Kirbon) et Fuvélien – Fuvélien charrié (Mines de Gardanne). Les estimations de surfaces aquifères déduites de ces modélisations (191 km² pour les puits Gérard, Y et Z, 211 km² et 186 km² pour Kirbon) sont proches de celle définie précédemment (170 km²). Les limites du réservoir sont plus éloignées afin que l'ouvrage considéré soit bien localisé au sein du multicouche. Leurs estimations, même si similaires aux précédentes, représentent plus un besoin de modélisation qu'une vraie estimation, la fiabilité de ces estimations est donc toute relative. De même, les paramètres T0, Sy et k' (systèmes drainant) ne sont pas représentatifs des aquifères dans lesquels ils sont implantés puisqu'il ne s'agit pas d'une compartimentation horizontale, telle que prévue par le modèle, mais d'une verticale.

b) Essai de 1994

Cet essai de longue durée (02/08 au 06/09/2014 ; Kassem et Fournier, 1994) s'est déroulé alors que l'ouvrage était en cours d'exploitation. Il n'y a donc pas eu d'arrêt du pompage avant l'essai et donc non ré-atteinte du niveau initial (ou proche de celui-ci) avant pompage. Dans la modélisation, le calcul démarre 15 j avant les essais au débit constant de 2150 m³/h tel que défini par les mesures (Kassem et Fournier, 1994). Par ailleurs, le calcul se fait en différence de niveau piézométrique par rapport au niveau d'eau juste avant le démarrage du premier palier (28,8 m/sol).

Ceci permet d'une part, de considérer la phase de pompage avant les essais et d'autre part de s'affranchir de la connaissance de la profondeur du niveau d'eau initial avant pompage.

Les résultats de la modélisation sont présentés sur l'illustration 18. L'illustration 19 consigne les paramètres hydrodynamiques utilisés. A l'exception des pertes de charge quadratiques ($23,0 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ en 1994 et $17,2 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ en 2014) tous les autres paramètres sont identiques à ceux utilisés pour modéliser les essais 2014 (au puits). Ceci confirme et valide les paramètres du modèle utilisé. Concernant les pertes de charge liées au puits (quadratiques), les modélisations suggèrent une amélioration du puits d'environ 25%. Ceci signifie que pour un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ le rabattement additionnel induit par ces pertes était de 23 m en 1994 contre 17 m en 2014. Pour un débit de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ il était de 52 m en 1994 contre 39 m en 2014, pour un débit de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, il était de 92m en 1994 contre 69 m en 2014, etc. Ainsi même si la différence du coefficient paraît faible, elle n'en paraît pas moins importante et significative en termes de niveau. La cause de cette amélioration n'est pas connue, elle provient vraisemblablement du nettoyage naturel lié à l'artésianisme de la galerie depuis 1994, voire des tests de fonctionnement des pompes juste avant les essais de 2014 (eau turbide durant les derniers essais par paliers de débit). Il est probable que les puits puissent encore s'améliorer tout seuls ou être améliorés.

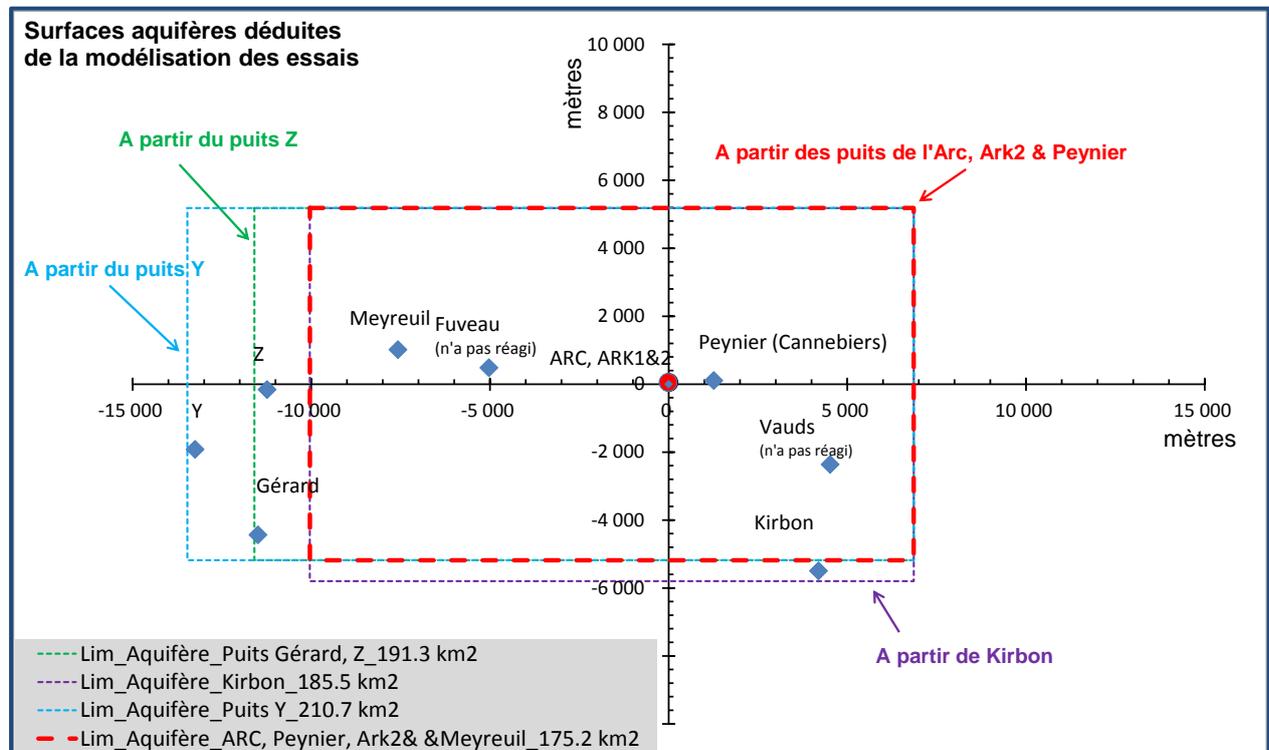


Illustration 15 : Vue en plan de l'aquifère. Différentes surfaces sont proposées en fonction de l'endroit (piézomètre) où est fait la modélisation.

Nota : Sur l'illustration précédente, l'aquifère représente un rectangle d'environ 17 km sur 10 km.

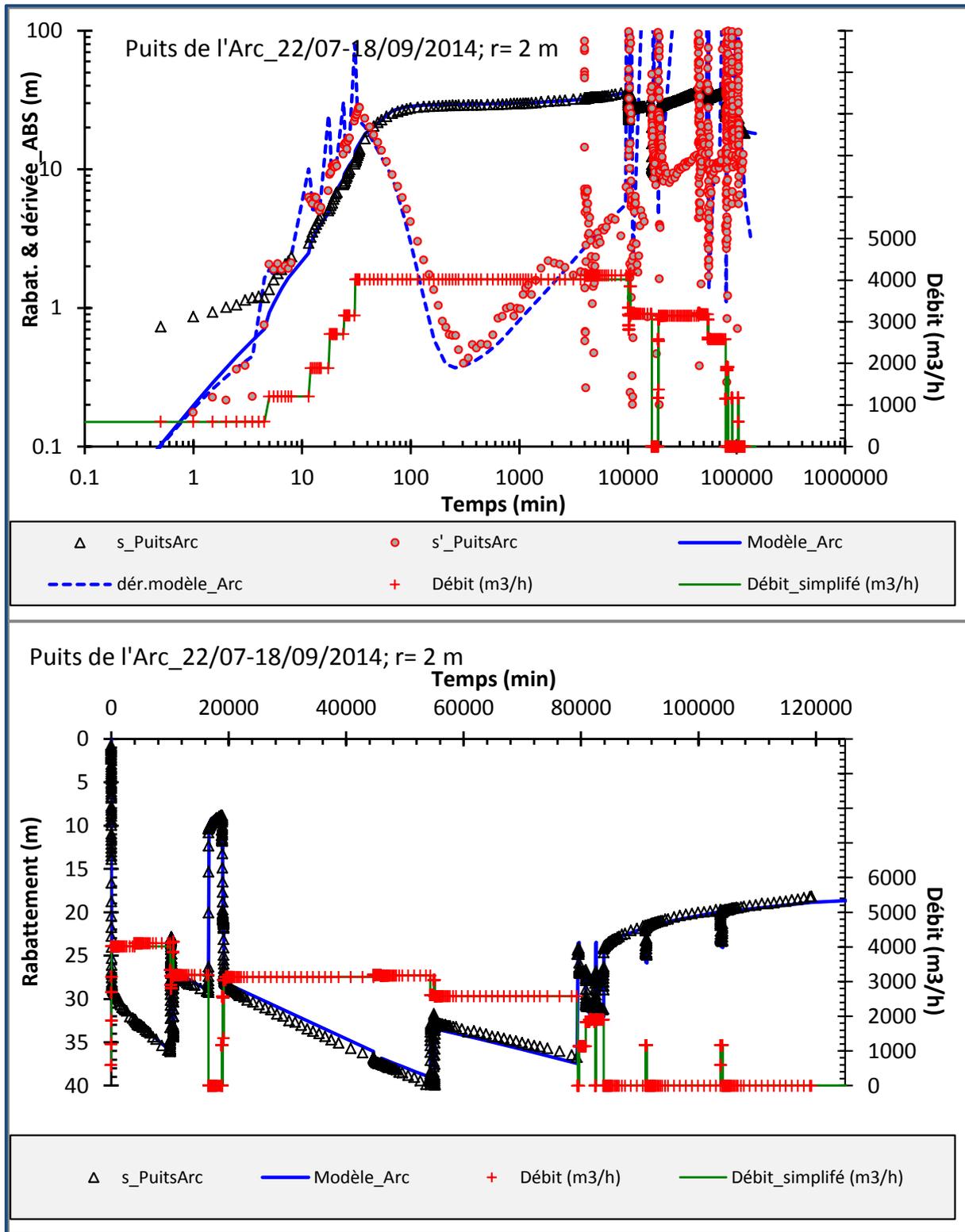


Illustration 16 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc - modélisation aux puits.
Modèle : Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, le graphe du haut = représentation log-log ; dérivée ABS = valeur absolue de la dérivée et graphe du bas = représentation arithmétique.

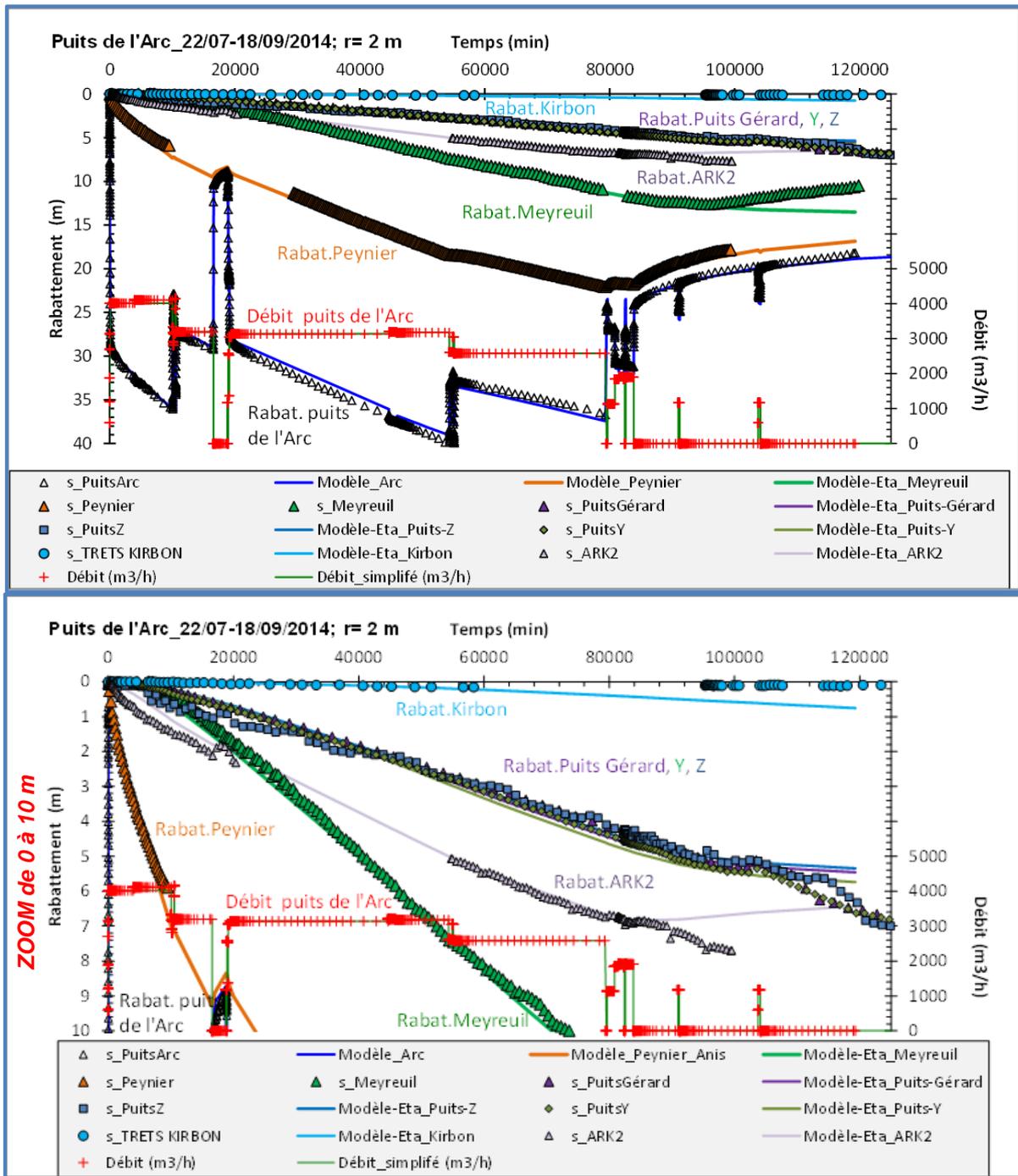


Illustration 17 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc, aux forages de Peynier, Meyreuil, Ark2, puits Gérard, Y et Z et au piézomètre de Kirbon. Modèle = Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, la représentation est arithmétique et le graphe du bas est un zoom pour les rabattements les plus faibles (0 à 10 m).

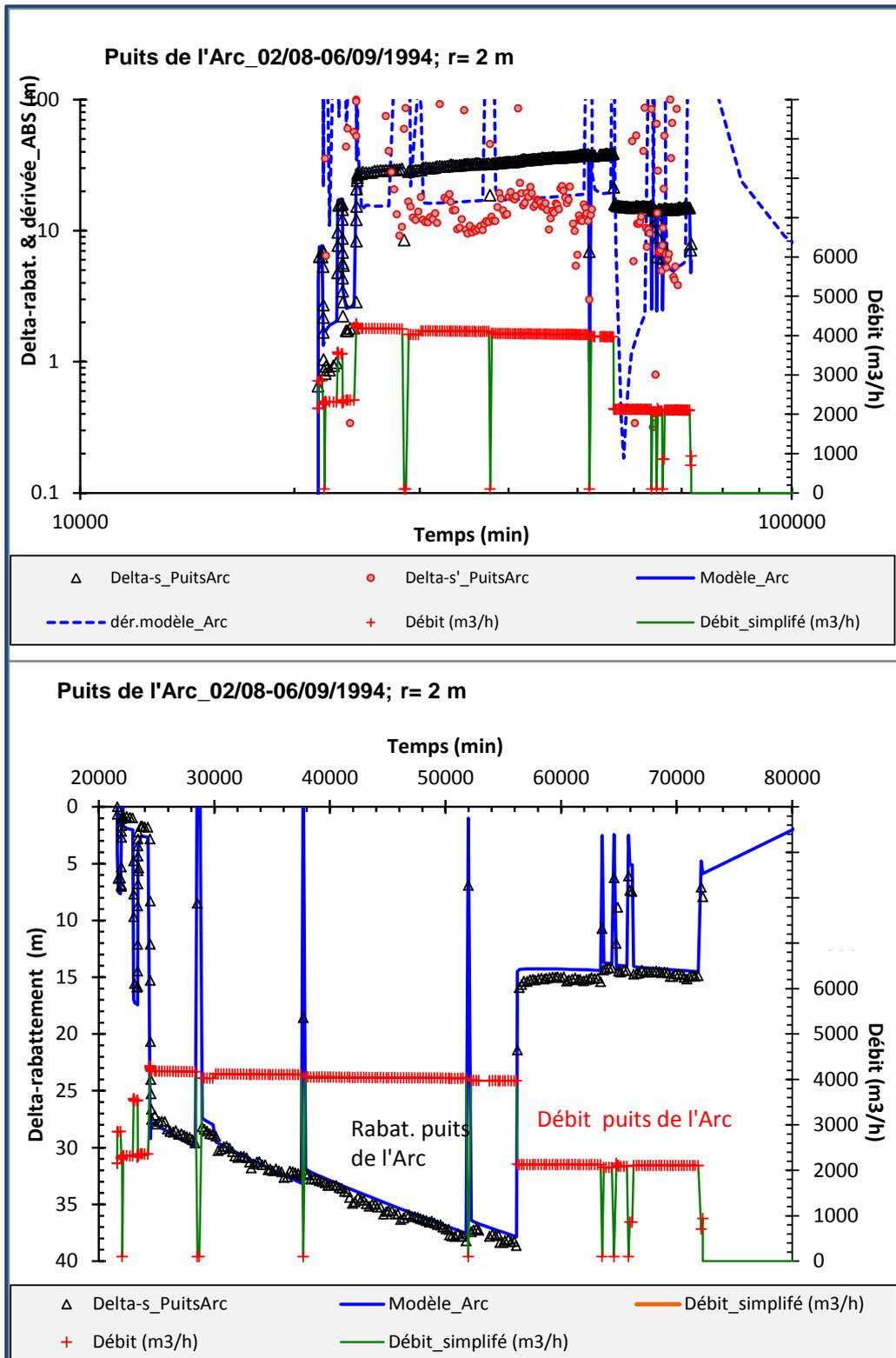


Illustration 18 : Modélisation de l'essai du 02/08 au 06/09/1994 au puits de l'Arc. Modèle = Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, le graphe du haut = représentation log-log ; dérivée_ABS : valeur absolue de la dérivée et le graphe du bas = représentation arithmétique.

Puits / forages	r (m)	x (m)	y (m)	T (m ² /s)	S (-)	B (m)	l (m)	d (m)	k' (m/s)	e' (m)	T0 (m ² /s)	Sy (-)	Distance à la limite (minute)				Distance à la limite (mètres)				C (m-5s ²)	Rc (m)
													limite 1	limite 2	limite 3	limite 4	limite 1	limite 2	limite 3	limite 4		
<i>Puits de l'Arc_02/08-06/09/1994</i>	2	1,41	1,42	0,28	0,0005	330	270	130	3E-10	1	0,00003	0,0008	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	23	2,5
<i>s_ARC_puits1 (1, 2 et 3 pompes)_30/06/2014</i>	2	1,41	1,42	0,28	0,0005	330	270	130	3E-10	1	0,00003	0,0008	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	17,2	2,5
<i>s_ARC_puits2 (1, 2 et 3 pompes)_01/07/2014</i>	2	1,41	1,42	0,28	0,0005	330	270	130	3E-10	1	0,00003	0,0008	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	17,2	2,5
<i>s_ARC_puits1&2 (2, 3 et 4 pompes)_02/07/2014</i>	2	1,41	1,42	0,28	0,0005	330	270	130	3E-10	1	0,00003	0,0008	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	16,7	2,5
<i>s_ARC_puits1&2 (4, 5 et 6 pompes)_03/07/2014</i>	2	1,41	1,42	0,28	0,0005	330	270	130	3E-10	1	0,00003	0,0008	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	16,2	2,5
<i>Puits de l'Arc_22/07-18/09/2014</i>	2	1,41	1,42	0,28	0,0005	330	270	130	3E-10	1	0,00003	0,0008	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	17,2	2,5
<i>Peynier</i>	1266	104	1261,72	0,28	0,0005	330	80	0	3E-10	1	0,00003	0,001	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	-	-
<i>ARK2_Eta</i>	54,6	-53	-13,12	0,28	0,0005	330	270	130	2E-09	1	0,00003	0,0033	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	-	-
<i>Meyreuil_Eta</i>	7640	-1100	-7560,40	0,28	0,0005	-	-	-	5E-10	1	0,0001	0,0012	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	-	-
<i>Puits Gérard_Eta</i>	12320	4439	-11492,51	0,28	0,0005	-	-	-	5E-10	1	0,0001	0,0036	200	200	350	1000	5185	5185	6859	11593	-	-
<i>Puits-Z_Eta</i>	11236	160	-11234,96	0,28	0,0005	-	-	-	5E-10	1	0,0001	0,0033	200	200	350	1000	5185	5185	6859	11593	-	-
<i>Puits-Y_Eta</i>	13389	1922	-13250,03	0,28	0,0005	-	-	-	5E-10	1	0,0001	0,0027	200	200	350	1350	5185	5185	6859	13470	-	-
<i>Kirbon_Eta</i>	6916	5496	4198,22	0,28	0,0005	330	270	130	2E-11	1	0,0001	0,004	200	200	350	750	5185	5185	6859	10040	-	-

Illustration 19 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations aux puits de l'Arc.

Nota 1 : Sur l'illustration précédente, en gras = puits de pompage, en italique = piézomètre d'observation. Eta = solution pour l'aquifère de surface, le reste correspond à l'aquifère profond. Modèle utilisé : modifié de Hunt et Scott (2007).

Nota 2 : * pour les valeurs de S au puits de pompage : celles-ci sont des estimations qui ne reflètent pas forcément la réalité (sur ou sous-estimation en raison des effets de puits). Il en est de même pour les estimations des limites en mètres déduites au puits de pompage.

2.4. SCENARIOS DE SIMULATIONS DU DEBIT D'EXPLOITATION

Le modèle ainsi calé a été utilisé pour réaliser des scénarios de débit afin d'évaluer le débit d'exploitation des puits de l'Arc. Le modèle ne prenant pas en compte la recharge par les pluies il est donc possible que les rabattements calculés soient surestimés par rapport à la réalité en fin de simulation. Les simulations, particulièrement pour les temps longs, sont donc pessimistes par rapport à la réalité car ne considérant aucune recharge de l'aquifère.

Après discussion avec la SCP, il a été décidé de travailler sur les trois scénarios suivants :

- scénario 1 : le droit d'eau actuel dont dispose la SCP sur les puits de l'Arc, soit 1,1 m³/s. Dans ce cas, il s'agit de définir quel va être le rabattement maximum d'un pompage continu (24h/24, 7j/7) sur l'année hydrologique (1 an sans recharge de l'aquifère) ;
- scénario 2 : le débit maximum prélevable sur les puits de l'Arc en l'état, au cours d'une année hydrologique (1 an sans recharge de l'aquifère) ;
- scénario 3 : un scénario dit « accident » qui correspond à une sollicitation ponctuelle des puits de l'Arc, suite à un incident sur le réseau existant qui nécessite un arrêt d'une semaine à 10 jours d'un axe de distribution. En d'autres termes comment les puits de l'Arc peuvent (ou non), et jusqu'à quel point (débit), aider à gérer le risque de désordres d'alimentation assurée par la SCP.

Pour ces scénarios, le rabattement maximum admissible, c'est à dire celui permettant un fonctionnement correct des pompes, est défini pour deux cas (Cf. illustration 20) :

- a- rabattement maximum avec la position actuelle des pompes (situées à 100 m de profondeur) avec une sécurité de 10 m, soit un rabattement maximal de 90 m ;
- b- rabattement maximum sans dénoyage du travers banc entre les puits (situé à 200 m de profondeur) avec 10 m de sécurité, soit un rabattement maximal de 190 m. Il a été choisi de ne pas dénoyer le travers banc car les venues d'eau sont essentiellement localisées sur le puits 2. Les pompes étant localisées dans les deux puits, un dénoyage du travers banc occasionnerait une très rapide accélération du rabattement dans le puits 1 voire son assèchement.

Ces valeurs de rabattement constituent donc la limite d'exploitation des ouvrages. Le débit exploitable est estimé lorsque cette valeur n'est pas atteinte au bout de la période de pompage considérée.

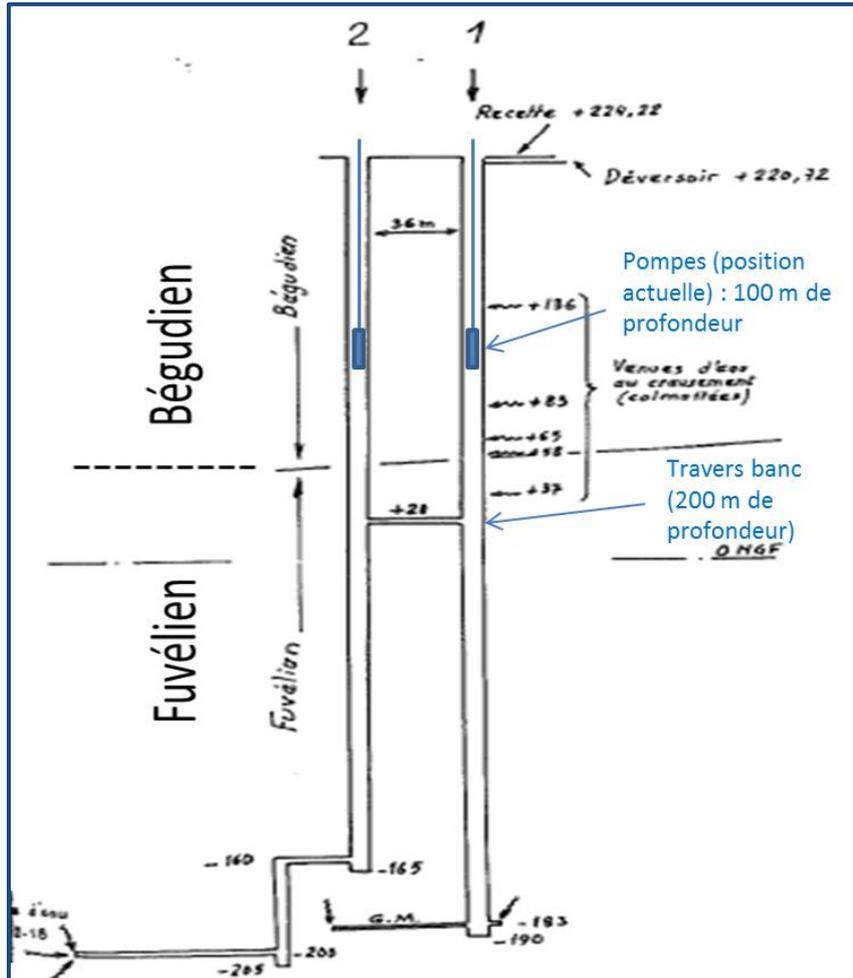


Illustration 20 : Position actuelle des pompes et du travers banc pour le calcul du rabattement maximum admissible.

2.4.1. Simulation d'un pompage en continu sur 365 jours – Scénarios 1 & 2

L'illustration 21 présente plusieurs simulations du rabattement pour un pompage à débit constant (24h/24, 7j/7) variant de 0,5 à 1,2 m³/s durant 365 jours. Ces modélisations, qui correspondent aux scénarios 1 & 2, montrent qu'avec la position actuelle des pompes, qui ne permet qu'un rabattement maximal de 90 m, le débit d'exploitation des puits de l'Arc se situe aux environs de 0,55 m³/s.

Dans le cas où les pompes seraient descendues sous le travers banc, mais sans le dénoyer, soit un rabattement maximal de 190 m, le débit d'exploitation des puits de l'Arc se situerait aux environs de 1,1 m³/s soit le droit actuel d'exploitation.

Les illustrations 22 et 23 montrent l'impact en termes de niveaux sur les forages et ouvrages voisins (forage de Meyreuil, Puits Gérard et forage de Peynier), pour les débits de pompage aux puits de l'Arc de 0,55 et 1,1 m³/s respectivement. Dans les deux cas, les rabattements créés par le pompage sur les puits de l'Arc sont importants, même pour des ouvrages relativement éloignés (Meyreuil : 56,6 m et 113 m de rabattement respectivement pour chacun de ces deux débits au bout d'un an de pompage). Au forage de Peynier, le rabattement calculé au bout d'un an est de 73 m dans le cas où les puits de l'Arc sont pompés à 0,55 m³/s et de 146 m dans le cas où ils sont pompés à 1,1 m³/s.

L'annexe 6 présente des cartes des valeurs du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage à ces deux débits pour le Fuvélien (aquifère profond) et l'aquifère de surface. On notera que les rabattements sont très prononcés sur l'ensemble de l'aquifère multicouche, ceci est dû à la structure limitée dans l'espace de l'aquifère.

Cependant, plus les estimations sont faites loin des puits de l'Arc plus elles doivent être considérées avec prudence car aucune observation de calage n'est disponible dans ces secteurs. Concernant les estimations faites sur l'aquifère de surface (Bégudien), si elles sont vraisemblables à proximité des puits de l'Arc, elles sont probablement fausses et exagérées à plus grande distance car elles résultent de la modélisation faite à partir des données au forage Ark2 (voir § précédent pour la limite de la modélisation en ce point et le fait que le phénomène de drainance n'est pas qu'attribuable au Bégudien). Les données modélisées à des distances conséquentes des puits de l'Arc ont donc leur limite.

Au bout de 365 jours de pompage les résultats du modèle donnent les résultats suivants. Dans le cas où le débit des puits de l'Arc est de $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ le rabattement moyen sur l'ensemble de l'aquifère pompé (Fuvélien) est de 73 -74 m, alors que dans l'aquifère de surface, le Bégudien, il est voisin de 24-25 m. Dans le cas où le débit des puits de l'Arc est de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ le rabattement moyen sur l'ensemble de l'aquifère pompé (Fuvélien) est de 145 -147 m, alors que dans l'aquifère de surface, le Bégudien, il est voisin de 48-50 m. Comme indiqué précédemment, la modélisation sur l'ensemble du Bégudien est très certainement surestimée, dans les deux cas.

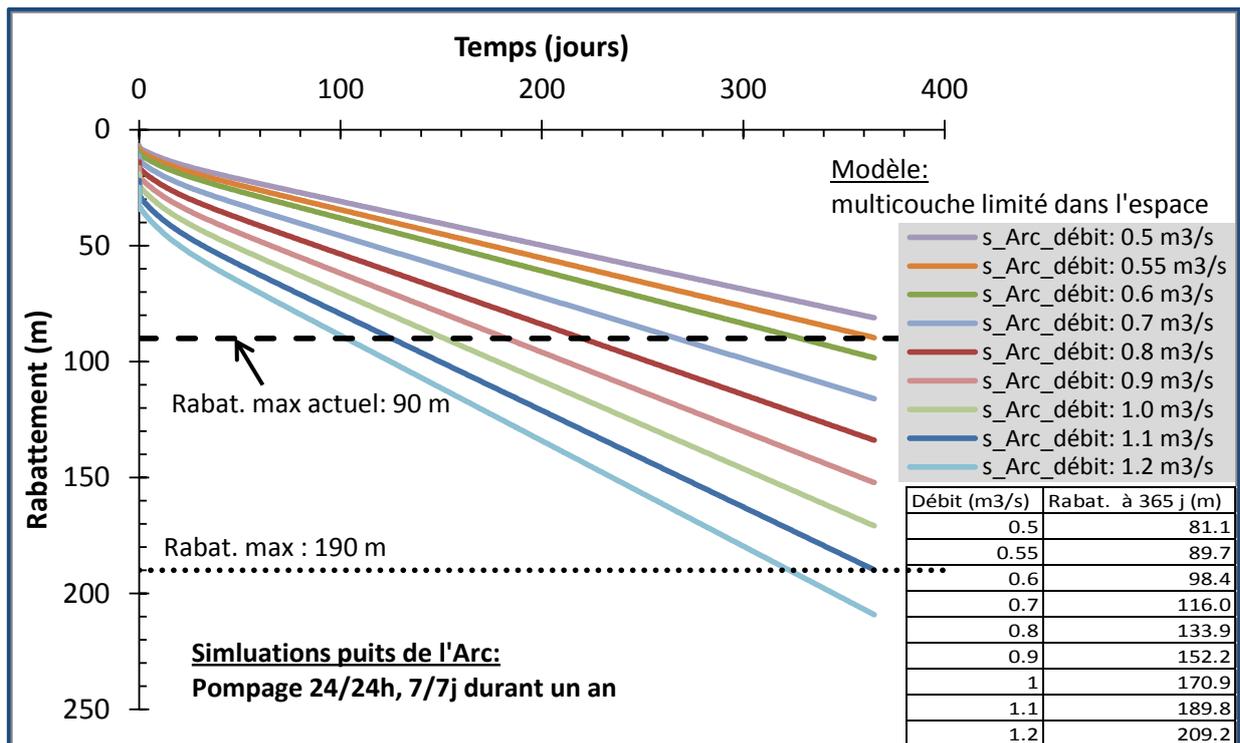


Illustration 21 : Simulations au puits de l'Arc - Pompage 24h/24, 7j/7 pendant un an, scénarios 1 & 2.

Nota : Sur l'illustration précédente, la première limite (pointillé large) correspond au rabattement maximum avec la position actuelle des pompes (90 m), la deuxième limite (pointillé serré) correspond au niveau du travers banc (rabat. maximum : 190 m).

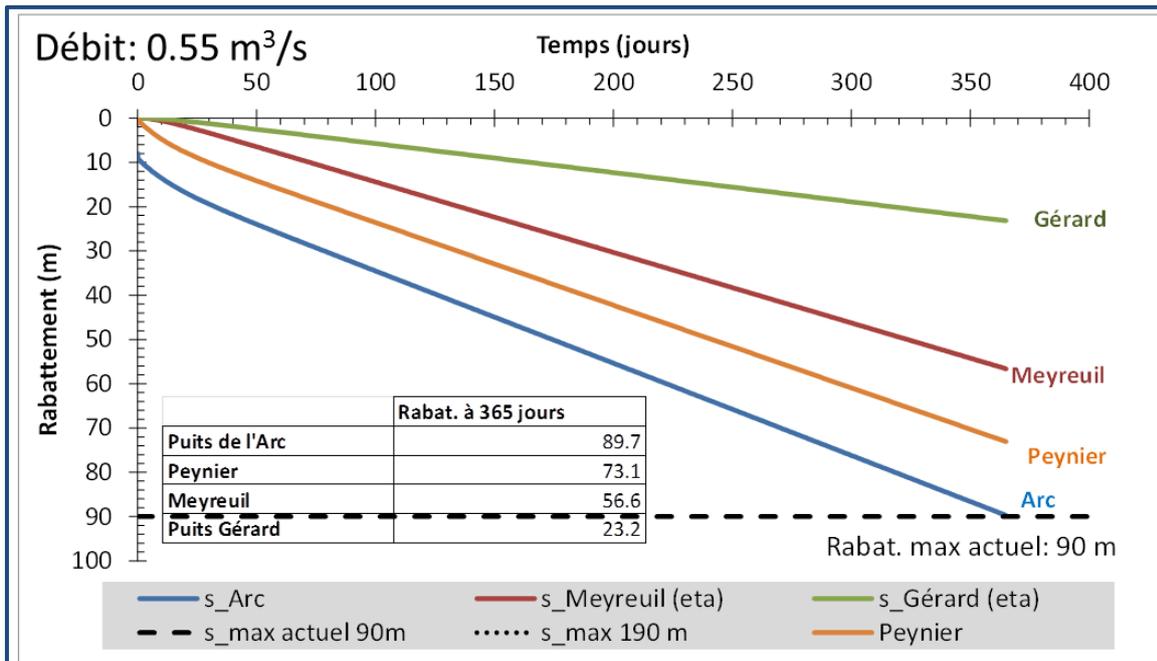


Illustration 22 : Simulations au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant un an). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 0,55 m³/s (scénarios 1 & 2).

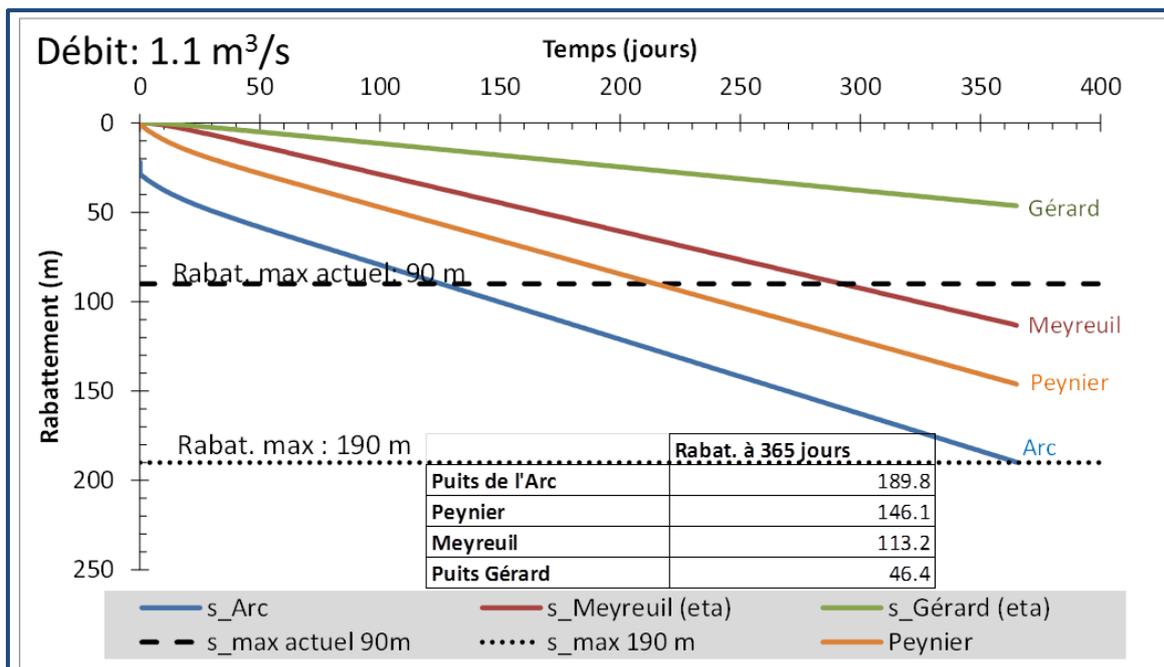


Illustration 23 : Simulations au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant un an). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 1,1 m³/s (scénarios 1 & 2).

2.4.2. Simulation pompage ponctuel sur 10 jours

L'illustration 24 présente plusieurs simulations du rabattement pour un pompage à débit constant (24h/24, 7j/7) variant de 1,8 à 3,1 m³/s pendant 10 jours ; ces simulations correspondent au scénario 3.

Ces modélisations montrent qu'avec la position actuelle des pompes (rabattement maximal de 90 m), le débit d'exploitation des puits de l'Arc se situe aux environs de 1,85 m³/s. Dans le cas où les pompes seraient descendues sous le travers banc (rabattement maximal de 190 m), le débit d'exploitation des puits de l'Arc se situerait aux environs de 2,9 m³/s.

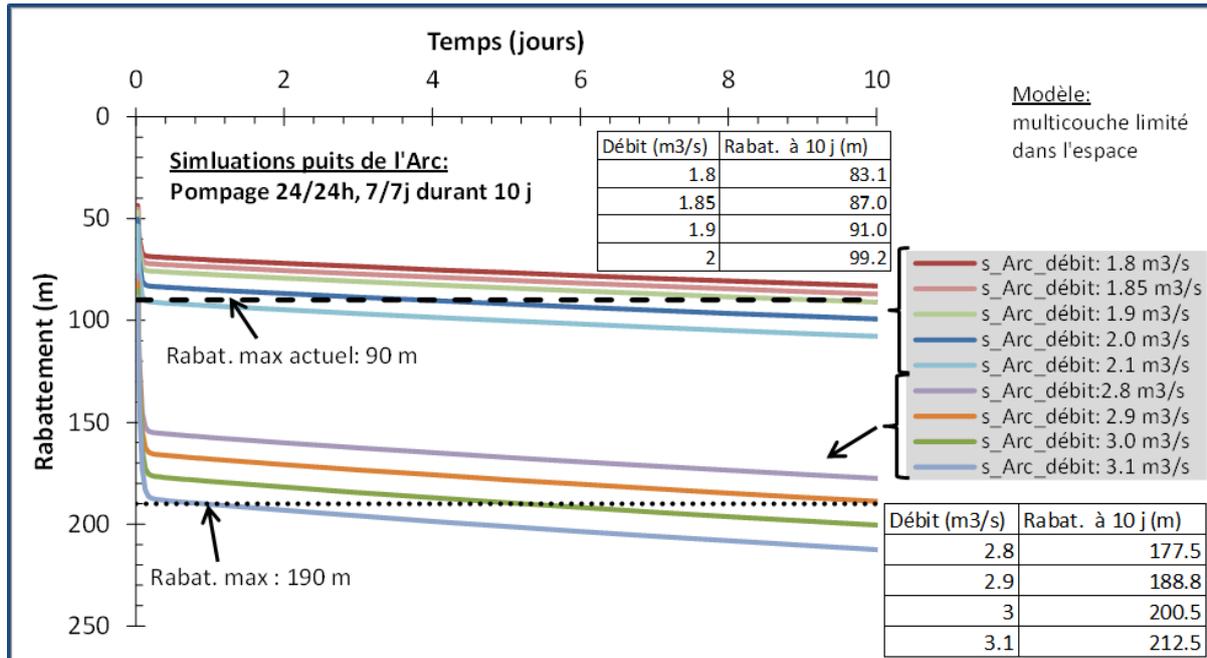


Illustration 24 : Simulation au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant 10 jours). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 1,1 m³/s (scénarios 1 & 2).

Les illustrations 25 et 26 montrent l'impact en termes de niveaux sur les forages et ouvrages voisins (forage de Meyreuil, Puits Gérard et forage de Peynier), pour les débits de pompage aux puits de l'Arc de 1,85 et 2,9 m³/s respectivement. Dans les deux cas, les rabattements créés par le pompage sur les puits de l'Arc sont naturellement beaucoup moins importants que dans les scénarios précédents. Ils sont évalués, au bout de 10 jours et dans le cas où les puits sont pompés à 1,85 m³/s, à 0,7 m au puits Gérard, 2,0 m au forage de Meyreuil et 16,0 m au forage de Peynier. Dans le cas où les puits sont pompés à 1,9 m³/s, ils sont de 1,1 m au puits Gérard, 3,2 m au forage de Meyreuil et 25,0 m au forage de Peynier.

De même que dans les scénarios précédents, l'annexe 6 présente des cartes des valeurs du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage à ces deux débits pour le Fuvélien (aquifère profond) et l'aquifère de surface (Bégudien). La lecture de ces cartes doit être faite avec la même prudence que dans les cas précédents. Au bout de 10 jours de pompage, dans le cas où le débit des puits de l'Arc est de 1,85 m³/s le rabattement moyen sur l'ensemble de l'aquifère pompé (Fuvélien) est de 13-16 m, alors que dans l'aquifère de surface, le Bégudien, il est voisin de 0,5-0,6 m. Dans le cas où le débit des puits de l'Arc est de 2,9 m³/s le rabattement moyen sur l'ensemble de l'aquifère pompé (Fuvélien) est de 20 -25 m, alors que dans l'aquifère de surface, le Bégudien, il est voisin de 0,8-1,0 m. Comme indiqué précédemment, la modélisation sur l'ensemble du Bégudien est très certainement surestimée, dans les deux cas.

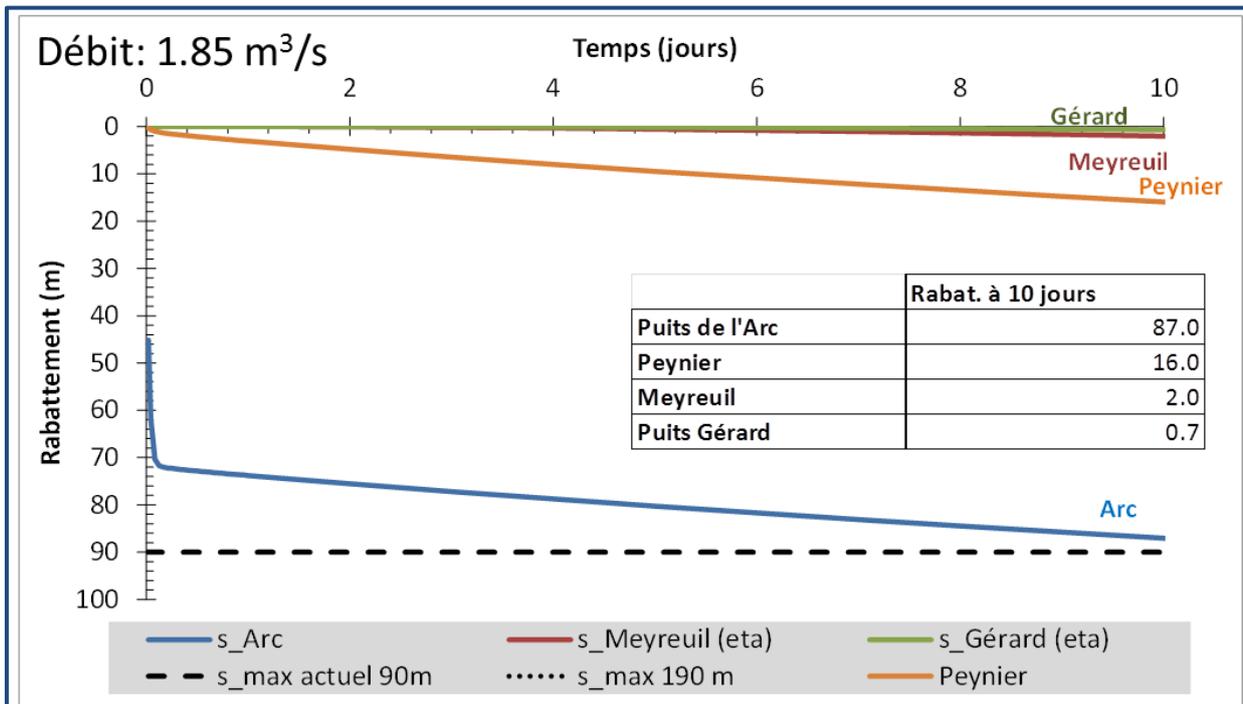


Illustration 25 : Simulation au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant 10 jours). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 1,85 m³/s (scénario 3).

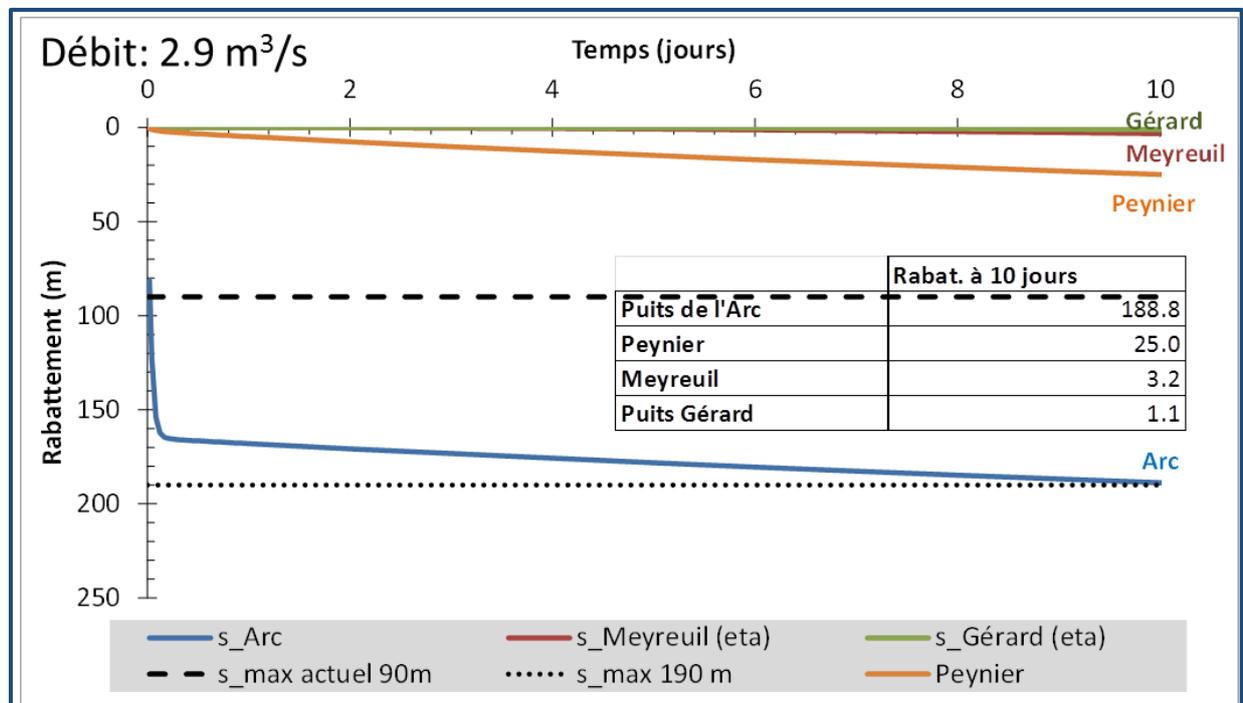


Illustration 26 : Simulation au puits de l'Arc (pompage 24h/24, 7j/7 pendant 10 jours). Impact en termes de niveau sur les ouvrages voisins. Débit : 2,9 m³/s (scénario 3).

2.5. CONCLUSIONS ET SYNTHÈSE

Les illustrations 27 et 28 synthétisent les différents types de comportements hydrodynamiques identifiés dans le secteur des puits de l'Arc. Elles ont été établies à partir des essais par pompage réalisés dans le Bégudien (Ark2), le Fuvélien (Ark1, Peynier, Puits Gérard, puits de l'Arc) et l'Hauterivien (Meyreuil)³. L'illustration 29 rappelle les informations issues des tests réalisés sur les ouvrages autres que sur les puits de l'Arc.

Ces informations montrent que le secteur d'étude est relativement compartimenté. Sur sa bordure ouest, les puits de Gardanne sont situés dans un bloc charrié du Fuvélien en connexion hydraulique modérée avec celui des puits de l'Arc.

La limite ouest de l'aquifère Fuvélien des puits de l'Arc correspondrait vraisemblablement à la zone de failles ayant permis ce charriage (Cf. illustration 28). Dans les trois autres directions, ses limites ne sont pas contraintes par l'observation hydrogéologique mais semblent correspondre aux limites du synclinal.

La superficie globale de l'aquifère est estimée à environ 170 km². Le système est aussi compartimenté, ou stratifié, horizontalement, l'essai de 2014 ayant montré des connexions hydrauliques entre le Bégudien, sus-jacent au Fuvélien, et l'Hauterivien, sous-jacent.

Il est probable que, même si l'hydraulique ne le démontre pas, l'aquifère du Jurassique soit aussi en connexion hydraulique avec le Fuvélien (c'est d'ailleurs ce qu'ont montré les analyses hydrochimiques de l'eau des puits de l'Arc, cf. §3.5).

Si la connexion hydraulique Fuvélien-Jurassique était très forte, il aurait fallu soit obtenir une épaisseur aquifère beaucoup plus importante, or celle-ci est estimée à 300 m environ ce qui correspond à l'épaisseur du Fuvélien, soit elle se serait manifestée par un très fort effet de drainance. Dans ces deux situations, les rabattements lors des essais sur les puits de l'Arc auraient été beaucoup moins forts, voire (cas de forte drainance) se seraient stabilisés, ce qui n'est pas le cas. On peut en conclure, qu'il y a effectivement connexion hydraulique Fuvélien-Jurassique (dixit l'approche géochimique) mais que celle-ci est relativement faible par rapport au débit qui a été pompé. Il est probable que la connexion ne soit que locale à l'échelle du Fuvélien, celle-ci pouvant se faire par endroit au gré de la distribution du réseau karstique. Il est probable que, globalement, un niveau peu perméable (dans le Fuvélien mais plus vraisemblablement entre le Fuvélien et le Jurassique où les séries du Valdorien à l'Hauterivien présentent effectivement plusieurs niveaux marneux et argileux) limite les échanges entre ces deux niveaux.

Les rabattements mesurés au forage de Meyreuil (Hauterivien), pourtant distant de 7,6 km, sont beaucoup plus importants, environ 12,6 m à la fin de l'essai, que ceux mesurés à Ark2 situé qu'à une cinquantaine de mètres des puits (Bégudien, distant de 55 m rabattement de 7,7 m). Cela conforte l'idée que la drainance d'aquifères sous-jacents est plus importante que celle d'aquifères sus-jacents au Fuvélien. Il est donc probable que la plupart du phénomène de drainance identifié lors des essais sur les puits de l'Arc, proviennent des aquifères sous-jacents au Fuvélien, dont le Jurassique qui, d'après la géochimie, en serait le principal contributeur.

Les essais conduits sur Peynier, le puits Gérard et Ark1 montrent une transmissivité dans le Fuvélien relativement homogène, de l'ordre de 1 à 4.10⁻³ m²/s, excepté pour Ark1, très peu perméable (environ 2.10⁻⁶ m²/s) mais très bien connecté au puits de l'Arc. Les essais réalisés sur les puits de l'Arc montrent par contre une transmissivité de l'aquifère Fuvélien dans sa globalité beaucoup plus importante de l'ordre de 2,8. 10⁻¹ m²/s, ce qui explique notamment la réponse quasi instantanée, en terme de pression, de la sollicitation exercée par les puits sur le

³ Voir rapport BRGM/RP64610-FR - Bailly-Comte et al., 2015

forage de Peynier pourtant distant de 1,3 km ou de Meyreuil au bout du 4^{ème} jour de pompage mais situé à presque 8 km. Vraisemblablement, les drains karstiques interceptés par les puits de l'Arc, s'étendent ou sont connectés à d'autres drains, qui parcourent le Fuvélien sur de très grandes distances. Ce réseau est en lien a priori direct avec celui du Jurassique. D'un point de vue emmagasinement, typique d'un aquifère captif, celui-ci est voisin de 1 à $5 \cdot 10^{-4}$ suivant les essais disponibles.

La formation du Bégudien, en raison de son caractère argileux, est, comme attendu, beaucoup moins perméable que le Fuvélien. Sa transmissivité est estimée aux environs de $3 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Il convient cependant de relativiser cette donnée car seule une valeur pour cette formation est disponible.

L'Hauterivien apparaît relativement perméable ($T=3 \cdot 10^{-2}$ m²/s), du moins au niveau du forage de Meyreuil. En cet endroit, l'aquifère est aussi limité dans l'espace et soumis à l'effet de drainance des formations sus-jacentes.

En ce qui concerne le débit exploitable au puits de l'Arc, le modèle utilisé est un modèle aquifère multicouche avec captage partiel de l'ouvrage et limité dans l'espace [aquifère fermé]. Les différents scénarios de débit, de 0,5 à 3,1 m³/s ont été étudiés.

Trois scénarios ont été testés :

- le premier s'appuie sur le droit d'eau actuel (1,1 m³/s ; 24h/24, 7j/7 pendant un an) ;
- le deuxième concerne le calcul du débit maximum exploitable (24h/24, 7j/7 pendant un an) ;
- le troisième est l'identification du débit maximum exploitable sur une période de 10 jours (solicitation ponctuelle des puits de l'Arc, suite à un incident sur le réseau existant).

Ces scénarios ont été testés suivant deux conditions de positionnement des pompes :

- positionnement actuel (100 m de profondeur) ;
- positionnement sous le travers banc réunissant les deux puits (200 m de profondeur).

Il convient de noter que le modèle utilisé ne prend pas en compte la recharge par la pluie, ainsi, en particulier pour les scénarios de 365 j, les rabattements sont probablement surestimés. Les modélisations sont donc conduites dans une condition pessimiste (pas de recharge de l'aquifère durant un an). L'impact sur les ouvrages voisins a aussi été calculé (Puits Gérard, forages de Meyreuil et Peynier).

L'application du modèle montre que si les puits devaient être pompés en continu avec le dispositif de pompage actuel, le débit moyen annuel de pompage ne devrait pas dépasser 0,55 m³/s. Par contre, si les pompes sont abaissées sous le travers banc, un débit de 1,1 m³/s, correspondant au droit actuel, serait envisageable.

Dans les deux cas, les rabattements créés au bout d'un an de pompage sur les puits de l'Arc sont importants et estimés à, pour Meyreuil : 56,6 m et 113 m de rabattement respectivement à 0,55 et 1,1 m³/s, forage de Peynier : 73 m et 146 m, et Puits Gérard : 22,8 m et 45,7 m.

Selon ces simulations, même au débit de 0.55 m³/s, un pompage de 24h/24h et 365 jours par an sur les puits de l'Arc devrait occasionner un rabattement très important des niveaux pour les autres ouvrages exploités dans le secteur.

Pour le scénario « accident » (10 jours de pompage), les résultats du modèle montrent qu'avec le dispositif actuel le débit maximal d'exploitation se situe aux environs de 1,85 m³/s, et aux environs de 2,9 m³/s si les pompes sont descendues sous le travers banc. Dans les deux cas, les rabattements sur les ouvrages alentours sont beaucoup plus faibles avec pour Meyreuil : 2,0 m et 3,2 m, pour le forage de Peynier : 16,0 m et 25,0 m, et pour le Puits Gérard : 0,7 m et 1,1 m.

Des cartes du rabattement dans l'aquifère du Fuvélien et dans le Bégudien sont présentées en annexe 6 du présent document, elles concernent :

- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 0,55 m³/s. Compartiment Fuvélien. Cf. page 120 – figure A6-1 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 0,55 m³/s. Compartiment Bégudien. Cf. page 121 – figure A6-2 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 1,1 m³/s. Compartiment Fuvélien. Cf. page 122 - figure A6-3 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 1,1 m³/s. Compartiment Bégudien. Cf. page 123 – figure A6-4 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 1,85 m³/s. Compartiment Fuvélien. Cf. page 124 – figure A6-5 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 1,85 m³/s. Compartiment Bégudien. Cf. page 125 – figure A6-6 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 2,9 m³/s. Compartiment Fuvélien. Cf. page 126 – figure A6-7 ;
- la simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 j de pompage sur les puits de l'Arc au débit de 2,9 m³/s. Compartiment Bégudien. Cf. page 127 – figure A6-8.

Les valeurs indiquées sur ces figures sont à prendre avec prudence, en particulier pour les endroits où l'information hydrogéologique n'est pas disponible (Fuvélien) et dès que l'on s'éloigne des puits de l'Arc en ce qui concerne le Bégudien.

Avertissement : la lecture des résultats de ces simulations (Cf. annexe 6) et l'utilisation de ces résultats en dehors du cadre de ce rapport nécessite impérativement que les conditions de validation de ces cartes soient rappelées afin que le lecteur soit conscient des hypothèses retenues, compte tenu des données disponibles.

Le caractère nuancé (voire restrictif) des conclusions apportées par les simulations réalisées ne doit pas cacher une autre solution qui pourrait s'avérer très pertinente pour exploiter de manière plus conséquente le gisement : un captage direct dans le Jurassique.

Les perspectives d'exploitation de forts débits, dans le secteur des puits de l'Arc, sont fortes si l'aquifère des calcaires jurassiques est sollicité directement. Cette perspective pourrait justifier de futures investigations et la réalisation de nouveaux captages.



Illustration 27 : Synthèse des informations hydrodynamiques dans le secteur des puits de l'Arc, vue en plan.

Nota : Sur l'illustration précédente, les flèches rouges et violettes représentent les connexions hydrauliques mises en évidence lors de l'essai de pompage de longue durée (2014) réalisé au puits de l'Arc.

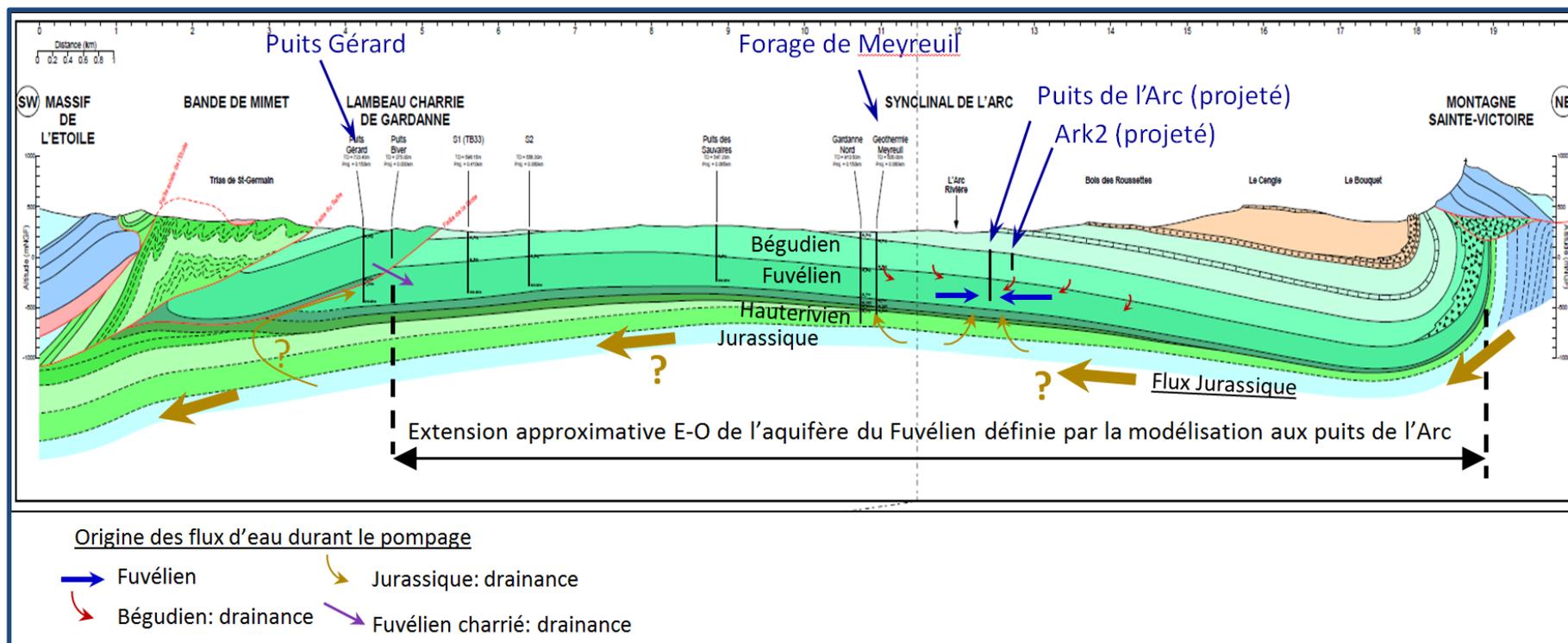


Illustration 28 : Origine des flux d'eaux souterraines durant le pompage sur les puits de l'Arc (essai de pompage de longue durée, été 2014).

Nota : le tracé de la coupe sur l'illustration précédente correspond au trait n°2 sur la carte reproduite par l'illustration 30.

Formation	Ouvrage	Dates de référence	r (m)	T (m ² /s)	S (-)	k' (m/s)	b' (m)	B (m)	l (m)	d (m)	Distance limite (mn)				Distance limite (m)				Sk (-)	C (m-5s2)	Rc (m)		
											n°1	n°2	n°3	n°4	n°1	n°2	n°3	n°4					
Fuvélien	Piézo ARK1	Essai du 13/05/2014	0,111	1,6E-06	0,001	-	-	220	140	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	
	Peynier-Piézo à 10m (Pz10m)	Essai du 20/10/2013	0,07	0,0044	0,0001	-	-	300	70	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158000	0,2	
	Peynier Forage Cannebiens	Essai du 10 au 13/01/2014	0,084	0,0044	0,0001	-	-	300	80	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,7	-	0,075	
	Peynier Forage Cannebiens	Essai du 18/03/2014	0,084	0,0044	0,0001	-	-	300	80	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	50000	0,07	
	Peynier-Piézo à 10m (Pz10m)	Essai du 18/03/2014	10	0,0044	0,0001	-	-	300	70	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Puits Gérard	Essai du 04/09 au 25/10/2011	4	0,001	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	310
Béguvien	Piézo ARK2	Essai du 13 au 16/05/2014	0,111	2,89E-05	0,005	-	-	220	140	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,3	0,03
Hauterivien	Forage Meyreuil	Essai du 23/02 au 28/04/2011	0,076	0,03	0,0001	1E-10	1	-	-	-	20	20	50	60	1200	1200	1897	2078	90	-	-	-	

Illustration 29. Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des essais dans le cadre du projet ARK (Extrait rapport BRGM/RP-64610-FR).

3. Approche fonctionnelle et géochimie

3.1. AVANT-PROPOS

En complément à l'analyse et à l'interprétation des essais de pompage (chapitre précédent), les outils hydrogéologiques et hydrochimiques permettent d'apporter des éléments d'informations importants sur le fonctionnement de l'hydrosystème du bassin d'Aix-Gardanne.

Dans le cadre du projet ARK, deux approches complémentaires ont ainsi été mises en œuvre :

- une approche dite « **fonctionnelle** » basée sur l'analyse des données de débit, piézométrie, pompage à l'aide du modèle global GARDENIA afin de qualifier, dans un premier temps, le fonctionnement hydrogéologique du Jurassique du massif de la Sainte-Victoire pour ensuite, mieux appréhender le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère fuvélo-jurassique du bassin d'Aix-Gardanne. Ce travail s'appuie sur l'état des connaissances géologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude qui est préalablement rappelé,
- une approche **géochimique** basée sur l'interprétation des différentes informations apportées par l'approche multi-isotopiques mise en œuvre dans le projet (cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR)

3.2. RAPPELS SUCCINCTS - GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Cette partie de rappels succincts des connaissances existantes sur les aspects hydrogéologiques se focalise sur les formations autochtones du bassin d'Aix-Gardanne, situées à l'est de la faille d'Aix. Les informations disponibles à l'extérieur de cette zone (massif calcaire de la Sainte-Victoire) ont été également utilisées pour préciser la description et le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère jurassique du bassin d'Aix-Gardanne.

Le bassin d'Aix-Gardanne correspond à un synclinal composé de formations jurassiques, crétacées et tertiaires, bordé par des plis chevauchants formant les reliefs de bordure : massif de la Sainte-Victoire au nord, de l'Etoile au sud-ouest et de l'Olympe-Aurélien à l'est (Cf. figures A7-1 et A7-2 en annexe 7).

Ce synclinal est assimilé à une gouttière dissymétrique (verticalisée sur son flanc nord), orientée Est-Ouest et plongeant vers l'ouest. Ce synclinal est traversé par des accidents subméridiens, qui engendrent une structuration, notamment de part et d'autre de la faille d'Aix : le bassin d'Aix-Gardanne à l'est et un bassin de l'Arc de Berre à l'ouest (BRGM/RP-57641-FR).

Les formations géologiques du bassin de l'Arc définissent un ensemble multicouche composé pour l'essentiel des formations Jurassique à Tertiaire qui, d'après les informations du log géologique dépasse plusieurs kilomètres d'épaisseur dans l'axe du synclinal.

Du plus récent au plus ancien, on distingue :

- Les formations quaternaires : alluvions de l'Arc formées de sables, graviers et cailloutis. Ces formations, de quelques mètres d'épaisseur et restreintes au niveau du cours d'eau de l'Arc, ne présentent pas un fort intérêt hydrogéologique ;
- Les formations tertiaires (Miocène à Eocène inférieur) : il s'agit de calcaires et conglomérats d'une puissance variant d'une quarantaine de mètres à presque 200 m. Ces formations donnent naissance à de petites sources, mais sont généralement faiblement aquifères ;

- Les formations du Crétacé : il s'agit de bancs calcaires, de niveaux plus ou moins sableux et gréseux séparés de niveaux argileux.

Dans le détail des formations du Crétacé, on distingue :

- *Rognacien* (jusqu'à 600-700 m d'épaisseur) : sables et grès lenticulaires, conglomérats et calcaires abritant localement de petits niveaux aquifères, ennoyés dans une matrice argileuse ou marneuse.
 - *Béguvien* (300 à 500 m) constitué d'alternances de marnes, de calcaires, de grès et de conglomérats, abrite plusieurs niveaux aquifères de type fissuré.
 - *Fuvélien*, environ 250-300 m de calcaires à characées, est situé entre deux étages peu perméables, le Valdonnien⁴ en dessous et Béguvien au-dessus. Il constitue un aquifère bien individualisé de type fracturé localement karstique, il est en général artésien et donne des débits relativement importants (plusieurs m³/h). Ce niveau a la particularité d'avoir fait l'objet d'une exploitation minière (lignite) ; **c'est dans cette formation que sont implantés les puits de l'Arc.**
 - *Crétacé inférieur* (quelques dizaines de mètres à plus de 200 m) regroupe plusieurs niveaux discontinus majoritairement calcaires séparés de niveaux marneux du Coniacien au Santonien. Cette formation présente localement des remplissages bauxitiques sur des poches karstiques. Non présente à l'affleurement et hypothétique en profondeur, l'aquifère du Crétacé inférieur ne semble pas être exploité dans le bassin d'Aix-Gardanne. L'absence locale du Crétacé inférieur peut donc favoriser les échanges entre l'aquifère du Crétacé supérieur (Fuvélien) et les formations jurassiques sous-jacentes (BRGM/RP-53238-FR).
- Les formations du Jurassique (Argovien, Kimméridgien, Portlandien) sont épaisses d'environ 1 000 à 1 100 m. Formées de calcaires plus ou moins dolomités, fissurés et karstifiés. L'aquifère de cette formation est peu connu car peu accessible, cependant il a été identifié en tant qu'entité hydrogéologique (FRDG210/PAC07B) d'intérêt régional tant les ressources en eau qu'il contient semblent être importantes. Il s'agit d'un système captif de type fissuré et karstique s'étendant sur plus de 250 km² qui renferme des ressources potentiellement importantes et exploitables (réserve estimée à 200.10⁶ m³) mais d'accès difficile compte tenu de sa profondeur dans le bassin. L'exutoire principal de ce système karstique, s'il existe, est inconnu. Certes il est admis que l'aquifère jurassique contribue à l'alimentation, par drainance verticale, du Fuvélien comme notamment aux Puits de l'Arc (0.5 m³/s en période de hautes eaux), et dans la mine de Gardanne (sources 90 et sources Ste Victoire, voir figure A7-3 en annexe 7) d'après Chalumeau (2000). Cette contribution n'explique pas tout et la question de l'exutoire reste posée au terme du projet. La possibilité d'un drainage vers l'ouest via l'Urgonien (mer ou étang de Berre) dans un secteur sensible aux oscillations du niveau marin depuis au moins le début du Miocène reste une question ouverte aux termes du projet.
- Les formations calcaires du Trias sous-jacentes sont considérées comme peu perméables.

La délimitation de la zone de recharge des calcaires jurassiques situés sous couverture (FRDG210/PAC07B) n'est pas connue avec précision. Le rôle d'alimentation de la limite nord et est du bassin (Massif de la Sainte-Victoire et bois de Pourrières) a souvent été présumé et cité dans la littérature.

⁴ La reconnaissance de l'extension du gisement de lignite de Gardanne a montré l'absence d'écran efficace à l'est de Fuveau entre le Jurassique supérieur et le Fuvélien (marnes du Valdonnien peu épaisses ou absentes, existence d'une importante fracturation). Cette absence locale de mur imperméable du Fuvélien peut donc favoriser les échanges entre l'aquifère du Crétacé supérieur et le Jurassique sous-jacent.

Au sud, la partie jurassique du massif du Régagnas est supposée également contribuer à l'alimentation de l'entité hydrogéologique. Les illustrations 30 et 31 ci-après, issues du rapport intermédiaire du projet (réf RP-64610-FR de décembre 2015), permettent de visualiser le contexte local.

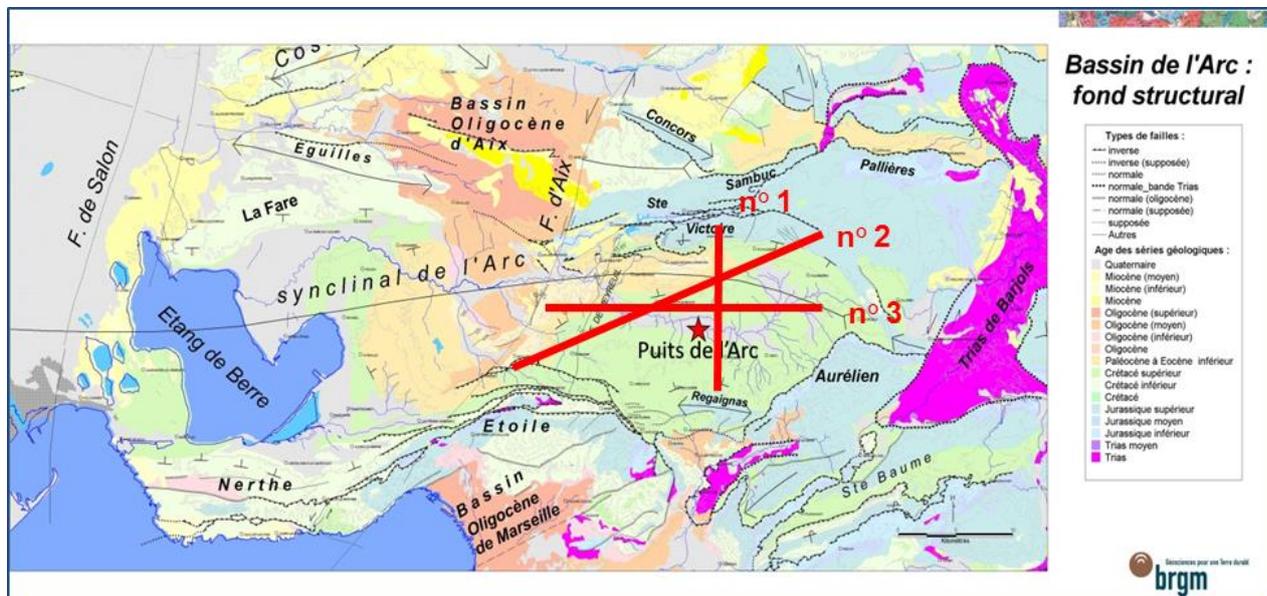


Illustration 30 : Situation des puits de l'Arc sur fond géologique simplifié et position des coupes géologiques

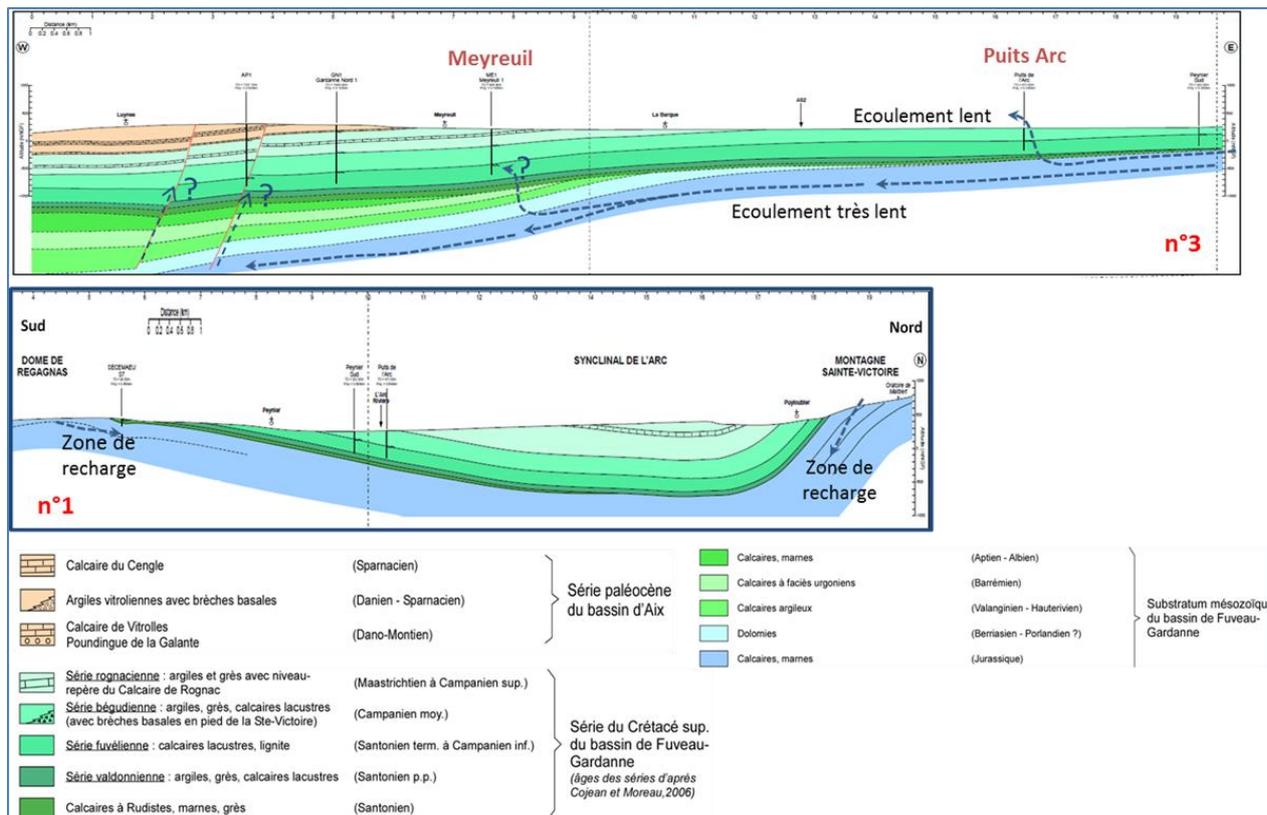


Illustration 31 : Coupes interprétatives nord-sud et est-ouest du bassin hydrogéologique.

Nota : Sur l'illustration précédente, les zones de recharge de l'aquifère du jurassique et le cheminement probable de l'écoulement ont été reportés.

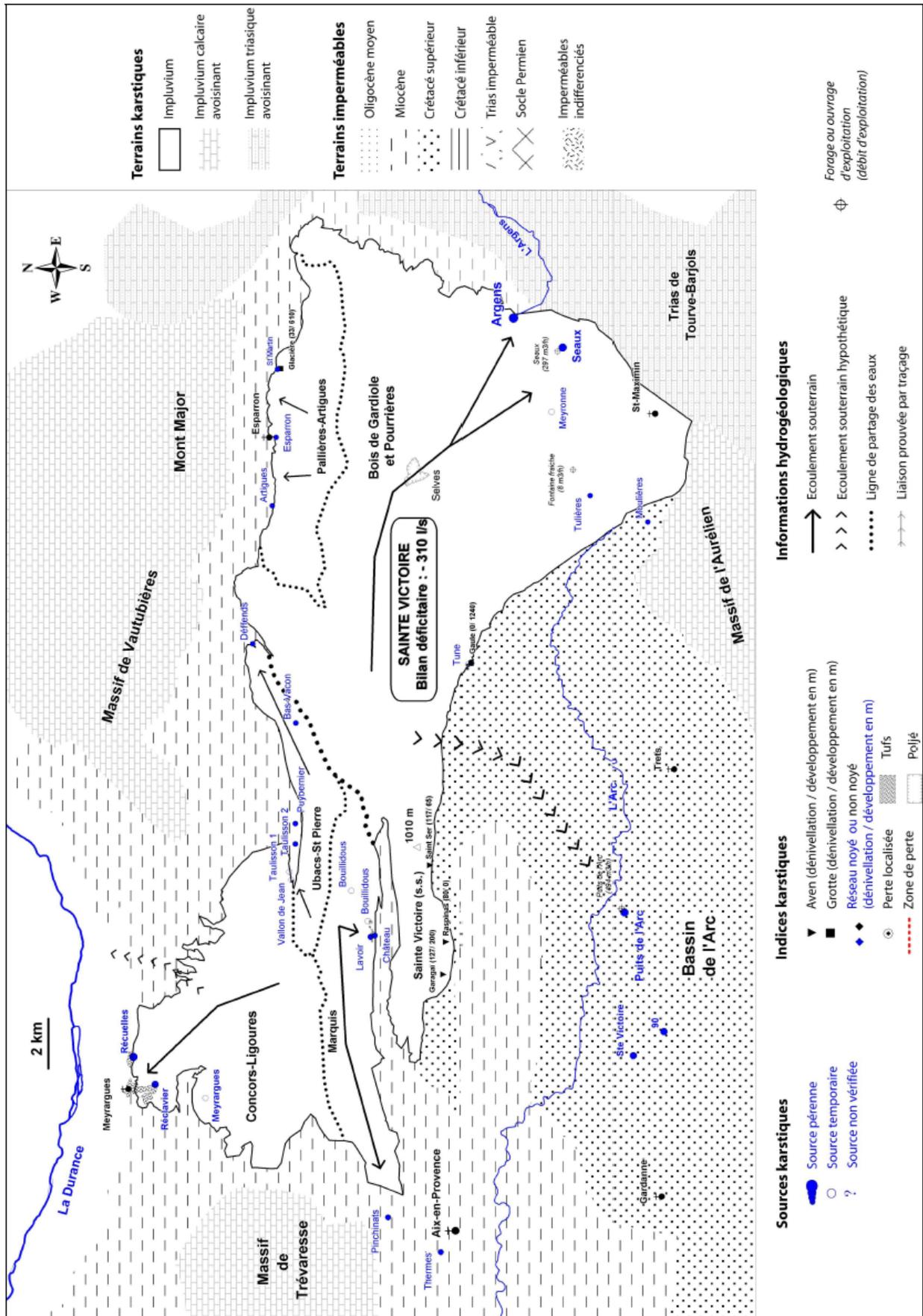


Illustration 32 : Carte hydrogéologique simplifiée du massif karstique de la Sainte Victoire (extrait de la Thèse de Cavalera, 2007)

Sur la base des mesures de débits réalisées sur les principaux exutoires par Bitesnik et Durozoy (1969) et Durozoy et al (1972), et en apportant des précisions sur la délimitation des impluviums et la pluviométrie de la zone d'étude, Cavalera (2007) a révisé les anciens bilans hydrogéologiques des années 1970 (Cf. illustration 32). Sur la base d'une pluviométrie moyenne de 700 mm sur les 311 km² de la zone d'étude (Cf. données de l'illustration 33) et en considérant que l'ensemble des flux estimés aux exutoires est égal à 1 715 l/s, le bilan hydrogéologique global apparaîtrait déficitaire de 310 l/s, en considérant un coefficient d'infiltration théorique de 0.29, soit 6.5 l/s/km². Selon cet auteur, le déficit de l'unité de la Sainte-Victoire serait principalement expliqué par l'alimentation en profondeur du Jurassique, et notamment de l'entité PAC07B située sous couverture dans le bassin d'Aix-Gardanne.

UNITE DE LA SAINTE VICTOIRE					
Superficie (km ²)		311			
Pluviométrie moyenne (mm)		700			
Débit total estimé aux exutoires (L/s)		1715			
Coefficient d'infiltration théorique (H&S)		0,29			
Module d'infiltration moyen théorique (L/s/km ²)		6,5			
BILAN GLOBAL : Excédent ou Déficit (+/- %)				-311 L/s (-15%)	
Détail bilan partie nord-ouest (S= 97 km²)					
Entrées (L/s)	Sorties (L/s)		Déficit	Excédent	Bilan déficitaire
Peff 485	Sources de Meyrargues (Réclavier, Récuellles) + exutoire temporaire du Grand Vallat	300			
	Source de Pinchinats	45			
	Sources de Vauvenargues (Lavoir, Château)	30			
	Sources diffuses au Nord (Unité Ubacs-St Pierre, Bas-Vacon)	20	50 L/s (-10%)		
	Suralimentation de la nappe alluviale de la Durance + vallons miocènes du Nord-est	40			
Total 485		435			
Détail bilan partie sud-est (S= 214 km²)					
Entrées (L/s)	Sorties (L/s)		Déficit	Excédent	Bilan complètement déficitaire
Peff 1541	Prélèvements (Fontaine fraîche, Seaux)	70			
	Sources de l'Argens (Argens, Seaux, Meyronne)	500			
	Sources diffuses au Nord (Unité Pallières-Artigues)	10	261 L/s (-17%)		
	Sources thermales d'Aix	50			
	Venues d'eaux karstiques dans les ouvrages miniers	650			
Total 1541		1280			

Illustration 33 : Bilans hydrogéologiques révisés du massif karstique de la Sainte-Victoire (extrait de la Thèse de Cavalera, 2007)

D'après les informations de bilan hydrogéologique calculé par Cavalera (2007) pour la partie sud-est de la masse d'eau souterraine, la superficie associée au déficit d'écoulement qui alimente le Jurassique profond représenterait 40 km² environ.

En raison de la difficulté à boucler le bilan en eaux souterraines du Jurassique de la masse d'eau du massif calcaire de la Sainte-Victoire, avec, notamment, une méconnaissance des flux de sortie naturelle et/ou artificielle des eaux de l'aquifère jurassique du bassin de l'Arc, des imprécisions demeurent quant à l'importance et la dynamique de la composante de recharge profonde du jurassique.

Dans le but d'apporter des éléments de connaissance nouveaux sur le fonctionnement du système karstique du massif calcaire de la Sainte-Victoire, une modélisation Pluie-Débit a été réalisée sur la chronique de la source de l'Argens (Y5002020, Banque Hydro) suivie depuis 1975. Cette étude constitue un préalable à la caractérisation du fonctionnement de l'aquifère jurassique qualifié à l'aide des chroniques du puits de l'Arc.

3.3. FONCTIONNEMENT DE LA SOURCE DE L'ARGENS / GARDENIA

3.3.1. Présentation de l'approche de modélisation

Le modèle **GARDENIA** (modèle **G**lobal **A** Reservoir pour la simulation des **D**ébits et des **N**iveaux **A**quifères), développé par le BRGM (Thiéry, 2004, 2013) est un modèle hydrologique global qui représente le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou ponctuellement sur un piézomètre dans l'aquifère.

Ce modèle est global, car il considère une entrée "globale" (une « lame d'eau » sur le bassin et une évaporation potentielle) et une sortie qui sont suivant le cas d'étude, le débit à l'exutoire d'un bassin versant et/ou un niveau piézométrique.

Le modèle hydrologique global simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées sont décrites par un écoulement à travers une succession de 3 réservoirs (Cf. illustration 34) : le premier réservoir symbolise les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration, le second symbolise une zone intermédiaire (zone non saturée) qui produit un écoulement rapide et un flux de recharge vers le troisième réservoir, l'aquifère, qui produit l'écoulement lent.

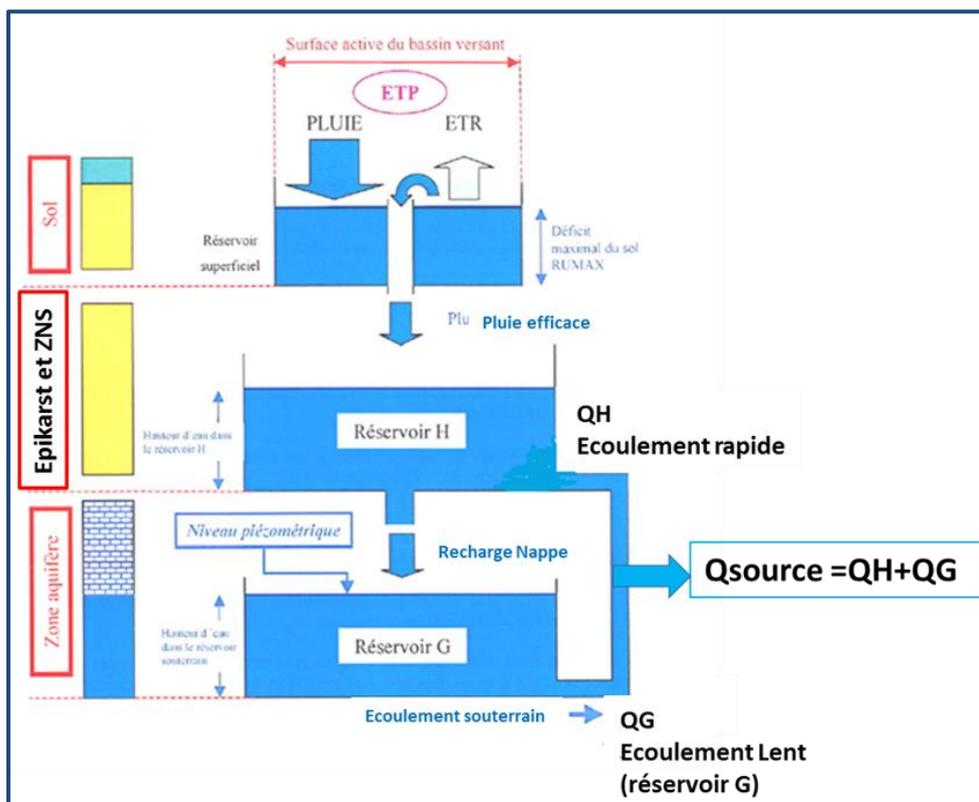


Illustration 34 : Schématisation hydrogéologique adoptée pour décrire le fonctionnement hydrogéologique de la source d'Argens

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par des paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc). En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrogéologique réel, ces paramètres, bien qu'ayant un sens physique, peuvent difficilement être déduits a priori des caractéristiques physiographiques ponctuelles du bassin versant (géologie, couverture végétale...).

Dans la pratique, les paramètres doivent donc être déterminés par ajustement (calibration) sur une ou deux séries d'observation (chronique de débit et/ou de piézométrie). Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évaporation) à chacun des pas de calcul considéré (jour, décadaire, mensuel).

Dans la pratique toujours, l'approche de modélisation Gardenia permet d'analyser le fonctionnement hydrogéologique d'un hydrosystème en tenant compte des éventuelles sollicitations de la ressource (pompages ou apports). Le modèle, une fois calé, est en mesure de simuler la réponse de l'hydrosystème (rivière ou source et aquifères) à des scénarios hydro-climatologiques incluant ou non des scénarios de prélèvement en eau. Pour plus de détails concernant le fonctionnement et les conditions d'utilisation du modèle Gardenia, on se référera à son guide d'utilisation (rapport BRGM/RP-62797-FR – Février 2014).

3.3.2. Stratégie de calibration

Le calage du modèle a été effectué en considérant la chronique de débit de la source de l'Argens et la piézométrie du Jurassique mesurée à Pourcieux (10225X0089/F)

Les paramètres du modèle pour calculer le débit de la source karstique sont au nombre de 7 :

- Surface du bassin d'alimentation : ce paramètre a été estimé sur la base des données disponibles (Cf. Cavalera 2007) ;
- Rsup-Prog : Capacité du réservoir superficiel de type sol et/ou épikarst disponible pour l'évapotranspiration » : en mm ;
- T1/2-Perco : Temps de demi-percolation du réservoir H : en mois ;
- RUIPER : Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation : en mm ;
- T1/2-Tari : Temps de demi-tarissement du réservoir G : en mois ;

Un paramètre supplémentaire est nécessaire pour exprimer le niveau d'eau en piézométrie :

- Coef_Emmag : Coefficient d'emmagasinement global de l'aquifère ;
- Niv_Base : Ce paramètre correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en absence de recharge.

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit à l'exutoire et le niveau piézométrique en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (\alpha \times F_{\text{Débit}}) + (1-\alpha \times F_{\text{Niveau}})$$

en retenant comme critères de performance pour $F_{\text{Débit}}$ et F_{Niveau} respectivement le coefficient de Nash sur la racine carrée des débits Nash $Q^{0.5}$ et sur la racine carrée de la piézométrie Nash $h^{0.5}$.

3.3.3. Données utilisées pour la modélisation de la source de l'Argens

a) Données d'ETP et de précipitation

Les données journalières d'évapotranspiration potentielle et de précipitation sont issues d'une pondération surfacique des données météo-france des mailles SAFRAN n° 8874 à 8878, 8963 à 8967, 9049 à 9053 et 9130 à 9134 correspondant à l'emprise sur la zone d'étude, aux calcaires des massifs de la Sainte Victoire et du Régagnas. (Cf. Illustration 35). La surface totale considérée est de 347.8 km² dont 14 km² environ pour les calcaires jurassiques du Régagnas.

La fonction de pondération utilisée pour la pluie (PI) est :

$$[60.62*PI(8874) + 34.26*PI(8875) + 40.54*PI(8876) + 36.84*PI(8877) + 15.91*PI(8878) + 6.13*PI(8962) + 20.16*PI(8963) + 22.19*PI(8964) + 35.51*PI(8965) + 47.68*PI(8966) + 13.87*PI(8967) + 2.53*PI(9050) + 2.87*PI(9052) + 0.43*PI(9130) + 8.3*PI(9131)]/347.85$$

La même pondération est utilisée pour l'ETP.

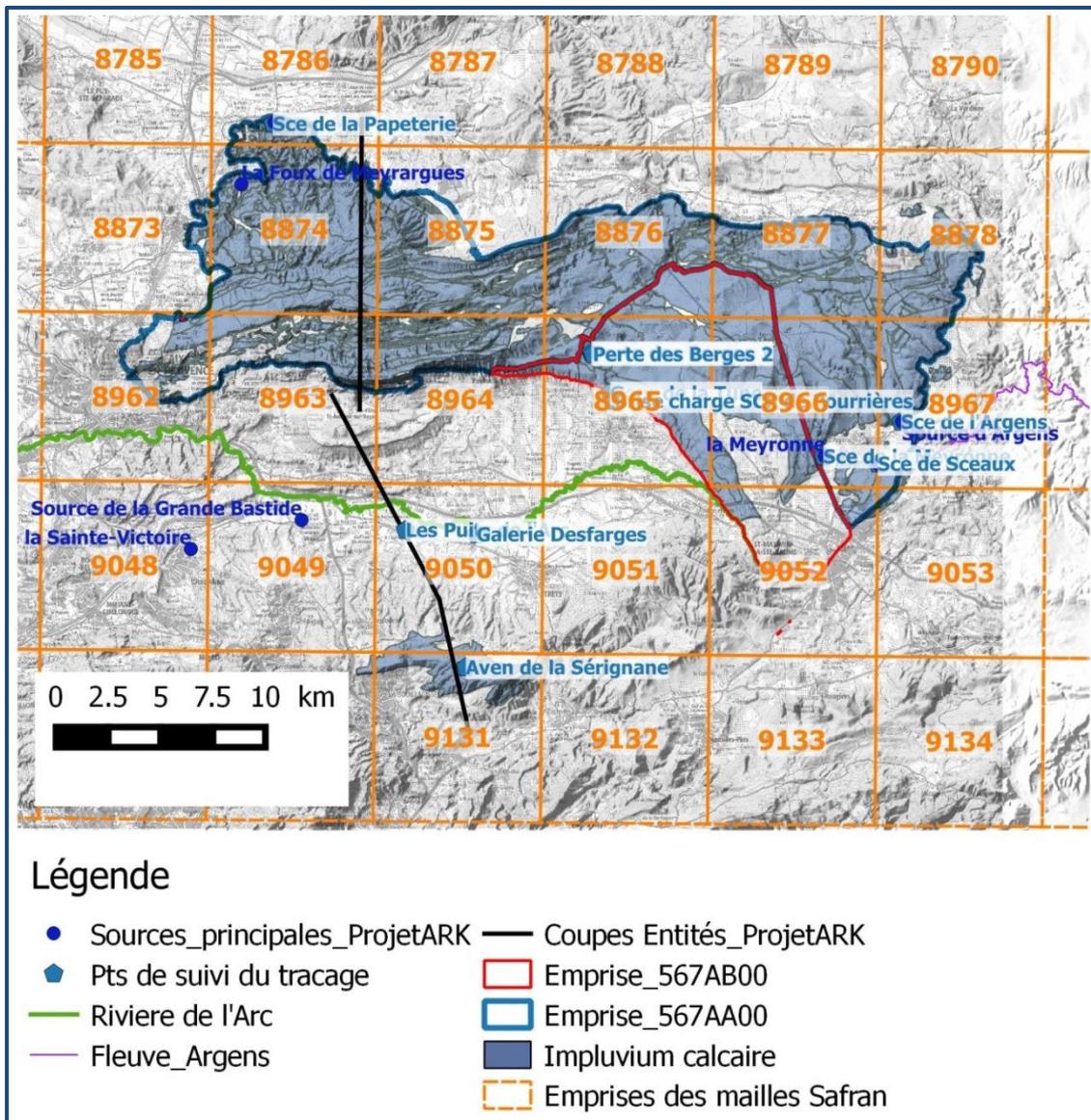


Illustration 35 : Emprise des mailles Safran sur la masse d'eau FRDG210 du massif calcaire de la Sainte-Victoire, fond IGN 100000.

Des éléments de statistiques descriptives de la pluie sur la période 1958-2014 sont présentés en annexe 8. Sur la période considérée, le cumul annuel de la précipitation sur l'emprise de la zone d'étude est compris entre 300 mm et 1069 mm, la médiane et la moyenne sont estimées à 700 mm environ. Concernant la période récente, les années 2008 à 2013 apparaissent excédentaires en précipitation, par rapport à la moyenne (1958-2014).

b) Données de piézométrie et de débit

Le modèle a été calibré sur la chronique de débit de la source de l'Argens, les données sont bancarisées dans la banque hydro (station Y5002020), chronique de débit journalière du 1975 à 2012, avec quelques lacunes. Les données de 2013 et 2014 sont utilisées pour la validation. Des éléments de statistiques descriptives des débits mesurés sont présentés en annexe 8. Sur la période 1975-2012, le débit moyen annuel est estimé à 0.42 m³/s, les débits minimum et maximum sont respectivement de 0.125 m³/s et 0.886 m³/s.

Les données de piézométrie utilisées pour la calibration du modèle sont celles de l'ouvrage 10225X0089/F permettant le suivi de la charge de l'aquifère du jurassique dans le secteur de Pourcieux (point anciennement suivi dans le cadre du réseau piézométrique régional). Les données disponibles couvrent la période 2005-2016 avec de nombreuses lacunes.

3.3.4. Examen des résultats de modélisation du débit de la source de l'Argens

La modélisation du fonctionnement hydrogéologique de la source de l'Argens a été réalisée sur la période 1985-2013. Dans cette modélisation, on suppose que le débit de la source karstique est assuré par 2 composantes d'écoulements souterrains (Cf. illustration 36) : une composante d'écoulement rapide qui intervient lors des périodes de crues et une composante lente qui assure le débit d'étiage de la source.

Les résultats de modélisation sont présentés sur les Illustration 36 et 37. Le critère de Nash est de 0.74 sur les débits, de 0.88 sur la piézométrie, le critère de Nash global étant de 0.784. L'allure du débit simulé et le coefficient de Nash sur la période 1985-2013 sont jugés satisfaisants ce qui permet une discussion des résultats. Le modèle a néanmoins tendance à sous-estimer les pointes de crue, ce qui n'est pas préjudiciable dans le cadre de cette étude, puisque c'est la composante lente de l'écoulement qui nous intéresse car elle est supposée permettre de caractériser le fonctionnement de la composante profonde qui contribue à recharger l'aquifère jurassique sous couverture du bassin Aix-Gardanne. Des éléments de statistiques descriptives complémentaires sont reportés en annexe 8.

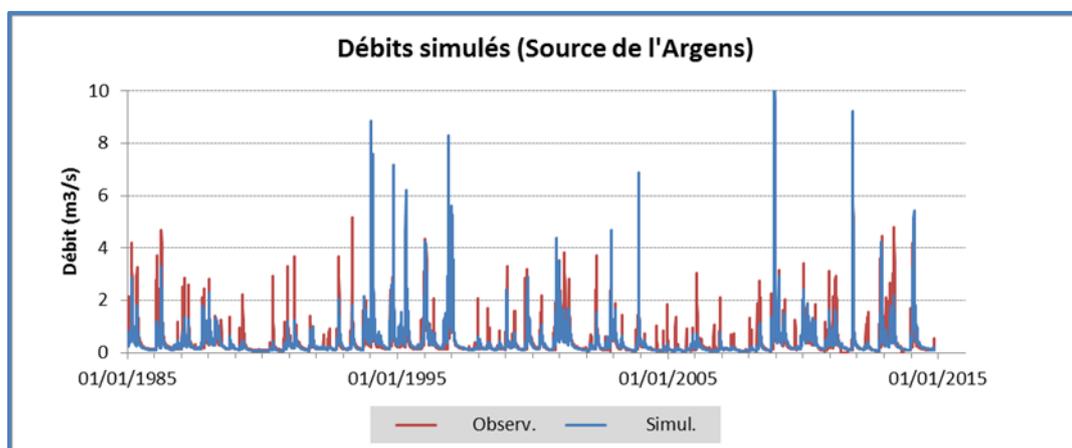


Illustration 36 : Source de l'Argens : évolution des débits simulés par le modèle Gardenia sur la période 1985-2013.

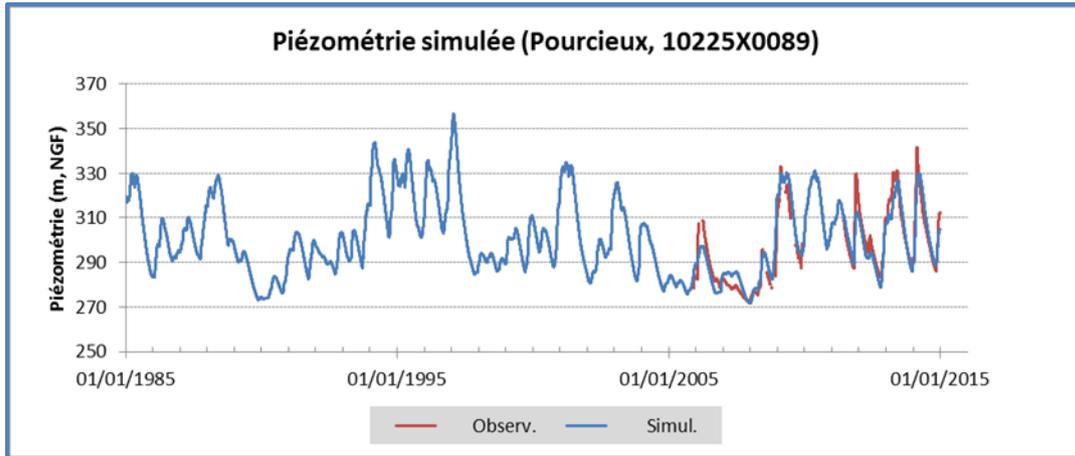


Illustration 37 : Evolution de la piézométrie simulée par le modèle Gardenia sur la période 1985-2015.

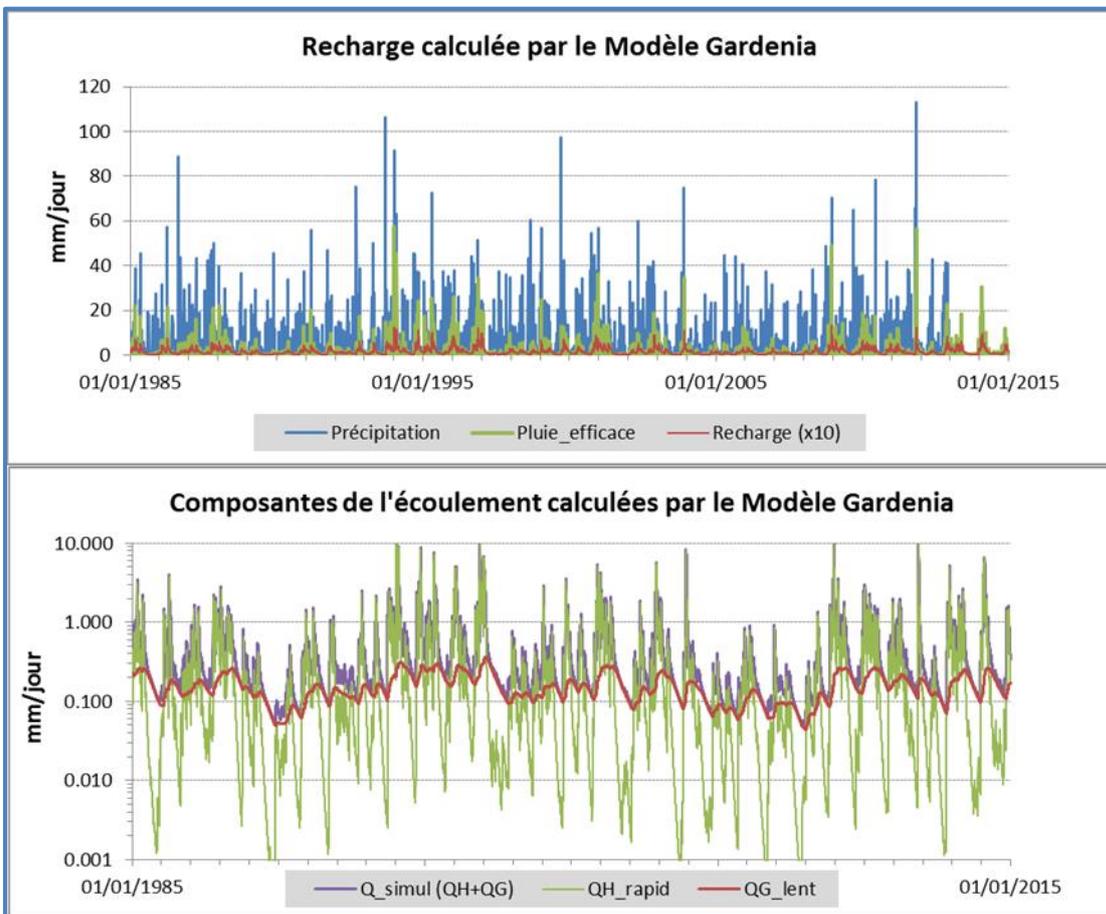


Illustration 38 : Evolution des flux de pluie efficace et de recharge et des composantes de l'écoulement de la source de l'Argens calculés par le modèle Gardenia.

Les évolutions de flux de pluie efficace et de recharge associées respectivement aux composantes rapide et lente de l'écoulement de la source de l'Argens sont présentées sur l'illustration 38. L'écoulement rapide assure l'essentiel du débit de la source en période de crue, la réponse maximale du karst est observée près d'un jour après un épisode de pluie efficace, les débits de l'exutoire cessent d'être influencés par l'écoulement rapide dans les 30 jours qui suivent un épisode de pluie efficace comme le renseigne la réponse impulsionnelle du karst à la pluie efficace (Cf. Illustration 39).

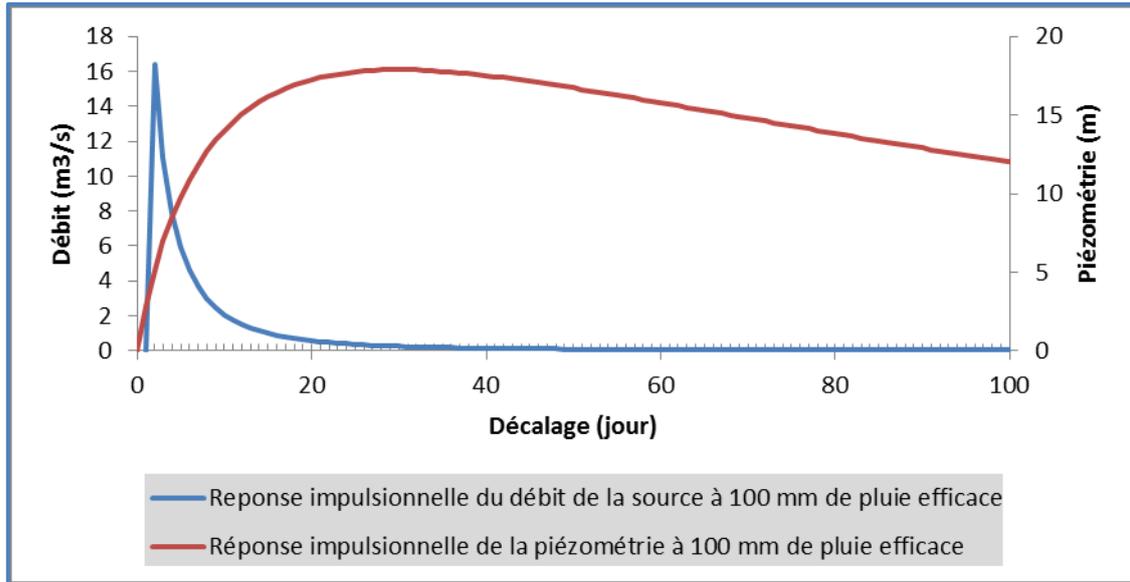


Illustration 39 : Réponse impulsionnelle de l'aquifère à 100 mm de pluie efficace

Les paramètres du modèle obtenus par calage automatique sont rassemblés dans l'illustration 40.

La superficie du bassin d'alimentation de la source n'a pas été imposée car inconnue en raison notamment d'absence d'essai de traçage. La superficie estimée par le modèle est de 72 km² environ.

La valeur du coefficient Rui_Per est faible (8.5 mm environ), le débit de la source en période de crue est majoritairement assuré par produit par la composante rapide (QH) du modèle, cette dernière semble « court-circuiter » la composante lente (QG) du modèle qui assure l'écoulement de base de la source.

Le temps de demi percolation (T1/2_Perco) est globalement lent (1.54 mois) ce qui dénote que le transfert de la recharge en direction de la zone noyée de l'aquifère est assez lent comme le témoigne l'évolution de la réponse du débit de la composante lente (Illustration 38) et de la réponse impulsionnelle de la piézométrie (Illustration 39).

Le temps de demi tarissement (T1/2_Tari) est de plus de 4 mois ce qui dénoterait une importante inertie de la zone noyée de l'aquifère karstique.

Le coefficient d'emmagasinement de la nappe (0.00052) est faible et caractéristique d'un aquifère captif, ce qui est cohérent puisque l'ouvrage (10225X0089/F) recoupe le Jurassique sous couverture de Crétacé.

A titre d'information, des éléments de statistiques descriptives de la pluie efficace et de la recharge sont présentés en annexe 8 (période 1959-2014) dans le but notamment, de fixer les ordres du flux d'eau qui contribue à l'alimentation de la zone noyée de l'aquifère karstique de la source de l'Argens. Les résultats présentés pour la période antérieure à 1975 sont donnés à titre indicatif. La pluie efficace moyenne [1959-2014] est estimée à 178 mm/an (comprise entre 19 mm et 415 mm) tandis que la recharge moyenne [1959-2014] est estimée à 59 mm/an (comprise entre 17 mm et 102 mm).

Nom	Source Argens			Descriptif
Superficie	km2	71.16	calage automatique	C'est la superficie du bassin alimentation. Cette superficie est généralement connue. Dans certain cas, cette superficie est inconnue ou mal connue, à savoir : bassin d'alimentation d'une source; exutoire ne controlant qu'une partie du bassin versant. Dans ces cas l'optimisation par calage est conseillée.
Corr_Pluv	%	0.00		Coefficient de correction de la pluie
Corr_ETP	%	0.00		Coefficient de correction de le ETP
Rsup_Progr	mm	286.56	calage automatique	Capacité de la réserve superficielle progressive . Dans ce réservoir superficiel, l'évaporation réelle et la production de pluie efficace suivent des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de cette réserve.
Rui_Perco	mm	8.46	calage automatique	C'est la hauteur du réservoir H conduisant à une égale répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et percolation (recharge) alimentant l'écoulement lent
T1/2_Perco	mois	1.35	calage automatique	Temps de ½ percolation. C'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement (une reponse) de la composante lente du débit.
T1/2_Taris1	mois	3.15	calage automatique	Temps de ½ tarrissement souterrain. C'est le temps au bout duquel, en absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par 2.
Débit_extér	m3/s	0.00		Débit extérieur (Qext) éventuel. Ce débit extérieur est non controlé par la mesure à l'exutoire. Le débit observé (Qobs) se déduit du calculé (Qcal) par la relation : $Q_{obs} = Q_{cal} + Q_{ext} + \text{écart}_{simulation}$
Coef_Emmag	-	5.2E-04	calage automatique	Coefficient d'emménagement équivalent de la nappe. C'est le coefficient d'emménagement apparent global de la nappe
Niv_Base	m	259.86	calage automatique	Niveau de base locale de la nappe. Ce paramètre correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en absence de recharge

Illustration 40 : Paramètres du modèle Gardenia de la source de l'Argens

Nota : Dans le tableau de l'illustration précédente, la valeur dite niveau de base ne correspond pas à la cote de débordement de la source mais, comme le précise le descriptif, à un paramètre de calage qui correspond à une cote de l'aquifère en l'absence totale de recharge.

3.3.5. Estimation du bilan hydrogéologique du massif calcaire de la Sainte-Victoire

Sur la base des résultats de la modélisation de la source de l'Argens, un calcul de bilan hydrogéologique a été réalisé sur le massif calcaire de la Sainte-Victoire en supposant que le fonctionnement hydrogéologique est similaire à celui décrit précédemment pour la source de l'Argens. La confrontation des résultats de la modélisation aux débits jaugés à la fin des années 1960 et au début 1970 sur les principaux exutoires rattachés à cette masse d'eau (Sources de Seaux et de la Papeterie, cf. Illustration 41) permet de justifier cette hypothèse.

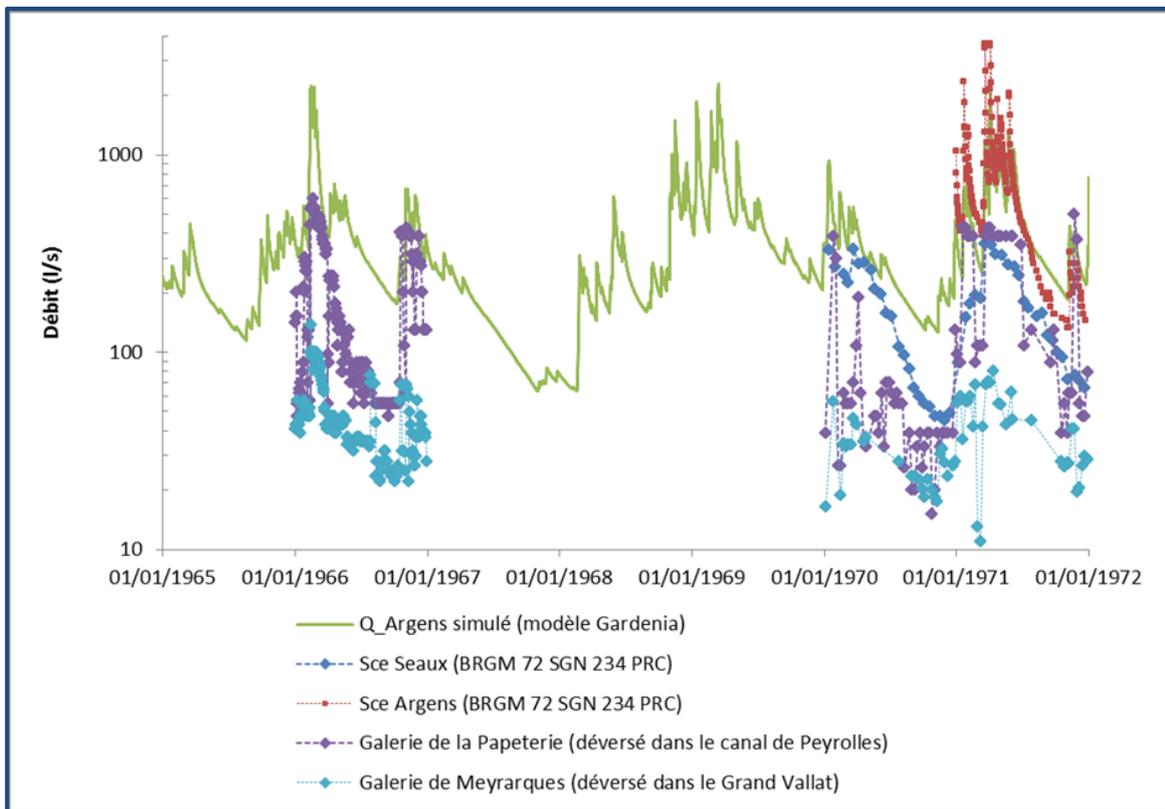


Illustration 41 : Comparaison des débits mesurés aux principales sources du Massif de la Sainte Victoire au débit simulé à la source de l'Argens.

La délimitation de différents sous-impluviums est présentée sur l'illustration 42. Elle s'appuie en partie sur la délimitation proposée par Cavalera (2007), selon l'illustration 32.

Quatre sous-systèmes ont été considérés :

- Le système dit de la « source de la papeterie » (63.2 km²), qui concerne principalement les sources de Meyrargues (Galleries de la Papeterie et de Meyrargues), le trop-plein de la Foux de Meyrargues ;
- Le système de la « Sainte Victoire Nord » (53.4 km²), qui concerne principalement les sources de Vauvenargues et les forages thermaux d'Aix (Sextius) ;
- Le système dit de la « source de Fontaine Veille » (28.7 km²) ;
- Le système dit de la « Sainte Victoire Est » (183.8 km²), qui concerne principalement les sources d'Argens et de Seaux et, en période de crue, les sources de trop plein de la Meyronne et du Gour de la Tune, ainsi que les flux profonds qui contribuent à alimenter l'aquifère fluvélo-jurassique situé sous couverture du bassin de l'Arc.

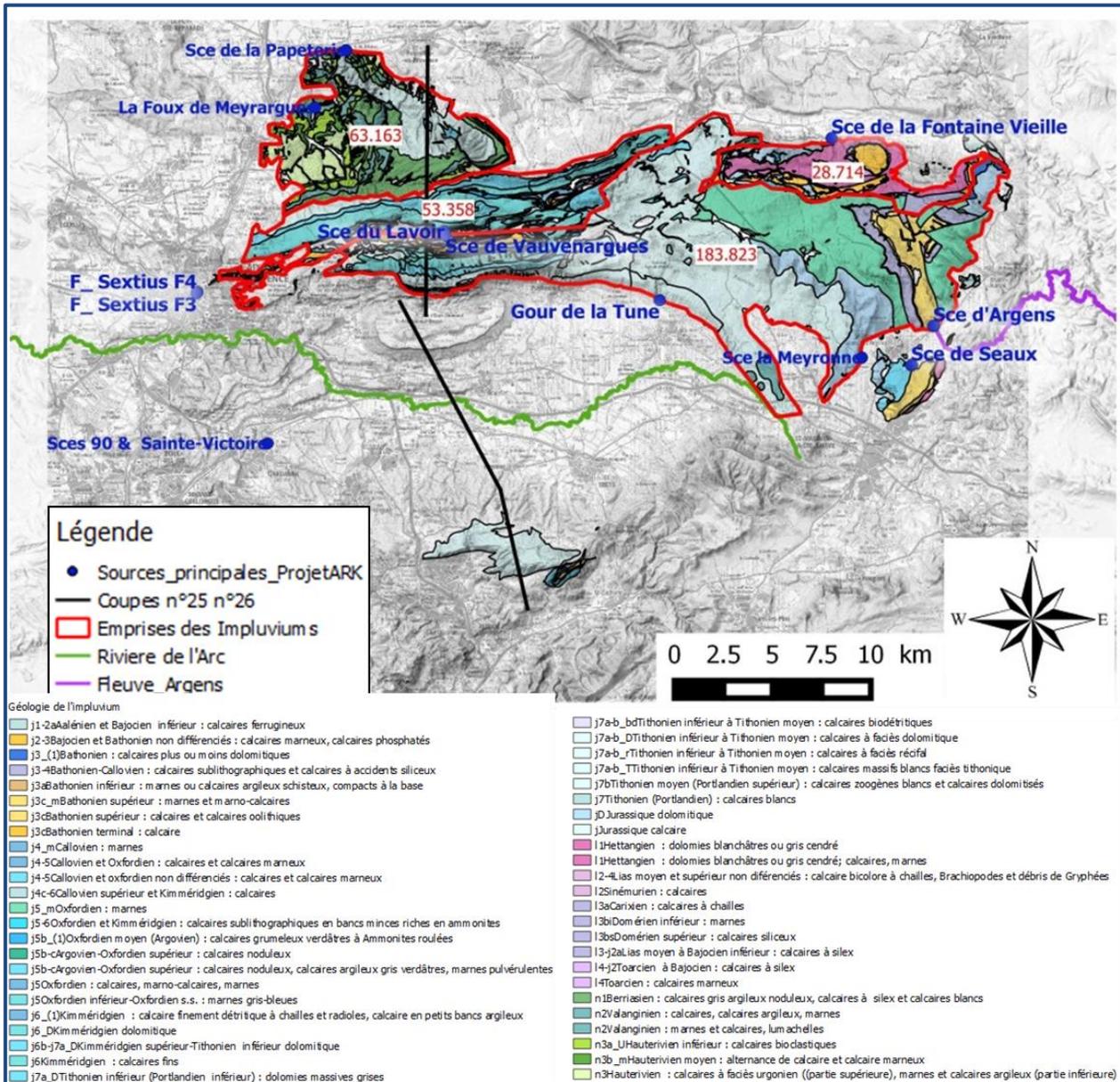


Illustration 42 : Délimitation des différents impluviums au sein du massif calcaire de la Sainte-Victoire, fond géologique harmonisé au 1/50000.

Nota : les coupes n°25 et n°26 sont présentées en annexe 7 (Figure A7 - 1, Figure A7 - 2)

Pour le sous-système dit de la « Sainte Victoire Est » (184 km² environ), le débit moyen de la source de Seaux mesuré en 1970-1971 est de l'ordre de 169 l/s contre 378 l/s à la source de l'Argens (estimé par simulation). En supposant que le fonctionnement hydrogéologique de la source de Seaux est identique à celle de la source de l'Argens, la surface de l'impluvium de la source de Seaux est estimée à⁵ 32 km² environ (contre 71 km² pour la source de l'Argens), en considérant la pluie efficace moyenne de 178 mm/an.

⁵ (169/378)x71

Les différents prélèvements pour l'AEP indiquent que le cumul des pompages est de l'ordre de 2.7 millions de m³/a (en moyenne), soit environ 85 l/s (période 1997-2013, Illustration 43).

L'essentiel des prélèvements concerne la source karstique de Seaux (72 l/s en moyenne) et la source de l'Argens (10 l/s en moyenne). Les autres prélèvements AEP représentent 5 l/s en moyenne, soit une valeur faible qui a été négligée dans le calcul de bilan.

En considérant les différents impluviums des sources et de l'entité de la « Sainte Victoire Est », par différence, la superficie de l'impluvium qui contribue à alimenter l'aquifère jurassique situé sous la couverture du bassin de l'Arc est estimée à 81 km² environ⁶. Cette surface apparaît plus faible que celle considérée pour l'entité 567AB00 (99 km², cf. Illustration 35, données BDLISA).

En considérant la surface du Jurassique du massif du Régagnas (14 km² environ) pour lequel aucun exutoire n'est connu, **la superficie de l'impluvium qui contribue à alimenter l'aquifère jurassique sous couverture du bassin de l'Arc (flux profonds) serait de l'ordre de 95 km² environ**. Cette information permet de fixer l'ordre de grandeur de la superficie à considérer lors la modélisation du puits de l'Arc (cf. § 3.4)

Commune	BRUE AURIAC	SEILLONS SOURCE D'ARGENS	OLLIERES	ST MAXIMIN LA STE BAUME	ST MAXIMIN LA STE BAUME	
n°INSEE	83025	83125	83089	83116	83116	
Code_Point Prélèvement	183025001	183125001	183089003	183116004	183116003	
Nom_ouvrage _prélèvement	Sce_ d'ARGENS	Sce_ d'ARGENS	F_ FONTAINE FRAICHE	SCEAUX (F1+F2)	F_ Du DEFFENDS	Total m3/an
1997	94 400	193 400	65 900	1 973 300		2 327 000
1998	108 100	203 800	54 300	1 893 800		2 260 000
1999	127 000	186 400	71 700	1 955 000		2 340 100
2000	101 200	185 000	97 600	2 120 200		2 504 000
2001	109 900	219 300	95 800	2 232 900		2 657 900
2002	107 600	214 700	62 700	2 476 400		2 861 400
2003	130 600	228 800	71 200	2 647 100		3 077 700
2004	110 400	253 600	77 300	2 602 600		3 043 900
2005	107 300	222 500	84 200	2 761 400		3 175 400
2006	101 700	197 900	74 600	2 441 900		2 816 100
2007	95 600	182 300	73 200	2 341 900		2 693 000
2008	99 600	174 000	66 500	2 182 400		2 522 500
2009	96 100	224 200	76 000	2 383 600	58 100	2 779 900
2010	97 000	186 700	91 500	2 603 400	137 800	2 978 600
2011	107 500	204 200	68 000	2 281 800	172 000	2 661 500
2012	90 900	228 900	69 600	2 135 100	106 500	2 524 500
2013	79 200	248 000	69 000	1 901 500	14 400	2 297 700
Moyenne m3/a	103 771	209 041	74 653	2 290 253	97 760	2 677 718
Moyenne l/s	3.29	6.63	2.37	72.62	3.10	84.91

Illustration 43 : Bilan des prélèvements AEP sur le sous-système dit de la « Sainte Victoire Est »

Nota : sur l'illustration précédente, les données « prélèvements » sont issus de l'Agence de l'Eau RM&C.

⁶ = 184-[71+32]= 81 km²

3.4. FONCTIONNEMENT DES PUIITS DE L'ARC / GARDENIA

3.4.1. Schéma conceptuel de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement hydrogéologique des Puits de l'Arc

Bien que les puits soient localisés dans les calcaires du Fuvélien, de nombreux indices géochimiques permettent de montrer que les eaux proviennent de l'aquifère jurassique sous-jacent (Durozoy 1978, BRGM 78SGN648PCA ; Moulin et Ladouche 2006, BRGM/RP-55762-FR). Les suivis géochimiques réalisés au cours de l'opération de pompage de 2014 (Bailly-Comte et al., 2015, BRGM/RP-64610-FR) permettent de confirmer ces résultats.

Les Puits de l'Arc constituent aujourd'hui une émergence d'un système karstique captif développé dans les formations fuvélo-jurassiques. L'exutoire principal de ce système karstique, s'il existe, est inconnu. L'émergence créée artificiellement par les Puits de l'Arc ne constitue qu'un regard partiel sur le système karstique fuvélo-jurassique.

Les Puits de l'Arc constituent ainsi l'exutoire temporaire d'un sous-système karstique dont la zone d'alimentation est mal connue. Les mesures réalisées aux puits de l'Arc ne permettent donc pas de qualifier l'ensemble du fonctionnement hydrogéologique de la masse d'eau car un flux profond d'origine jurassique contribue notamment à l'alimentation des mines de Gardanne (Cf. illustration 31).

Le **schéma adopté pour la modélisation du système fuvélo-jurassique à l'aide du logiciel Gardenia** est présenté sur l'illustration 44.

Le modèle hydrologique global simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées décrites par un écoulement à travers une succession de 3 réservoirs :

- **le premier réservoir** (nommé U sur Illustration 44) symbolise les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration,
- **le second réservoir** (nommé H sur Illustration 44) symbolise une zone intermédiaire (zone non saturée) qui produit un écoulement rapide et un flux de recharge vers
- un **troisième réservoir** (nommé G1 sur Illustration 44), l'aquifère, qui produit l'écoulement lent. Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par des paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc).

Dans cette étude, le troisième réservoir est caractérisé par 2 exutoires séparés par un seuil, le premier exutoire permet de représenter le fonctionnement des puits de l'Arc, le second exutoire permet de caractériser les flux profonds qui échappent à la station de mesure du puits de l'Arc. Dans ce schéma de modélisation, il s'agit donc d'un débit de « fuite ».

Le modèle permet de prendre en compte l'effet des débits de pompage sur la mesure piézométrique. Le calage du modèle est réalisé en considérant simultanément les données de débits de trop plein mesurés et la piézométrie du puits. Les calculs sont réalisés au pas de temps journalier.

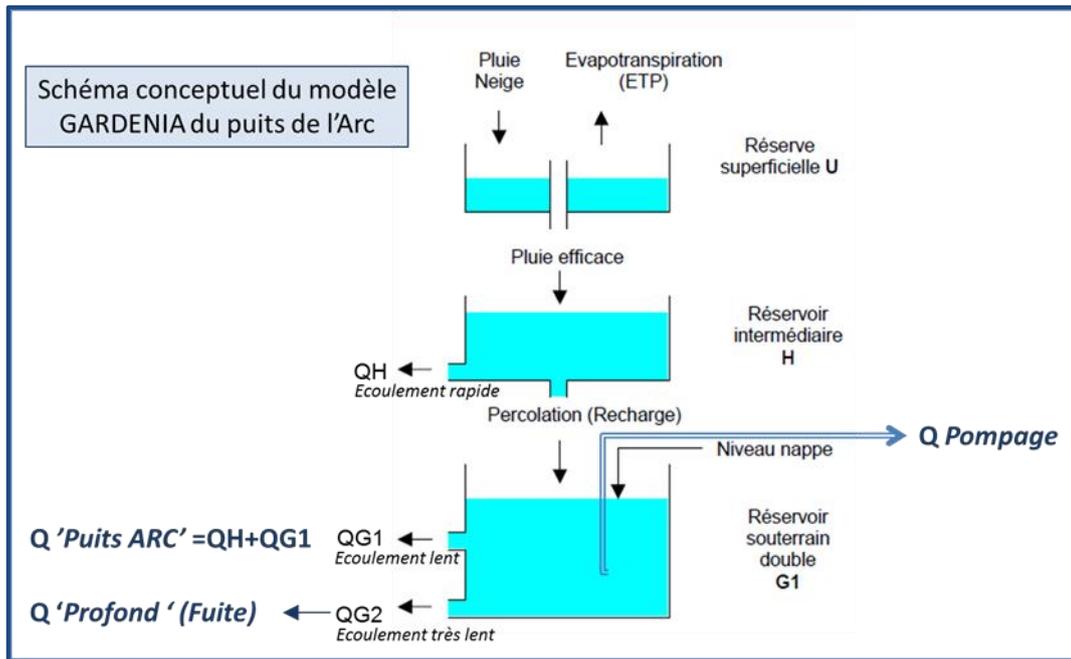


Illustration 44 : Schéma de modélisation adopté pour décrire le fonctionnement du système fuvélo-jurassique à l'aide des chroniques du puits de l'Arc

3.4.2. Stratégie de calibration

Le calage du modèle a été effectué en considérant la chronique de débit de débordement des puits de l'Arc et la piézométrie mesurée dans les puits. Dans le but de limiter les paramètres, il a été supposé que la fonction de production de la pluie efficace était identique à celle du modèle de la source de l'Argens afin de conserver la même pluie efficace. Le paramètre $R_{sup-Prog}$ a donc été imposé à 281.49 mm (cf. Illustration 40). Nous avons imposé la surface du modèle à 95 km², valeur précédemment estimée par bilan (cf. 3.3.5).

Cette surface de 95 km² représente la portion de surface jurassique du sous-système dit de la « Sainte Victoire Est » qui contribue à alimenter les calcaires jurassiques situés sous couverture dans le bassin de l'Arc. Le coefficient d'emmagasinement global du système fuvélo-jurassique a été fixé à 0.0005, valeur identique à celle déduite par l'interprétation de l'essai de pompage (cf. § 2.2.2 modélisation hydrogéologique) et comparable à celle déterminée par le modèle de la source de l'Argens ($S=0.00052$) pour décrire le fonctionnement de l'aquifère du jurassique.

La valeur du coefficient R_{ui_Per} (paramètre de répartition Ruissellement-Percolation) a été imposée à sa valeur maximale (9999) ce qui revient à supposer que la totalité de la pluie efficace précipitée sur l'impluvium considérée contribue à la recharge du jurassique situé sous couverture. Dans ce contexte, on fait l'hypothèse⁷ qu'aucun débordement du karst autre que celui du puits de l'Arc ne peut se produire au sein du système.

Cette hypothèse apparaît néanmoins peu vraisemblable car il est indiqué que le Gour de la Tune et la source de la Meyronne pourraient constituer un trop plein du système jurassique notamment lors des périodes de hautes eaux (Durozoy 1972).

⁷ Cette hypothèse est due au fait que les flux des sources Gour-de-Tune et Meyronne ne sont pas connus. Cette simplification maximise certes le flux de recharge mais c'est le seul moyen de procéder en l'absence des flux au niveau des sources. Seule une qualification du flux des sources permettra à l'avenir d'être plus précis.

Les paramètres du modèle Gardénia pour calculer la piézométrie et le débit de surverse sont au nombre de 8 :

- T1/2-Perco : Temps de demi-percolation du réservoir H : en mois,
- T1/2-Tari G1 : Temps de demi-tarissement de l'écoulement lent du réservoir G : en mois,
- Seuil répartition du réservoir souterrain G1. QG1=0 si le niveau du réservoir est inférieur au seuil
- T1/2-Tari G2 : Temps de demi-tarissement de l'écoulement très lent du réservoir G : en mois,
- Niv_Base : Ce paramètre correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en absence de recharge.
- F_Pom_Nap : Coefficient d'influence du pompage sur les niveaux de nappe. Il caractérise l'amplitude de l'influence du pompage sur le niveau de la nappe
- Tr_Pom_Nap : Temps de ½ réaction du niveau de la nappe au pompage. C'est le temps qui caractérise la vitesse de réaction du niveau de la nappe à une variation de débit de pompage.
- Ts_Pom_Nap : Temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le niveau de la nappe. C'est le temps qui caractérise la vitesse de stabilisation de l'influence d'une « échelons » de variation de pompage

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit de surverse et le niveau piézométrique mesuré au puits en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (\alpha \times F_{\text{Débit}}) + (1-\alpha \times F_{\text{Niveau}})$$

en retenant comme critères de performance pour F_Débit et F_Niveau respectivement le coefficient de Nash sur la racine carré des débits Nash $Q^{0.5}$ et sur la racine carré de la piézométrie Nash $h^{0.5}$.

3.4.3. Données utilisées pour la modélisation du puits de l'Arc

c) Données de pluie et d'ETP

Les données journalières de précipitations et d'évapotranspiration potentielle sont identiques à celles utilisées pour décrire le fonctionnement de la source d'Argens (cf. § 3.3.3).

d) Données de piézométrie

Les données de piézométrie sont les suivantes :

- Période 1970-1993 : données H.B.C.M⁸ issues de la synthèse réalisée par Antéa en 1994 (cf. rapport A01764-AR/PAC94), mesures à pas de temps variables (jour, hebdomadaire, ou décadaire voire mensuel, avec lacunes) ;
- Période 1994-1996 : mesures journalières lors de l'essai de pompage de 1994, puis mensuelles (numérisation de la chronique présentée dans la note technique JC/JF N°182/96 (H.B.C.M) ;
- Période 2005-2013 : données journalières issues de base de données de la SCP ;
- 2014 : données acquises (moyenne journalière) dans le cadre du projet ARK (la présente étude).

L'évolution de la piézométrie mesurée est présentée sur l'illustration 45 B.

e) Données de débit de pompage

Les données de débit de pompage au puits de l'Arc sont les suivantes :

- Période 1970-1993 : données H.B.C.M issues de la synthèse réalisée par ANTEA en 1994 (cf. rapport A01764-AR/PAC94), mesures à pas de temps variables (jour, hebdomadaire, ou décadaire voire mensuel, avec lacunes. Il s'agit du cumul des débits pompés pour le H.B.C.M et des débits pompés pour l'AEP (compris entre 7 m³/h et 44 m³/h) ;
- Période 1994-1996 : débit journaliers lors de l'essai de pompage de 1994, puis débit moyen mensuel (numérisation de la chronique présentée dans la note technique JC/JF N°182/96 (H.B.C.M)) ;
- Période 1996-2005 : lacune de données. Pour les besoins de la modélisation, le débit moyen de pompage a été estimé à 400 l/s ;
- Période 2005-2013 : données journalières issues de basse de données de la SCP. Il s'agit du cumul des débits pompés pour la centrale thermique et des débits pompés pour l'AEP ;

L'évolution des débits de pompage est présentée sur l'illustration 45 (section C).

f) Données de débit de surverse

Les données de débit de surverse du puits de l'Arc en période de hautes eaux sont les suivantes :

- Période 1970-1993 : données H.B.C.M issues de la synthèse réalisée par ANTEA en 1994 (cf. rapport A01764-AR/PAC94), jaugeages ponctuels. Les données de hauteur d'eau mesurées ponctuellement dans le canal ont été également converties en débit à l'aide de l'ancienne courbe de tarage (antérieur à 2014) fourni par le SCP ;
- Période juillet 2011-mai 2014 : chronique journalière définie à partir des données de hauteur d'eau mesurées par la SCP. Les hauteurs d'eau ont été converties en débit après correction d'un offset de 18 cm (cf. annexe) sur la chronique de niveau d'eau (calculs réalisés à l'aide de l'ancienne courbe de tarage établie antérieurement à 2014) ;
- Période mai 2014-décembre 2014 : chronique journalière définie à partir des données de hauteur d'eau mesurées par la SCP. Les hauteurs d'eau ont été converties en débit à l'aide de la courbe de tarage du nouveau seuil réalisé dans le cadre du projet.

⁸ H.B.C.M. : Houillère du Bassin du Centre et du Midi (Unité d'exploitation Provence)

L'évolution des débits de surverse du puits de l'Arc en période de hautes eaux est présentée sur l'illustration 45 (section A).

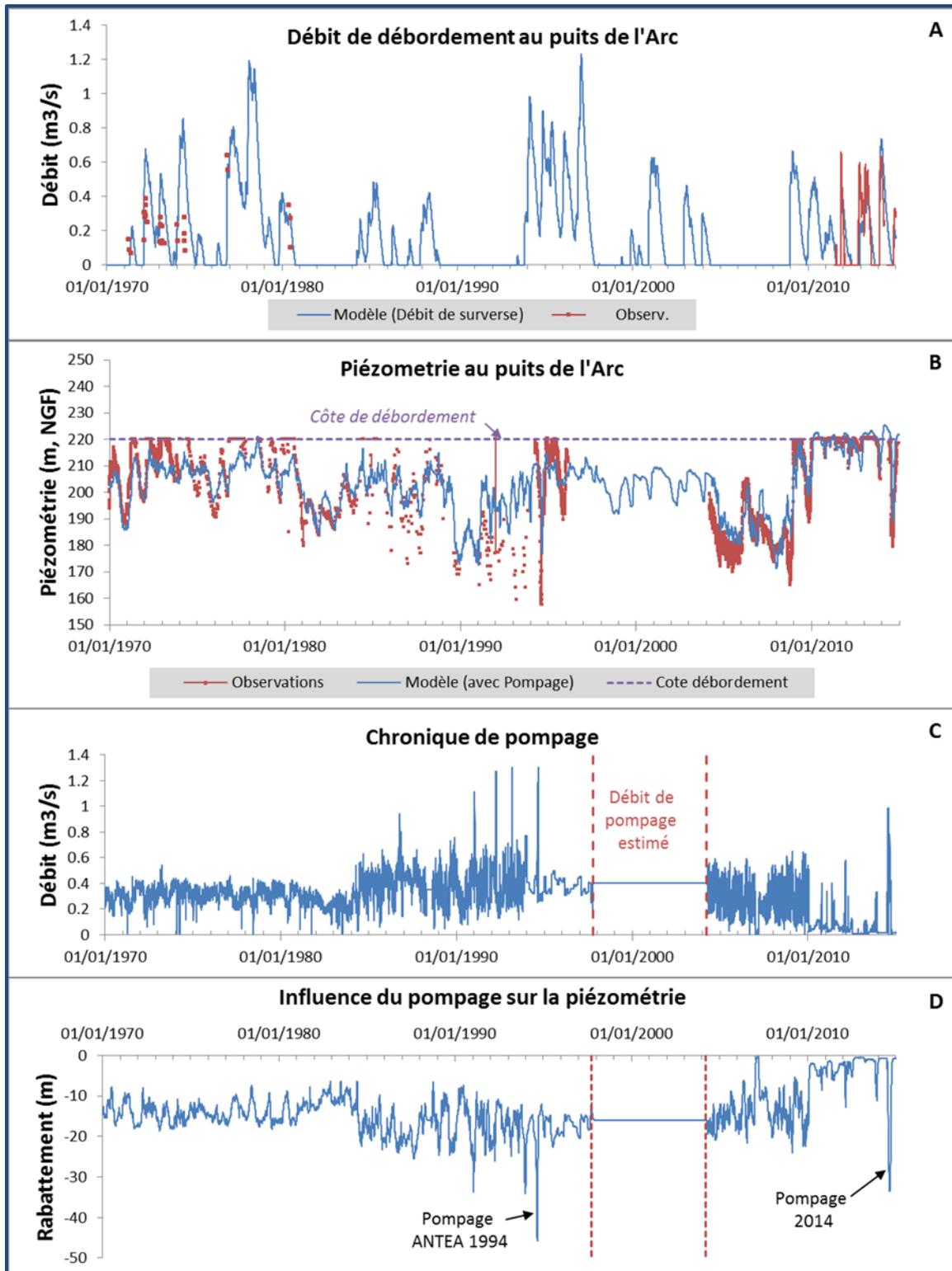


Illustration 45 : Evolution du débit de débordement (A) et de la piézométrie (B) calculés par le modèle GARDENIA en considérant la chronique de pompage (C). L'influence des pompages sur la piézométrie est également reportée (D).

3.4.4. Examen des résultats du modèle du puits de l'Arc

La modélisation du fonctionnement hydrogéologique du système fuvélo-jurassique décrite au puits de l'Arc a été réalisée sur la période 1970-2014.

Les résultats de modélisation sont présentés sur l'illustration 45. Le critère de Nash sur les débits est de 0.66, l'allure du débit de surverse simulé est jugé satisfaisante, de même pour la piézométrie (Nash = 0.79). Le coefficient de Nash global sur la période 1970-2014 est de 0.72, ce qui permet une discussion des résultats.

Le modèle a tendance à surestimer la piézométrie en période de hautes eaux lorsque la charge est supérieure à la cote de débordement (220.6 m NGF). La piézométrie simulée sur la période 1990-1994 est mal reproduite, ce qui pourrait être dû à une sous-estimation des débits de prélèvements ou à des mesures piézométriques erronées. L'évolution piézométrique observée lors des essais de pompage de 1994 (ANTEA) et de 2014 (cette étude) apparaît bien reproduite. En 2014, le pompage a provoqué près de 30 m de rabattement au puits de l'Arc. Les débits de débordement apparaissent globalement bien reproduits.

Les paramètres du modèle obtenu par calage automatique sont rassemblés dans le tableau de l'illustration 46.

Le temps de demi percolation (T1/2_Perco) est lent (3.9 mois) ce qui dénote que le transfert de la recharge en direction de la zone noyée de l'aquifère est assez lent probablement en raison de l'importance de la zone non saturée du karst jurassique. La réponse maximale de la composante d'écoulement (Q_G1) qui alimente le puits de l'Arc en période de crue se produit autour de 15 jours après le débit d'un épisode de recharge (Cf. illustration 47).

Le temps de demi-tarissement (T1/2_Tari) de l'écoulement (Q_G1) qui alimente le puits de l'Arc est de 0.1 mois ce qui témoigne d'une décroissance assez rapide du débit de débordement en absence de recharge. L'écoulement Q_G1 cesse lorsque le niveau dans le réservoir G1 devient inférieur au seuil de répartition (20.1 mm, Illustration 48).

Le temps de demi réaction de l'influence des pompages sur les niveaux d'eau du puits (Tr_Pomp_Nap) est très faible (<1 jour) ce qui traduit les effets liés aux pertes de charges quadratiques. Le temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage est également très court (<1 jour) suivant les variations de pompage.

La composante de l'écoulement QG2 (débit de fuite) qui n'est pas contrôlée par le débit de surverse du puits de l'Arc est caractérisée par un coefficient de demi-tarissement (T1/2_Tari) de 1.2 mois ce qui dénoterait l'inertie de la composante profonde du système fluvélo-jurassique. L'évolution temporelle des flux profonds calculés par le modèle est reportée sur l'illustration 48C. Les débits de « fuite » non contrôlés par la station du puits de l'Arc seraient compris entre 0.12 m³/s et 0.38 m³/s selon l'importance de la recharge (0.3 m³/s en moyenne). Des éléments de statistiques complémentaires sur les composantes de l'écoulement du modèle (QG1 et QG2) sont présentés en annexe 9.

Le modèle Gardenia, bien que présentant des résultats intéressants, comme présentés ci-dessus, ne permet pas le calcul d'un bilan hydrogéologique correct car il néglige l'effet des pompages par rapport aux autres termes du bilan. Cette hypothèse n'est pas valide pour notre cas d'étude en raison de l'importance des pompages. C'est sur la base de ce constat qu'une approche de modélisation complémentaire a été mise en œuvre (Cf. chapitre modélisation) dans le but de préciser les différents termes du bilan hydrogéologique.

Nom	Bassin Puits Arc			Descriptif
Superficie	km2	95.00	Fixé	C'est la superficie du bassin alimentation. Cette superficie est généralement connue. Dans certain cas, cette superficie est inconnue ou mal connue, à savoir : bassin d'alimentation d'une source; exutoire ne contrôlant qu'une partie du bassin versant. Dans ces cas l'optimisation par calage est conseillée.
Coef_Emmag	-	5.00E-04	Fixé	Coefficient d'emménagement équivalent de la nappe. C'est le coefficient d'emménagement apparent global de la nappe
Niv_Base	m	181.67	calage automatique	Niveau de base locale de la nappe. Ce paramètre correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en absence de recharge
Rsup_Progr	mm	286.56	Fixé	Capacité de la réserve superficielle progressive. Dans ce réservoir superficiel, l'évaporation réelle et la production de pluie efficace suivent des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de cette réserve.
Rui_Perco	mm	9999.00	Fixé	C'est la hauteur du réservoir H conduisant à une égale répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et percolation (recharge) alimentant l'écoulement lent
T1/2_Perco	mois	3.913	calage automatique	Temps de ½ percolation. C'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement (une réponse) de la composante lente du débit.
T1/2_Taris1	mois	0.10	calage automatique	Temps de ½ tarissement souterrain de l'écoulement lent. C'est le temps au bout duquel, en absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par 2.
Seuil_repartition	mm	19.81	calage automatique	Seuil de répartition du réservoir souterrain G1. QG1=0 si le niveau du réservoir est inférieur au seuil
T1/2_Taris2		1.21	calage automatique	Temps de ½ tarissement souterrain de l'écoulement très lent. C'est le temps au bout duquel, en absence de recharge, le débit de la composante très lente est divisé par 2.
F_Pom_Nap	-	-45.58	calage automatique	Coefficient d'influence du pompage sur les niveaux de nappe. Il caractérise l'amplitude de l'influence sur le niveau de la nappe
Tr_Pom_Nap	mois	2.54E-01	calage automatique	Temps de ½ réaction du niveau de la nappe au pompage. C'est le temps qui caractérise la vitesse de réaction du niveau de la nappe à une variation de débit de pompage.
Ts_Pom_Nap	mois	3.28E-03	calage automatique	Temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le niveau de la nappe. C'est le temps qui caractérise la vitesse de stabilisation de l'influence d'une « échelons » de variation de pompage

Illustration 46 : Paramètres du modèle Gardenia du puits de l'Arc.

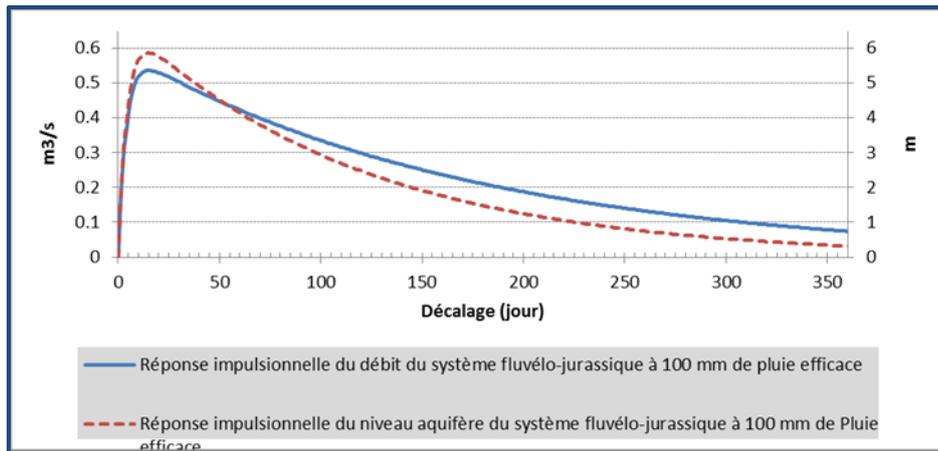


Illustration 47 : Réponses impulsionnelles du débit et de la piézométrie à 100 mm de pluie efficace.

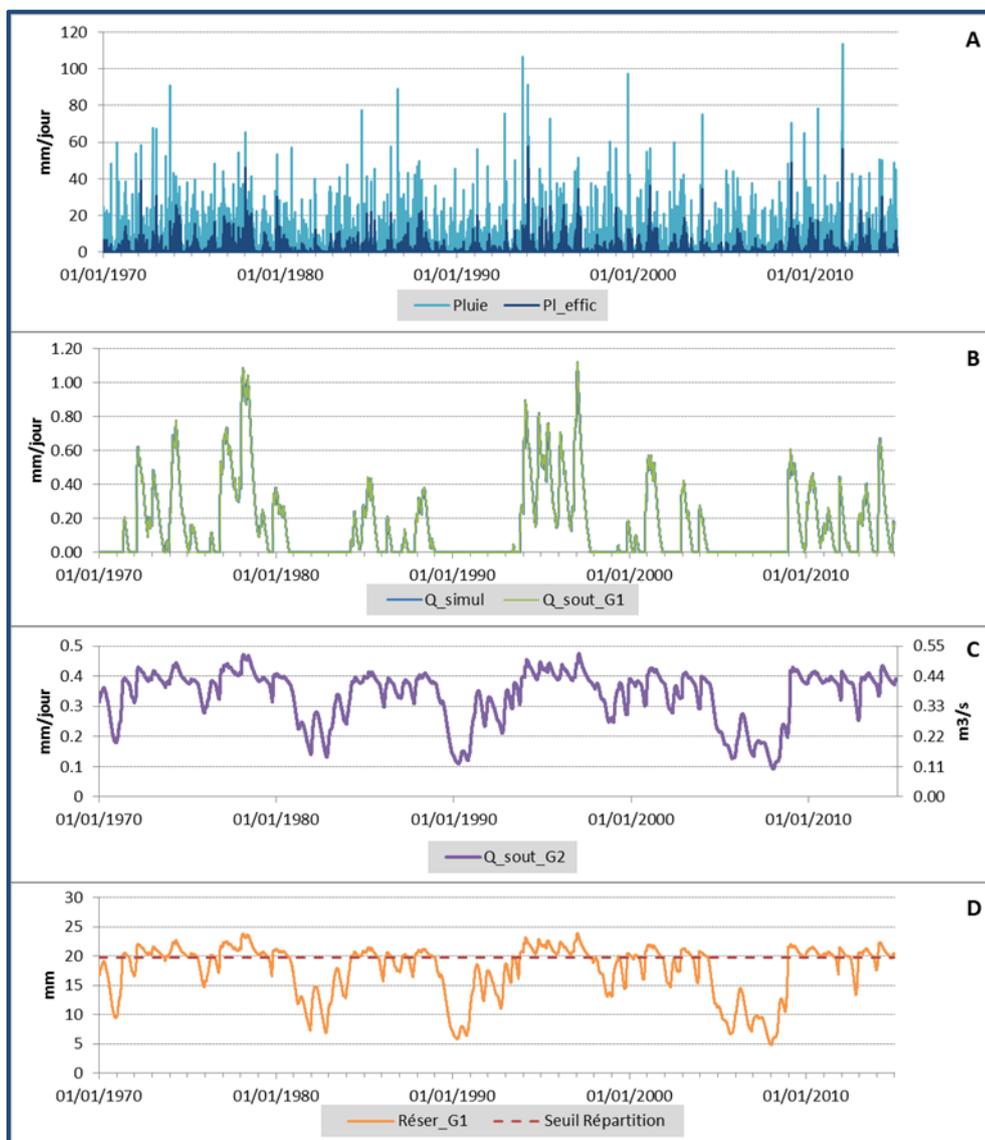


Illustration 48 : Evolution des flux (journaliers) de pluie et de pluie efficace (A) et des composantes de l'écoulement calculées par le modèle GARDENIA (B et C). L'évolution temporelle du réservoir G1 est reportée (D).

3.4.5. Confrontation des résultats des composantes QG1 et QG2 du modèle au débit d'exhaure du puits Gérard de la mine de Gardanne.

Les variations du débit d'exhaure au poste de relevage -250 m sont directement à mettre en relation avec les débits des différentes venues d'eau rencontrées dans la mine de Gardanne au cours de son exploitation. A la fin des années 1990, des suivis de débits et de qualité des principales arrivées d'eau ont été réalisés par Chalumeau (2000).

D'après Chalumeau (2000), les principales venues d'eau de la mine de Gardanne aux points dit « sources 90 et sources Sainte Victoire » (Cf. Figure A7- 3 en Annexe 7) présentent un faciès chimique comparable aux eaux du puits de l'Arc et seraient donc d'origine jurassique et contribueraient pour 75 % au débit total de l'exhaure du poste de relevage -250 du puits Gérard. D'un point de vue conceptuel, ces débits pourraient constituer l'un des débits de fuite du système fluvélo-jurassique qualifié par les puits de l'Arc.

L'évolution temporelle du débit moyen mensuel de l'exhaure -250 du puits Gérard sur la période 1982-2002 est présentée sur l'illustration 49 ci-après. Dans le but d'établir une comparaison des dynamiques mensuelles, les évolutions temporelles des flux QG1 et QG2 calculées par le modèle ont été également reportées.

Ces évolutions temporelles montrent que la composante très lente du modèle (QG2, débit de fuite du modèle du puits de l'Arc, cf. Illustration 44) est trop inertielle et ne permet pas de reproduire à elle seule la dynamique du débit de l'exhaure -250.

A l'inverse, la dynamique de la composante QG1 du modèle (cf. Illustration 44) permettrait de reproduire les débits de l'exhaure -250 mesurés lors des cycles excédentaires en précipitation (1994, 1995 et 1996 notamment), mais pas celles mesurées en dehors de ces périodes.

Ces résultats illustrent que pour reproduire les évolutions des débits de l'exhaure -250, il faudrait considérer les 2 dynamiques de l'écoulement qualifiées par la modélisation au puits de l'Arc.

Nota :

Le projet ARK a cherché à mieux caractériser la relation hydraulique entre la mine de Gardanne et les puits de l'Arc. Le modèle Gardania n'a pas permis de représenter de manière pertinente les bilans. Cependant l'existence de deux composantes rapide et lente est confirmée.

On peut conclure que les compartiments aquifères des puits de l'ARC et de Gardanne sont distincts mais qu'il y a un flux depuis le secteur des puits de l'Arc vers le secteur de Gardanne et que l'arrêt des pompes à Gardanne n'a pas d'incidence directe sur le comportement aquifère du secteur de l'Arc.

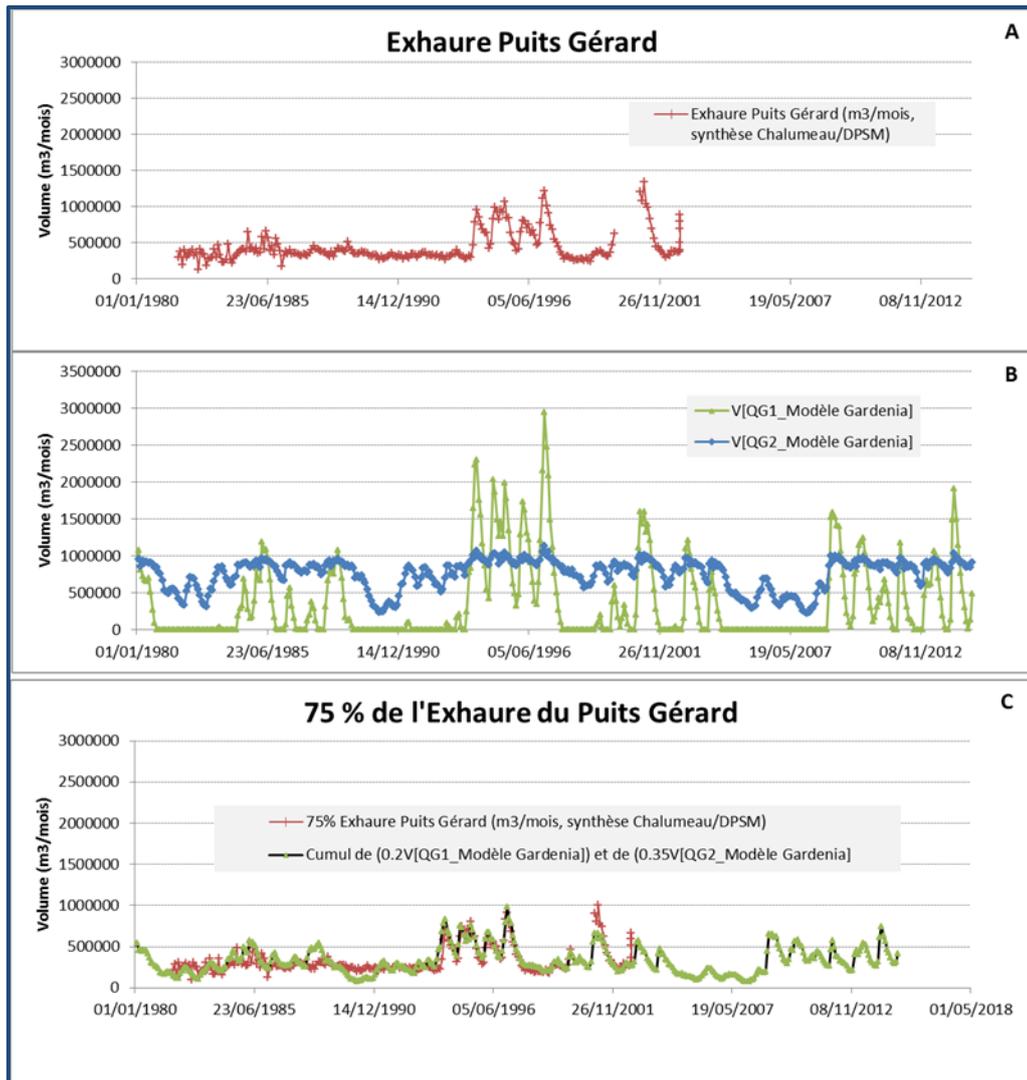


Illustration 49 : Modélisation (Gardenia) de l'évolution des débits pompés au puits Gérard.

Nota : Sur l'illustration précédente, (A) = Evolution du volume mensuel de l'exhaure -250 = (Poste de relevage du Puits Gérard, période 1981 à 1999, mine de Gardanne). (B) = Evolution du volume mensuel des 2 composantes de l'écoulement (QQ1 et QG2) calculé par le modèle Gardénia du puits de l'Arc. (C) = Evolution de la part d'eau du puits Gérard issue du Jurassique selon Chalumeau (2000). Une combinaison linéaire des flux d'eau calculés par le modèle Gardenia du puits de l'Arc permet de reproduire l'évolution des débits pompés au puits Gérard.

3.4.6. Synthèse et discussion de l'approche de modélisation Gardenia

Les exutoires connus des calcaires jurassiques de l'entité dit de la « Sainte Victoire Est » - PAC07A2 (184 km²) - sont les sources de l'Argens et de Seaux et, en période de crue, les sources de trop plein de la Meyronne et du Gour de la Tune. Il est supposé par les auteurs qu'une partie de la recharge contribue également à l'alimentation de l'aquifère fuvélo-jurassique situé sous couverture du bassin de l'Arc.

L'étude du fonctionnement hydrogéologique de la source de l'Argens à l'aide de l'approche de modélisation globale (logiciel GARDENIA) a permis d'une part, de qualifier le fonctionnement hydrogéologique du système karstique développé au sein du jurassique et d'autre part, de réévaluer le bilan hydrogéologique au sein de l'entité dit de la « Sainte Victoire Est » (184 km² environ).

En considérant la pluie efficace moyenne de 180 mm/an évaluée par modélisation, la surface des impluviums des sources de l'Argens et de Seaux a été évaluée à 71 km² et 32 km², respectivement. L'emprise de l'impluvium où se produit la recharge du Jurassique qui contribue à l'alimentation du fuvélo-jurassique du bassin d'Aix Gardanne est estimée à 95 km² environ⁹, sachant que l'on prend en compte la contribution du jurassique du massif de Regagnas qui fait partie intégrante de l'impluvium (14 km²).

L'étude du fonctionnement hydrogéologique des puits de l'Arc a permis de faire avancer la connaissance sur la dynamique de fonctionnement du Jurassique sous couverture crétacée. Bien que les puits soient localisés dans les calcaires du Fuvélien, de nombreux indices géochimiques permettent de montrer que les eaux proviennent de l'aquifère Jurassique sous-jacent (Durozoy 1978, BRGM 78SGN648PCA ; Moulin et Ladouche 2006, BRGM/RP-55762-FR; Bailly-Comte et al., 2015, BRGM/RP-64610-FR). Les Puits de l'Arc constituent aujourd'hui une émergence artificielle de l'aquifère karstique jurassique captif développé dans les formations Fuvélo-Bégudienne.

L'exutoire principal de ce système karstique, s'il existe, est inconnu. L'émergence créée artificiellement par les puits de l'Arc ne constitue qu'un regard partiel sur le système karstique jurassique.

Les mesures du débit de surverse et de piézométrie réalisées aux puits de l'Arc depuis 1970 ont permis d'envisager la modélisation du fonctionnement hydrogéologique de la masse d'eau à l'aide du modèle réservoir (logiciel GARDENIA).

Les résultats jugés satisfaisants permettent de préciser les dynamiques de fonctionnement des composantes de l'écoulement des puits de l'Arc et ont également permis de reproduire les évolutions temporelles des débits d'exhaure -250 de la mine de Gardanne.

Cependant, la synthèse des différents résultats obtenus dans cette étude ne permet pas l'établissement d'un bilan hydrogéologique des calcaires fuvélo-jurassiques situés sous couverture du bassin d'Aix Gardanne. En effet le modèle Gardénia suppose lors du calcul du bilan hydrogéologique que l'effet des pompages est négligeable par rapport aux autres termes du bilan. Cette hypothèse n'est pas valide pour notre cas d'étude en raison de l'importance des pompages aux puits de l'Arc.

C'est sur la base de ce constat qu'une approche de modélisation complémentaire a été mise en œuvre dans le but de préciser les différents termes du bilan hydrogéologique (Cf. chapitre suivant : modélisation).

3.5. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE

Le programme d'échantillonnage et d'analyses mis en œuvre dans cette étude a été précédemment détaillé dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR ainsi que les généralités sur les différentes approches chimiques et isotopiques utilisées. Les premières conclusions faisaient état du fait que la qualité physico-chimique des eaux des puits l'Arc présentait très peu de variation au cours de l'essai de pompage à fort débit (jusqu'à 1 100 l/s), comme le souligne par exemple l'évolution des teneurs en chlorure (Cf. Illustration 50).

⁹ 95 = 184-(71+32)+14

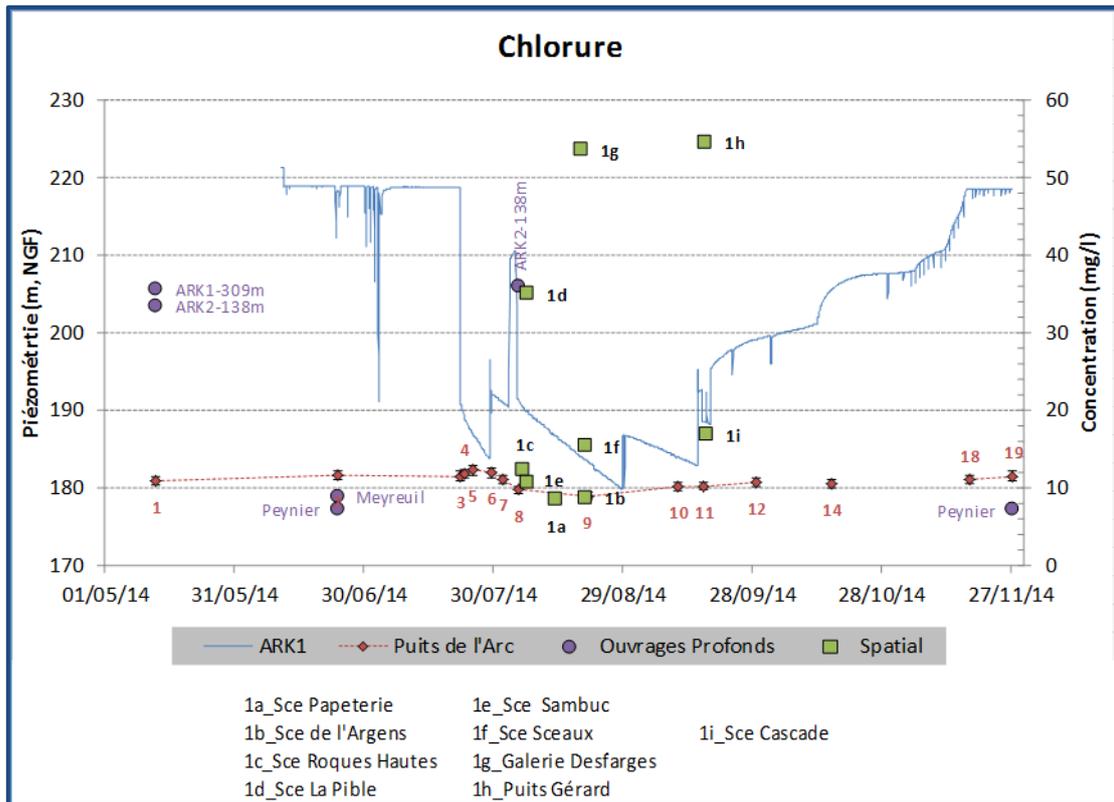


Illustration 50 : Evolution des teneurs en chlorure des eaux du puits de l'Arc et report des signatures chimiques mesurées dans les ouvrages profonds et les sources échantillonnées lors de la campagne spatiale.

Nota : Sur l'illustration précédente, l'évolution de la piézométrie mesurée sur ARK1 ou au puits de l'Arc est également reportée (courbe bleue). La localisation des sources échantillonnées est quant-à elle présentée par le rapport intermédiaire du projet (Réf. RP-64610-FR).

3.5.1. Informations apportées par le suivi chimique et isotopique

Les eaux des puits de l'Arc présentent un faciès bicarbonaté calcique, le cation dominant étant le calcium (Ca) et l'anion dominant les hydrogénocarbonates (HCO_3). Le faciès des eaux des puits de l'Arc est très comparable à celui du faciès des eaux jurassiques caractérisées, notamment, par les sources karstiques de l'Argens et de Roques Hautes. Les informations apportées par les isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) permettent de conforter ce résultat (Cf. Illustration 51) : les eaux des puits de l'Arc et du forage Peynier présentent une signature isotopique comprise entre celles des sources karstiques de l'Argens et de Roques Hautes ce qui témoigne que l'eau a interagi avec les calcaires du Jurassique.

En effet, la signature chimique et isotopique de l'ouvrage ARK1 (à proximité du puits de l'Arc), qui permet de qualifier la signature du réservoir matriciel du fuvélien, est très significativement différente de celle mesurée dans les ouvrages du puits de l'Arc et de Peynier. Les eaux de la matrice du fuvélien (ARK1) apparaissent nettement plus minéralisées que celles du puits de l'Arc (Cf. BRGM/RP-64610-FR) et présentent un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevé (0.70801), très significativement différent de ceux mesurés à Peynier et au puits de l'Arc ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70791$).

Si l'on adopte la représentation conceptuelle « Drain-Matrice » pour décrire le fonctionnement du réservoir fuvélien sous-couverture capté par les puits de l'Arc, ces résultats pourraient indiquer que les drains et/ou réseaux de fissures du Fuvélien sont bien connectés à l'aquifère jurassique sous-jacent et que par ailleurs, l'aquifère du Jurassique impose ou contrôle la signature du réservoir Fuvélien qui a été sollicité par le pompage.

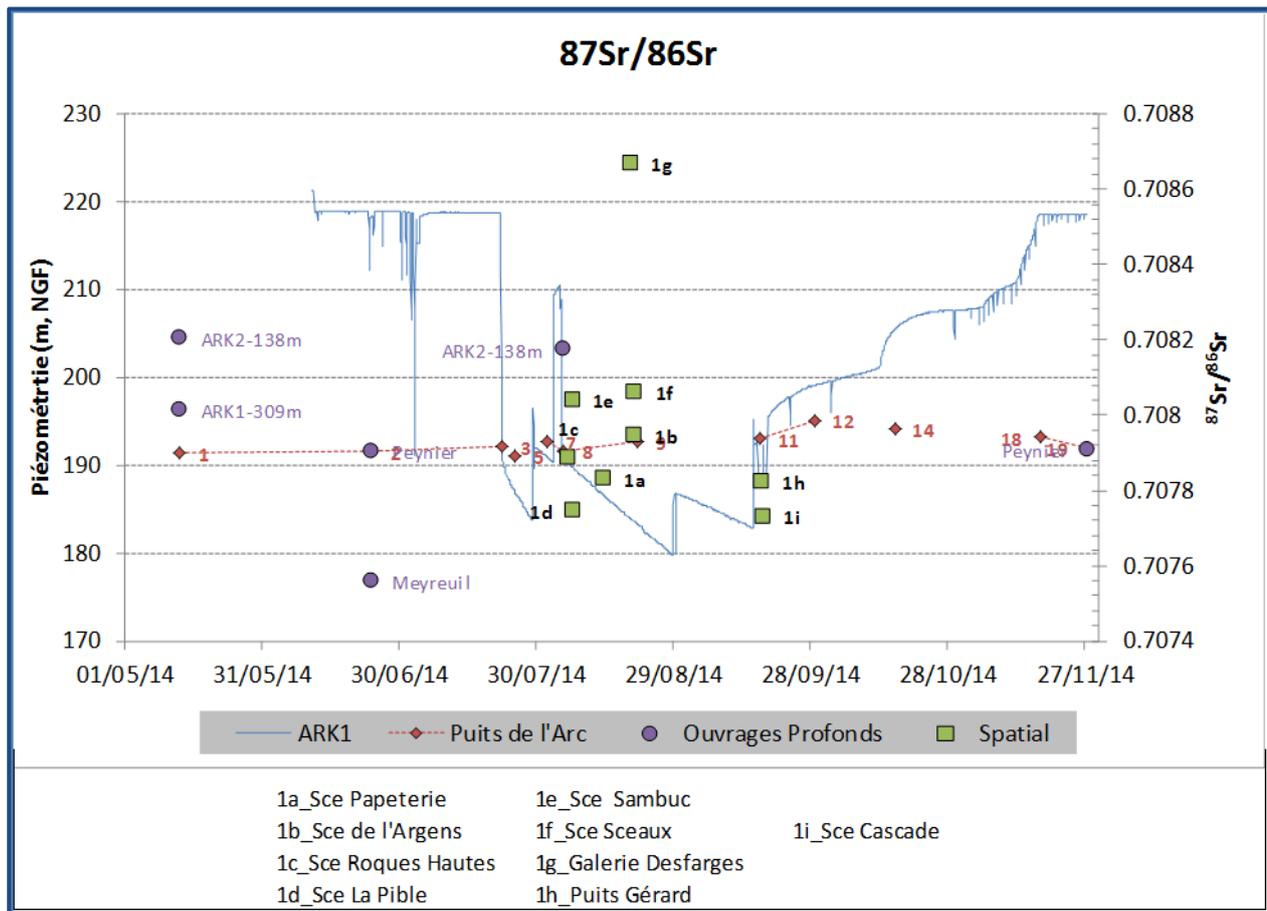


Illustration 51 : Evolution des rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des eaux des puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les ouvrages profonds et les sources échantillonnées lors de la campagne spatiale.

Nota : Sur l'illustration précédente, l'évolution de la piézométrie mesurée au puits de l'Arc est également reportée (courbe bleue).

L'examen détaillé des évolutions isotopiques (Cf. Illustration 52) au cours du pompage semble indiquer que les eaux de la matrice du Fuvélien (qualifiée par ARK1-309 m) ont contribué très tardivement et principalement lors de la phase de remontée (échantillons 12, 14 et 18).

Au cours des premiers jours de pompage (échantillons 3 à 9), les eaux mobilisées par le pompage apparaissent issues des drains et fissures du réservoir fuvélien (réseaux/drains envahis par de l'eau du Jurassique sous-jacent) en raison de l'absence de variation significative du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Par ailleurs, les zones (secteurs) mobilisées apparaissent différentes de celle de Peynier puisque la signature isotopique de l'eau semble s'enrichir très légèrement en oxygène 18 (compte tenu des incertitudes analytiques sur l'oxygène 18 ($\pm 0.1\text{‰}$) les variations mesurées sont toutefois jugées peu significatives).

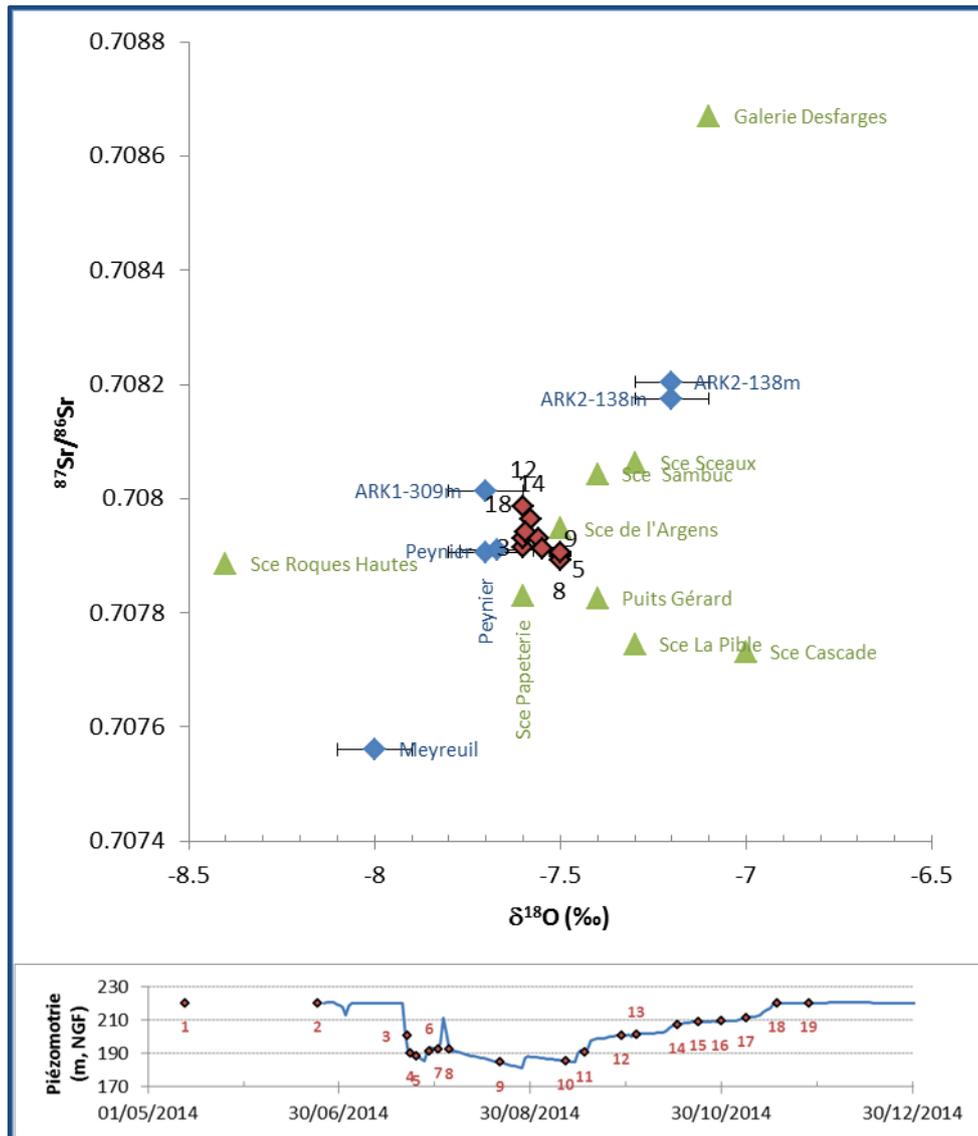


Illustration 52 : Evolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$).

Nota : Sur l'illustration précédente, l'évolution de la piézométrie mesurée au puits de l'Arc ainsi que les dates des échantillonnages sont également reportés. En annexe, les résultats de cette étude sont également replacés dans le cadre géochimique plus large défini par Moulin et al. 2006 (rapport BRGM/RP55762-FR).

Les signatures des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) mesurées dans cette étude sont celles d'eaux d'origine météorique pour tous les échantillons prélevés au cours de la campagne spatiale et au cours du pompage au puits de l'Arc.

Dans le rapport intermédiaire (BRGM/RP-64610-FR), il a été montré que les eaux des puits de l'Arc apparaissent appauvries en isotopes lourds par rapport aux signatures isotopiques des pluies échantillonnées par Chalumeau (2000) sur le secteur d'étude Gardanne-Fuveau, ce qui témoigne d'une infiltration/recharge à des altitudes plus élevées.

La signature des puits de l'Arc mesurée en 2014 apparaît identique à celle mesurée en 2006 (Moulin et al., rapport BRGM/RP55762-FR) et en 1979 par Vernet (1980). La signature isotopique ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) des puits de l'Arc apparaît comparable à celles mesurées aux sources karstiques de la Papeterie et de l'Argens.

Pour le puits de l'Arc, l'altitude moyenne de recharge a été estimée à 500 m ±140 m (cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR), ce qui, compte-tenu des altitudes, impose de délimiter la zone de recharge au nord-nord-est sur les calcaires jurassiques affleurants du massif de la Sainte-Victoire.

Ces résultats confortent une fois de plus le rôle joué par le Jurassique dans l'alimentation du réservoir du Fuvélien caractérisé par les ouvrages du puits de l'Arc et de Peynier. L'absence de variation de la signature isotopique à différentes dates (1980, 2006, 2014) et la quasi absence de variations de minéralisation mesurée aux puits de l'Arc suggèrent par ailleurs, l'existence d'un important réservoir présentant un temps de régulation élevé qui permet de lisser les variations saisonnières et interannuelles de la signature isotopique (et chimique) des eaux de recharge.

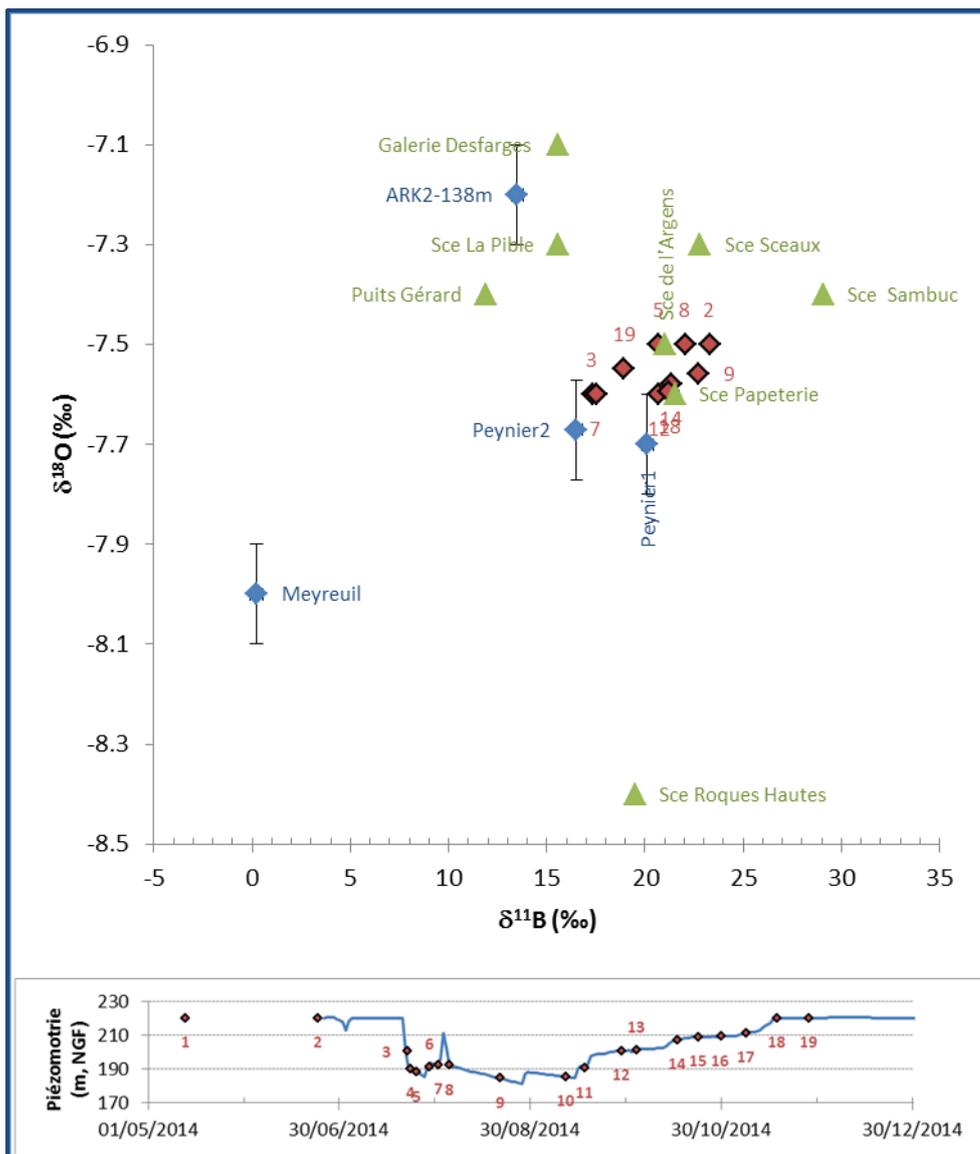


Illustration 53 : Evolution de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) en fonction de la signature isotopique du bore ($\delta^{11}\text{B}$).

Les isotopes du bore permettent également de montrer que l'eau des puits de l'Arc mobilisée pendant le pompage provient du réservoir fuvélien et que ce dernier est alimenté par des eaux jurassiques du type de celles échantillonnées aux sources de l'Argens, de Seaux/Sambuc (Cf. Illustration 53).

Dans l'illustration 54 les signatures isotopiques du lithium des eaux du puits de l'Arc ($\delta^7\text{Li}= 12 \text{ ‰}$) sont intermédiaires à celles mesurées dans les sources karstiques (Seaux/Sambuc/Argens ; $\delta^7\text{Li}= 18 \text{ ‰}$ environ) et dans le forage Peynier ($\delta^7\text{Li}= 6 \text{ ‰}$). La différence de signature isotopique du lithium entre les puits de l'Arc et Peynier traduit l'importance du temps d'interaction avec la roche, les valeurs plus appauvries de Peynier s'expliquant par un temps d'interaction plus important, ce qui dénote globalement l'existence d'eaux plus vieilles pour ce point, comme on le verra dans les § 3.5.2 et 3.5.3.

Enfin pour terminer l'éclairage sur les isotopes stables, rappelons que la signature isotopique des sulfates ($\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{sulfate}}$) du puits de l'Arc ($\text{SO}_4 < 20 \text{ mg/l}$) et du forage Peynier apparaît être expliqué à la fois par la pluie et par l'oxydation des sulfures sédimentaires, ce qui traduit une origine mixte pour les sulfates des eaux (cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR).

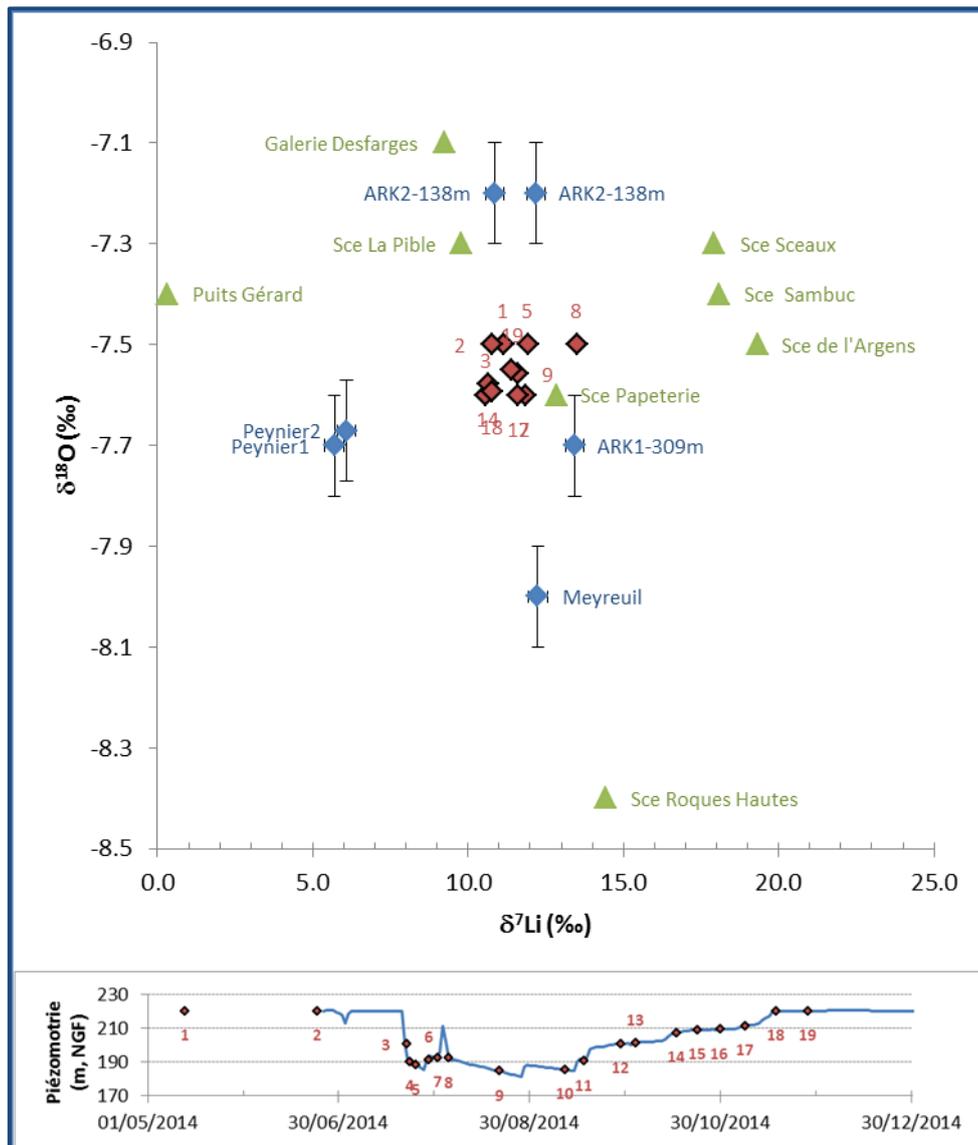


Illustration 54 : Evolution de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) en fonction de la signature isotopique du lithium ($\delta^7\text{Li}$).

3.5.2. Informations apportées par la datation des eaux à partir des Gaz dissous (CFC et SF₆)

L'approche méthodologique de la datation par les gaz dissous (CFCs/SF₆) a été présentée dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR. Brièvement rappelée ci-après, la méthode se base sur la mesure des gaz dissous contenus dans l'eau à l'état de trace : les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (trichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) ainsi que le SF₆ (hexafluorure de soufre). Les gaz CFC ont été produits industriellement à partir des années 1930, avec une large utilisation dans les années 1950 à 1960 avant d'être interdits en 1987 (accords du protocole de Montréal) car les CFC sont en effet des gaz destructeurs de la couche d'ozone.

Les CFC étaient utilisés dans les fluides réfrigérants et les solvants tandis que le SF₆ est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. La production industrielle du SF₆ a débuté en 1953. Le SF₆ est principalement d'origine anthropique mais, contrairement aux CFC, il existe également une production géogénique de ce gaz, estimé à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport plus important.

L'analyse des gaz dissous (CFC et SF₆) dans les eaux souterraines permet donc de dater des eaux relativement jeunes.

Les premières conclusions (rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR) faisaient état que les différentes eaux prélevées présentent de faibles teneurs en gaz dissous ce qui témoigne globalement de l'existence d'eaux anciennes infiltrées depuis plusieurs années voire dizaine d'années. Les premières conclusions faisaient également état d'une difficulté dans l'interprétation des résultats si l'on ne considère que les informations apportées par les CFC (CFC11, CF12 et CFC113).

En effet, les CFC ne permettent pas de faire le distinguo entre le modèle exponentiel et le modèle binaire de mélange entre un pôle d'eau d'infiltration récente (post 1990) et un pôle ancien (infiltrées avant l'utilisation des CFC à partir des 1930). Le modèle piston ne permet pas d'expliquer les résultats (cf. Illustration 59). Dans ce contexte, seules les informations apportées par le SF₆ permettraient de conclure, seulement, en l'absence de quantification de l'excès d'air à l'aide des gaz noble (Ne/Ar) lors des échantillonnages de 2014 ; il a été difficile de conclure car les concentrations en SF₆ dans les eaux sont fortement modifiées par la valeur de l'excès d'air¹⁰ choisie.

Dans le but d'avancer sur cette problématique, 2 prélèvements complémentaires ont été réalisés en juillet 2015 (Puits de l'Arc et Forage Peynier) dans le but de qualifier l'excès d'air, ce paramètre étant important pour la correction de la concentration du SF₆. Les interprétations des résultats de datation de 2014 s'appuient donc sur les nouvelles données de 2015.

Analyse des résultats :

Les résultats des concentrations en gaz dissous¹¹ sont présentés en annexe 10 (Figure A10.6 Figure A10.10). Les teneurs en gaz nobles permettent de montrer que l'excès d'air des échantillons est faible de l'ordre de 2 cm³/L pour le puits de l'Arc (Figure A10.5).

¹⁰ La concentration en SF₆ dans les eaux est très sensible à l'excès d'air en raison de la faible solubilité du gaz

¹¹ En 2014, les analyses des CFC et SF₆ par chromatographie gazeuse ont été réalisées par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne). En 2015, les analyses des CFC et SF₆ et des gaz nobles (Ar/Ne) ont été réalisées à la plateforme CONDATE-Eau de l'Université de Rennes

Au préalable à l'interprétation, il est nécessaire de convertir les données brutes (exprimées en pmol/l) en pptv (partie par trillion volumique) pour estimer la concentration en gaz au moment de la recharge de l'aquifère. Le calcul est réalisé à l'aide des coefficients de solubilité donnés par le guide de l'IAEA (2006). Pour conduire ce calcul, il faut également connaître les paramètres susceptibles d'influencer la diffusion des gaz dans l'eau au moment de la recharge : altitude et la température moyenne de la recharge. Les données brutes ont été donc converties en pptv en considérant un excès d'air de 2 cm³/L ; l'altitude de recharge estimée à l'aide des isotopes stables de l'eau (BRGM/RP-64610-FR), soit 500 m en moyenne. Pour la température de recharge (Cf. Illustration 55), la température moyenne pondérée de la pluie efficace a été calculée en pondérant les températures moyennes mensuelles par les pluies efficaces moyennes mensuelles¹² calculées par le modèle Gardenia de la source de l'Argens. La sensibilité du paramètre « température » conduit à des modifications de l'âge apparent de l'ordre de 2-3 ans pour des écarts de ± 2°C. Les paramètres utilisés pour le calcul de l'âge apparent des eaux sont rassemblés dans le tableau de l'illustration 56. Les représentations graphiques des résultats des eaux prélevées en 2014 et 2015 sont présentées sur les illustrations 57 et 58.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annuel
PI_eff_moy (mm)	24.6	20.9	18.3	17.8	14.0	5.0	1.0	1.7	6.0	17.5	26.9	24.3	178.1 mm
Tair_moy (°C)	4.1	4.9	7.5	10.3	14.4	18.3	21.1	20.0	16.2	12.1	7.4	4.7	11.8 °C
Température moyenne pondérée de la pluie efficace (°C) =													8.4 °C

*Pluie efficace calculée par modélisation sur la période 1959-2014 (cf. modèle Gardenia de la source de l'Argens)
 **Température moyenne de l'air calculée par la formule de pondération des chroniques SAFRAN de la zone d'étude (1959-2014), cf. §3.3.3

Illustration 55 : Estimation de la température moyenne de la recharge.

Laboratoire	Id	nom	Nom Graph	date	Alt moyenne de recharge (m)	T°C moyenne Air ^a	T°C moyenne Air ^b	T°C recharge	Excess Air cm3/L	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
Spurenstofflabor*	P837	Piézo ARK1-308 m	ARK1-309m	13/05/14	500	12.7	11.8	8.4	2	2.9	96.2	37.1	22.1
Spurenstofflabor*	P720	Piézo ARK2-138 m	ARK2-138m	13/05/14	300	13.5		13.0	2	1.7	390.9	640.0	15.1
Spurenstofflabor*	N866	Pey nier_Artésien	Pey nier_1	24/06/14	500	12.7	11.8	8.4	2	2.1	138.9	69.5	17.7
Spurenstofflabor*	P981	Meyreuil_Artésien	Meyreuil	24/06/14	599	12.3	11.8	8.4	2	0.4	25.2	10.3	3.0
Spurenstofflabor*	P994	Puits ARC2_24/06/14	2	24/06/14	500	12.7	11.8	8.4	2	2.3	195.9	101.9	28.0
Spurenstofflabor*	P973	Puits ARC2_05/08/14	8	05/08/15	500	12.7	11.8	8.4	2	1.7	195.9	111.2	29.5
Spurenstofflabor*	P982	Puits ARC2_21/08/14	9	21/08/14	500	12.7	11.8	8.4	2	1.9	195.9	111.2	28.0
Spurenstofflabor*	P977	Puits ARC2_17/09/14	11	17/09/14	500	12.7	11.8	8.4	2	1.7	195.9	101.9	26.5
Spurenstofflabor*	P965	Puits ARC2_29/09/14	12	29/09/14	500	12.7	11.8	8.4	2	2.7	195.9	101.9	28.0
Spurenstofflabor*	R99	PUITS ARC LD25	19	27/11/14	500	12.7	11.8	8.4	2	3.7	213.7	101.9	30.9
Spurenstofflabor*	P810	Forage Pey nier	Pey nier_2	27/11/14	500	12.7	11.8	8.4	2	1.9	114.0	55.6	14.7
CONDATE-eau**	Moyenne	Forage Pey nier	Pey nier_2015	02/07/15	500	12.7	11.8	8.4	2	1.9	122.0	60.7	28.0
CONDATE-eau**	Moyenne	Puits Arc_Artésien	Arc_2015	02/07/15	500	12.7	11.8	8.4	2	2.5	157.2	83.5	27.9

(*) : Spurenstofflabor; harald.oster@t-onlin.de
 (**): Plateforme CONDATE-eau; osur-datation@univ-rennes1.fr
^a Température moyenne estimée à partir de la relation établie par Cavalera (2007) pour le secteur d'étude : Tmoy = -0.004*Altitude + 14.717, (R2 =0.92).
^b Température moyenne estimée à partir de la pondération des chroniques SAFRAN (cf.texte) :
 [60.62*T(8874) + 34.29*T(8875) + 40.54*T(8876) + 36.84*T(8877) + 15.91*T(8878) + 6.13*T(8962) + 20.16*T(8963) + 22.19*T(8964) + 35.51*T(8965) + 47.68*T(8966) + 13.87*T(8967) + 2.53*T(9050) + 2.87*T(9052) + 0.43*T(9130) + 8.3*T(9131)]/347.85

Illustration 56 : Paramètres utilisés pour le calcul des âges de l'eau.

¹² Température moyenne pondérée de la recharge : $T_{moy_Pond} = \frac{\sum_{i=1}^{12} Peff(i) * Tair(i)}{\sum Hi}$; avec i de 1 à 12 = mois

Pour les eaux des puits de l'Arc, les concentrations en SF6, CFC11 et CFC 12 mesurées par les 2 laboratoires sont comparables. Seules les concentrations en CFC113 diffèrent, les mesures effectuées en 2015 apparaissent plus élevées que celles réalisées en 2014. Le même constat est fait pour les eaux du forage Peynier.

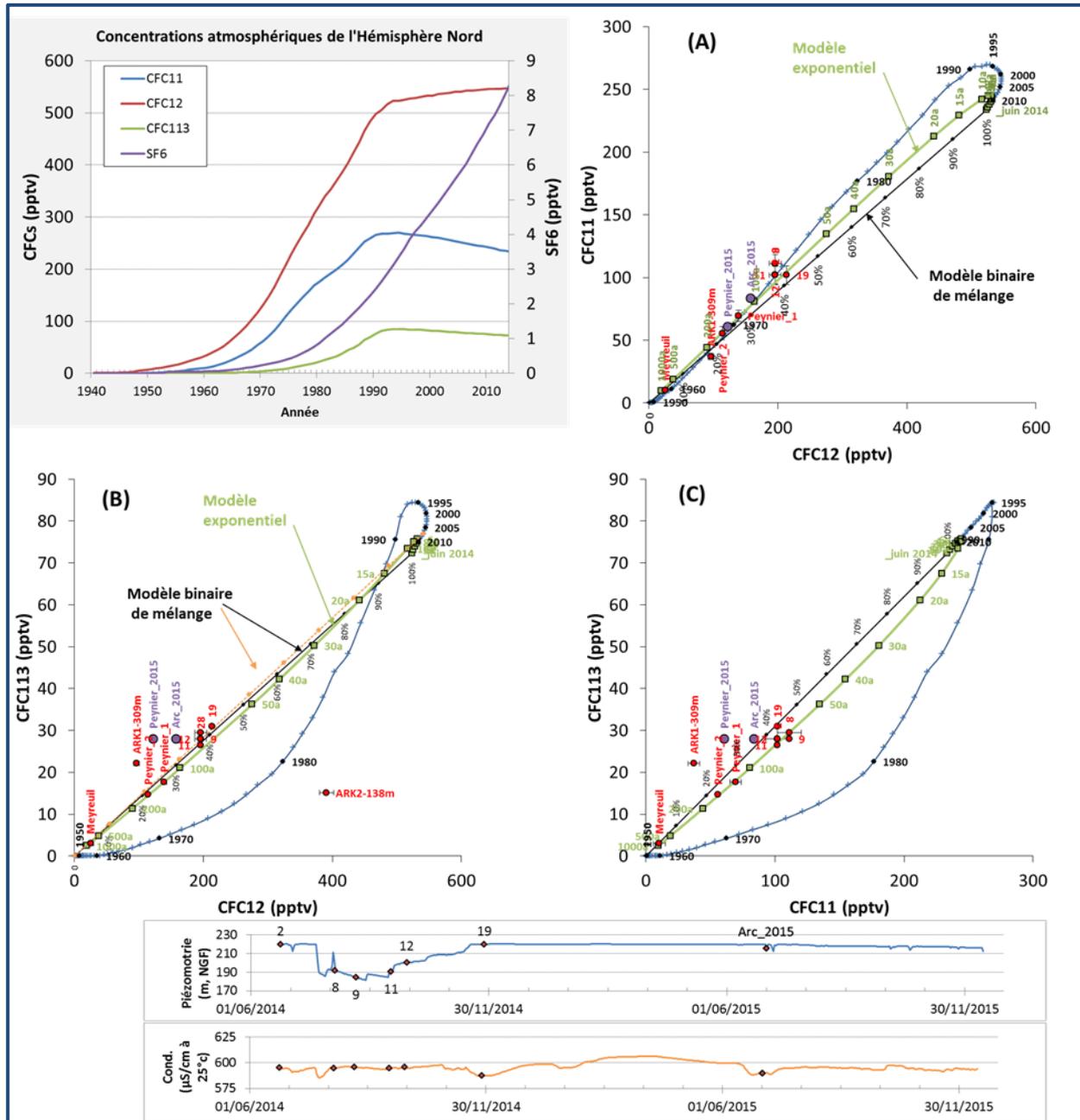


Illustration 57 : Comparaison des concentrations en CFC mesurées dans l'eau en 2014 et 2015 aux évolutions théoriques calculées.

Nota : Sur l'illustration précédente, les concentrations sont exprimées en pptv. Les évolutions théoriques sont calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et pour le modèle de mélange binaire. Les évolutions temporelles de la piézométrie et de la conductivité électrique de l'eau des puits de l'Arc sont également reportées.

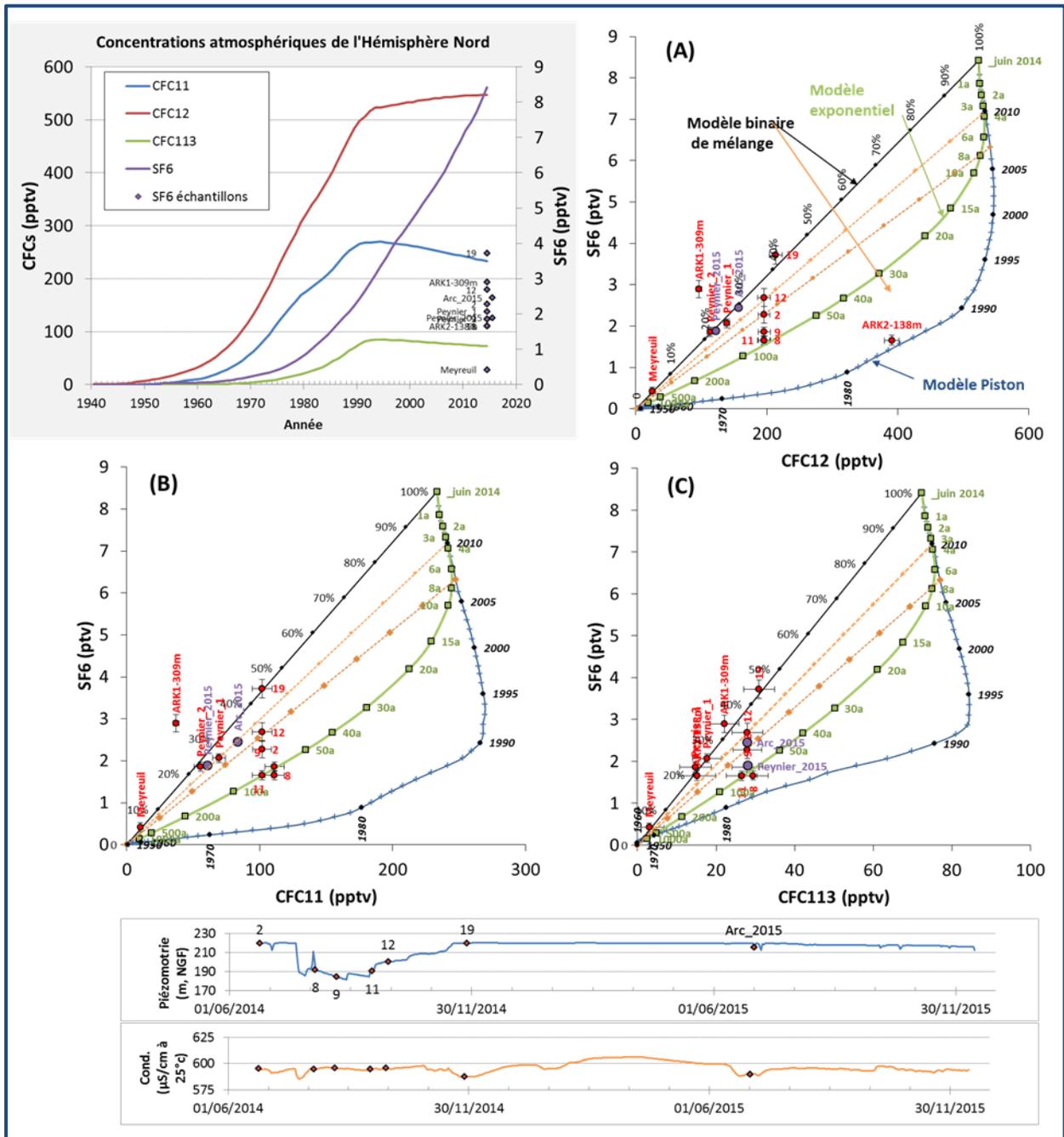


Illustration 58 : Comparaison des concentrations en CFC et SF6 mesurées dans l'eau en 2014 et 2015 aux évolutions théoriques calculées.

Nota : Sur l'illustration précédente, les concentrations sont exprimées en pptv. Les évolutions théoriques sont calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et pour le modèle de mélange binaire. Les évolutions temporelles de la piézométrie et de la conductivité électrique de l'eau des puits de l'Arc sont également reportées.

Interprétation des résultats :

Les estimations des âges de l'eau reposent sur l'utilisation de modèle de transfert (cf. Illustration 59, Maloszewski et Zuber, 1982) :

- **le modèle piston (P)** suppose le déplacement du fluide sans modification de la teneur (modèle convectif). C'est le modèle le plus simple qui permet d'attribuer un âge apparent sans définir de distribution des temps de séjour. Seules des dates de recharge postérieures aux années 50 pourront être proposées par l'utilisation des gaz dissous ;
- **le modèle exponentiel (EM)** attribue une forme exponentielle décroissante à la distribution des temps de séjour de l'eau. Ce modèle ne nécessite qu'un paramètre : le temps moyen de séjour. Ce modèle correspond à la distribution des temps de séjour obtenue par un bilan de masse pour un réacteur discontinu à mélange parfait. Dans le cas d'un aquifère, ce modèle s'interprète comme la résultante sur une verticale de multiple lignes d'écoulements ayant une distribution exponentielle des âges. A l'échelle de l'aquifère, il peut donc s'interpréter comme le résultat d'une dispersion d'origine hydrodynamique.

Un troisième type de modèle est également classiquement utilisé pour décrire les résultats. Il s'agit du modèle de mélange binaire : l'eau étudiée est constituée d'un mélange de deux eaux d'âges différents. Un des pôles du mélange peut être ancien (anté ou post-traceur), l'autre pôle de mélange étant actuel. Pour le pôle actuel, il n'est pas possible de distinguer la nature du type de transfert (modèle Piston ou modèle exponentiel) lorsque les eaux sont récentes (infiltrées après 2000).

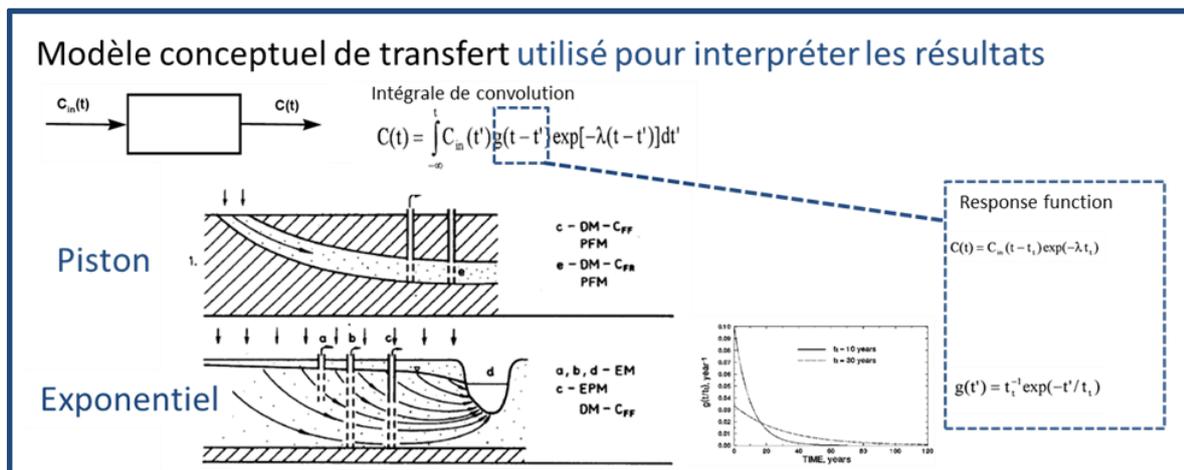


Illustration 59 : Modèle de transfert couramment utilisé pour interpréter les résultats CFCs (d'après Maloszewski et Zuber, 1982)

Les eaux du forage Meyreuil : les eaux prélevées présentent les plus faibles teneurs en gaz dissous ce qui témoigne globalement de l'existence d'eau ancienne ou d'une très faible participation d'eau récente. En considérant un excès d'air de 2 cm³/L comparable aux valeurs mesurées au forage Peynier et au puits de l'Arc en 2015, le report des concentrations de l'ouvrage positionnent les points sur la droite du modèle binaire de mélange à deux composantes (Cf. Illustration 58).

Ces résultats suggèrent que les eaux sont expliquées par une contribution d'eau ancienne dépourvu de CFC/SF6 (contribution = 95%) et par une très faible (5%) contribution d'eau récente infiltrée récemment (après 2010 si l'on considère un transfert par piston), ou présentant un temps de résidence moyen de 3-4 ans si l'on considère le modèle exponentiel).

Compte-tenu des incertitudes analytiques, les très faibles concentrations pourraient également être interprétées par le Modèle Exponentiel, le temps de résidence moyen serait alors supérieur à 500 ans¹³.

Les eaux prélevées dans le piézomètre Ark2 : les eaux présentent un important enrichissement en CFC11, les valeurs mesurées (614 pptv) étant bien supérieures aux valeurs maximales atmosphériques (280 pptv). Les concentrations en CFC113 sont très faibles compte-tenu des concentrations en CFC12 ce qui suggère l'existence du phénomène de dégradation en condition anoxique pour ce point, comme l'indique la position du point dans le diagramme de l'illustration 57 B.

En considérant un excès d'air de 2 cm³/L comparable aux valeurs mesurées au forage Peynier et au puits de l'Arc en 2015, le report des concentrations de l'ouvrage dans le diagramme SF6 vs CFC12 (Cf. Illustration 58 A), positionne le point sur la courbe théorique du modèle piston, les eaux se seraient infiltrées en 1983. Le transfert de l'eau dans l'aquifère captif du Bégulien se ferait donc par effet piston.

Les eaux prélevées dans le piézomètre Ark1 : En considérant un excès d'air de 2 cm³/L comparable aux valeurs mesurées au forage Peynier et aux puits de l'Arc en 2015, le report des concentrations de l'ouvrage dans les différents diagrammes de l'illustration 58 positionne les points en dehors du champs défini par les courbes du modèle piston et du modèle binaire de mélange (Cf. Illustration 58 A et B) et sur la droite du modèle de mélange binaire à deux composantes « ancien-récent » (Cf. illustration 58 C).

Dans les Illustration 58 A et B la position des points pourrait s'expliquer si l'on considère qu'une partie des CFC11 et CFC12 a été dégradée ce qui semble corroboré par la position des points dans les diagrammes de l'illustration 58. Dans ce contexte, seules les informations apportées par le SF6 et le CFC113 seraient utilisables dans la datation.

Ces résultats (Cf. Illustration 60) suggéreraient que les eaux sont expliquées par une contribution d'eau ancienne dépourvue de CFC/SF6 (contribution = 65%) et par une contribution d'eau récente infiltrée récemment (après 2010 si l'on considère un transfert par piston, ou présentant un temps de résidence moyen de 3-4 ans si l'on considère le modèle exponentiel), cette contribution étant évaluée à 35%. Si l'on considère que les 3 CFC ont subi des dégradations les résultats ne peuvent pas être interprétés.

Les eaux du forage Peynier (en 2014, prélèvements effectués lorsque le forage était jaillissant; en 2015, échantillon prélevé lors du pompage d'essai effectué pour le compte de la commune de Peynier) présentent de faibles teneurs en gaz dissous. Le report des concentrations dans les différents diagrammes de l'illustration 58 indique que les eaux apparaissent bien expliquées par le modèle de mélange binaire à deux composantes « ancien-récent », le pôle récent étant âgé de quelques années (eau infiltrée après 2010 si l'on considère un transfert par piston, ou présentant un temps de résidence moyen de 3-4 ans si l'on considère le modèle exponentiel).

La contribution relative du pôle ancien est évaluée à 75% environ, la contribution d'eau récente étant évaluée à 25%. Si l'on adopte la représentation conceptuelle « Drain-Matrice » pour décrire le fonctionnement du réservoir fluvélien sous-couverture, la part récente pourrait représenter la part d'eau des drains et/ou fissures bien connectés avec l'aquifère jurassique sous-jacent. Dans ce schéma, le pôle ancien permettrait de caractériser l'eau du réseau de fissure et de la matrice carbonatée du Fuvélien mal connecté avec l'aquifère jurassique sous-jacent.

Les eaux du puits de l'Arc prélevées avant, pendant et après le pompage présentent de faibles teneurs en gaz dissous ce qui témoigne également de l'existence d'eau globalement

¹³ Pour être plus conclusif sur cette question d'âge, il conviendrait d'utiliser des traceurs de temps de résidence beaucoup plus long que les CFC/SF6. En l'état, il n'est pas possible d'apporter plus de précision à ce propos.

ancienne. En considérant la valeur de l'excès en gaz dissous estimée par les gaz nobles (Ne/Ar) en 2015 (excès de $2 \text{ cm}^3/\text{L}$ pour tous les échantillons), les teneurs SF6 des eaux du puits de l'Arc apparaissent variables selon le contexte d'écoulement contrairement aux autres gaz dissous qui présentent des valeurs très stables (Cf. Illustration 58).

Dans le détail, l'échantillon 19 prélevé en période de crue ($Q=0.26 \text{ m}^3/\text{s}$) qui fait suite au pompage de l'été 2014 présente les concentrations en SF6 les plus élevées. A l'inverse, les échantillons prélevés au cours du pompage (8, 9, 11) présentent les concentrations en SF6 les plus faibles. La position des points dans les différentes figures de l'illustration 58 (SF6 vs CFC12, SF6 vs CFC11 et SF6 vs CFC113) laisse suggérer que les eaux peuvent être expliquées par le modèle de mélange binaire à deux composantes « ancien-récent » comme pour le forage Peynier, voire par le modèle exponentiel pour les échantillons (8, 9, 11).

Si l'on accepte l'hypothèse que l'excès d'air est identique pour tous les échantillons ($=2 \text{ cm}^3/\text{L}$), les variations mesurées peuvent s'expliquer comme le résultat d'une modification de l'âge apparent du pôle récent selon le contexte d'écoulement :

- **En contexte de débordement naturel des puits de l'Arc** (période de hautes et moyennes eaux, ech. 2 et 19), les eaux récentes mobilisées pour environ 40% seraient actuelles (quelques années, voire subactuelles, c. a. d. infiltrées dans l'année). D'un point de vue conceptuel, la part d'eau récente mobilisée lors de ces périodes proviendrait du Jurassique sous-jacent (en charge par rapport au Fuvélien) par l'intermédiaire du drain karstique recoupé en fond de puits. Dans le jurassique, le réseau du drain (ou des drains) karstique qui contribue à alimenter les puits de l'Arc est lui-même bien connecté à sa zone de recharge, et les transferts de masse sont rapides.
- **En pompage**, on observe la mobilisation d'une eau récente de plus en plus vieille compte-tenu des évolutions observées en considérant le modèle binaire de mélange. L'âge apparent du pôle récent évolue jusqu'à une dizaine d'année voire une quinzaine d'années si l'on suppose que le transfert des eaux récentes est réalisé par piston (modèle piston). Si l'on considère que le transfert des eaux récentes est mieux décrit par le modèle exponentiel, le temps de résidence moyen des eaux récentes mobilisées par le pompage serait de l'ordre de quelques années voire une dizaine d'années. Les informations apportées par le tritium permettront de préciser les modalités de transfert des eaux récentes (Cf. § 3.5.3).

Si l'on réfute l'idée, que l'âge du pôle récent puisse varier selon le contexte d'écoulement, la dispersion des concentrations en SF6 serait alors à attribuer à une mauvaise estimation de l'excès d'air. Dans ce contexte, seul l'échantillon de 2015 serait à considérer car les excès d'air des échantillons de 2014 ne sont pas connus. Le report des concentrations mesurées en 2015 dans les différents diagrammes (Illustration 57 et 58) indique que les eaux apparaissent bien expliquées par le modèle de mélange binaire à deux composantes « ancien-récent », le pôle récent étant âgé de quelques années (eau infiltrée après 2010 si l'on considère un transfert par piston, ou présentant un temps de résidence moyen de 3-4 ans si l'on considère le modèle exponentiel). La contribution relative du pôle ancien est évaluée à 60% environ, la contribution d'eau récente étant évaluée à 40% environ.

Les résultats permettent de montrer que les eaux du forage Peynier sont globalement plus anciennes que les eaux du puits de l'Arc car la proportion d'eau ancienne dépourvue de CFC/SF6 (infiltré avant 1930) est plus importante, respectivement de l'ordre de 75 % et 60%. Ce résultat est cohérent avec l'information apportée par les isotopes du lithium et par les isotopes du carbone (cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR), l'activité carbone 14 ($A^{14}\text{C}$) des eaux de Peynier étant plus faibles que celles du puits de l'Arc ($A^{14}\text{C}=45 \text{ ppm}$ contre 60 ppm environ, respectivement), ce qui dénote l'existence d'eau plus vieille.

Au niveau de Peynier, la plus faible contribution d'eau récente (25% contre 40% pour le puits de l'Arc) suggère que la connexion hydraulique avec le Jurassique sous-jacent est moins importante ou moins développée ce qui semble indiquer, comme précédemment évoqué par l'hydraulique, que la connexion avec le Jurassique est plutôt ponctuelle, au gré de la distribution du réseau karstique du Jurassique, et qu'un niveau peu-perméable entre le Fuvélien et le Jurassique (où les séries du Valdonien à l'Hauterivien présentent effectivement plusieurs niveaux marneux et argileux) limite les échanges entre ces deux niveaux aquifères.

La synthèse des interprétations par les CFC/SF6 est rassemblée dans le tableau de l'illustration 60 ci-après.

nom	Nom Graph	date	Modèle conceptuel pour l'interprétation	Pôle Ancien	Pôle Récent	TRM*	Remarques
Piézo ARK1-308 m	ARK1-309m	13/05/14	Aucun				Dégradation du CFC-11, CFC113 et CFC-12
Piézo ARK2-138 m	ARK2-138m	13/05/14	Piston? (1984) ou aucun				Enrichissement du CFC-11 (pollution?); dégradation du CFC-113
Peynier_Artésien	Peynier_1	24/06/14	Binaire de mélange	75% (<1930 PFM)	25%(>2010)		
Meyreuil_Artésien	Meyreuil	24/06/14	Binaire de mélange ou modèle exponentiel*	75% (<1930 PFM)	5%(>2010)	>500 ans	
Puits ARC2_24/06/14	2	24/06/14	Binaire de mélange	60% (<1930 PFM)	40% (2005 PFM)		
Puits ARC2_05/08/14	8	05/08/15	Binaire de mélange	60% (<1930 PFM)	40% (1999 PFM)		
Puits ARC2_21/08/14	9	21/08/14	Binaire de mélange	60% (<1930 PFM)	40% (2005 PFM)		
Puits ARC2_17/09/14	11	17/09/14	Binaire de mélange	60% (<1930 PFM)	40% (1999 PFM)		
Puits ARC2_29/09/14	12	29/09/14	Binaire de mélange	60% (<1930 PFM)	40% (2008 PFM)		
PUITS ARC LD25	19	27/11/14	Binaire de mélange	55% (<1930 PFM)	45% (2014 PFM)		
Forage Peynier	Peynier_2	27/11/14	Binaire de mélange	75% (<1930 PFM)	25% (>2010 PFM)		
Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15	Binaire de mélange	75% (<1930 PFM)	25% (>2010 PFM)		
Puits Arc_Artésien	Arc_2015	02/07/15	Binaire de mélange	65% (<1930 PFM)	35% (>2010 PFM)		

PFM : Piston Flow model
EM : Exponentiel Model
TRM : Temps de résidence moyen calculé avec le modèle exponentiel (EM)

Illustration 60 : Synthèse des interprétations avec les gaz dissous.

Nota : Dans le tableau de l'illustration précédente, les dates d'infiltration du pôle récent sont données à titre indicatif pour le modèle piston. Les résultats auraient pu également être présentés en considérant l'information donnée par le modèle exponentiel (TRM compris entre 1 an et 8 ans). Les gaz dissous (SF6/CFC) ne permettent pas de trancher sur la nature du transfert (modèle piston ou modèle exponentiel) pour le pôle récent.

3.5.3. Informations apportées par le Tritium :

L'approche méthodologique de la datation des eaux par le tritium a été présentée dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR. Les premières conclusions faisaient état que toutes les eaux prélevées présentent du tritium ce qui témoigne globalement de l'existence d'une contribution d'eaux récentes infiltrées depuis plusieurs années voire dizaines d'années et/ou de l'existence de phénomène de mélange avec des eaux récentes nucléaires (post 1952).

Dans le but d'interpréter les résultats tritium de manière quantitative par l'utilisation des modèles d'évolution théorique précédemment présentés et utilisés pour les CFC/SF6 (modèles Piston, exponentiel et mélange binaire), la fonction d'entrée tritium liée à la recharge de la zone d'étude a été déterminée.

En effet, les concentrations atmosphériques en tritium ne sont pas homogènes dans l'atmosphère, si bien que la pluie présente des valeurs différentes selon la localisation des sites, comme le témoignent par exemple les résultats à Marseille-Marignane et Thonon-les-Bains.

Les pluies à Marseille présentent une activité tritium plus faible que les pluies mesurées à Thonon-les-Bains (Cf. Illustration 61). Nous considérons dans la suite de l'étude que l'évolution temporelle (relative) des teneurs en tritium de l'eau de pluie dans le secteur des puits de l'Arc suit celle de Thonon-Les-Bains. Le facteur correctif (0.7) appliqué à la chronique de Thonon-les-Bains a été défini par la pente de la corrélation linéaire qui lie les évolutions à Thonon-les-Bains (Cf. Illustration 61). Les données antérieures à 1963 sont celles définies par le GNIP à la station d'Ottawa.

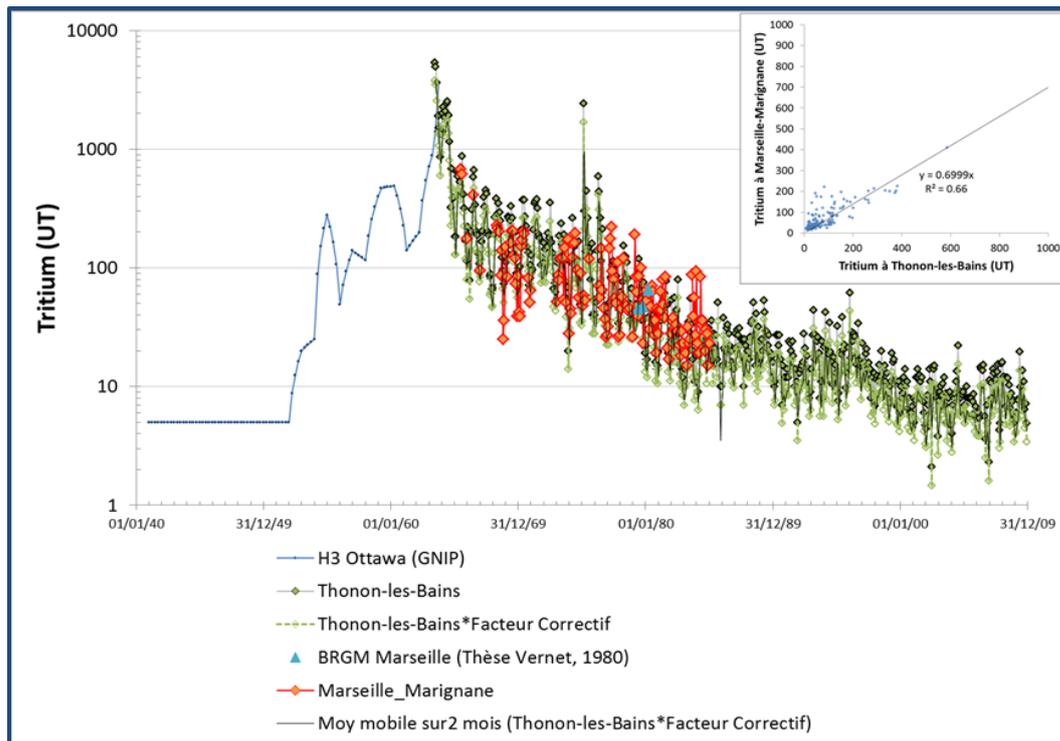


Illustration 61 : Evolution des teneurs en tritium à Marseille-Marignane (GNIP) et à Thonon-les-Bains (GNIP) et confrontation des évolutions mesurées.

Les données tritium disponibles aux puits de l'Arc sont rassemblées dans le tableau de synthèse de l'illustration 62. Les données de la thèse de Vernet (1980) complètent la base de données initialement constituée dans le rapport intermédiaire (BRGM/RP-64610-FR).

L'activité tritium des eaux de l'essai de pompage de 2014 (Cf. données du tableau de l'illustration 62) ne présente pas de variations significatives autour de 3 UT à l'exception de la valeur mesurée fin septembre au cours de la remontée (6 UT). Les eaux profondes (Meyreuil, Peynier) présentent des activités tritium plus faibles que les eaux des puits de l'Arc (autour de 1 UT).

Les eaux des sources karstiques (Argens, Papeterie et Seau) ainsi que les eaux d'exhaure de mine (Puits Gérard et galerie Desfarges) présentent des activités tritium comparables à celles mesurées dans le puits de l'Arc (Cf. rapport BRGM/RP-64610-FR).

Origine de la donnée	Date plvt	Tritium (UT)	±	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) ± 0.1 ‰	$\delta^2\text{H}$ (‰) ± 0.8 ‰
Data Thèse Vernet 1980*	déc-79	23	3	-7.5	-47.3
Data thèse Chalumeau 2000	sept-96			-7.9	
Data thèse Chalumeau 2000	mars-97	8.3	0.4	-7.9	
Data thèse Chalumeau 2000	mars-98			-7.9	
Moulin et al 2006	01/02/2006	6	2	-7.6	-46.5
Cette étude :					
ARC exhaure (13/05)	13/05/2014	3.2	1.0	-7.5	-47.8
ARC-puits 2 (24/06)	24/06/2014	2.4	0.7	-7.5	-47.6
ARC-puits 2_LD1	22/07/2014			-7.6	-47.8
ARC-puits 2_LD3	25/07/2014			-7.5	-47.9
ARC-puits 2_LD06	01/08/2014	3.0	0.6	-7.5	-47.1
ARC-puits 2_LD9	21/08/2014			-7.6	-47.7
ARC-puits 2_LD15	17/09/2014				
ARC-puits 2_LD18	29/09/2014	6.0	0.8	-7.6	-47.9
ARC-puits 2_LD20	16/10/2014			-7.6	-47.8
ARC-puits 2_LD24	17/11/2014			-7.6	-47.7
ARC-puits 2_LD25	27/11/2014	2.6	0.8	-7.5	-47.7
*La date du prélèvement n'est pas clairement indiquée (hiver 1979/1980)					

Illustration 62 : Synthèse des données des isotopes de l'eau des puits de l'Arc (Tritium, $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$).

L'illustration 63 permet de visualiser les évolutions théoriques de l'activité tritium de l'eau d'un aquifère karstique qui présenterait un temps de résidence moyen de 1 an, calculées à l'aide du modèle exponentiel.

Des évolutions théoriques de l'activité tritium d'un aquifère dont l'eau serait issue d'un mélange entre une composante ancienne (dépourvue de tritium nucléaire donc infiltrée avant 1952) et d'une composante récente présentant un temps de résidence moyen de 1 an ont été également reportées.

Différentes contributions relatives d'eau ancienne ont été considérées : 45% ; 60% ; 75% et 85%. Les activités tritium des eaux du puits de l'Arc mesurées par Vernet en 1979, Chalumeau en 1997 et au cours du projet apparaissent globalement bien expliquées par le modèle de mélange binaire défini par une eau récente (actuelle) et une eau ancienne dépourvue de tritium nucléaire (infiltrée avant 1952).

La part de l'eau ancienne apparaît comprise entre 45% et 60%. Les résultats tritium permettent donc de corroborer les résultats des gaz dissous (SF6/CFC) et le schéma conceptuel interprétatif (modèle binaire de mélange).

Les eaux échantillonnées par Moulin et al en 2006 et l'échantillon n°12 prélevé au cours de l'essai de pompage ne sont cependant pas expliqués par ce schéma conceptuel interprétatif ce qui témoigne d'une plus grande complexité des phénomènes hydrologiques. Pour avancer dans la réflexion, les informations des gaz dissous ont été confrontées aux informations tritium à l'aide de graphiques binaires.

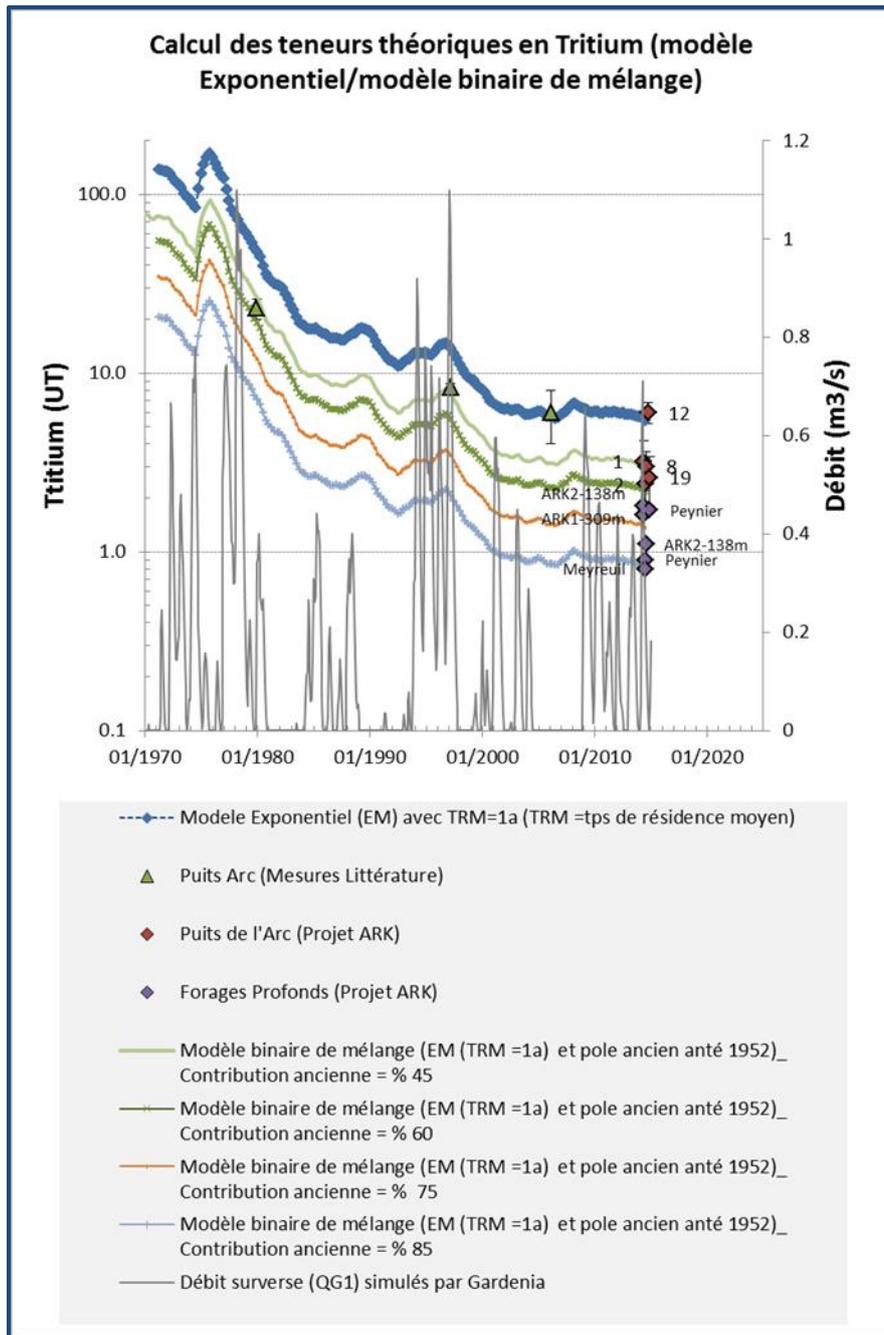


Illustration 63 : Evolutions théoriques de l'activité tritium de la recharge calculée par l'utilisation du modèle exponentiel (TRM = 1 an) et report des activités mesurées dans les eaux.

Nota : Sur l'illustration précédente, les évolutions théoriques du modèle binaire de mélange (ancien/récent) pour différentes contributions relatives du pôle ancien sont reportées. A titre indicatif, les débits de débordement des puits de l'Arc calculés à l'aide du modèle Gardenia sont également reportés (courbe grise).

3.5.4. Confrontation des informations apportées par le tritium et les gaz dissous (CFC/SF6).

Les évolutions des concentrations en SF6 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge sont présentées sur les graphiques binaires de l'illustration 64.

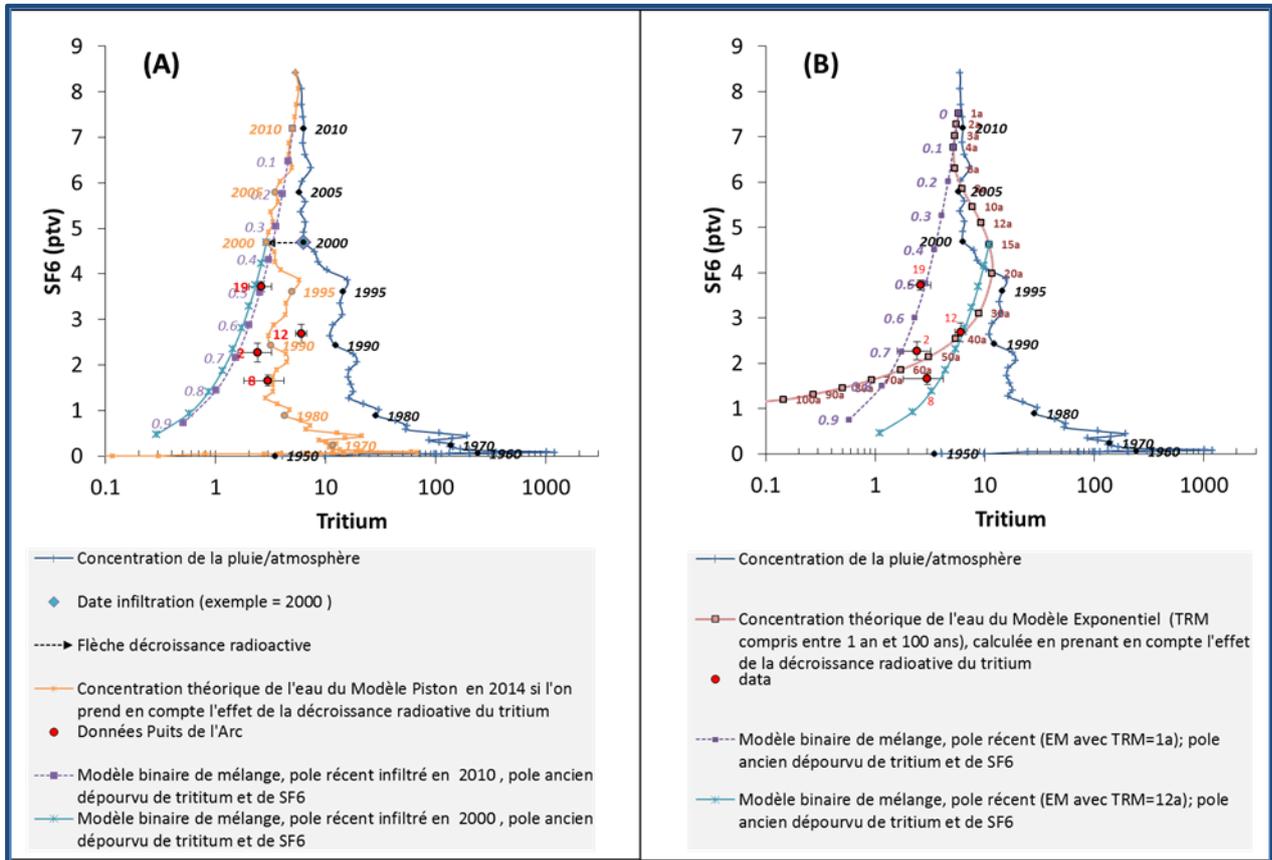


Illustration 64 : Evolutions du SF6 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge et report des concentrations en gaz dissous et des activités tritium mesurées dans les eaux des puits de l'Arc.

Nota : Sur l'illustration précédente, les évolutions théoriques calculées à l'aide des modèles de transfert sont présentées : A) Les évolutions théoriques sont calculées à l'aide du modèle piston (PM). B). Les évolutions théoriques sont calculées à l'aide du modèle exponentiel (EM) pour des temps de résidence moyen (TRM) compris entre 1 an et 100 ans. Dans chaque cas, les calculs prennent en compte la décroissance radioactive naturelle du tritium.

Les évolutions théoriques du modèle binaire de mélange (ancien/récent) pour 2 cas différents sont présentées :

A) courbe en tireté violet : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle piston, infiltration en 2010 ; pôle ancien dépourvu de tritium et de SF6) ; courbe bleue : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle piston, infiltration en 2010 ; pôle ancien dépourvu de tritium et de SF6).

B) courbe en tireté violet : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle Exponentiel de TRM =1a) ; pôle ancien dépourvu de tritium et de SF6) ; courbe bleue : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle Exponentiel de TRM =15a) ; pôle ancien dépourvu de tritium et de SF6).

L'examen des résultats du puits de l'Arc indique que le modèle piston n'est pas adapté pour décrire la composante récente (infiltrée après 2000) impliquée dans le mélange binaire puisque les points ne sont pas distribués sur les courbes définies pour le modèle binaire de mélange.

A l'inverse, le modèle exponentiel apparaît mieux adapté pour décrire la composante récente impliquée dans le mélange binaire. Les données du puits de l'Arc se répartissent entre les deux courbes de mélange binaire (ancien/récent) définies (courbes bleu clair et violette). La confrontation des résultats des CFC au tritium permet également de renforcer cette interprétation (cf. Figure A10.9 et Figure A10.10 de l'annexe 10). **L'utilisation combinée du tritium et des gaz dissous permet de préciser les résultats de datation en apportant un élément de contrainte supplémentaire.** Pour chaque échantillon, l'estimation des % de contribution de la composante ancienne et nouvelle et l'âge apparent de cette dernière ont été calculés en minimisant la fonction « objectif » suivante :

$$X^2 = \sum_i \frac{(C_i - C_i^{mod})^2}{\sigma^2}$$

Où C_i^{mod} est la concentration modélisée calculé à l'aide du modèle binaire de mélange, C_i la concentration mesurée dans l'eau et σ l'incertitude analytique et i le paramètre (CFC₁₁ ; CFC₁₂ CFC₁₁₃ SF6 et ³H). La méthode GRG non linéaire¹⁴ du solver Excel a été utilisée pour minimiser le chi² (X^2). Les résultats des calculs sont rassemblés dans le tableau de l'illustration 65.

Les résultats indiquent que l'eau des puits de l'Arc qui s'écoulait avant le pompage (éch n° 2 du 24/06/2014) résultait d'un mélange entre une eau ancienne dépourvue de gaz dissous et de tritium et une eau récente présentant un temps de résidence moyen (TRM) de 6 ans, et la contribution ancienne était majoritaire (63%).

Au cours du pompage (échantillons n°8 à 11), les eaux mobilisées apparaissent de plus en plus anciennes car l'âge apparent de la composante récente augmente (TRM de 6 ans à 11 ans), la contribution ancienne restant globalement constante autour de 60 %. Lors de la première crue de reprise du cycle hydrologique après l'arrêt du pompage (27/11/2014), l'âge de la composante récente est subactuelle (<1an) ce qui dénote une bonne connexion du système fluvélo-jurassique avec la zone de recharge, la contribution de la composante ancienne apparaît toujours majoritaire (58%).

¹⁴ Cette méthode utilise le code Generalized Reduced Gradient (GRG2)

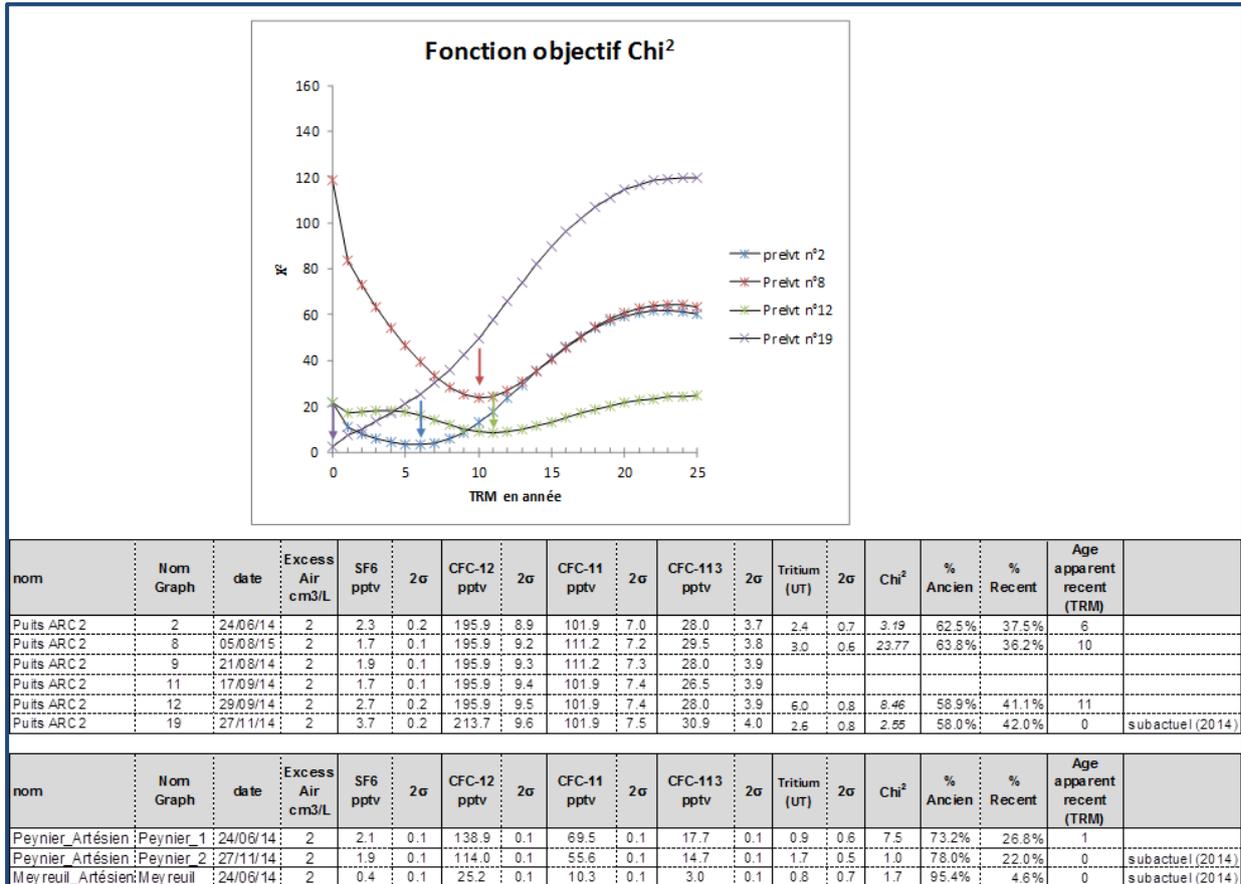


Illustration 65 : Evolution de la fonction objectif versus temps de résidence moyen (TRM) de la composante récente et report des % des contributions (Pôle ancien/Pôle récent) et estimation de l'âge apparent de la composante récente calculée par la fonction objectif Chi².

3.5.5. Conclusions/Synthèse sur le plan hydrochimique

Le programme d'échantillonnage et d'analyses mis en œuvre dans cette étude a permis de montrer que la qualité physico-chimique des eaux du puits l'Arc a présenté peu de variation au cours de l'essai de pompage à fort débit (jusqu'à 1 100 l/s).

Les eaux du puits de l'Arc présentent un faciès bicarbonaté calcique, le cation dominant étant le calcium (Ca) et l'anion dominant les hydrogénocarbonates (HCO₃).

Le faciès chimique et isotopique des eaux du puits de l'Arc est très comparable à celui du faciès des eaux jurassiques caractérisées, notamment, par les sources karstiques de l'Argens, Seaux et de Roques Hautes.

Le faciès chimique et isotopique des eaux pompées aux puits de l'Arc apparait très significativement différent de celui de l'ouvrage ARK1 (implanté dans le Fuvélien à proximité des puits de l'Arc), ce dernier ouvrage permettant de qualifier, a priori, la signature de l'eau qui interagit avec la matrice carbonatée du Fuvélien (porosité matricielle). En adoptant la représentation conceptuelle « Drain-Matrice » pour décrire le fonctionnement du réservoir fuvélien capté par les puits de l'Arc, les différents résultats géochimiques de cette étude permettent de montrer que **les drains et/ou réseaux de fissures du Fuvélien sont bien connectés à l'aquifère jurassique sous-jacent** et que par ailleurs, l'aquifère du Jurassique impose ou contrôle la signature du réseau de fissures/drains du réservoir Fuvélien qui a été très majoritairement sollicité par le pompage. La contribution de la porosité matricielle semble avoir été seulement perceptible du point de vue géochimique lors de la phase de remontée.

Les résultats de la datation (CFC/SF6/Tritium) ont permis d'une part, de poser le cadre conceptuel interprétatif (modèle binaire de mélange ancien/récent) et d'autre part, d'estimer des proportions de mélange et d'évaluer l'âge de la composante récente qui contribue au mélange.

Les résultats permettent de montrer que les eaux du forage Peynier sont globalement plus anciennes que les eaux des puits de l'Arc car la proportion d'eau ancienne dépourvue de CFC/SF6 (infiltré avant 1930) est plus importante, respectivement de l'ordre de 75 % et 60%. Le pôle récent est bien décrit par le modèle exponentiel.

Au niveau de Peynier, la plus faible contribution d'eau récente (25% contre 40% pour les puits de l'Arc) suggère que la connexion hydraulique avec le Jurassique sous-jacent est moins importante ou moins développée ce qui semble indiquer, comme précédemment évoqué par l'hydraulique, que **la connexion avec le Jurassique est plutôt ponctuelle, au gré de la distribution du réseau karstique du Jurassique**, et qu'un niveau peu-perméable entre le Fuvélien et le Jurassique (où les séries du Valdorien à l'Hauterivien présentent effectivement plusieurs niveaux marneux et argileux) limite les échanges entre ces deux niveaux aquifères.

Le suivi réalisé aux puits de l'Arc laisse suggérer que **le pompage a mobilisé globalement une eau de plus en plus vieille** au fur et à mesure du rabattement et que ce vieillissement apparent de l'eau est **lié à l'âge de la composante récente impliquée dans le mélange**.

Le temps de résidence moyen des eaux récentes mobilisées par le pompage a évolué de 5-6 ans à 11-12 ans. Le suivi en contexte de débordement naturel des puits de l'Arc (période de hautes et moyennes eaux, échantillon 2 et 19), indique que les eaux récentes mobilisées pour environ 40% seraient actuelles (quelques années, voire subactuelle, c. a. d. infiltrées dans l'année).

D'un point de vue conceptuel, la part d'eau récente mobilisée lors de ces périodes proviendrait du Jurassique sous-jacent (en charge par rapport au Fuvélien) par l'intermédiaire du drain karstique recoupé en fond de puits.

Dans le Jurassique, le réseau du drain (ou des drains) karstique qui contribue à alimenter les puits de l'Arc est lui-même bien connecté à sa zone de recharge, et les transferts de masse sont rapides. Les signatures des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) indiquent que les eaux des puits de l'Arc apparaissent appauvries en isotopes lourds par rapport aux signatures isotopiques des pluies échantillonnées par Chalumeau (2000) sur le secteur d'étude Gardanne-Fuveau, ce qui témoigne d'une infiltration/recharge à des altitudes plus élevées.

La signature des puits de l'Arc mesurée en 2014 apparaît identique à celle mesurée en 2006 (Moulin et al.) et en 1979 par Vernet (1980). La signature isotopique ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) des puits de l'Arc apparaît comparable à celles mesurées aux sources karstiques de la Papeterie et de l'Argens.

Pour les puits de l'Arc, l'altitude moyenne de recharge a été estimée à 500 m \pm 140 m, ce qui, compte tenu des altitudes, impose de délimiter la zone de recharge au nord-nord-est sur les calcaires jurassiques affleurants du massif de la Sainte Victoire.

Ces résultats confortent une fois de plus le **rôle joué par le jurassique dans l'alimentation du réservoir du Fuvélien caractérisé par les ouvrages du puits de l'Arc et de Peynier**.

L'absence de variation de la signature isotopique à différentes dates (1980, 2006, 2014) et la quasi absence de variations de minéralisation mesurée aux puits de l'Arc suggèrent par ailleurs, **l'existence d'un important réservoir présentant un temps de régulation élevé qui permet de lisser les variations saisonnières et interannuelles de la signature isotopique (et chimique) des eaux de recharge**.

Ce résultat est très cohérent au vu de l'importance de la part d'eau ancienne (infiltrée avant 1930) qui contribue à expliquer la signature chimique et isotopique du puits de l'Arc.

4. Approche modélisation

La modélisation présentée dans ce chapitre a été mise en œuvre pour compléter l'approche fonctionnelle décrite dans le chapitre précédent. Elle repose sur les connaissances acquises au cours de l'étude. En particulier, les apports en termes hydrogéologiques (chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et fonctionnels (chapitre 3) permettent de proposer un modèle conceptuel de fonctionnement du système Fuvélo-Jurassique. Sur cette base, un modèle numérique a pu être développé. Après une phase de calage et de validation, il a été appliqué pour établir le bilan hydrologique du système exploité par les puits de l'Arc. Il a également permis de simuler différents scénarios d'exploitation.

4.1. MODELISATION DU SYSTEME FUELO-JURASSIQUE

4.1.1. Principe de la méthode des réseaux de réservoirs

L'approche de modélisation adoptée est celle des réseaux de réservoirs. C'est une approche semi-spatialisée, qui paraît adaptée compte-tenu du manque d'information sur la distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques des compartiments aquifères.

Elle consiste à représenter le système hydrogéologique étudié en un réseau de réservoirs connectés entre eux. Le niveau d'eau dans les réservoirs est ensuite calculé grâce à un bilan conservatif de l'eau réalisé à chaque pas de temps et qui tient compte des flux d'entrée, de sortie et des échanges entre les réservoirs. La pertinence du modèle repose sur l'élaboration d'un schéma conceptuel de fonctionnement hydrogéologique réaliste et sur le choix des lois phénoménologiques qui régissent les échanges entre les réservoirs.

4.1.2. Modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique du système

L'étude hydrodynamique (interprétation des essais de pompage) a mis en évidence le fait que les puits de l'Arc exploitent un réservoir compartimenté, d'une superficie de l'ordre de 170 km² en connexion hydraulique avec le Bégudien sus-jacent.

Les analyses géochimiques montrent également une relation avec l'aquifère du Jurassique. On peut supposer qu'elle est très locale, au gré de la distribution du réseau karstique. Par ailleurs, la modélisation globale du système exploité par les puits de l'Arc (avec le logiciel GARDENIA) a montré qu'un système de réservoirs avec un seuil et deux dynamiques de vidange permettait de reproduire les niveaux piézométriques observés au puits.

En combinant l'ensemble de ces connaissances, un premier modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique du système fuvélo-jurassique exploité par les puits de l'Arc est proposé (Cf. illustration 66). Le réservoir « Fuvélien » qui est pompé est alimenté par deux flux de drainance : un en provenance du réservoir Jurassique, l'autre en provenance du Bégudien.

La drainance (toujours orientée vers le réservoir Fuvélien) dépend de la différence de charge entre les deux réservoirs.

La vidange des réservoirs Fuvélien et Jurassique dépend classiquement de la hauteur d'eau dans le réservoir (l'évolution du réservoir Bégudien n'est pas calculée dans le modèle, sa charge hydraulique est supposée constante).

Le modèle numérique construit sur la base de ce schéma n'a pu être calé de manière satisfaisante. Une seconde version a donc été proposée.

Dans cette deuxième version (Cf. illustration 67) l'alimentation du Fuvélien par le Jurassique n'est pas une drainance, mais un flux indépendant de la hauteur d'eau dans le Fuvélien (ce qui correspond bien à la conclusion de l'étude hydrodynamique d'une connexion très locale, via un drain karstique par exemple, tout en expliquant la présence d'eau à faciès Jurassique dans le Fuvélien). C'est cette version qui est utilisée par la suite.

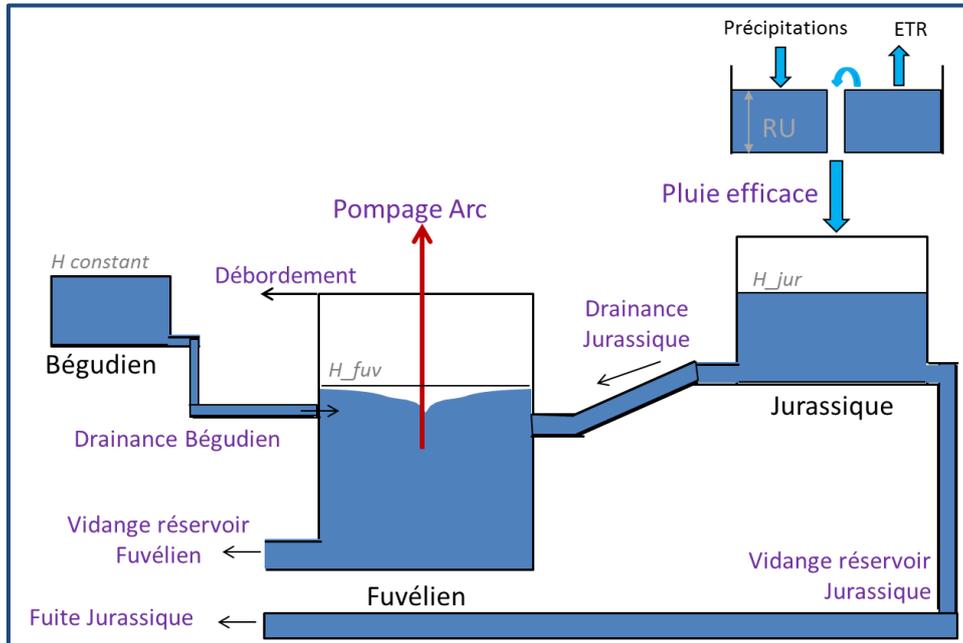


Illustration 66 : Schéma conceptuel du système Fuvélo-Jurassique exploité par les puits de l'Arc (version 1, non retenue)

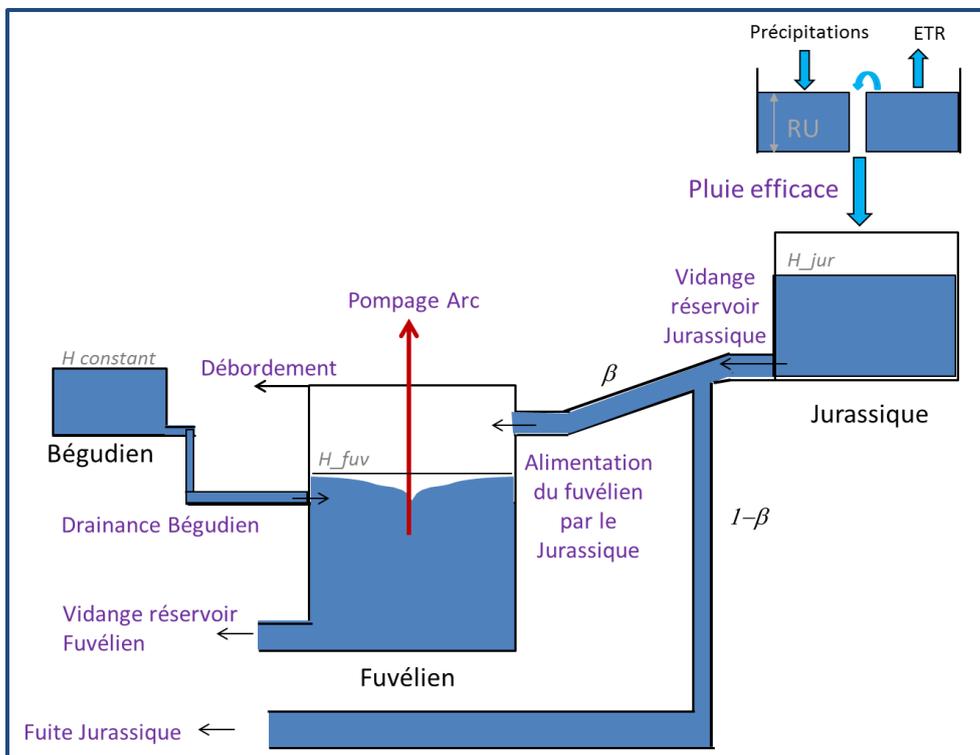


Illustration 67 : Schéma conceptuel du système Fuvélo-Jurassique exploité par les puits de l'Arc (version 2)

4.1.3. Modèle mathématique et expression des différents flux

Pluie efficace

La pluie efficace est calculée à partir des précipitations et de l'ETP selon un bilan hydrologique de type Thornthwaite. Celui-ci fait intervenir la notion de réserve utile du sol : il ne peut y avoir de pluie efficace que si la réserve utile dépasse un certain seuil.

En accord avec l'approche fonctionnelle, on suppose que le fonctionnement hydrogéologique du massif calcaire de la Sainte Victoire est uniforme pour sa partie superficielle, et donc que la pluie efficace calculée par calage d'un modèle sur la source de l'Argens (3.3.4) est valable pour toutes les zones de calcaires affleurant. Cette hypothèse a permis d'estimer la surface de l'impluvium de chacune des sources de la zone d'étude (3.3.5), et par différence, d'évaluer la surface de l'impluvium du Jurassique sans exutoire connu à 95 km². On associe cette surface de 95 km² au réservoir Jurassique intégré dans le modèle conceptuel. Celui-ci reçoit la pluie efficace calculée par le modèle GARDENIA.

Transferts entre réservoirs

En général, par analogie avec la loi de Darcy, on suppose que le flux qui s'établit entre deux compartiments voisins est proportionnel à la différence de charge entre ces compartiments.

Le flux de drainance du Bégudien vers le Fuvélien suit cette loi empirique :

$$Q_{\text{drain_Beg}} = k \cdot (H_{\text{Beg}} - H_{\text{Fuv}}), Q_{\text{drain_Beg}} > 0$$

Le paramètre k a la dimension d'une transmissivité (en m²/s).

Pour simplifier le modèle et en l'absence de données, la charge hydraulique du réservoir Bégudien est supposée constante. Cela signifie implicitement que la drainance du Bégudien n'est pas un élément limitant dans le fonctionnement du réservoir Fuvélien exploité. Le réservoir du Bégudien peut en théorie être sollicité sans limite (ce qui dans la réalité n'est évidemment pas le cas).

En ce qui concerne l'alimentation du Fuvélien en provenance du Jurassique, les premiers essais de modélisation effectués ont montré que le flux n'était a priori pas dépendant de la charge hydraulique dans le Fuvélien. Le flux d'alimentation du Fuvélien en provenance du Jurassique est donc supposé dépendre uniquement de la charge dans le Jurassique. Une fraction (constante) du flux de vidange du Jurassique alimente le Fuvélien tandis que le reste constitue ce que l'on a appelé le débit de fuite du Jurassique.

$$Q_{\text{alim_Fuv}} = \beta \cdot Q_{\text{vid_Jur}}$$

$$Q_{\text{fuite_Jur}} = (1-\beta) \cdot Q_{\text{vid_Jur}}$$

Vidange de chaque compartiment

On suppose que le réservoir Jurassique et le réservoir Fuvélien connaissent une vidange exponentielle classique (type loi de Maillet), c'est-à-dire que le flux sortant est proportionnel à la charge dans le compartiment (H_i) et à sa surface (S^i). Le coefficient τ a la dimension d'un temps.

$$Q_{out}^i = \frac{S^i}{\tau^i} \cdot H_i$$

Flux de débordement

Lorsque la charge hydraulique du réservoir Fuvélien dépasse la cote du sol, il y a débordement. Ce flux artésien est modélisé en inversant la formule de pertes de charge quadratiques du puits, et en supposant que le coefficient c est identique selon que le puits est pompé ou artésien.

$$Q_{deb} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{(H_{puits} - H_{sol})}{c}}$$

c (en $m^{-5}.s^2$) est le coefficient de pertes de charge quadratique du puits, estimé lors de l'interprétation des essais de pompage. α est un paramètre d'ajustement (adimensionnel).

Correction de charge au puits

L'hypothèse principale de cette approche globale est que les réservoirs sont supposés homogènes, ce qui implique que les variables qui y sont calculées (charge hydraulique dans notre cas) sont uniformes. Un modèle analytique est donc ajouté au modèle global afin de pouvoir calculer la charge au puits de l'Arc. Celle-ci est obtenue par correction de la charge du réservoir Fuvélien, en ajoutant les pertes de charge linéaires (s) et quadratiques ($c.Q^2$). Celles-ci sont connues grâce aux modélisations des essais de pompage aux puits de l'Arc (2.3).

$$H_{puits} = H_{res} - s(t) - c.Q^2$$

Le modèle établi au §2.3.1 fournit le rabattement théorique au puits de l'Arc pour un débit unitaire constant. En convoluant la réponse impulsionnelle (RI) avec la chronique des débits réellement pompés (Q_p), on obtient la fonction de rabattement qui représente les pertes de charge linéaires : $s(t) = RI * Q_p(t)$.

Bilan hydrologique du réservoir Fuvélien

Le bilan traduit le fait que, à chaque instant, la variation de volume (et donc de charge hydraulique) dans le réservoir résulte de la différence entre les flux qui entrent et ceux qui sortent du réservoir.

$$s \cdot S \frac{dH}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out}$$

avec $\sum Q_{in} = Q_{atim_Jur} + Q_{drain_Begud}$ et $\sum Q_{out} = Q_{vidange} + Q_{debord} + Q_{pomp}$

s le coefficient d'emmagasinement et S la surface du réservoir.

4.1.4. Modèle numérique

Le jeu d'équations différentielles ordinaires couplées décrivant le système a été traduit numériquement à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. La résolution numérique est assurée par le solveur Dormand-Prince implémenté par défaut. Un pas fixe de 1 jour est choisi (correspondant au pas des données météorologiques et de pompage).

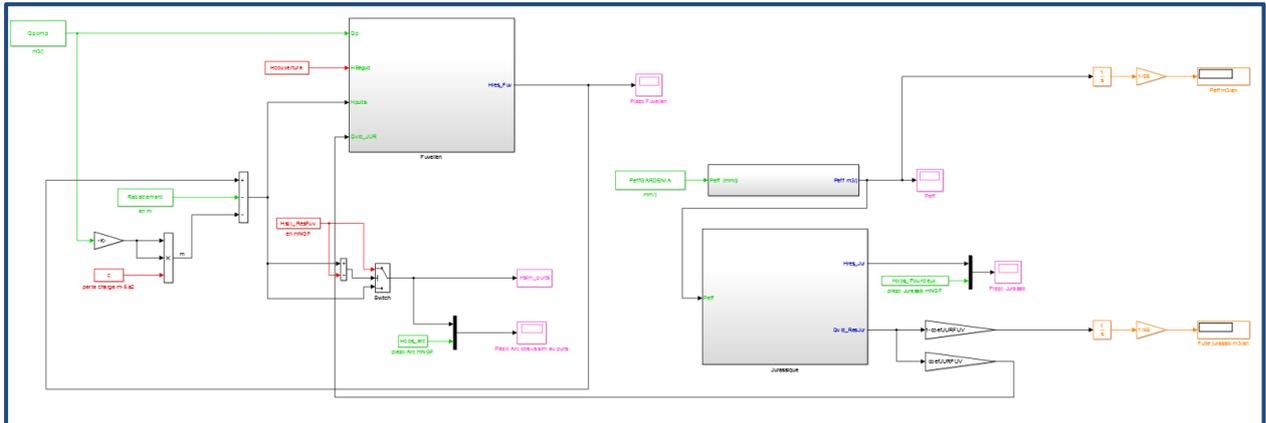


Illustration 68 : Modèle numérique (capture d'écran)

4.2. CALAGE DU MODELE NUMERIQUE

Le calage du modèle a consisté à enchaîner les simulations en faisant varier les valeurs des différents paramètres afin de reproduire au mieux le niveau piézométrique mesuré au puits de l'Arc et le débit de débordement.

Pour quantifier la pertinence du calage, le coefficient de Nash sur le niveau piézométrique est calculé à chaque simulation. Le jeu de paramètres retenu in fine permet à la fois de reproduire de façon satisfaisante l'allure des variations piézométriques, de faire coïncider les périodes et les valeurs de débordement avec les observations, et de produire le coefficient de Nash le plus élevé. Comme pour tous les modèles numériques, il faut noter que le « meilleur » calage n'est pas unique. On peut proposer plusieurs jeux de paramètres légèrement différents qui permettent de reproduire avec une précision équivalente l'évolution du niveau piézométrique au puits de l'Arc et le débit de débordement. Cette remarque explique que par la suite, des fourchettes de valeurs obtenues avec différents jeux de paramètres seront proposées pour le bilan hydrologique (§4.3.1).

4.2.1. Paramètres du modèle et valeurs de référence

Les paramètres du modèle sont ceux qui apparaissent dans les équations décrivant les différents flux. Pour la plupart d'entre eux, on dispose d'une valeur de référence, estimée par les modèles établis et calés lors de l'interprétation des essais de pompage et lors de l'analyse fonctionnelle (avec le logiciel GARDENIA).

	Valeur de référence	Origine de la valeur de référence	
		Interprétation des essais de pompage	Modèle GARDENIA
Superficie de l'impluvium du Jurassique	95 km ²		X
Surface du réservoir Fuvélien	170 km ²	X	
Coefficient d'emmagasinement des 2 réservoirs	s = 5.10 ⁻⁴	X	X

Coefficient de perte de charge quadratique du puits de l'Arc	$c = 17.2 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$	X	
Côte de base du réservoir - Jurassique - Fuvélien	256.5 mNGF 180 mNGF		X
Coefficient de tarissement des réservoirs : - Jurassique - Fuvélien	- 3 jours à 3 mois - 1.36 mois		X

Illustration 69 : Tableau des paramètres du modèle global et des valeurs de référence

Nous disposons d'un point de mesure (valeur de la surcôte et estimation simultanée du débit d'artésianisme) permettant de fournir une valeur au coefficient d'ajustement de la loi de débordement : $\alpha = 0.437$.

La cote de débordement du réservoir Fuvélien est de 220.6 mNGF (donnée terrain).

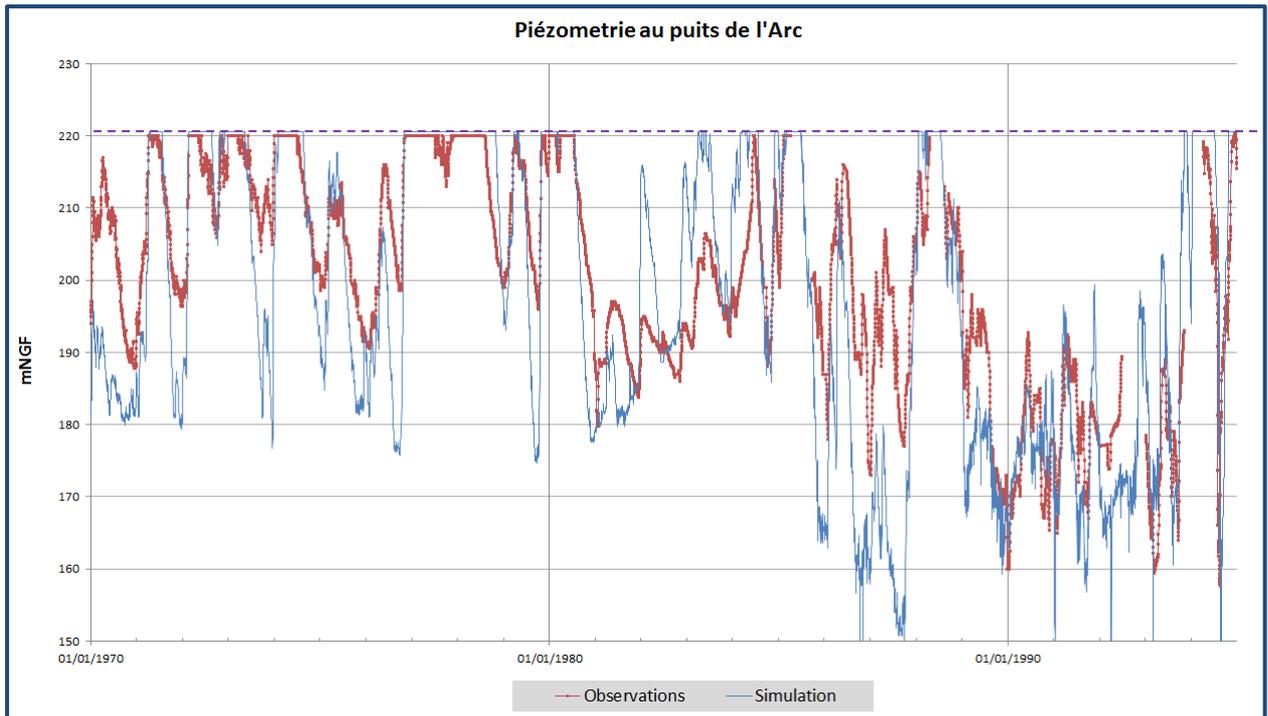
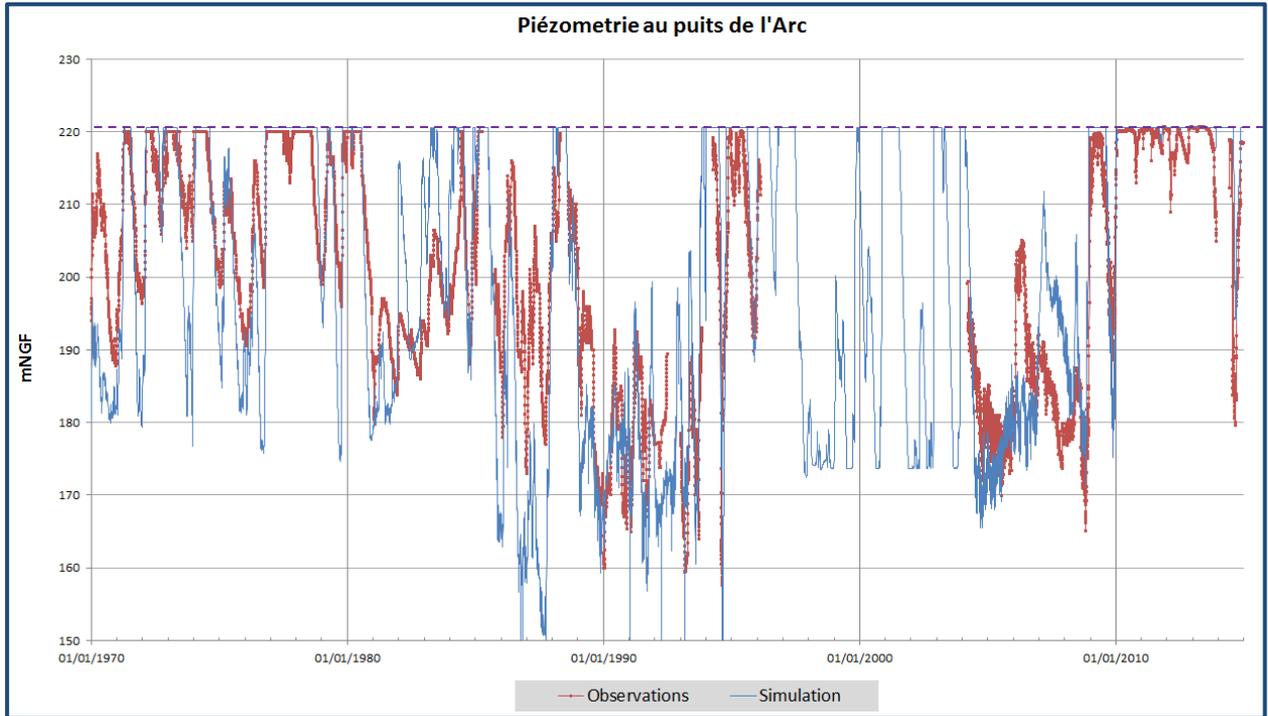
Le principe qui a présidé à la phase de calage du modèle est celui de parcimonie : dans la mesure du possible, on a essayé de minimiser le nombre de paramètres qui diffèrent de leur valeur de référence. Ainsi, en pratique, parmi les paramètres cités précédemment, seuls le coefficient de partition de la vidange du Jurassique entre Fuvélien et fuite (β), le coefficient d'ajustement de la loi de débordement (α), les coefficients de tarissement des deux réservoirs et le coefficient de transfert entre le Bégudien et le Fuvélien (k , pour lequel on ne dispose pas de valeur de référence) ont été calés.

4.2.2. Comparaison observations / simulations

La simulation qui reproduit au mieux les observations (Illustration 70) a été réalisée avec les valeurs suivantes des paramètres :

- Partition du flux de vidange du Jurassique : $\beta=75\%$ alimente le Fuvélien, 25% part en débit de fuite du Jurassique.
- Tarissement des réservoirs : τ jurassique = 3 jours ; τ Fuvélien = 5 ans
- Transfert entre Bégudien et Fuvélien : $k = 0.81 \text{ m}^2/\text{s}$
- Ajustement de la loi de débordement : $\alpha = 0.3$

Le modèle reproduit de manière jugée satisfaisante les variations de niveau au puits de l'Arc, y compris les essais de pompage de longue durée (1994 et 2014) et les périodes de débordement (Illustration 71). Sur la période 1970 – 2014, le coefficient de Nash est de 0.63 pour la piézométrie du puits de l'Arc.



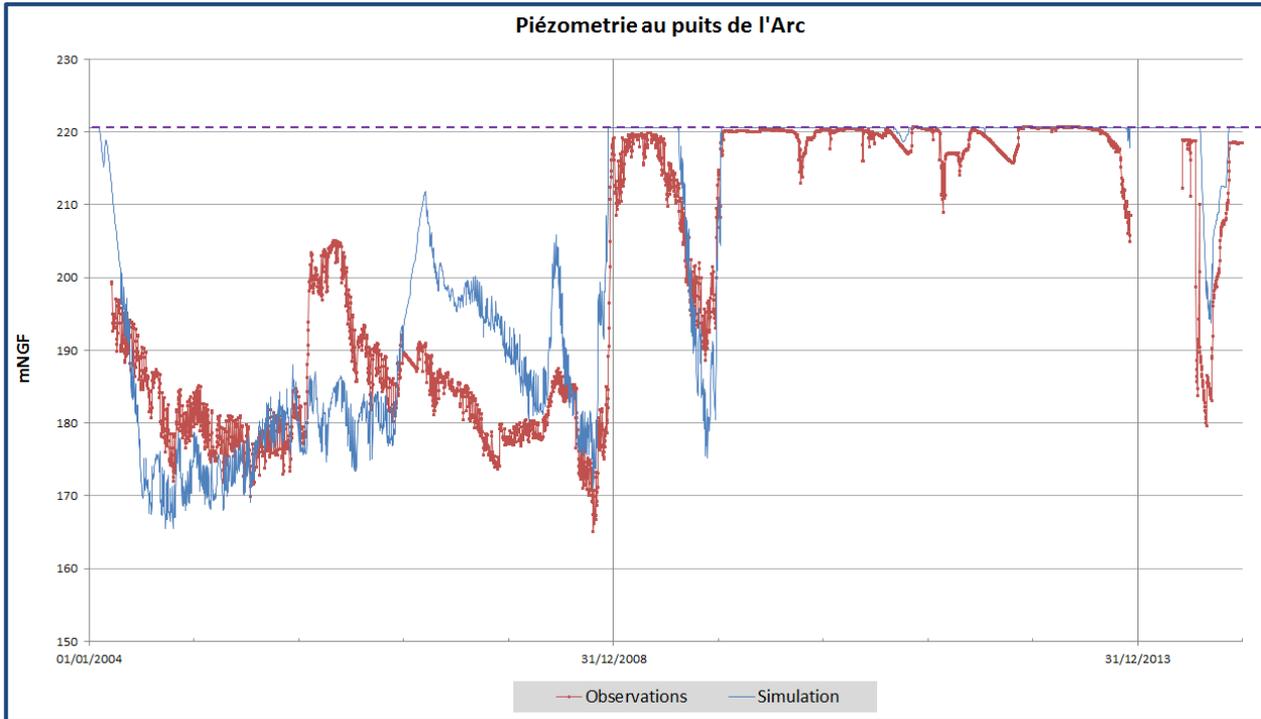


Illustration 70 : Comparaison des niveaux piézométriques observé et simulé au puits de l'Arc sur la période 01/01/1970 – 31/12/2014 (avec un zoom sur les périodes d'observation 1970 – 1994 et 2004 – 2014).

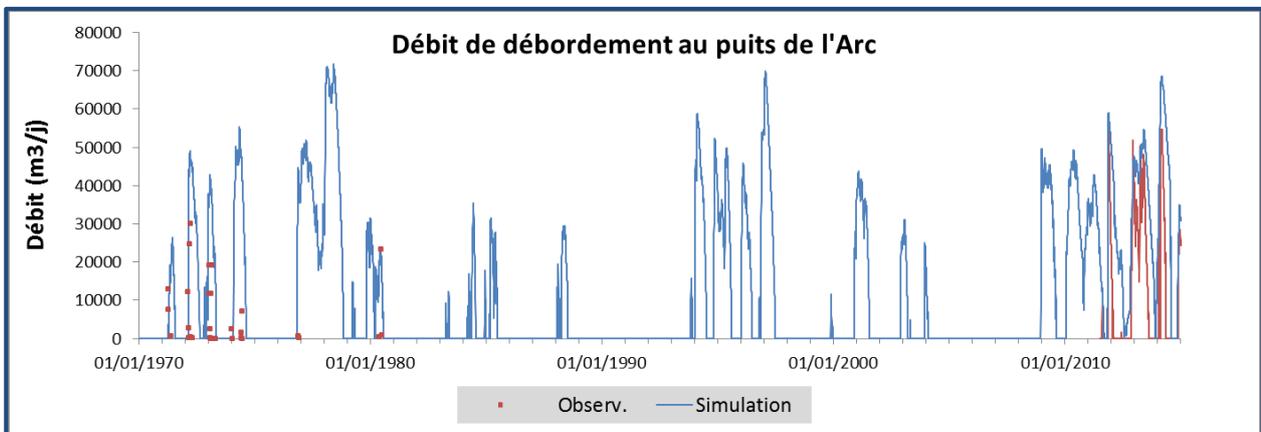


Illustration 71 : Comparaison du débit de débordement observé et simulé au puits de l'Arc sur la période 01/01/1970 – 31/12/2015.

4.3. APPLICATIONS DU MODELE

4.3.1. Bilan hydrologique du système exploité par les puits de l'Arc

Le modèle calé simule les flux d'entrée et de sortie du système, au pas journalier, sur toute la période simulée (1959 – 2014). Le traitement de ces résultats permet de quantifier le bilan hydrologique annuel du système fuvélo-jurassique exploité par les puits de l'Arc (Illustration 73). Pour chaque flux d'entrée ou de sortie du système, une fourchette de valeur annuelle (en Mm^3/an) est indiquée.

Il s'agit de la moyenne interannuelle des flux journaliers sur la période 1959 - 2014 fournis par différentes simulations réalisées avec des jeux de paramètres différents. Ces simulations permettent toutes de reproduire de manière acceptable la piézométrie au puits de l'Arc (Nash = 0.51 à 0.63). Les gammes de variation des paramètres sont fournies dans le tableau suivant (Illustration 72).

Partition du flux de vidange du Jurassique	$\beta=75\%$ à 80%
Tarissement du réservoir Jurassique	$\tau_{jur} = 1$ jour à 1.35 mois
Tarissement du réservoir Fuvélien	$\tau_{fuv} = 3$ à 5 ans
Transfert entre Bégudien et Fuvélien	$k = 0.23$ à 0.81 m ² /s
Ajustement de la loi de débordement	$\alpha = 0.3$ à 0.45

Illustration 72 : Gamme de variation des jeux de paramètres calés du modèle

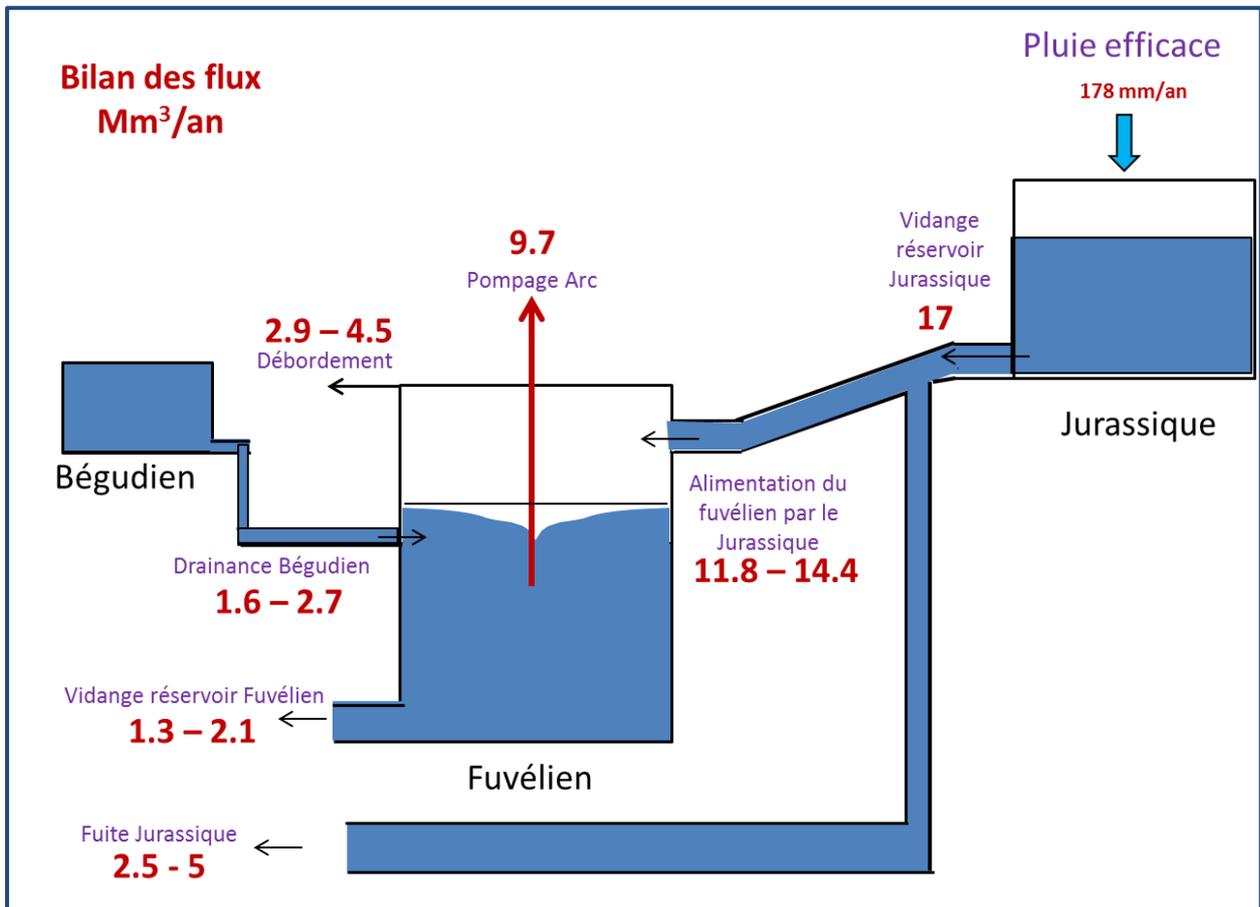


Illustration 73 : Bilan hydrologique du système fuvélo-jurassique exploité par les puits de l'Arc

4.3.2. Simulation de scénarios d'exploitation

Le modèle calé a également été appliqué pour simuler différents scénarios d'exploitation, afin de conforter les résultats présentés au §2.4.

Les scénarios consistent à imposer un débit pompé constant (24h/24, 7j/7 pendant toute la période de simulation), avec des valeurs variant de 0.55 à 1.1 m³/s (droit d'eau actuel). Dans tous les cas, la période simulée s'étend sur 56 ans (du 01/01/1959 au 31/12/2014). Le forçage externe correspond à la pluie efficace calculée par GARDENIA à partir des données de pluie et d'ETP sur la zone d'étude fournies par Météo-France (voir §3.4). Les paramètres du modèle sont identiques pour toutes les simulations, seul le débit pompé varie.

L'objectif est d'identifier le rabattement maximal calculé au puits de l'Arc, et de déterminer le débit maximal d'exploitation permettant de limiter le rabattement à 90m (positionnement actuel des pompes – 10m de sécurité) ou à 190 m (positionnement sous le travers banc réunissant les deux puits – 10m de sécurité). L'évolution du niveau piézométrique simulé au puits de l'Arc pour les débits d'exploitation de 0.55 m³/s et 1.1 m³/s est présentée en annexe 11.

		Flux moyens annuels (période simulée 1959 - 2014)						
		Pompage imposé (en m ³ /s)	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8	1.1
Mm ³ /an	Alimentation en provenance du Jurassique		12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7
	Pompage imposé		17.4	18.9	20.5	22.1	25.2	34.7
	Débordement		0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0
	Drainance Bégudien		6.8	8.0	9.4	10.8	13.7	23.0
	Vidange Fuvélien		1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0
Niveau puits Arc minimum (mNGF)			140	131	122	113	95	39
Rabattement maximum (m)			80	89	98	107	125	181

Illustration 74 : Bilan hydrologique du réservoir Fuvélien selon différents scénarios de pompage

Le fonctionnement hydrogéologique du système tel que décrit dans le modèle, fait que lorsque le débit exploité augmente, le débordement (et de façon plus marginale le flux de vidange du Fuvélien) diminue. Ainsi, lorsque le débit d'exploitation est doublé de 0.55 à 1.1 m³/s, le débordement passe de 0.9 Mm³/an à zéro. A contrario, la drainance du Bégudien augmente, et ceci d'autant plus que le réservoir Fuvélien est sollicité (elle passe de 6.8 à 23 Mm³/an). Il s'agit là d'une des limites de ce modèle de réservoirs, qui suppose que l'alimentation du Fuvélien par le Bégudien est illimitée (voir §4.1.3).

Les simulations indiquent qu'un débit d'exploitation constant de 0.6 m³/s permet de limiter le rabattement au puits de l'Arc à moins de 90 m. Une exploitation à 1.1 m³/s induirait un rabattement de 181 m. Ces résultats sont tout à fait proches de ceux obtenus par la modélisation analytique (§2.4) qui préconisait un débit maximal de 0.55 m³/s pour respecter le seuil de 90m de rabattement. Ils sont moins pessimistes car le modèle global prend en compte la recharge du système (via le réservoir Jurassique), ce qui n'est pas le cas de la modélisation analytique.

4.4. CONCLUSION

Pour compléter les approches présentées aux chapitres **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et 3, une modélisation du système fuvélo-Jurassique exploité par les puits de l'Arc a été mise en œuvre selon la méthode globale des réseaux de réservoirs.

Le modèle conceptuel retenu suppose que le réservoir Fuvélien est alimenté par une part constante de la vidange du réservoir Jurassique, indépendamment du niveau dans le Fuvélien. En accord avec l'interprétation des essais de pompage, le réservoir Fuvélien est également alimenté par un flux de drainance du Bégudien. La modélisation mathématique proposée vise à limiter le nombre de paramètres du modèle. Traduit numériquement, le modèle a été calé par comparaison des valeurs observées et simulées du niveau piézométrique au puits de l'Arc et du débit de débordement.

Les valeurs fournies par les approches hydrogéologiques et fonctionnelles pour la plupart des paramètres (superficie du réservoir Fuvélien, celle de l'impluvium du Jurassique, coefficient d'emmagasinement des deux réservoirs aquifères, coefficient de pertes de charge quadratique du puits) sont utilisées directement dans le modèle global et permettent d'obtenir un calage satisfaisant. Ce point conforte donc leur évaluation.

Les paramètres calés, quant à eux, varient dans un intervalle peu étendu autour des valeurs de référence. En particulier, le calage du modèle global **confirme une forte inertie du réservoir Fuvélien** (lié au volume important), avec un tarissement apparent de 3 à 5 ans. Il confirme également le **transfert rapide (1 à 3 jours) de pression entre le Jurassique et le Fuvélien**.

Enfin, le modèle repose sur le principe qu'une fraction constante du flux qui sort (par vidange naturelle) du réservoir Jurassique alimente le réservoir Fuvélien. Le calage du modèle estime **qu'entre 75 et 80% de la vidange du Jurassique s'écoule directement dans le réservoir Fuvélien**. Les 20 à 25% restant constituent un débit de fuite dont l'exutoire est inconnu.

L'intérêt de l'approche proposée ici est qu'elle permet une quantification des flux moyens annuels. Ainsi, pour une pluie efficace moyenne de 178 mm/an, on évalue **le débit de fuite du Jurassique entre 2.5 et 5 Mm³/an, et la vidange du Fuvélien entre 1.3 et 2.1 Mm³/an (pour un total compris entre 4.6 et 7 Mm³/an)**. L'exutoire de ces flux est inconnu. Néanmoins, il convient de souligner que l'exhaure au puits Gérard de la mine de Gardanne (située au-delà de la limite Ouest de la zone d'étude) représente un volume annuel moyen de 5.5 Mm³ sur la période 1959–2014. Ce volume est donc du même ordre de grandeur que la somme des pertes du système fuvélo-jurassique telles qu'évaluées ici. A titre indicatif, la fuite du Jurassique calculée avec le jeu de paramètres présenté au §4.2.2, est comparée aux débits d'exhaure du puits Gérard sur l'illustration 75.

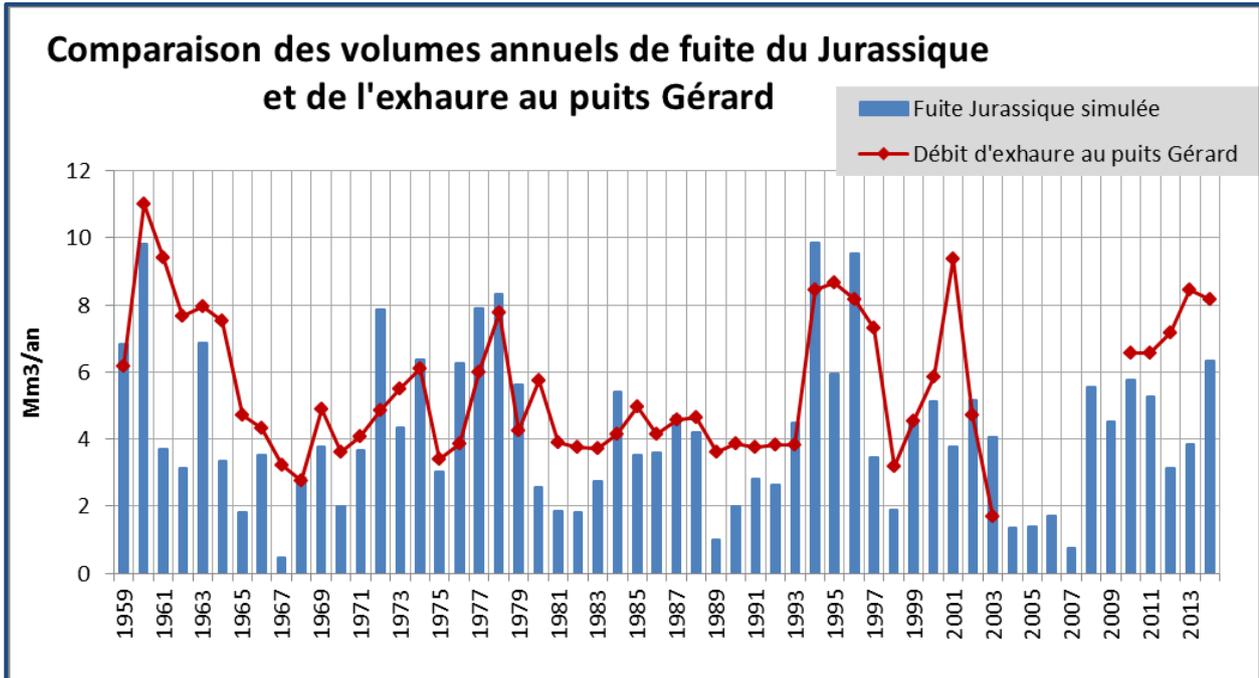


Illustration 75 : Comparaison des volumes annuels de fuite du Jurassique et d'exhaure au puits Gérard

Le modèle de réservoirs ne décrit pas les écoulements entre le réservoir Jurassique et le réservoir des mines de Gardanne. Ceci explique que la comparaison de ces mêmes flux au pas de temps mensuels révèle des dynamiques très différentes (Illustration 76).

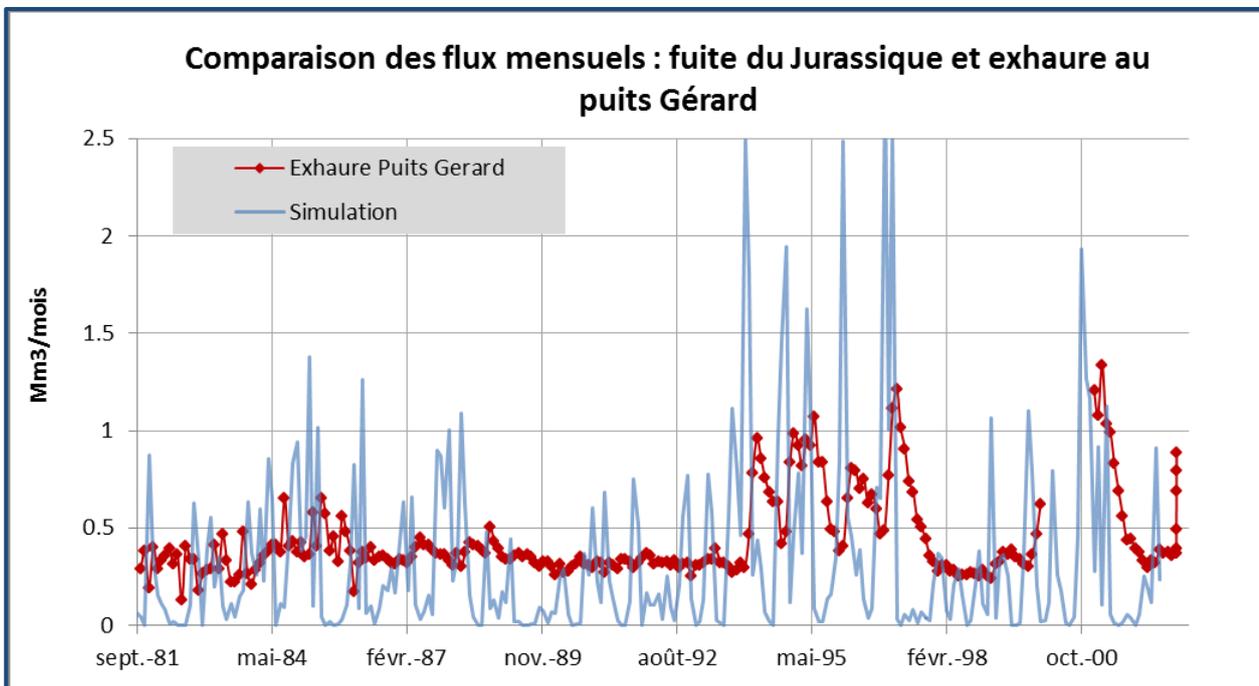


Illustration 76 : Comparaison des flux mensuels de fuite du Jurassique et d'exhaure au puits Gérard

Le modèle a permis de simuler différents scénarios d'exploitation. Les résultats indiquent qu'un débit d'exploitation constant de 0.6 m³/s permettrait de limiter le rabattement au puits de l'Arc à moins de 90 m. Une exploitation à 1.1 m³/s induirait un rabattement de 181 m. Ces résultats confortent ceux obtenus par la modélisation hydrodynamique analytique. Ils doivent néanmoins

être pris avec précaution à fort débit d'exploitation ($1.1 \text{ m}^3/\text{s}$), car le modèle ne limite pas le flux de drainance du Bégudien. Ainsi, au-delà d'un débit d'exploitation constant de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, la drainance du Bégudien calculée par le modèle représente un apport plus important que l'alimentation par le Jurassique, ce qui paraît peu cohérent avec les résultats de l'étude hydrochimique.

La modélisation globale selon l'approche des réservoirs a donc permis de conforter et préciser les connaissances et résultats fournis par l'analyse hydrodynamique (interprétation des essais de pompage), l'analyse fonctionnelle et l'analyse hydrochimique. Des incertitudes demeurent néanmoins sur le fonctionnement du système, et en particulier sur l'exutoire des réservoirs Fuvélien et Jurassique. Des mesures piézométriques supplémentaires dans le Jurassique, dans le Bégudien et à la limite Ouest du système permettraient sans doute de compléter et mieux contraindre le modèle proposé.

5. Conclusions / Perspectives

Le projet ARK, mené en partenariat entre l'Agence de l'Eau RM&C, le Conseil Régional PACA, le Conseil Départemental 13, la SCP et le BRGM, avait pour objectif d'apporter des éléments d'appréciation complémentaires sur le fonctionnement de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne.

Pour répondre à cet objectif, diverses investigations ont été menées pour acquérir des données sur les plans de l'hydraulique et de la chimie. Situés à Rousset, au centre du bassin d'Aix-Gardanne, les puits de l'Arc, anciens puits miniers qui ont atteint les calcaires du Fuvélien, ont servi d'accès à l'aquifère profond des calcaires jurassiques. Au niveau des puits de l'Arc, l'aquifère profond est sous recouvrement des horizons Bégudien et Fuvélien de 200 m d'épaisseur environ chacun. Les principales actions engagées au long du projet (de 2014 à 2016) peuvent se résumer selon :

- instrumentation d'une quinzaine de points (forages et sources) pour, principalement, le suivi des niveaux et instrumentation spécifique des puits de l'Arc pour le suivi du comportement hydraulique de l'aquifère et des puits ainsi que du comportement géochimique des fluides exhaérés (en artésianisme et/ou en pompage) ;
- réalisation de deux piézomètres au voisinage immédiat des puits de l'Arc pour qualifier le comportement hydraulique des horizons Bégudien et Fuvélien ainsi que la chimie spécifique de ces niveaux ;
- réalisation d'un double traçage depuis deux zones d'infiltration supposées des pluies, au nord du bassin (secteur de la Sainte-Victoire) et au sud du bassin (secteur de Regagnas) avec suivi d'incidence sur 8 mois en 2014 (aucune restitution du traceur n'a été observée) ;
- réalisation d'un pompage d'essai à gros débit (jusqu'à 1100 l/s) durant 4 mois en 2014 (descente puis remontée) sur les puits de l'Arc avec suivi hydraulique sur tous les points instrumentés ;
- réalisation d'un suivi géochimique renforcé avant, pendant et après la phase de pompage sur les différents points prélevables, dont des forages situés à distance notable (mine de Gardanne à 12 km, forage de Meyreuil à 7.5 km) ;
- compilation de l'ensemble des données acquises dans un rapport intermédiaire édité en mai 2015 (Réf. BRGM/RP-64610-FR) et interprétation de l'ensemble des résultats obtenus (le présent rapport) sous forme de trois composantes : approche hydrodynamique, approche fonctionnelle et géochimique, et approche modélisation.

Le détail de chacune des trois composantes abordées au cours du projet est explicité par les chapitres 2, 3 et 4 du présent rapport.

Concernant l'**approche hydrodynamique**, les conclusions peuvent être énoncées selon :

- la superficie globale de l'aquifère Fuvélien situé sous couverture tertiaire est estimée à environ 170 km². Ce chiffre est cohérent avec l'information géologique (charriage et synclinal) ;

- les connexions hydrauliques : Bégudien (sus-jacent), l'Hauterivien (sous-jacent) traduisent un système stratifié horizontalement et compartimenté latéralement : Fuvélien-Gardanne, Jurassique (Kirbon) ;
- la drainance du Jurassique n'est pas vue par l'hydraulique mais par la géochimie. Il est probable qu'elle soit locale, fonction de la distribution du réseau karstique. Il est aussi probable qu'un niveau peu-perméable (dans le Fuvélien, et/ou niveaux argilo-marneux du Valdोनien à l'Hauterivien) limite les échanges entre ces deux niveaux ;
- les rabattements mesurés au forage de Meyreuil (7.6 km Hauterivien, 12.6 m) par rapport à ceux mesurés au niveau du piézomètre Ark2 (55 m, Bégudien, 7,7 m) confortent l'idée que la drainance d'aquifères sous-jacents est beaucoup plus importante que celle venant de compartiments supérieurs (Cf. Bégudien) ;
- pour un pompage en continu, avec le dispositif de pompage actuel, le débit moyen annuel de pompage ne peut dépasser 0,55 m³/s. Avec un usage total de la hauteur des puits (pompes abaissées), le débit de 1,1 m³/s (droit actuel), pourrait être envisagé ;
- un pompage en continu (24h/24h et 365 j/an) sur les puits de l'Arc devrait occasionner, même au débit limité de 0,55 m³/s, un rabattement très important des niveaux pour les autres ouvrages exploités dans le secteur et ce, même pour ceux exploités à plusieurs km. Le risque de conflit avec des ouvrages proches (Peynier) et/ou des effets de subsidence ne doivent pas être négligés pour définir les conditions d'exploitation du gisement ;
- les différentes simulations réalisées au cours du projet, notamment à grande distance des puits de l'Arc, sont à prendre avec précaution en l'absence d'un nombre de points suffisants pour caler, sur l'ensemble du gisement, le comportement hydraulique sur de grandes échelles de temps et d'espace ;
- les perspectives d'exploitation du gisement des calcaires jurassiques à fort débit sont importantes, notamment dans le secteur des puits de l'Arc. Les essais réalisés n'ont permis d'apprécier que de façon relative (indirecte) la productivité réelle de l'aquifère des calcaires jurassiques qui mériterait d'être évaluée plus directement.

Concernant l'**approche fonctionnelle et géochimique**, les conclusions peuvent être énoncées selon :

- la qualification du fonctionnement du karst jurassique et la ré-évaluation du bilan hydrogéologique permettent de préciser que l'emprise de l'impluvium où se produit la recharge du Jurassique sous couverture dont une part contribue à l'alimentation du Fuvélien du bassin d'Aix Gardanne est estimée à 95 km² environ (81 km² pour la Sainte-Victoire et 14 km² pour Regagnas) ;
- l'aquifère Jurassique sous-couverture impose ou contrôle la signature géochimique des eaux du réseau de fissures/draines du réservoir Fuvélien mobilisé par le pompage ;
- les eaux pompées résultent d'un mélange entre une eau ancienne (anté1930) et une eau récente (quelques années voire subactuelle). La part récente est liée à la recharge par le jurassique ;
- dans le Jurassique, le(s) réseau(x) de drain(s) karstique(s) qui contribuent à alimenter les puits de l'Arc apparaissent bien connectés à leur zone de recharge, les transferts de masse sont rapides lors des crues (mobilisation d'une eau récente subactuelle <1an) ;

- la contribution d'eau récente est estimée à 25% au niveau du forage de Peynier contre 40% pour les puits de l'Arc. Cela suggère que la connexion hydraulique avec le Jurassique sous-jacent est moins importante, ou moins développée au niveau de Peynier. Ainsi, la connexion avec le Jurassique serait plutôt ponctuelle, au gré de la distribution du réseau karstique du Jurassique. En outre le niveau peu-perméable entre le Fuvélien et le Jurassique limite les échanges entre ces deux niveaux aquifères.

Concernant l'**approche modélisation**, les conclusions peuvent être énoncées selon :

- le modèle développé confirme les conclusions des autres approches : (i) le réservoir Fuvélien exploité est connecté au Bégudien et au Jurassique, (ii) il y a une forte inertie du réservoir (lié à son important volume), (iii) il y a un transfert rapide de pression du Jurassique vers le Fuvélien (quelques jours), (iv) les valeurs des paramètres hydrodynamiques sont confirmées ;
- pour un volume pompé de 9.5 Mm³/an (valeur actuelle), le bilan hydrologique apporté par l'approche modélisation indique (i) une alimentation du Fuvélien par le Jurassique de 12 à 15 Mm³/an, (ii) une fuite du Jurassique de 2.5 à 5 Mm³/an et (iii) une vidange du Fuvélien de 1.5 à 2 Mm³/an ;
- la simulation des scénarios permet de confirmer qu'au débit continu de 0.6 m³/s on observerait un rabattement maximal < 90 m.

Sur la base de ces conclusions spécifiques à chacune des composantes abordées, une série de conclusions plus générales permet de souligner les éléments d'appréciation obtenus au cours du projet pour mieux qualifier le fonctionnement du système karstique du bassin d'Aix-Gardanne :

- le projet a permis de passer de simples estimations et hypothèses sur le gisement à une véritable caractérisation in situ. Il était notamment supposé jusqu'alors que l'on était en présence globalement d'un seul aquifère. Le projet permet d'affirmer désormais que plusieurs aquifères sont en cause, avec des caractéristiques très distinctes et que le niveau aquifère majeur est celui des calcaires jurassiques (non atteint par les puits de l'Arc) ;
- les puits de l'Arc bénéficient à l'heure actuelle d'un droit d'eau de 1,1 m³/s. Les simulations réalisées permettent de préciser que ce droit d'eau est très surévalué pour un pompage en continu. Un tel pompage (en continu) doit être limité dans le temps. Il peut cependant servir à des situations d'urgence correspondant à une exploitation temporaire (quelques jours) ;
- le gisement des calcaires jurassiques est artésien jaillissant, il maintient, par-dessous, une sur pression importante sur les horizons Fuvélien et Bégudien. Le risque qu'une exploitation du gisement profond (les calcaires jurassiques) induise, sur le long terme, une diminution de la sur-pression relative des horizons supérieurs et, en conséquence des phénomènes de subsidence, doit rester présent pour assurer l'avenir ;
- la gestion durable des eaux souterraines de l'aquifère des calcaires Fuvélo-Jurassiques nécessite de disposer d'un réseau de suivi adapté. Le forage de Peynier est un point de suivi de l'aquifère Jurassique très pertinent mais seul un vrai réseau (plusieurs points à distance des puits de l'Arc, répartis de manière homogène sur l'ensemble de l'Aquifère) peut permettre d'apprécier le comportement du gisement sur le long terme ;

- le moteur du fonctionnement hydrogéologique du système (le bassin d'Aix-Gardanne) est le Jurassique. Le projet n'a pu, en réalité, qu'appréhender de façon relative la capacité d'exploitation du gisement des calcaires jurassiques car les puits de l'Arc ne sont pas assez profonds. Ainsi la connaissance du gisement est encore, en cette fin de projet, très perfectible. Nonobstant, les résultats acquis permettent d'affirmer que la capacité d'exploitation de ce gisement est très importante ;
- le projet n'a permis d'apporter qu'une vision très indirecte et très partielle de l'impact de l'exploitation du Jurassique en profondeur, que ce soit en termes de volumes prélevables qu'en termes d'incidence sur le débit de fuite vers Gardanne. Le projet a permis tout de même de noter que l'incidence d'un pompage à gros débit sur les puits de l'Arc était marquée au niveau de Gardanne ;
- la ressource renouvelable en eau souterraine des calcaires jurassiques est estimée à environ 17 Mm³/an, dont 14 Mm³/an alimentent le réservoir Fuvélien dans lesquels ils sont prélevés (pompage et surverse) ;
- la caractérisation d'un comportement karstique du gisement des calcaires jurassiques est désormais clairement établie, au terme du projet, compte tenu des valeurs de transmissivité très élevées qui ont été calculées et des éléments de transit rapide d'eau récente.

Sur la base de l'avancée notable dans la compréhension du fonctionnement de l'aquifère des calcaires fuvélo-jurassiques du bassin d'Aix-Gardanne, le projet ARK ouvre diverses perspectives qui pourraient guider les futures réflexions et nouveaux investissements de demain.

Une **première perspective** concerne une approche très opérationnelle axée sur l'optimisation de l'exploitation du gisement via les puits de l'Arc. L'idée est d'augmenter la productivité de ces puits et de réduire les coûts de production (pompage). Pour ce faire il convient de mieux gérer les pertes de charge liées aux caractéristiques propres des puits de l'Arc et de mobiliser plus directement l'aquifère profond des calcaires jurassiques dont on sait qu'ils n'ont pas été atteints par les puits de l'Arc. Plusieurs pistes pourraient être utilement explorées :

- simple nettoyage des puits actuels avec potentiellement ré-ouverture des galeries qui ont été obturées au moment où la mine a commencé à s'envoyer (sous réserve que cette opération soit réalisable techniquement) ;
- surforation en gros diamètre en fond de puits (de 400 m à environ 800m) afin de capter le niveau inférieur productif des calcaires jurassiques dont on sait qu'il constitue le gisement d'eau souterraine majeur du secteur ;
- réalisation d'un nouvel ouvrage en gros diamètre, d'une profondeur de l'ordre de 800 m de profondeur, captant les calcaires jurassiques.

La piste à retenir doit, bien entendu, s'appuyer sur une étude du coût de tels travaux (à priori très important) au regard des bénéfices qu'une meilleure exploitation du gisement peut permettre et donc, en définitive, aux besoins que l'on veut couvrir.

Une **deuxième perspective** concerne un aspect plus réglementaire, en lien avec la notion de "*gestion durable*" du gisement et donc la notion de "*volume prélevable*". Des interrogations risquent en effet de voir le jour quant aux autorisations à accorder pour exploiter ce gisement à l'avenir. La commune de Peynier a ouvert une voie en réalisant son forage profond et celui-ci devrait être ouvert à l'exploitation prochainement. Qu'advient-il si plusieurs communes, industriels ou même particuliers suivent ce chemin ? Ou s'arrêteront les autorisations d'exploiter ? Quand devra-t-on considérer qu'il y a surexploitation ?

La réponse à toutes ces questions va nécessiter de disposer d'un réseau de suivi et de données complémentaires sur cet aquifère afin d'obtenir une vision plus large (3D) du gisement et de consolider l'ébauche de fonctionnement hydraulique que le projet a apporté. La réponse aux questions posées pourrait nécessiter la réalisation d'ouvrages complémentaires pour le suivi du comportement de l'aquifère. Des piézomètres de petits diamètres mais profonds seront très probablement nécessaires.

L'enjeu en termes d'approvisionnement en eau souterraine du secteur semble réel et vu que la ressource est très importante et de grande qualité, cette deuxième perspective pourrait être une suite logique du projet ARK.

Une **troisième perspective** concerne la notion de gestion active de cet aquifère karstique profond. En effet les calcaires fuvelo-jurassiques sont un réservoir d'importance régionale qui dispose d'une capacité de stockage vraisemblablement élevée dans un contexte climatique où les épisodes pluvieux (parfois intenses) ne sont pas réguliers et non concomitants avec les périodes de plus forts besoins. Cet aquifère pourrait jouer un rôle actif de stockage / déstockage plus important, ce qui reste bien entendu, à ce stade, une hypothèse de travail qu'il convient d'étudier. Cette idée de gestion active est d'autant plus justifiée que le projet a mis en évidence la présence d'une composante très récente indiquant une recharge rapide du Jurassique après un épisode de pluie. Des comportements similaires ont été observés sur d'autres systèmes karstiques (source du Lez). La question est de savoir si le gisement des calcaires jurassiques du bassin d'Aix-Gardanne peut (ou non) répondre à une telle logique.

Enfin une **quatrième perspective** concerne à court ou moyen terme la notion de protection du gisement et de préservation de la qualité des eaux de l'aquifère des calcaires jurassiques qualifié ressource stratégique dans le SDAGE. Le projet a permis de quantifier, au moins partiellement, une ressource très importante et d'excellente qualité. Il a permis en outre de mieux préciser les secteurs d'impluvium et d'extension du gisement. Cette meilleure définition des secteurs à protéger pose la question du cadre réglementaire qui permettra demain de mettre en œuvre une politique de protection sur ces territoires jugés sensibles. Ces territoires (Sainte-Victoire et Regagnas) sont en effet, dans la réalité, assez éloignés du secteur des puits de l'Arc où, potentiellement, une exploitation importante du gisement pourrait s'opérer. La question qui se pose alors est celle d'une gestion patrimoniale du territoire en surface pour l'usage d'une ressource en eau souterraine située en dehors (et même à distance notable) de la zone à protéger.

Annexe 1

Eléments de bibliographie

Ancel A., Moulin M., Rampnoux N., 2004. Bassin d'Aix-Gardanne : état des connaissances géologiques structurales et hydrogéologique. Rapport de phase 1 : Synthèse des données hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-53238-FR. 100 p., 39 ill.

Bailly-Comte V., Coueffe R., Dewandel B., Ladouche B., Moulin M., Vigouroux P., 2015, Projet de recherche ARK – Amélioration de la connaissance de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne – Données acquises, Rapport BRGM/RP-64610-FR.

Blavoux, B., P. Lachassagne, A. Henriot, B. Ladouche, V. Marc, J.-J. Beley, G. Nicoud, et P. Olive (sous presse) - A Fifty-year chronicle of tritium data for characterising the functioning of the Evian and Thonon (France) glacial aquifers, *Journal of hydrology* - <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.029>.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Pirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE*, 293-302.

Caillol M., Dellery B., Glintzboeckel C., 1988. Bassin lignitifère de l'Arc (13). Bilan général des connaissances en vue de sa préservation à moyen et long termes. Rapport BRGM 88-SGN-524-PAC, 37 p., 11 fig., 1 ann. [comporte une liste bibliographique exhaustive des travaux publiés sur le bassin de l'Arc].

Clark, I. et P. Fritz (1997) - *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, New-York. 328 p.

Cooper H.H. and Jacob C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geoph. Union Trans.* 27, 526-534.

Craig, H. (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133 p. 1702-1793.

Deines P., Langmuir D. Harnom R.S. (1974) - Stable carbone isotope ratios and the existence of a gaz phase in the evolution of carbonate ground waters. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 38, 1147-1164.

Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J., 1992. Testing design and analysis. *Oilfield and analysis*. 28-45.

Dewandel B., Tertois L., Vigouroux P., 2014. Projet de recherche ARK – Piézomètres ARK1 et ARK2 – Dossier des Ouvrages Exécutés – Rapport final BRGM/RP-63684-FR. 31 p, 16 ill., 2 ann..

Durozoy G., 1978. Etablissements Sellier-Leblanc. Bassin de Gardanne – Puits de l'Arc (Bouches-du-Rhône). Données hydrogéologiques. Rapport BRGM 78-SGN-648-PCA, 20 p., 2 tabl., 13 ann.

Evans, G. V., R. L. Otlet, A. Downing, R. A. Monkhouse et G. Rae (1979) -Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. *Isotope Hydrology* (coll./conf.), Vienna, IAEA, p. 679-708.

Faure, G. (1986) - Principles of isotope geology : 2nd edition, 589 pp., John Wiley & Sons, Inc.

Fontes, J. C. et J. M. Garnier (1979) -Determination of the initial ^{14}C activity of total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. *Water resources research* 15 (2) p. 399-413.

Glantzboeckel C., 1975. Les possibilités d'extension du gisement de lignite de Gardanne (13). Etude de synthèse préliminaire. Rapport BRGM 75-SGN-228-PRC, 56 p., 3 fig., 10 pl., 1 ann.

Glantzboeckel C., 1980. Reconnaissance de l'extension du gisement de lignite de Gardanne. Synthèse des résultats. Rapport BRGM 80-SGN-357-PAC, 85 p., 29 fig., 12 pl., 7 ann.

Glantzboeckel C., 1980. Recherche d'un débit complémentaire pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône). Rapport BRGM 80-SGN-544-PAC, 51 p., 2 fig., 3 pl.

Glantzboeckel C., 1983. Gisement de lignite de Gardanne (13). Reconnaissance de l'extension (campagne de sondages 1982). Synthèse des résultats et perspectives. Rapport BRGM 83-SGN-142-PAC, 55 p., 11 fig., 10 pl., 4 ann.

Hantush, M.S., 1964. Hydraulics of wells. In: Chow V.T. (Ed.), *Advances in Hydroscience*, vol. 1. Academic Press New York, N.Y.

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

Ingerson, E. et F. J. Pearson (1964) - Estimation of age and rate of motion of groundwater by ^{14}C -méthod. *Recent Researches in Field of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry.* (coll./conf.), Tokyo, p. 263-283.

Kassem P. et I. Fournier. 1994. H.B.M.C. – Unité d'Exploitation Provence – Alimentation de la tranche 5 à partir du puits de l'Arc. Antéa. Rapp. A01310, 8 pp. +annexes.

Kruseman, G.P., de Ridder N.A., 2000. Analysis and evaluation of pumping test data. ILRI publication n°47. 377 p.

Ladouche B., Aquilina L., Doerfliger N. (2009) - Chemical and isotopic investigation of rainwater in southern France (1996-2002): potential use as input signal for karst functioning investigation, *Journal of Hydrology*, Vol. 367, Issues 1-2, p.150-164

Le Strat P., avec la collaboration de Castillo C., 2008. Synclinal de l'Arc. Géologie des aquifères. Rapport BRGM/RP-56857-FR, 223 p., 83 fig., 14 ann.

Maloszewski, P., and A. Zuber (1982) - Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers: 1. Models and their applicability, *Journal of Hydrology*, 57(3-4), 207-231.

Matthews A., Fouillac C., Hill R., O'Nions R.K. Oxburgh E.R. (1987) - Mantle-derived volatiles in continental crust: the Massif Central of France. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85, 117-128.

Mook, W. G. (1976) - The dissolution-exchange model for dating groundwater with ¹⁴C. IAEA 213-225 p.

Mook, W. G. et J. J. de Vries (2000) - Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle - Principles and Applications. Technical Documents in Hydrology, vol. 1-6, UNESCO/IAEA, Paris.

Moulin M., Ladouche B., avec la collaboration de Cubizolles J. et de Dufour P., 2007. Etude hydrogéologique des ressources en eau souterraines profondes du bassin d'Aix – Gardanne. Phase 2 : Acquisition de données complémentaires (1ère année) – résultats et interprétations. Rapport BRGM/RP-55762-FR, 113 p., 17 ill., 2 ann.

Moulin M., avec la collaboration de Dufour P. et le Strat P., 2011. Etude hydrogéologique des ressources en eau souterraines profondes du bassin d'Aix – Gardanne. Synthèse des résultats de la dernière phase : bilan et conclusion. Rapport final BRGM/RP-57641-FR, 159 p., 30 ill., 3 ann.

Phillips, F. M. et Castro, M. C. (2003) - Groundwater dating and residence time measurements, in Treatise on Geochemistry, ISBN 0-08-044340-0, Vol. 5, pp. 451-497.

Renard Ph., Glenz D. and M. Mejias. 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal. 17: 589–600.

Riou, V. 2014. Forage des Cannebiers. Déclaration au titre du code de l'Environnement. Dossier de fin de travaux. Riou Consult SARL. 14 p.

Rouire J., Nury D., Rousset C., Catzigras F., Durand J.-P., Guieu G., Tempier C., 1969. Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille Aix-en-Provence (n°1021).

Spane F.A. and Wurstner S.K., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

SCP, 2014. Tarage du seuil de déversant de la surverse des puits de l'Arc, oct.2014 ; 13 p

Shlumberger. 2002. Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

Annexe 2

Rappel des résultats du pompage d'essai 2014

Ces données et graphiques sont extraits du rapport BRGM/RP-64610-FR édité en mai 2015 qui fait état de l'ensemble des données acquises au cours du projet, notamment lors de l'essai de longue durée réalisé sur les puits de l'Arc.

- Figure A2 - 1 : Essais par pompage sur les puits de l'Arc – Suivi de l'évolution du niveau piézométrique (puits 1 & 2) et du débit de pompage au puits de l'Arc. 117*
- Figure A2 - 2 : Evolution du niveau piézométrique (puits 1 & 2) et du débit de pompage au puits de l'Arc - Détail des essais par paliers de débit. 117*
- Figure A2 - 3 : Evolution des niveaux piézométriques dans les ouvrages d'observation Ark1&2, Meyreuil, Peynier, Trets Kirbon, Trets les Vauds. 118*
- Figure A2 - 4 : Evolution des niveaux piézométriques dans les ouvrages d'observation Trets Fuveau, Puits Gérard (pompage constant durant les essais) et Puits Y & Z (Gardanne). 118*
- Figure A2 - 5 : Tableau des distances aux puits de l'Arc des ouvrages suivis durant les essais sur les puits de l'Arc. 119*
- Figure A2 - 6 : Rabattements sur les ouvrages suivis créés par le pompage aux puits de l'Arc (graphe du haut). Graphe du bas = zoom sur le piézomètre Kirbon. 119*

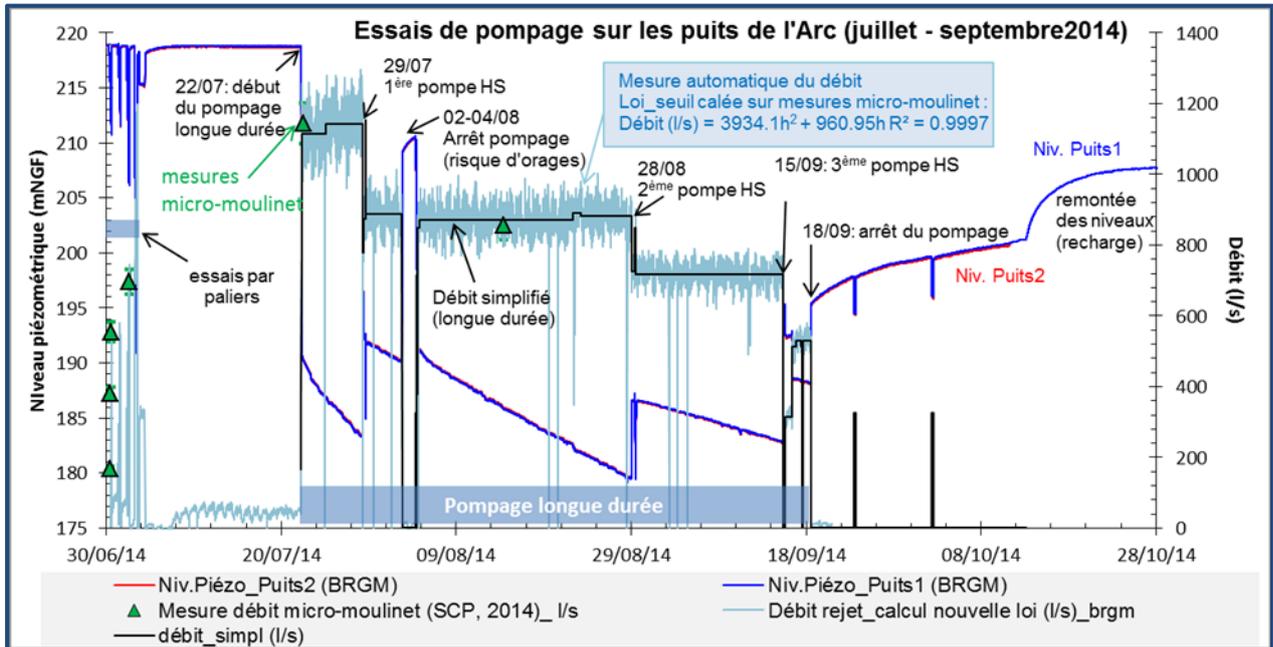


Figure A2 - 1 : Essais par pompage sur les puits de l'Arc – Suivi de l'évolution du niveau piézométrique (puits 1 & 2) et du débit de pompage au puits de l'Arc.

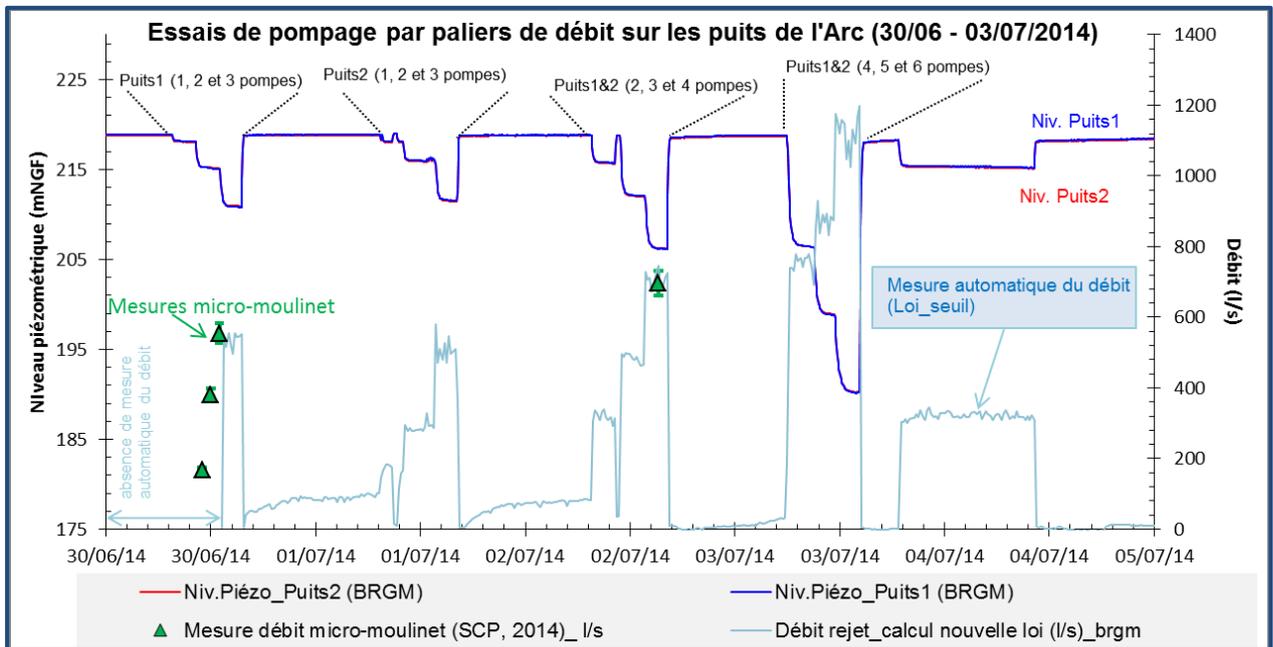


Figure A2 - 2 : Evolution du niveau piézométrique (puits 1 & 2) et du débit de pompage au puits de l'Arc - Détail des essais par paliers de débit.

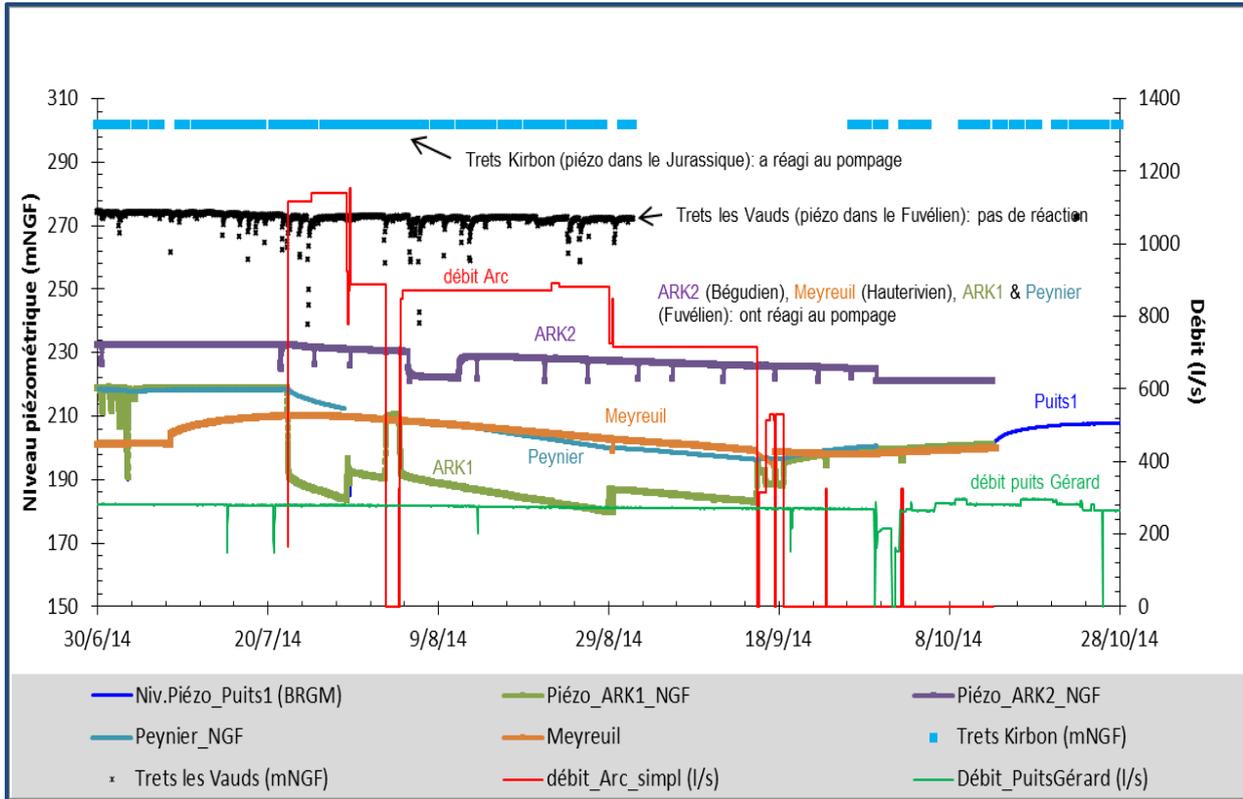


Figure A2 - 3 : Evolution des niveaux piézométriques dans les ouvrages d'observation Ark1&2, Meyreuil, Peynier, Trets Kirbon, Trets les Vauds.

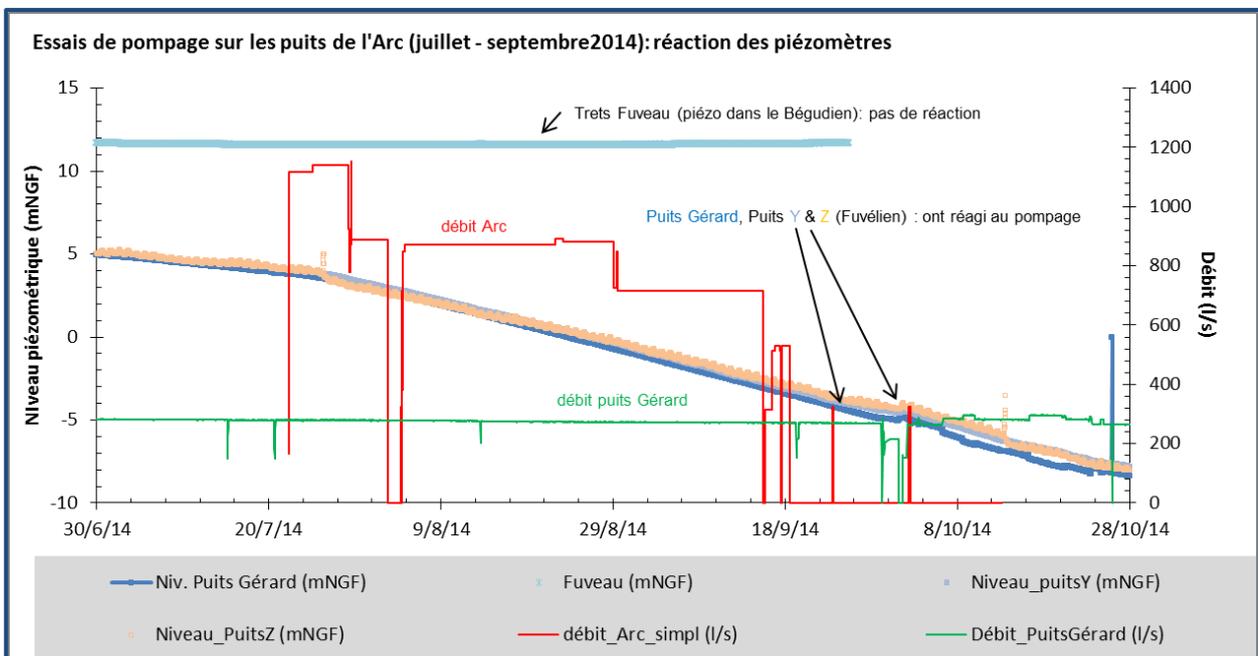


Figure A2 - 4 : Evolution des niveaux piézométriques dans les ouvrages d'observation Trets Fuveau, Puits Gérard (pompage constant durant les essais) et Puits Y & Z (Gardanne).

Points de suivi de l'essai	Distance aux puits de l'Arc (m)	Points de suivi de l'essai	Distance aux puits de l'Arc (m)
Piézo ARK1	51	Trets Les Vauds	5 104
Piézo ARK2	55	Trets Fuveau	5 051
Peynier	1 270	Puits Gérard	12 319
Meyreuil	7 639	Puits Z	11 236
Trets Kirbon	6 916	Puits Y	13 389

Figure A2 - 5 : Tableau des distances aux puits de l'Arc des ouvrages suivis durant les essais sur les puits de l'Arc.

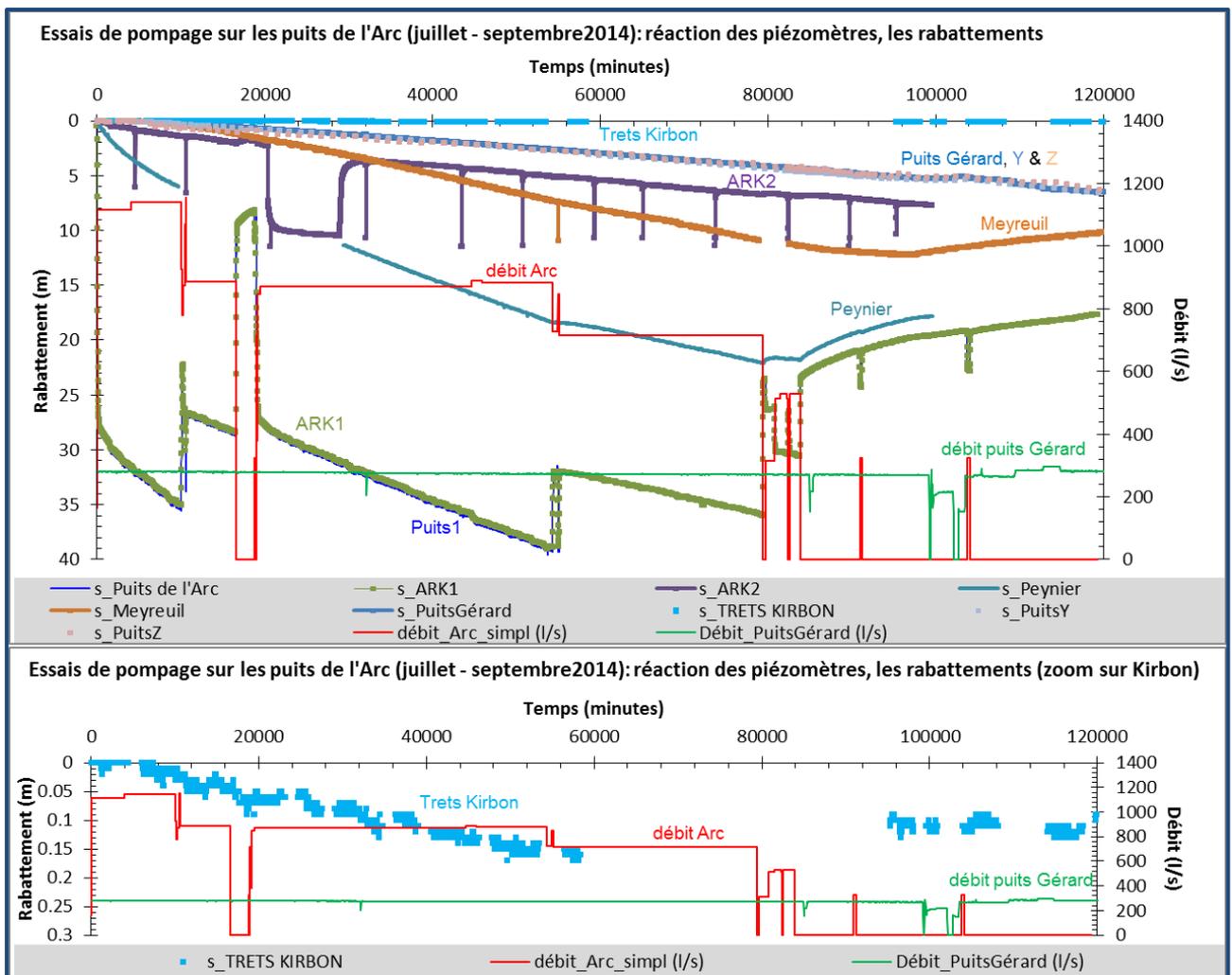


Figure A2 - 6 : Rabattements sur les ouvrages suivis créés par le pompage aux puits de l'Arc (graphe du haut). Graphe du bas = zoom sur le piézomètre Kirbon.

Annexe 3

Méthodologie de diagnostic des pompages d'essai

La méthode de diagnostic des pompages d'essai utilisée au cours du projet ARK est décrite par la figure a) ci-après. Les essais réalisés sur les puits de l'Arc ont été interprétés par cette méthode. Cette technique a l'avantage de travailler en courbes types des essais (courbe de rabattement pour un débit unitaire), ce qui permet de comparer strictement tous les essais entre eux, que leurs durées ou les débits en cause soient équivalents ou non.

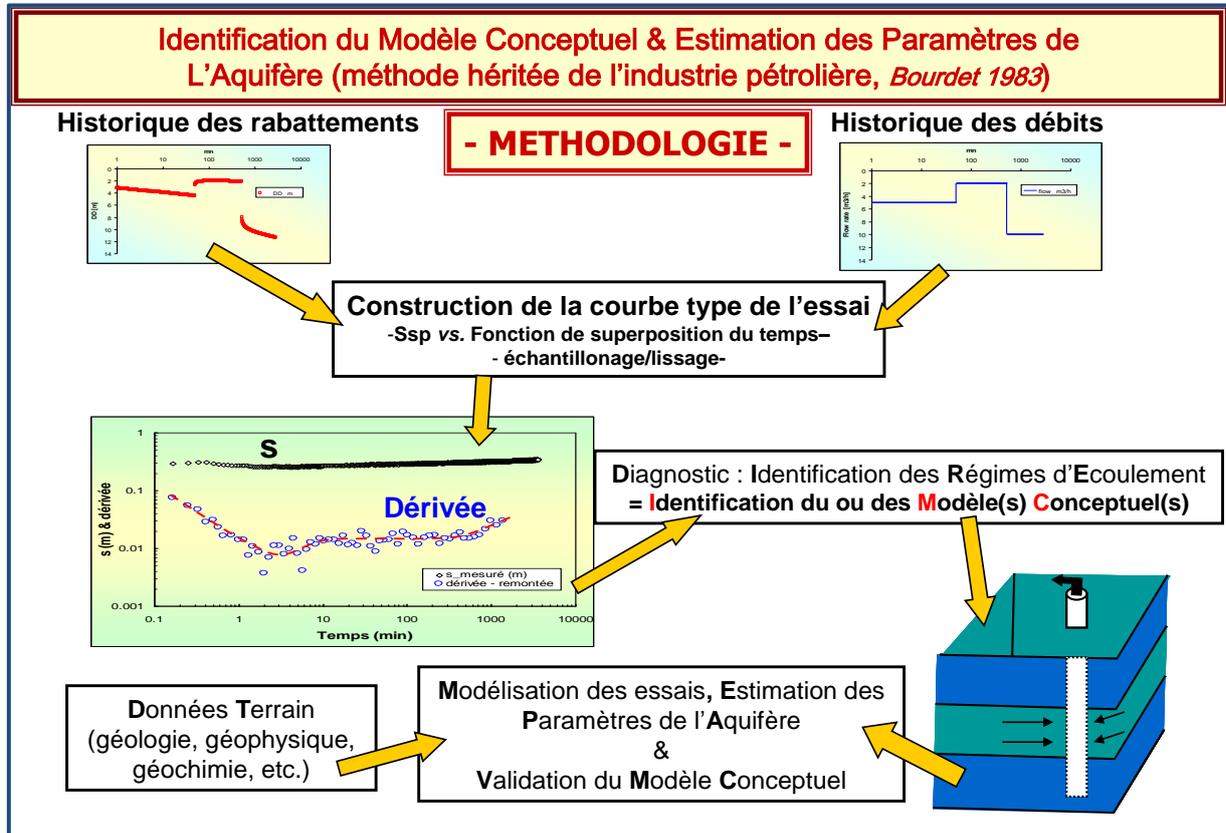


Figure a) : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.

L'interprétation des essais de pompage dans les formations fracturées ou dans les formations hétérogènes telles que les basaltes est souvent complexe, conséquence de la géométrie des réseaux de fractures, des relations fracture-matrice, de la connexion de ces réseaux avec des aquifères de surface, de l'empilement et de la géométrie de séries à perméabilités différentes lorsqu'il s'agit de formations sédimentaires ou volcaniques, etc.

Afin de déterminer les différentes composantes d'écoulement associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, il est nécessaire de porter une attention particulière aux essais de pompage et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur les essais avant toute modélisation. Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements (à la descente ou à la remontée des niveaux) qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet et al., 1983, 1989 ; Spane and Wurstner, 1993 ; etc.). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère mais aussi pour chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l'aquifère par exemple), il correspond un certain régime ou une succession de certains régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck et al., 1992, Schlumberger, 2002 ; Renard et al., 2009).

Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle), l'atteinte de deux limites étanches parallèles par une pente de $\frac{1}{2}$, 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1, un captage partiel de l'aquifère par une pente de $-\frac{1}{2}$, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. La figure b) ci-après présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire où, au fur et à mesure, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.

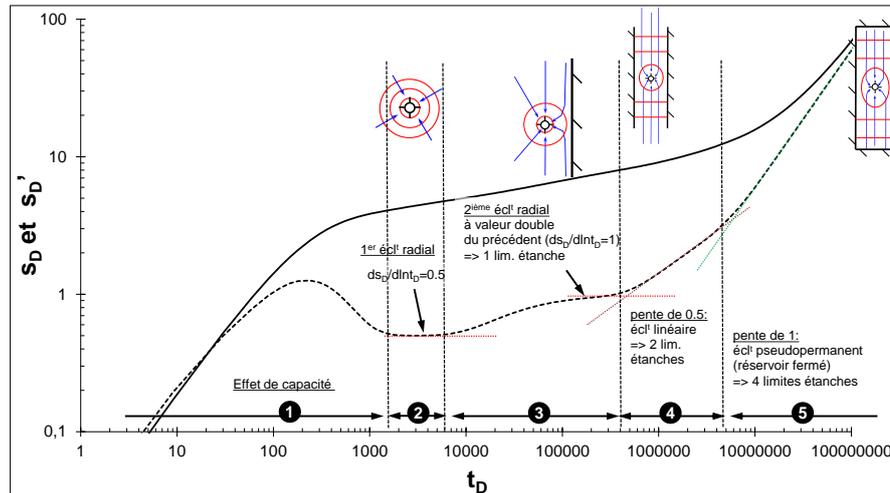


Figure b) : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos.

Nota : sur l'illustration précédente, t_D = temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) = rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit (Bourdet et al., 1983), le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles.

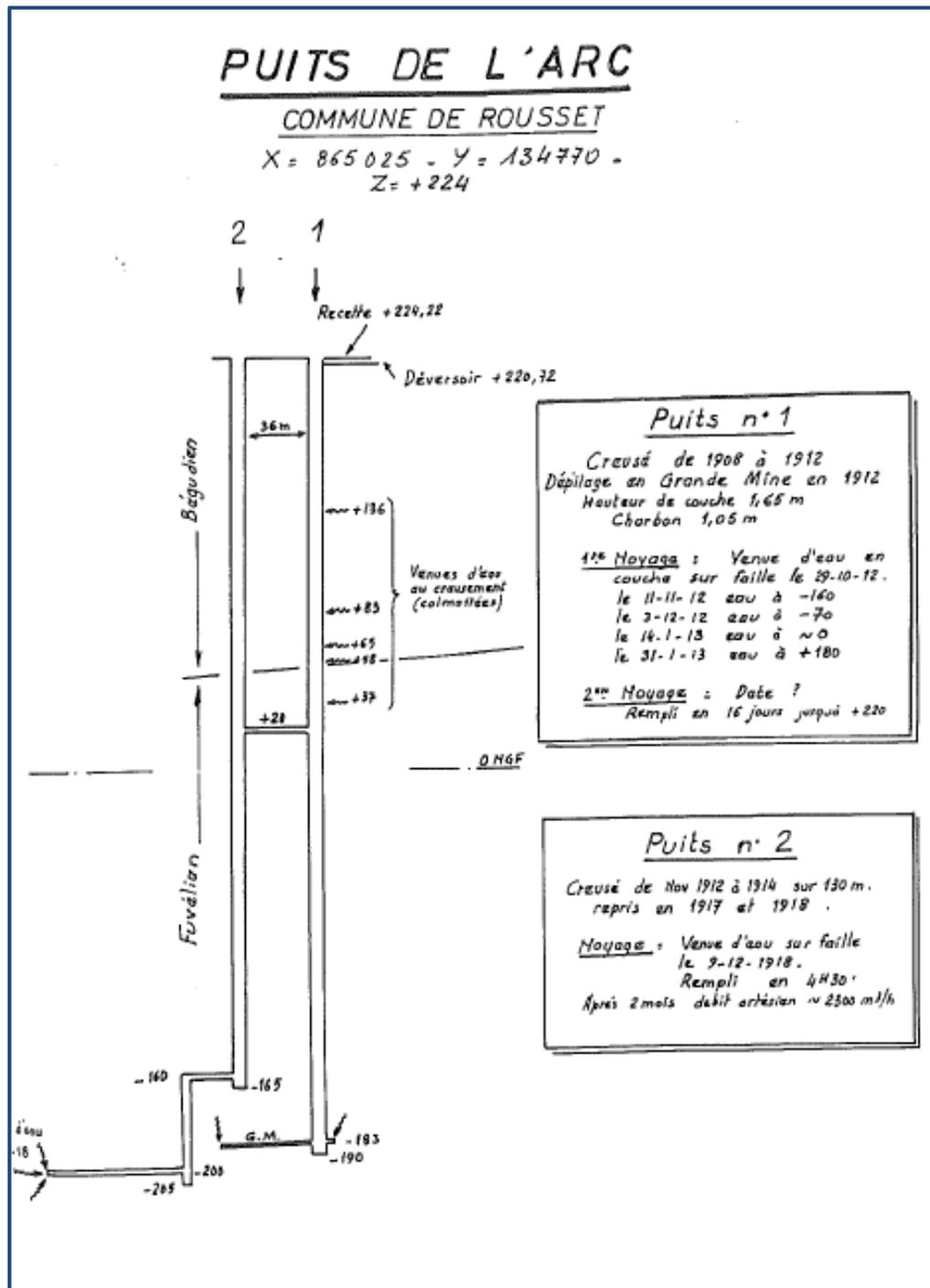
De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai –c'est-à-dire pour un débit unitaire- qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin,...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres aquifères (effet de drainance par exemple) et éventuellement la mise en évidence d'écoulements fractionnaires comme par exemple dus à la forte perméabilité d'un drain karstique. Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié. Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

A partir de la courbe des dérivées, il est déjà possible d'estimer les paramètres hydrodynamiques, en particulier la transmissivité et la perméabilité de la formation captée, lorsqu'un écoulement radial cylindrique est identifié.

Annexe 4

Coupe géologique et technique simplifiée des puits de l'Arc (document d'archive)



Annexe 5

Modélisation des essais aux puits de l'Arc

Essais par paliers de débit Complément du pompage de longue durée

<i>Figure A5 - 1 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 30/06/2014 au puits de l'Arc (puits 1 pompé); modélisation au puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.....</i>	129
<i>Figure A5 - 2 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 01/07/2014 au puits de l'Arc (puits 2 pompé); modélisation au puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.....</i>	130
<i>Figure A5 - 3 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 02/07/2014 aux puits de l'Arc (puits 1&2 pompés); modélisation aux puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.....</i>	131
<i>Figure A5 - 4 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 03/07/2014 aux puits de l'Arc (puits 1&2 pompés); modélisation aux puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.....</i>	132
<i>Figure A5 - 5 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au forage de Peynier. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.</i>	133
<i>Figure A5 - 6 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au forage Ark2. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.</i>	133
<i>Figure A5 - 7 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au forage de Meyreuil. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.</i>	134
<i>Figure A5 - 8 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au piézomètre de Kirbon. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.</i>	134
<i>Figure A5 - 9 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation puits Gérard. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.</i>	135
<i>Figure A5 - 10 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation puits Y. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.....</i>	135
<i>Figure A5 - 11 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation puits Z. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.</i>	136

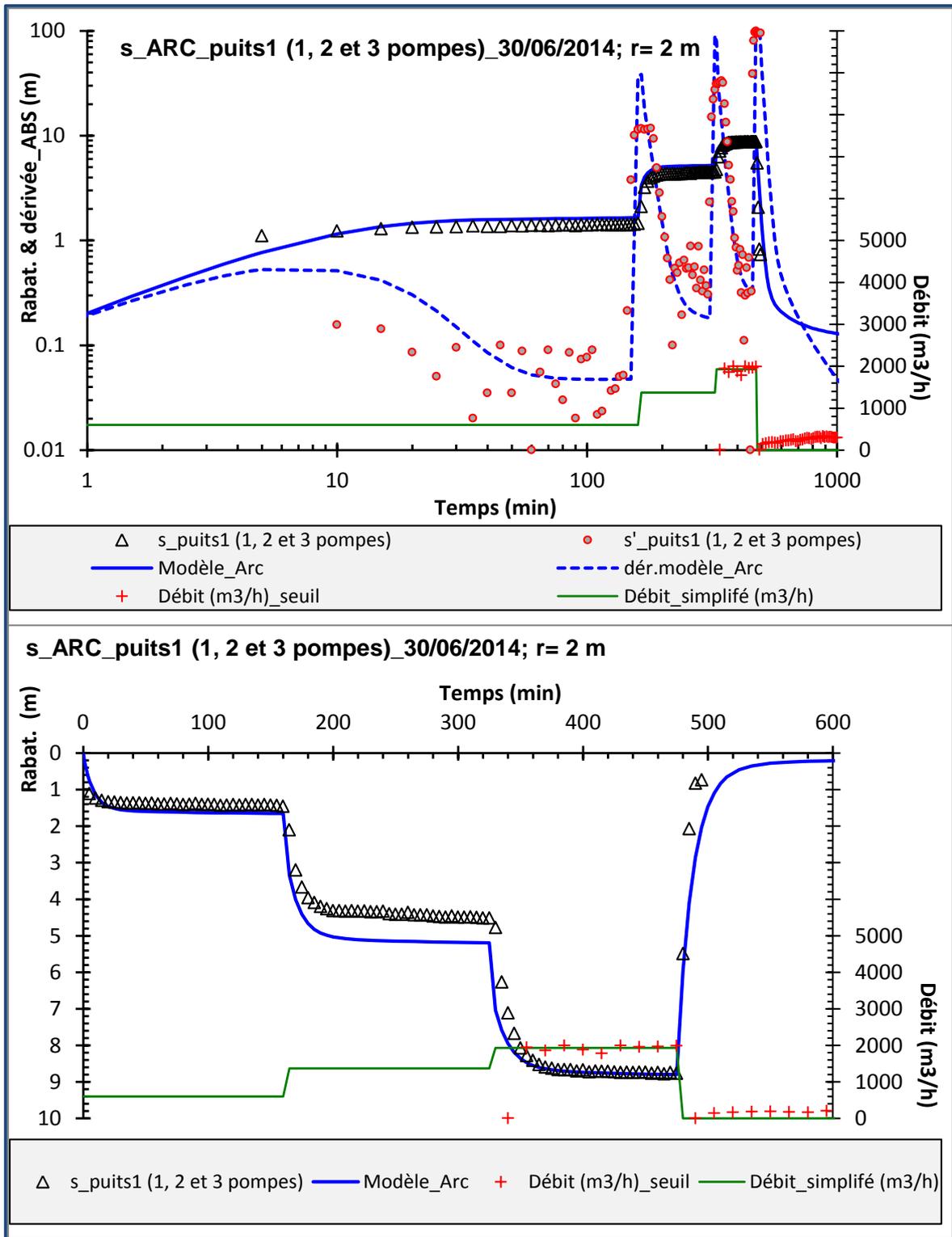


Figure A5 - 1 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 30/06/2014 au puits de l'Arc (puits 1 pompé); modélisation au puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, le graphe du haut = représentation log-log ; dérivée_ABS = valeur absolue de la dérivée.

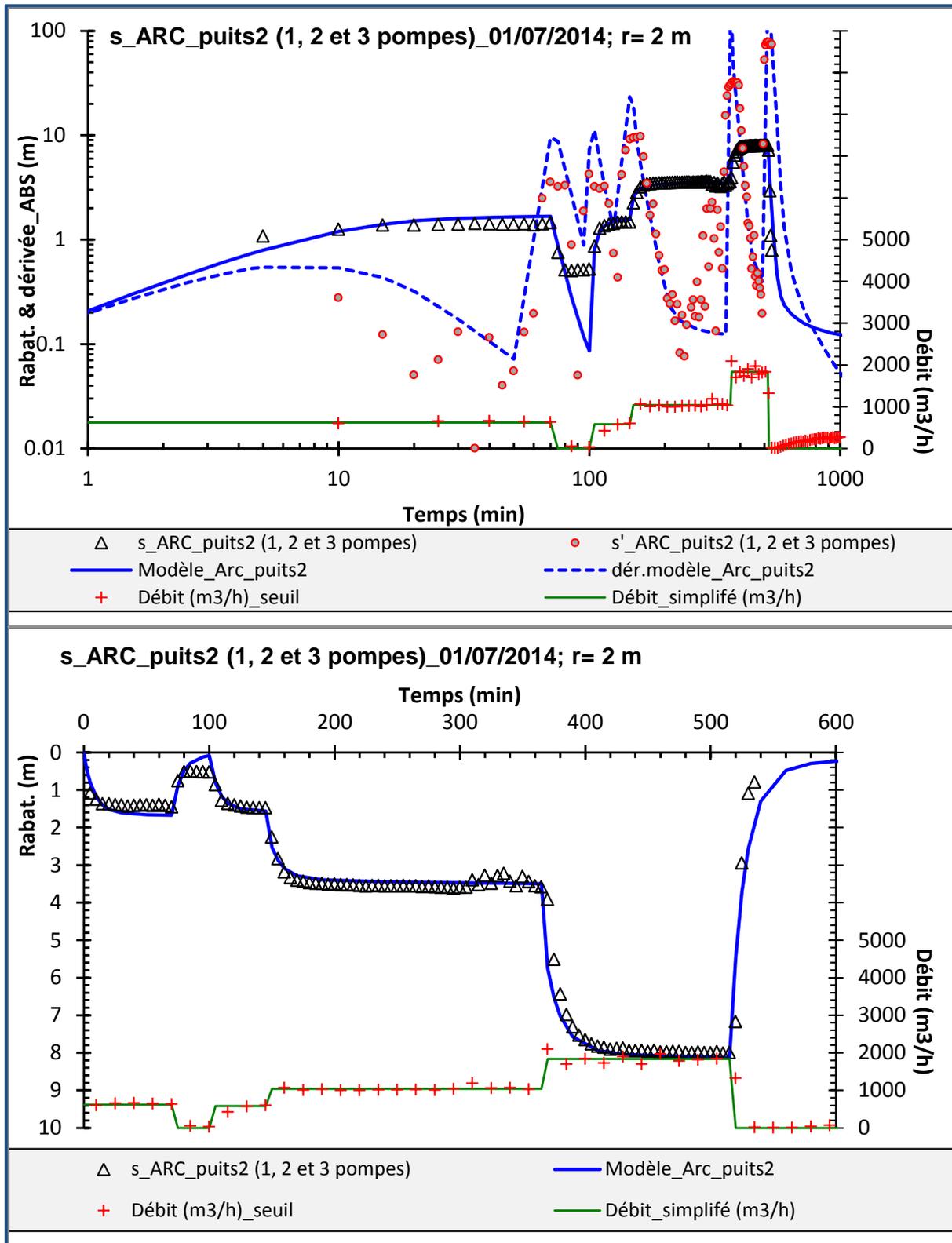


Figure A5 - 2 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 01/07/2014 au puits de l'Arc (puits 2 pompé); modélisation au puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, le graphe du haut = représentation log-log ; dérivée_ABS = valeur absolue de la dérivée.

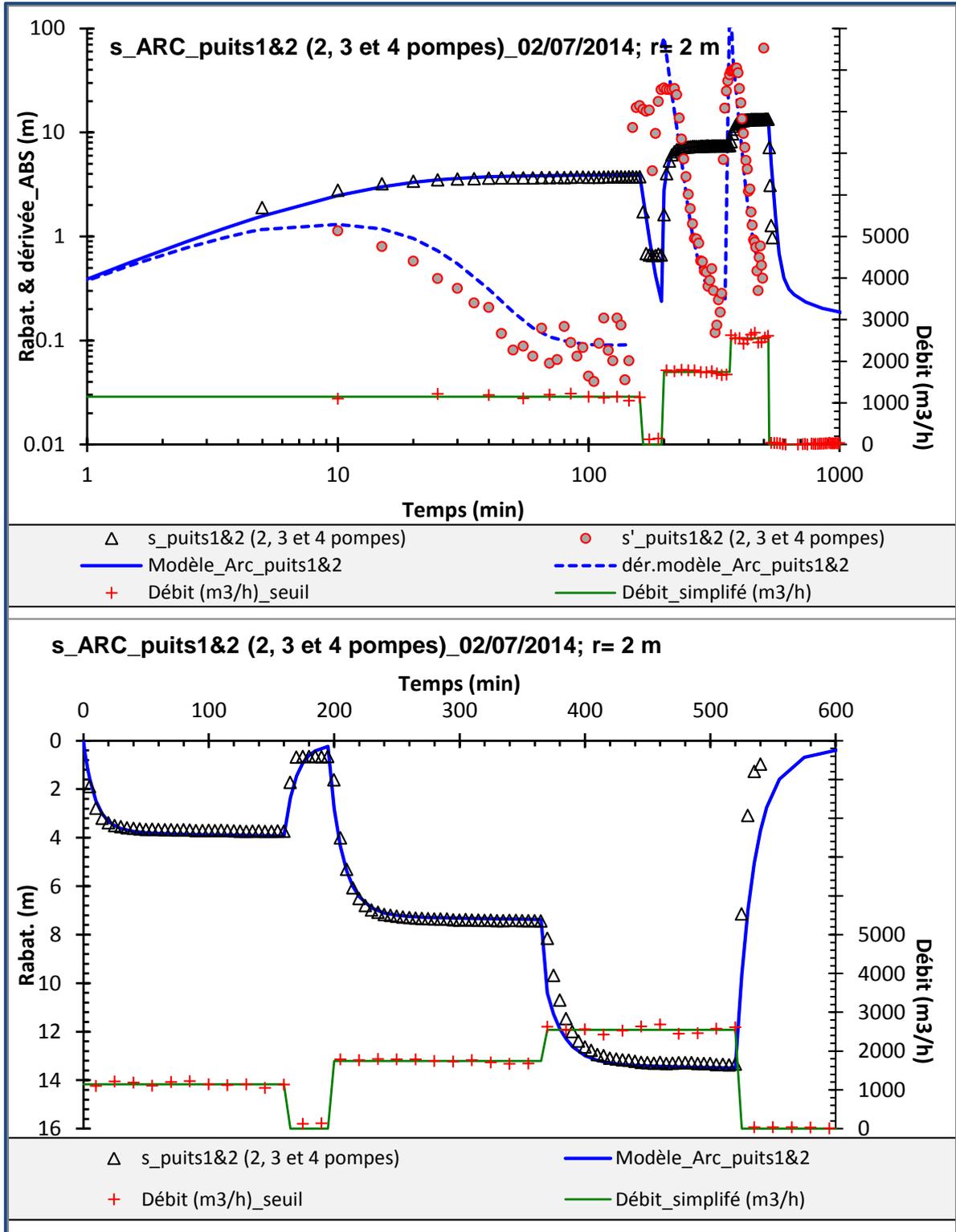


Figure A5 - 3 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 02/07/2014 aux puits de l'Arc (puits 1&2 pompés); modélisation aux puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, le graphe du haut = représentation log-log ; dérivée_ABS = valeur absolue de la dérivée.

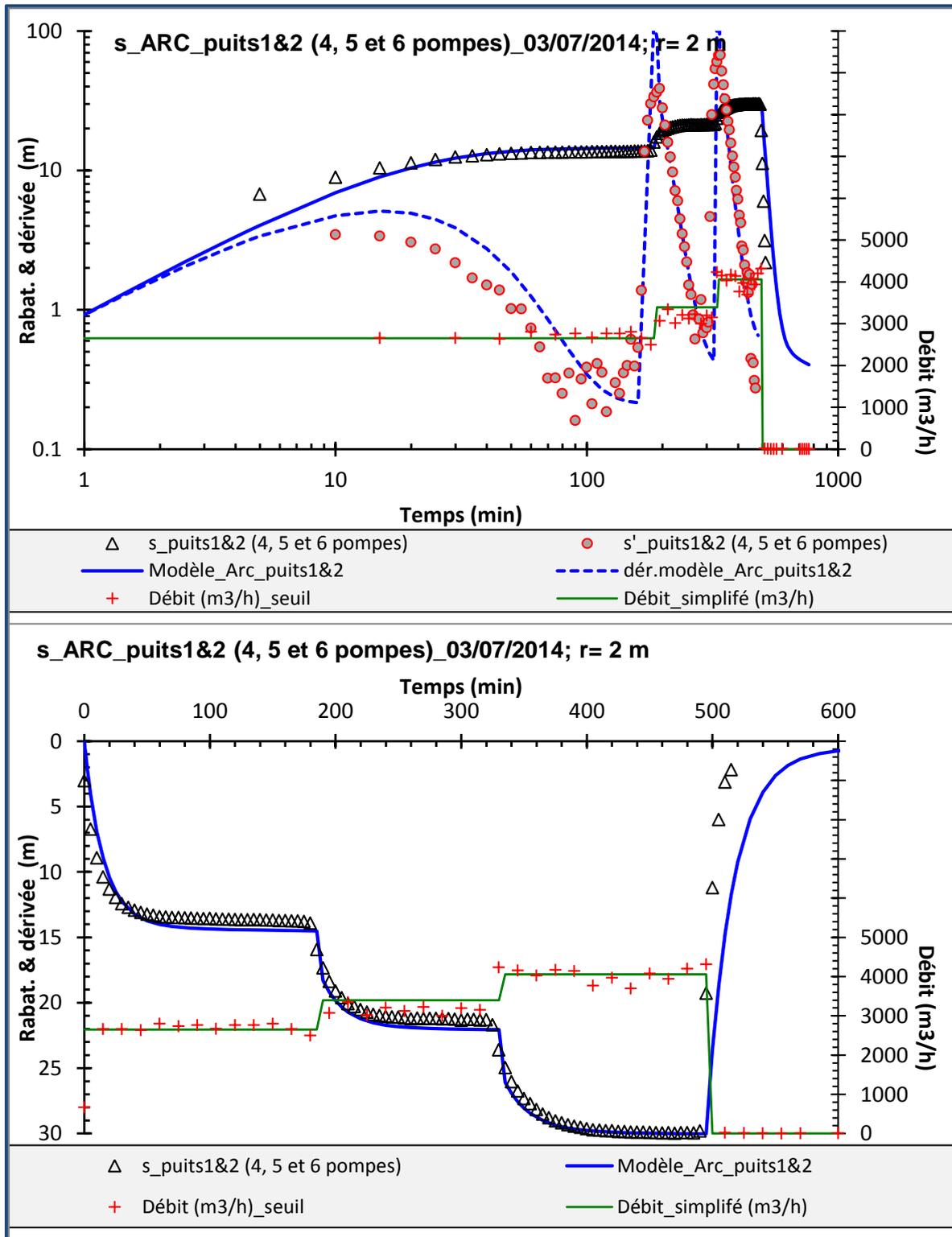


Figure A5 - 4 : Modélisation de l'essai par paliers de débit du 03/07/2014 aux puits de l'Arc (puits 1&2 pompés); modélisation aux puits. Modèle : Hunt & Scott modifié.

Nota : Sur l'illustration précédente, le graphe du haut = représentation log-log ; dérivée_ABS = valeur absolue de la dérivée.

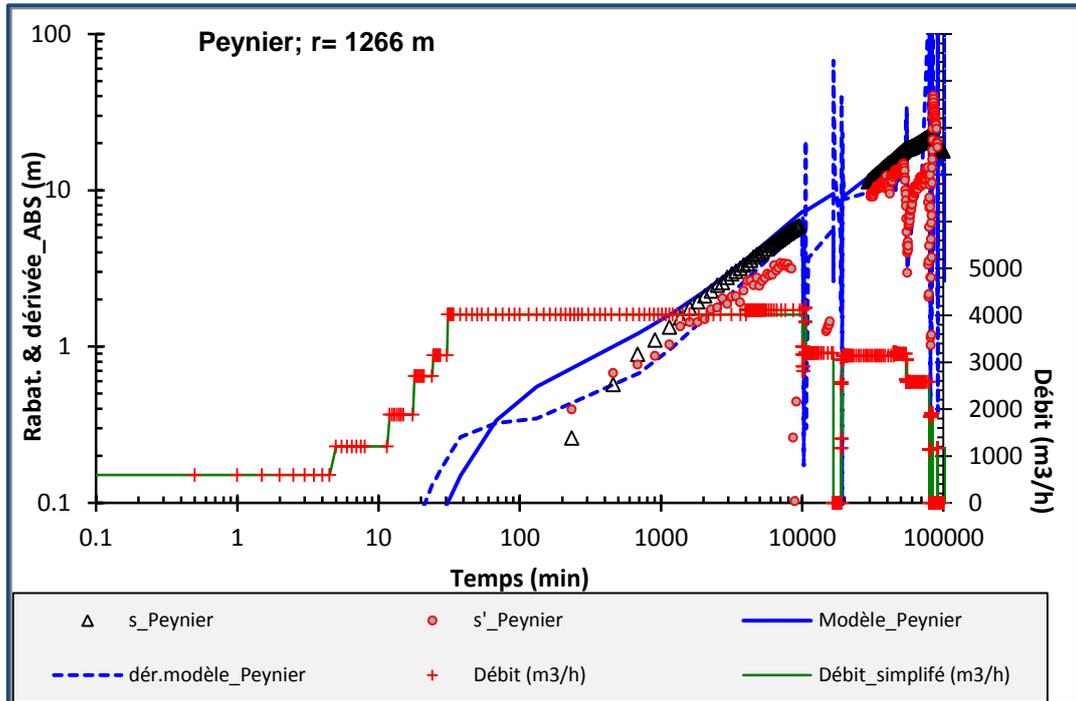


Figure A5 - 5 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au forage de Peynier. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

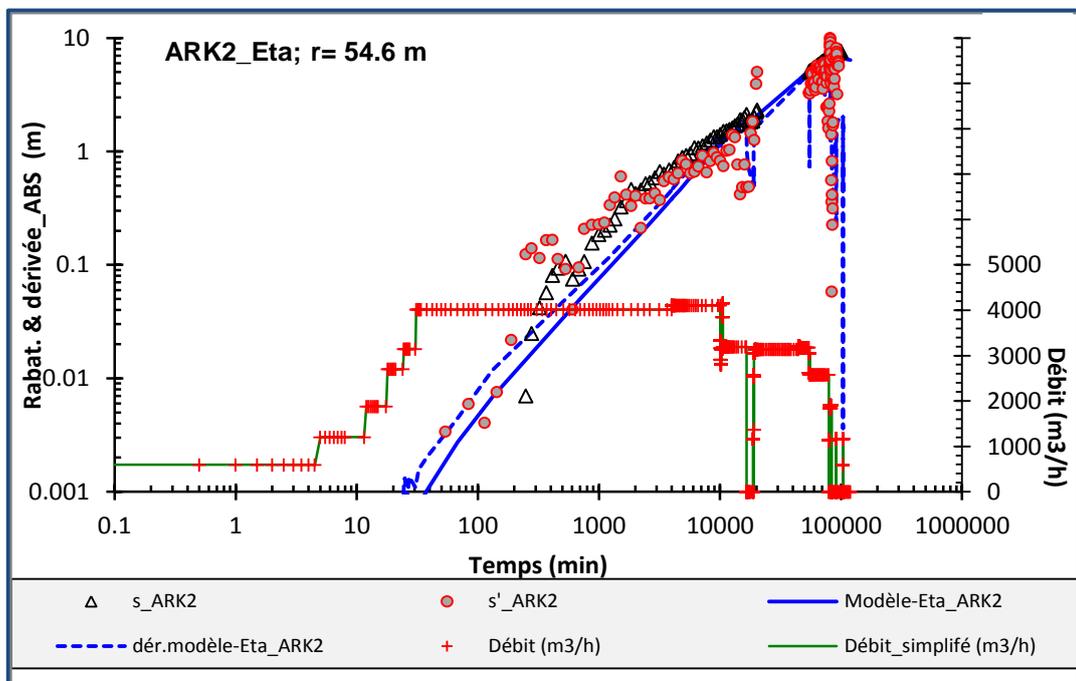


Figure A5 - 6 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au forage Ark2. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

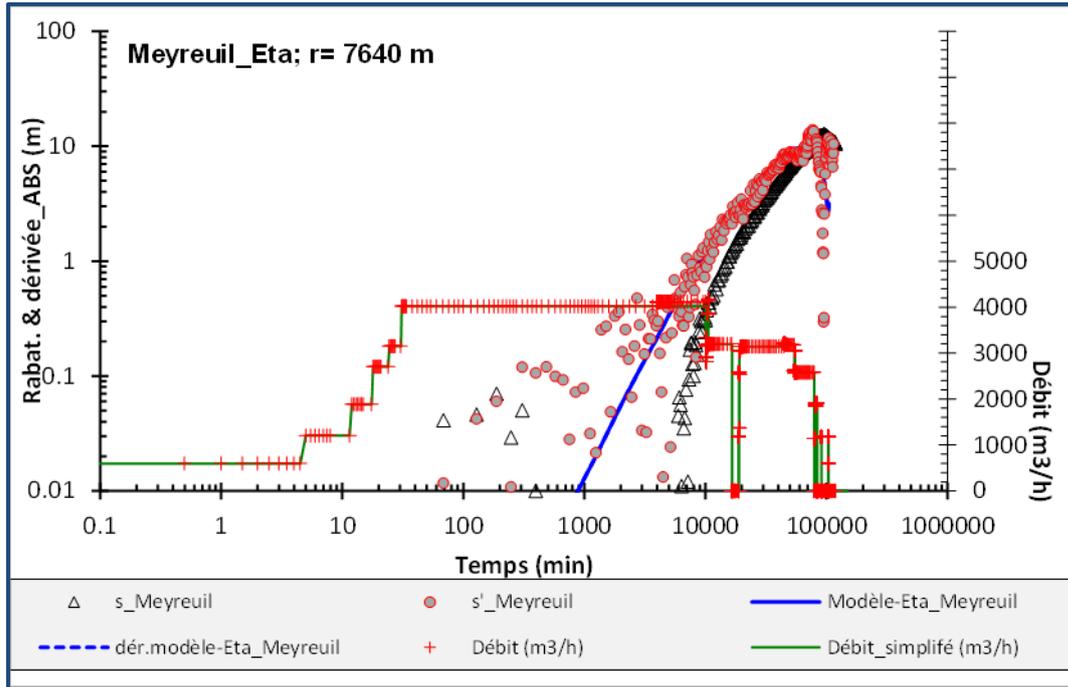


Figure A5 - 7 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au forage de Meyreuil. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

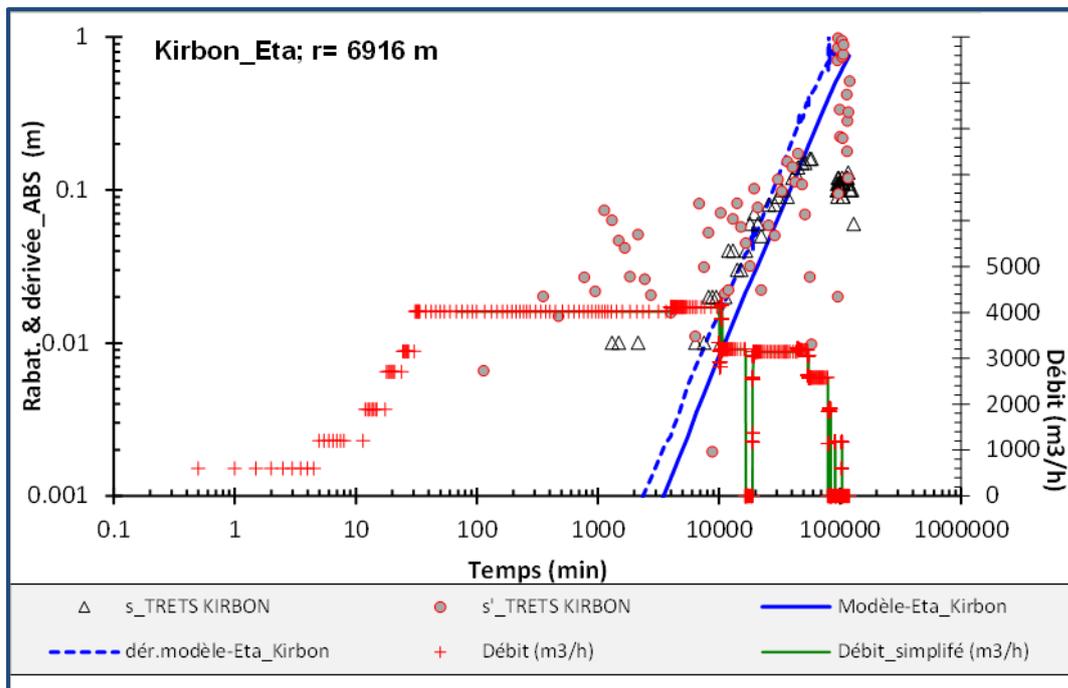


Figure A5 - 8 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation au piézomètre de Kirbon. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

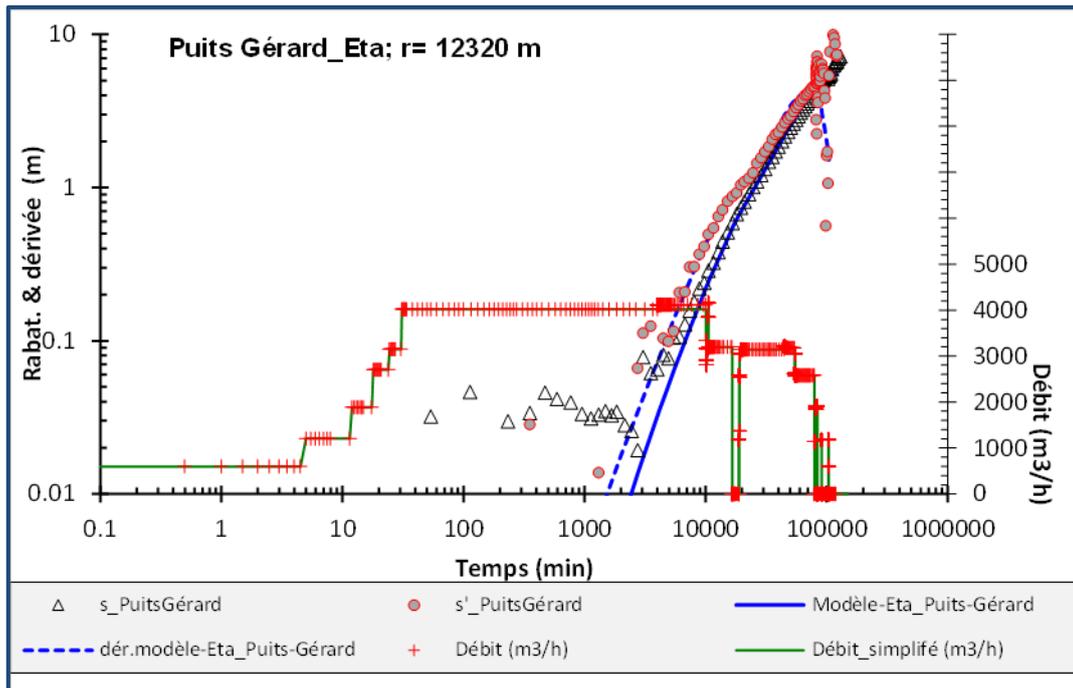


Figure A5 - 9 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation puits Gérard. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

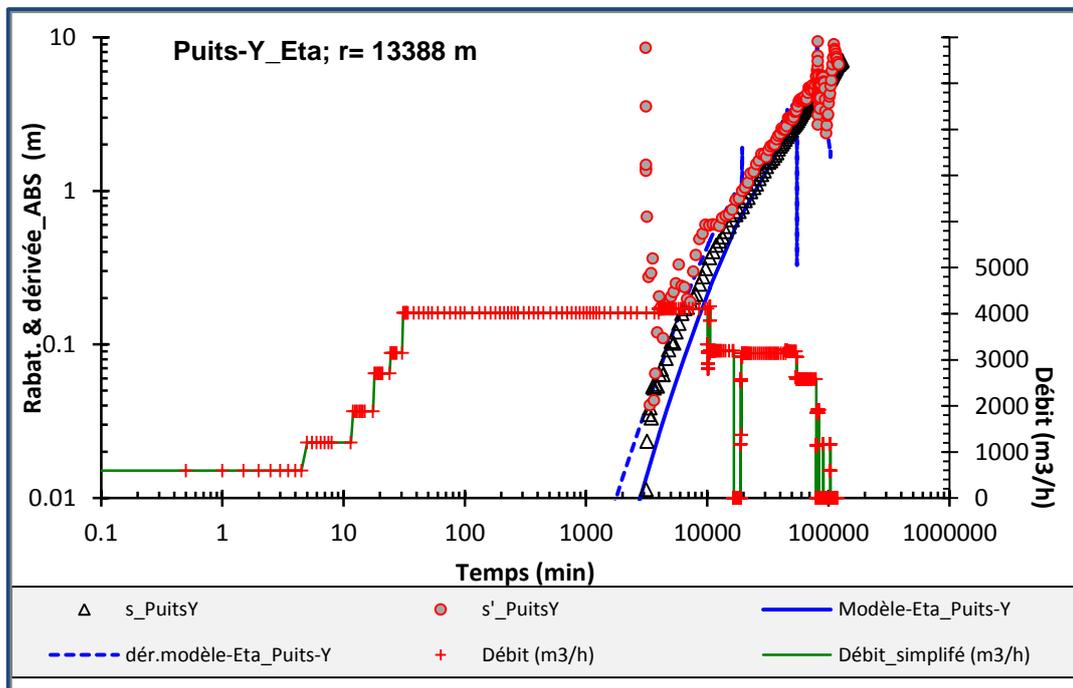


Figure A5 - 10 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation puits Y. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

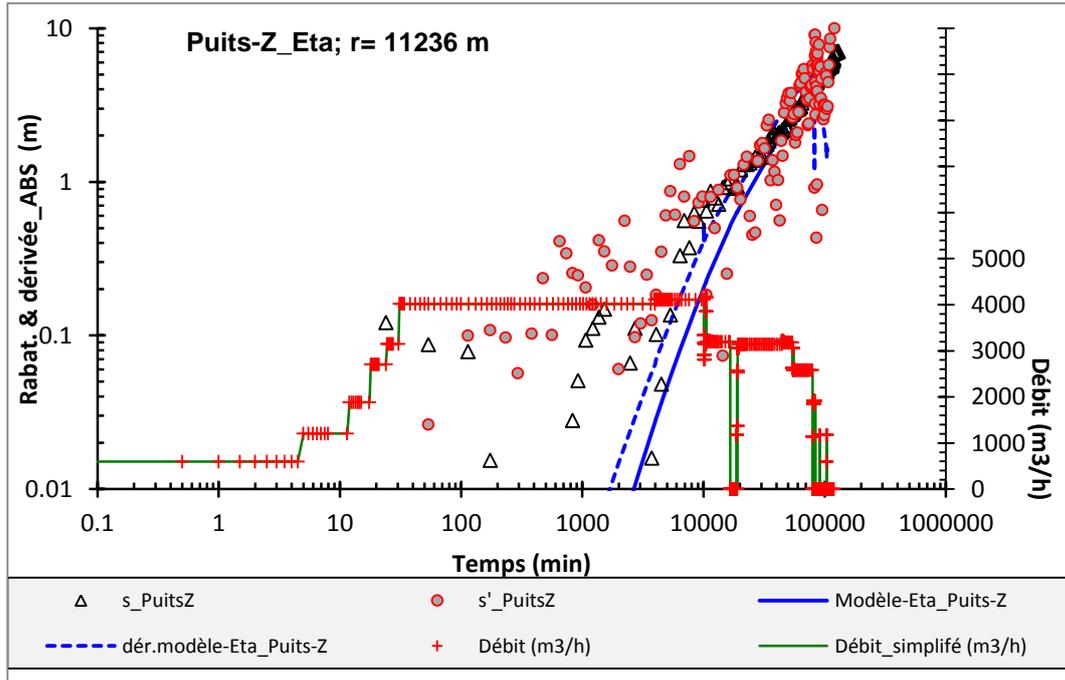


Figure A5 - 11 : Modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc. Modélisation puits Z. Modèle : Hunt & Scott modifié. Représentation arithmétique log-log.

Annexe 6

Résultats des simulations

<i>Figure A6 - 1 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 0,55 m³/s. Compartiment Fuvélien.</i>	<i>139</i>
<i>Figure A6 - 2 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 0,55 m³/s. Compartiment Bégudien.</i>	<i>140</i>
<i>Figure A6 - 3 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,1 m³/s. Compartiment Fuvélien.</i>	<i>141</i>
<i>Figure A6 - 4 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,1 m³/s. Compartiment Bégudien.</i>	<i>142</i>
<i>Figure A6 - 5 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,85 m³/s. Compartiment Fuvélien.</i>	<i>143</i>
<i>Figure A6 - 6 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,85 m³/s. Compartiment Bégudien.</i>	<i>144</i>
<i>Figure A6 - 7 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 2,9 m³/s. Compartiment Fuvélien.</i>	<i>145</i>
<i>Figure A6 - 8 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 2,9 m³/s. Compartiment Bégudien.</i>	<i>146</i>

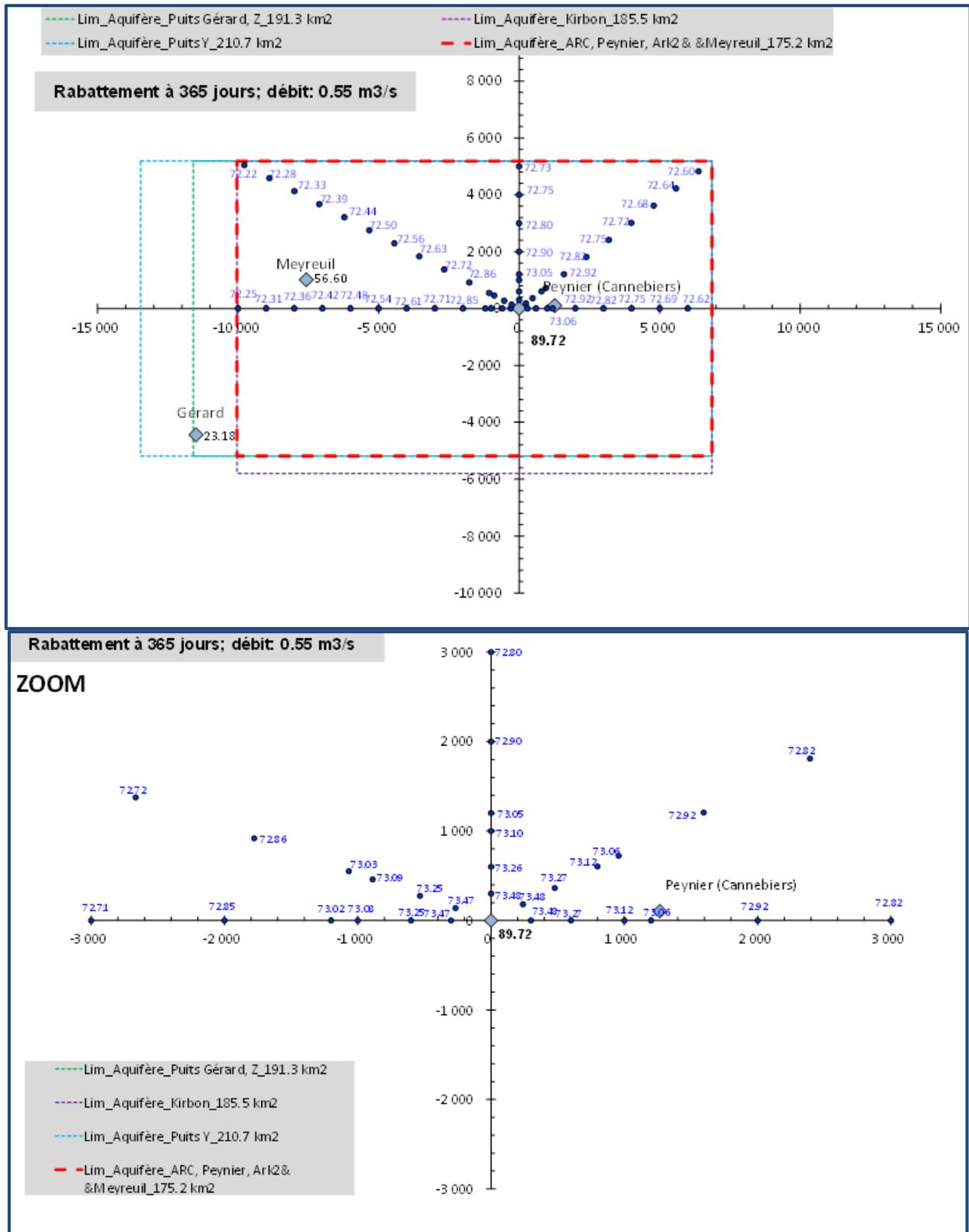


Figure A6 - 1 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 0,55 m³/s. Compartiment Fuvélien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

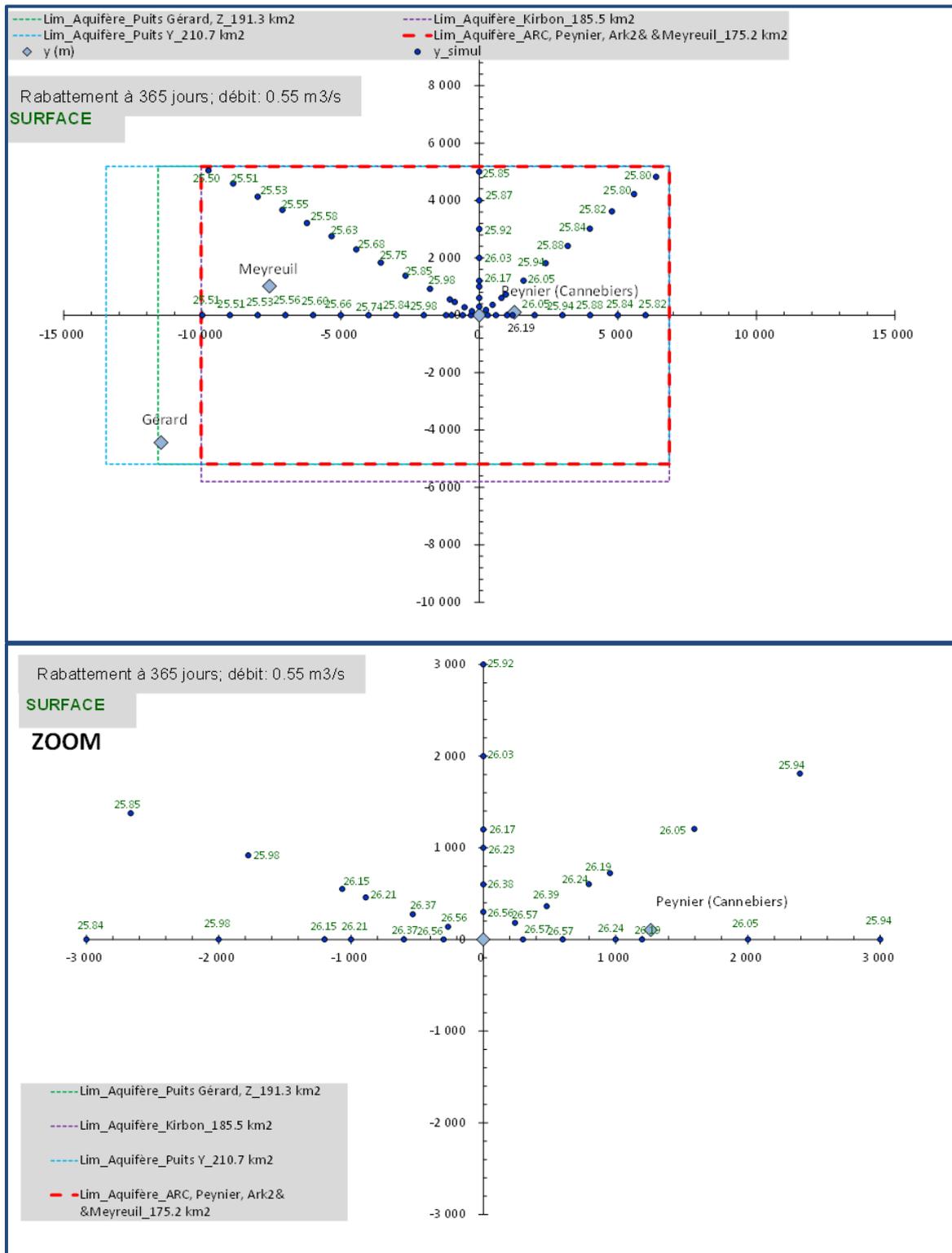


Figure A6 - 2 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 0,55 m³/s. Compartiment Bégudien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

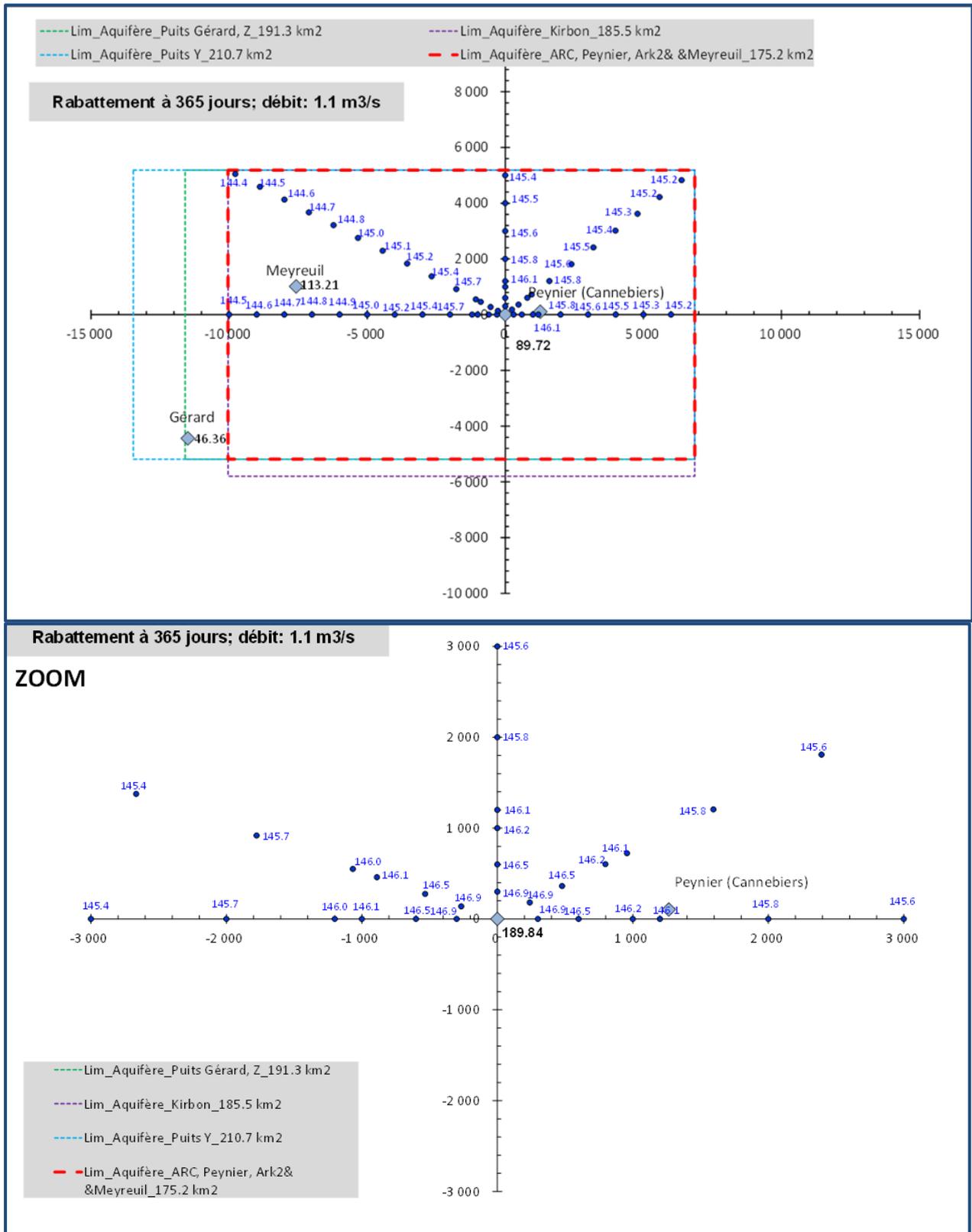


Figure A6 - 3 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,1 m³/s. Compartiment Fuvélien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

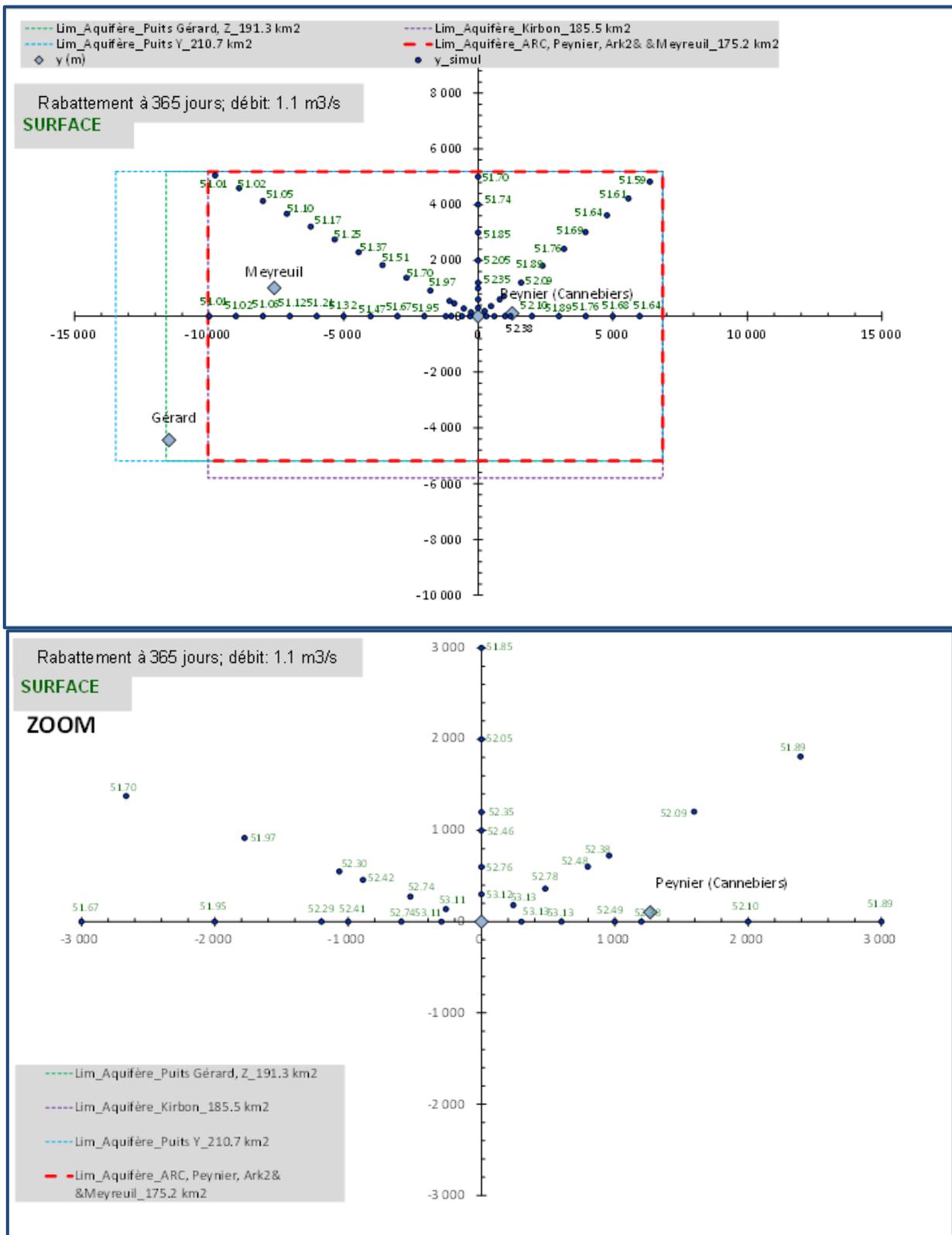


Figure A6 - 4 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 365 j de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,1 m³/s. Compartiment Bégudien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

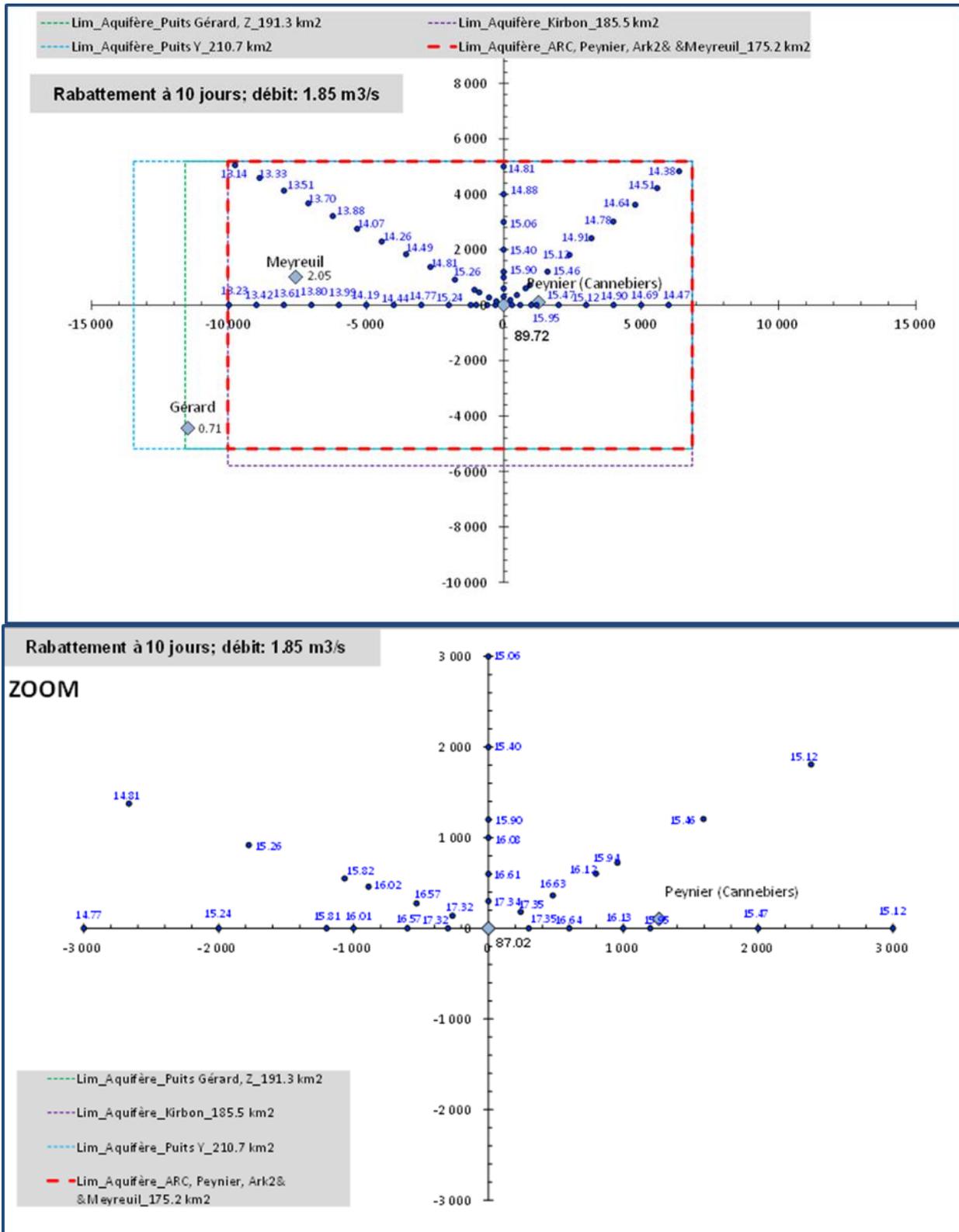


Figure A6 - 5 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,85 m³/s. Compartiment Fuvélien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

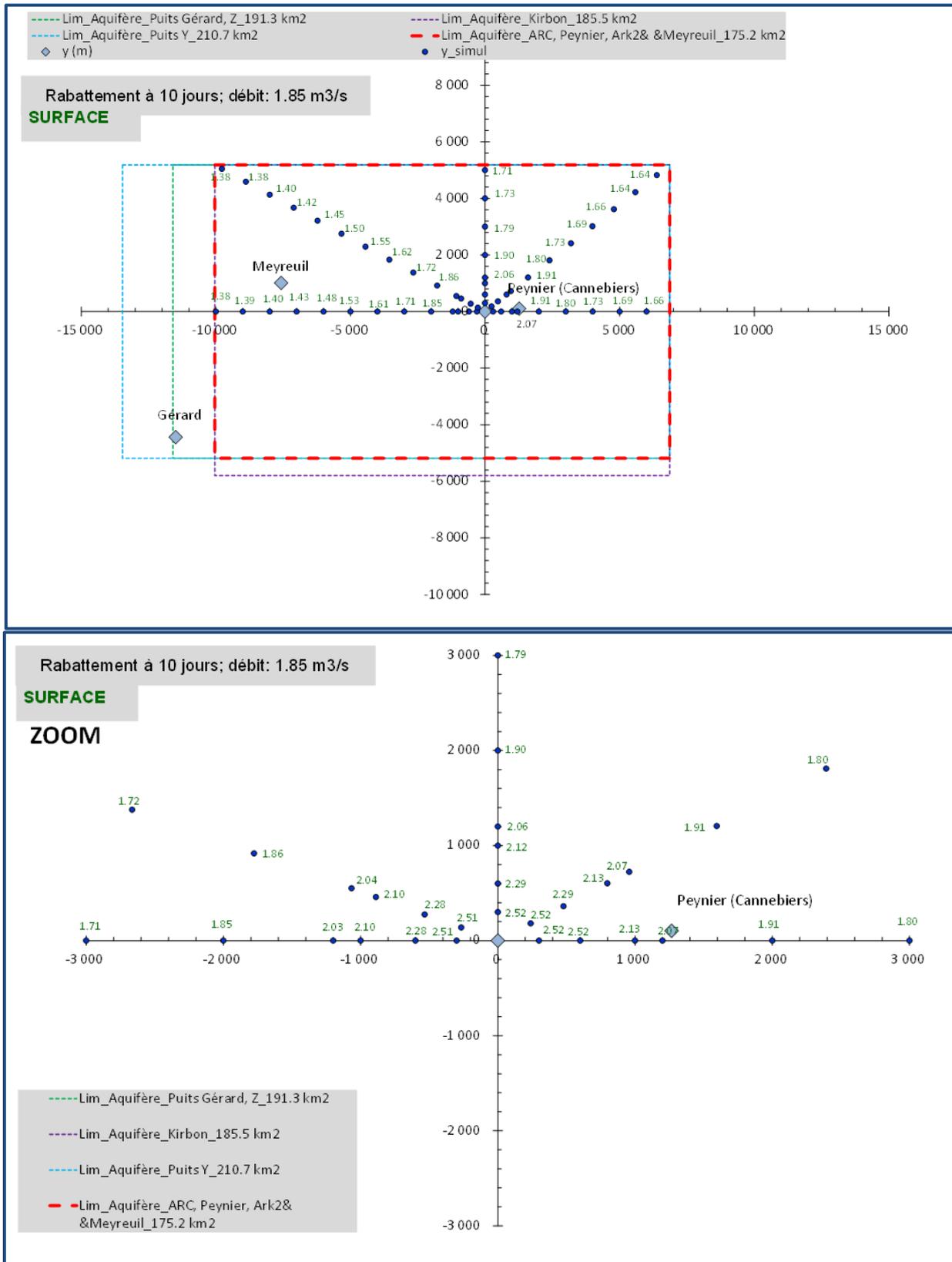


Figure A6 - 6 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 1,85 m³/s. Compartiment Bégudien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

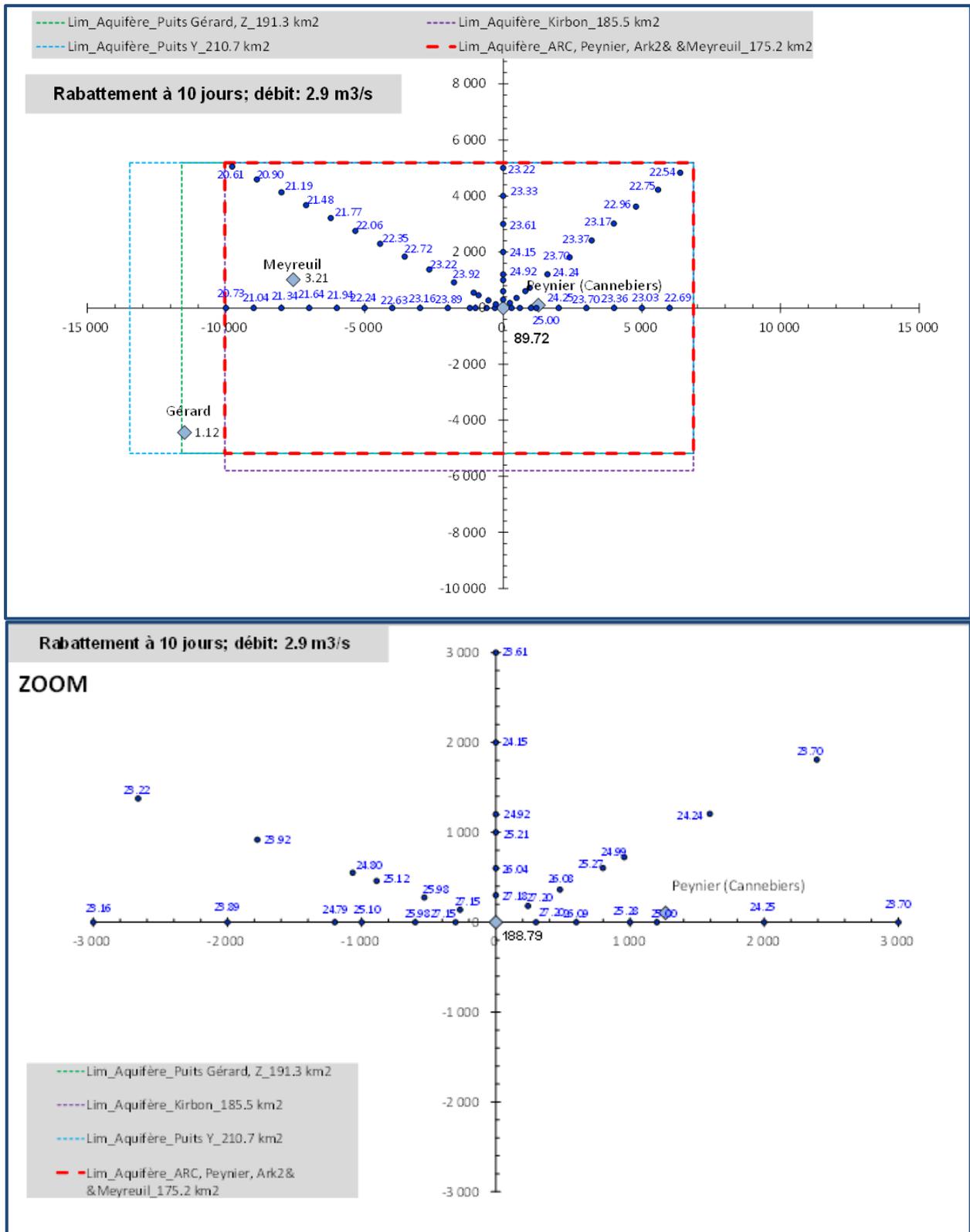


Figure A6 - 7 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 2,9 m³/s. Compartiment Fuvélien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

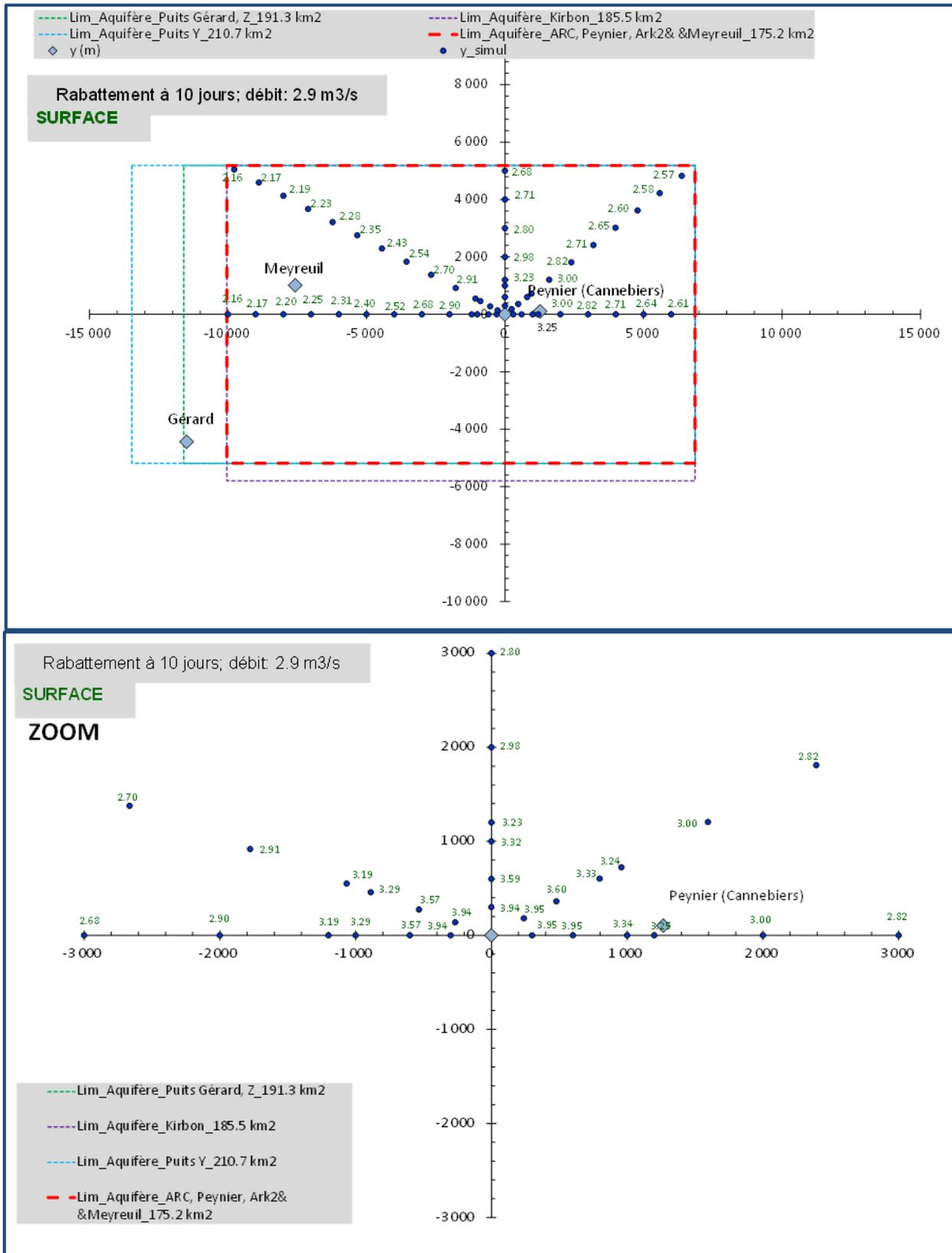


Figure A6 - 8 : Simulation du rabattement dans l'aquifère modélisé au bout de 10 jours de pompage. Pompage sur les puits de l'Arc : 2,9 m³/s. Compartiment Bégudien.

Nota : Rabattement symétrique à l'axe des x. Attention l'utilisation de ces cartes doit être faite avec prudence (voir texte). Graphique du bas = zoom de 3 km x 3 km centré sur les puits de l'Arc.

Annexe 7

Rappels sur le contexte hydrogéologique

- Figure A7 – 1 : Coupe géologique n°25, extrait synthèse hydrogéologique, fiche PAC07A-Massif calcaire jurassique à crétacé de la Sainte-Victoire (AE RMC, BRGM)..... 149*
- Figure A7 – 2 : Coupe géologique n°26, extrait synthèse hydrogéologique, fiche PAC07B-Calcaire jurassique à crétacé du bassin de l'Arc (AE RMC, BRGM) 149*
- Figure A7 – 3 : Mine de Gardane (vue en coupe), zones principales d'infiltration de surface et profondes, modifié d'après CESAME 2002 (extrait rapport BRGM/RP-56418-FR). . 150*

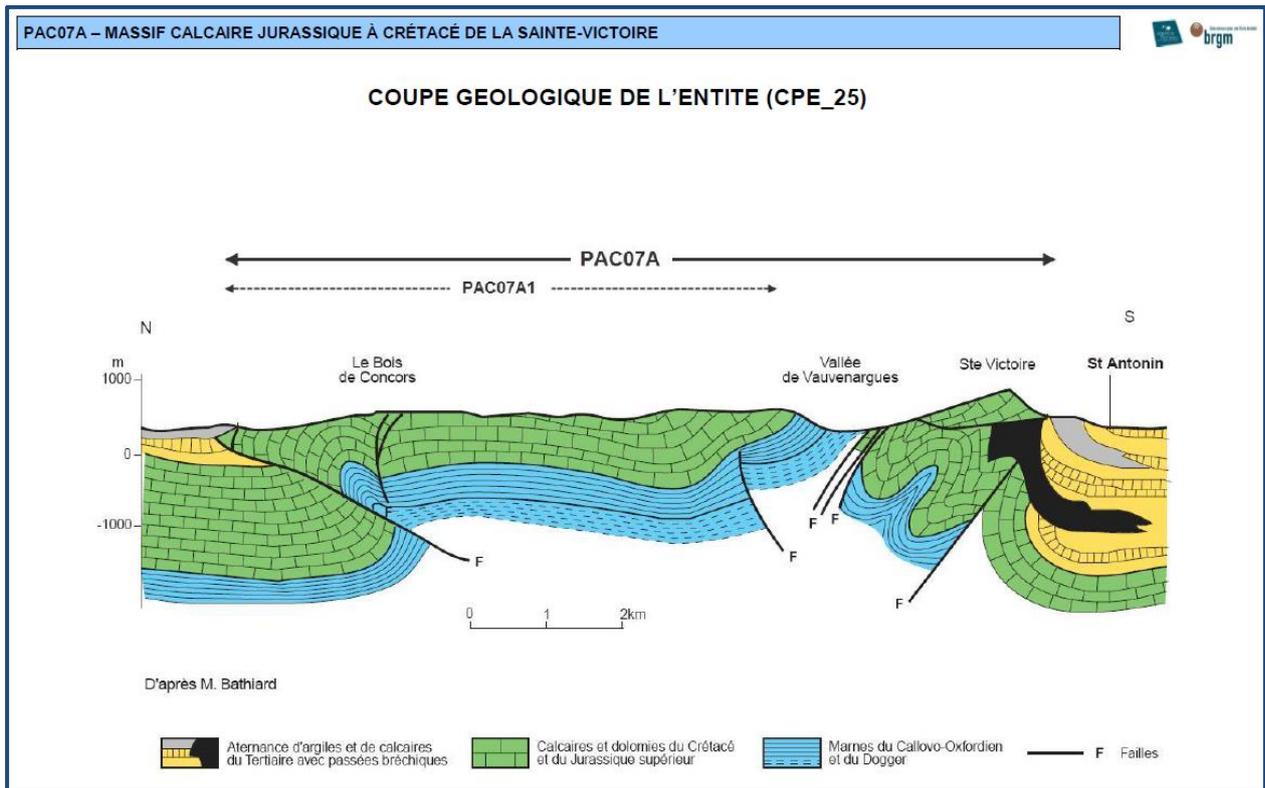


Figure A7 - 1 : Coupe géologique n°25, extrait synthèse hydrogéologique, fiche PAC07A-Massif calcaire jurassique à crétacé de la Sainte-Victoire (AE RMC, BRGM)

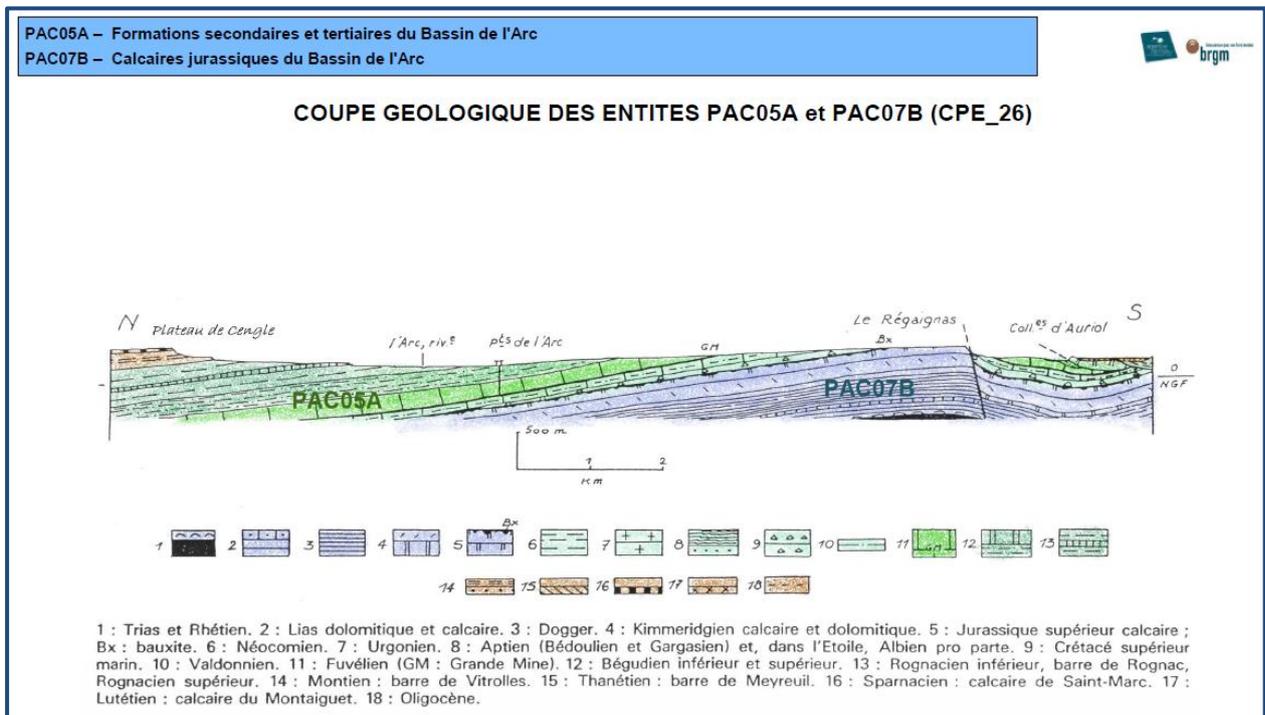


Figure A7 - 2 : Coupe géologique n°26, extrait synthèse hydrogéologique, fiche PAC07B- Calcaire jurassique à crétacé du bassin de l'Arc (AE RMC, BRGM)

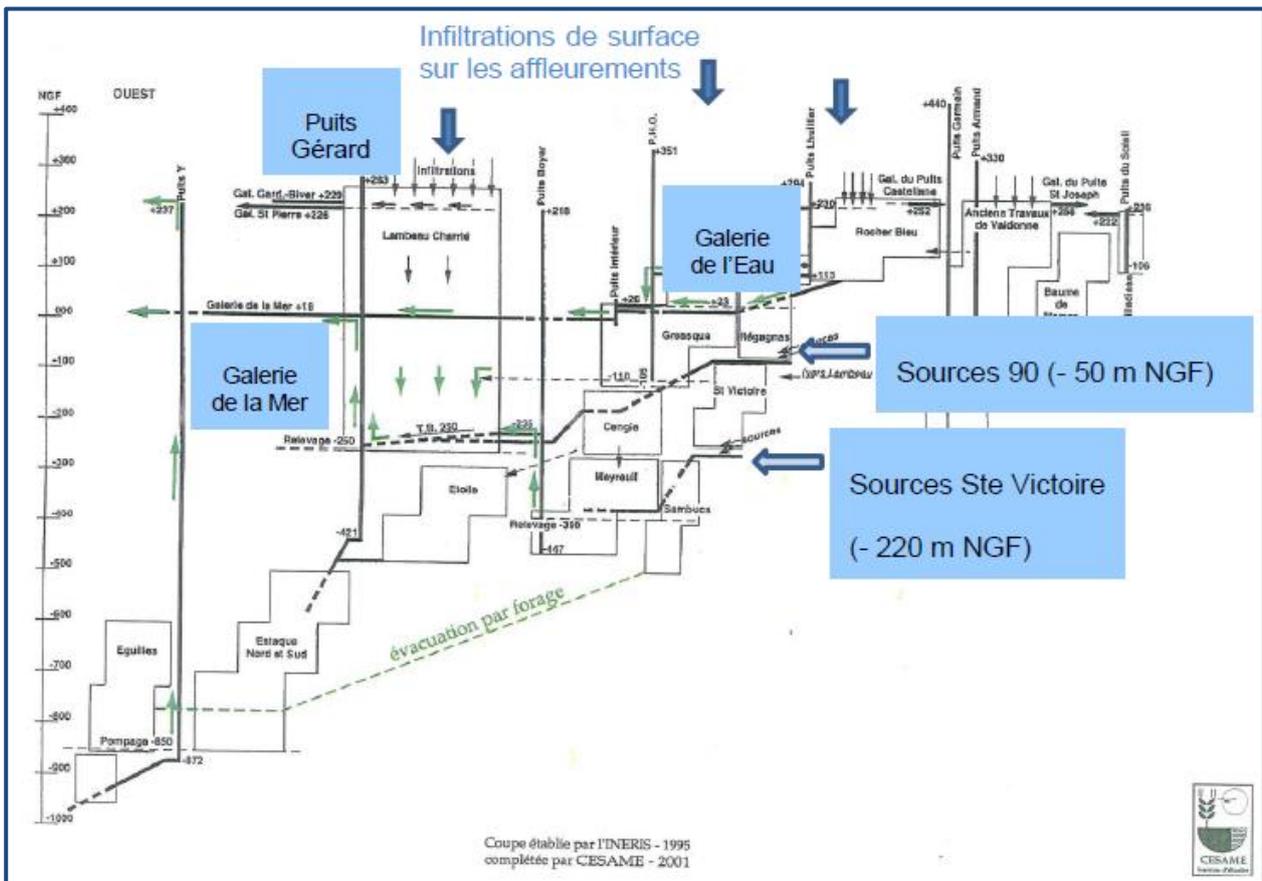


Figure A7 - 3 : Mine de Gardane (vue en coupe), zones principales d'infiltration de surface et profondes, modifié d'après CESAME 2002 (extrait rapport BRGM/RP-59418-FR).

Annexe 8

Informations complémentaires du modèle Gardenia de la source de l'Argens

<i>Figure A8 - 1 : Pluviométrie estimée sur la zone d'étude calculée à partir de la fonction de pondération (cf.texte).....</i>	<i>153</i>
<i>Figure A8 - 2 : Pluie efficace estimée sur la zone d'étude calculée à partir du modèle Gardenia de la source de l'Argens (cf.texte).....</i>	<i>154</i>
<i>Figure A8 - 3 : Recharge estimée sur la zone d'étude calculée à partir du modèle Gardenia de la source de l'Argens (cf.texte).....</i>	<i>155</i>
<i>Figure A8 - 4 : Eléments de statistiques descriptives des débits observés à la source de l'Argens (data banque Hydro).....</i>	<i>156</i>
<i>Figure A8 - 5 : Eléments de statistiques descriptives des débits simulés à la source de l'Argens par le modèle GARDENIA.</i>	<i>157</i>
<i>Figure A8 - 6 : Eléments de statistiques descriptives du flux de recharge calculé à l'aide du modèle GARDENIA (source de l'Argens).....</i>	<i>158</i>

Cumul de Pluie calculé par la fonction de pondération (cf.texte)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 Total général	
1958								54.0	98.8	56.0	62.2	176.1	447.2
1959	5.1	9.8	64.2	76.5	76.4	36.7	6.6	43.3	96.6	152.4	110.3	168.9	846.7
1960	31.0	76.6	124.6	38.4	13.2	48.5	17.0	78.7	116.7	247.7	135.8	140.7	1069.0
1961	27.6	4.5	0.0	116.4	95.5	46.9	4.4	10.4	66.7	148.7	154.3	30.4	705.8
1962	41.7	88.6	41.4	26.7	27.6	44.8	4.4	4.4	64.7	60.8	153.6	68.4	627.0
1963	54.4	103.3	33.8	102.1	20.6	86.1	54.5	68.2	163.9	64.5	96.5	62.5	910.4
1964	40.6	84.1	86.0	38.2	44.7	55.8	3.4	69.3	45.2	66.7	25.7	52.3	611.8
1965	40.5	10.6	72.9	2.0	16.1	38.6	63.1	82.7	110.7	49.1	48.6	57.9	593.0
1966	41.1	138.6	4.7	76.9	55.9	39.1	21.8	29.4	43.5	91.7	111.7	23.3	677.8
1967	11.4	33.6	10.2	33.3	16.4	31.4	0.4	8.9	41.7	14.3	81.9	16.4	299.9
1968	1.3	102.9	23.5	56.2	123.2	46.0	6.7	54.1	90.9	53.7	127.0	51.1	736.7
1969	76.4	62.1	84.9	17.5	72.4	65.2	62.9	33.6	114.4	10.4	56.3	51.4	707.5
1970	79.8	35.7	58.0	14.8	39.5	74.1	3.5	13.8	13.2	94.0	73.9	68.1	568.1
1971	72.3	11.4	80.3	121.1	85.6	55.3	15.7	38.4	29.3	10.5	141.7	35.9	697.5
1972	68.2	219.9	59.4	64.6	39.7	87.2	31.0	33.0	64.0	165.2	30.4	140.3	1002.8
1973	66.6	28.6	34.4	43.0	14.0	44.4	54.3	50.3	46.1	154.6	35.0	126.1	697.3
1974	78.2	134.6	72.8	112.2	63.3	16.6	5.4	26.9	144.6	15.1	40.5	23.9	734.0
1975	31.0	87.6	95.5	34.8	73.7	39.5	10.3	62.7	86.3	13.0	76.0	78.7	689.1
1976	33.3	49.8	63.1	92.4	45.1	30.2	77.5	73.3	56.4	250.8	87.1	61.3	920.4
1977	92.6	61.4	67.6	27.5	117.6	54.3	82.8	128.3	1.4	103.0	67.0	91.3	894.7
1978	230.0	67.9	61.8	83.4	137.9	39.8	10.7	35.6	22.6	7.5	1.3	77.8	776.3
1979	97.1	81.5	91.8	38.2	17.0	42.6	13.3	10.7	23.4	330.0	30.1	84.8	860.6
1980	38.2	0.5	68.8	43.6	132.2	37.9	19.5	61.3	1.7	59.0	61.8	1.7	526.1
1981	22.6	8.6	91.5	67.8	48.2	30.1	32.4	8.3	100.7	23.5	0.2	203.0	637.0
1982	17.5	21.9	21.2	23.9	9.3	39.0	5.4	30.8	29.3	85.5	135.5	29.4	448.8
1983	0.2	75.3	71.5	32.7	60.9	61.2	4.8	114.4	14.5	100.6	12.3	98.4	646.8
1984	57.9	44.6	63.9	12.0	142.9	76.8	0.0	95.6	48.6	111.3	124.6	61.5	839.8
1985	38.9	39.7	105.7	15.1	133.3	20.1	6.6	46.6	1.9	34.9	38.2	61.1	542.2
1986	120.8	60.5	12.8	142.8	9.1	51.3	17.7	92.7	90.7	37.8	62.4	29.2	727.8
1987	64.4	71.4	27.7	74.4	34.7	30.4	75.2	103.2	31.1	171.1	85.9	54.8	824.2
1988	81.9	17.3	69.7	96.7	79.4	51.4	5.6	4.7	14.7	175.2	19.6	20.3	636.6
1989	10.4	54.0	15.5	98.7	10.1	16.3	9.0	18.0	31.7	24.1	77.7	28.4	393.8
1990	21.4	19.6	29.2	96.9	105.8	19.5	13.7	54.4	28.9	154.4	50.0	69.1	662.7
1991	20.7	21.9	92.4	45.3	31.0	26.4	19.9	11.1	164.4	108.5	56.7	1.0	599.4
1992	28.9	23.0	49.9	25.4	37.3	136.3	35.3	48.2	115.0	114.2	56.6	18.4	688.6
1993	0.2	15.3	22.4	181.6	59.2	18.9	21.2	26.7	206.8	132.1	65.7	17.6	767.7
1994	157.7	121.4	9.8	67.4	54.3	53.8	16.4	28.1	253.3	119.1	110.2	12.2	1003.8
1995	37.5	75.1	27.9	178.6	105.0	1.7	22.1	63.6	100.5	49.4	88.0	125.2	874.7
1996	156.2	27.3	41.1	61.7	38.0	58.5	34.9	84.8	161.7	76.9	220.2	75.7	1037.1
1997	123.2	2.9	1.1	24.6	17.2	69.5	15.7	104.3	23.1	29.5	89.9	67.5	568.5
1998	49.4	14.5	6.8	106.9	76.1	21.6	6.1	49.4	146.3	68.7	26.5	35.7	608.1
1999	116.1	5.2	59.1	72.8	46.0	6.9	32.9	38.4	166.0	144.1	67.9	21.3	776.9
2000	2.9	9.2	64.1	113.4	28.3	64.1	29.3	14.6	104.4	95.0	186.2	89.8	801.4
2001	77.2	26.3	65.0	41.8	141.4	2.4	27.4	3.1	68.0	48.8	28.6	0.1	530.0
2002	37.6	75.1	39.3	38.7	166.9	53.0	56.1	65.3	106.5	65.0	213.9	49.4	966.6
2003	47.3	11.5	8.4	85.6	23.4	5.7	1.3	14.2	76.5	103.6	86.4	147.0	610.9
2004	29.3	25.9	7.7	35.1	34.4	14.0	3.0	68.5	48.8	113.2	19.1	52.6	451.5
2005	5.3	0.2	27.6	73.8	53.6	31.7	7.4	29.8	142.0	51.1	58.2	54.5	535.2
2006	61.4	31.3	31.4	14.4	12.2	5.3	51.9	28.0	114.7	38.6	28.4	95.3	512.9
2007	13.0	34.4	17.9	26.2	97.3	66.7	2.1	16.7	4.8	27.5	62.2	24.1	392.8
2008	70.8	35.7	26.3	98.1	148.1	50.9	5.9	14.5	66.7	115.2	149.1	171.8	953.2
2009	44.5	49.1	44.8	114.6	45.3	29.1	10.7	28.3	108.0	64.1	58.3	125.7	722.5
2010	69.5	77.5	78.4	57.7	77.0	109.3	3.3	25.2	38.5	133.2	83.7	74.1	827.5
2011	27.4	43.3	100.4	47.6	6.7	79.0	72.5	45.1	40.5	84.0	272.5	13.4	832.4
2012	11.7	0.3	8.3	109.4	91.0	11.5	7.5	18.7	46.7	159.8	161.4	34.7	660.8
2013	51.5	8.9	126.5	82.5	98.0	6.2	90.0	15.3	44.7	43.7	47.5	117.5	732.2
2014	177.7	124.7	34.7	23.5	20.5	86.4	48.1						515.5
Min	0.2	0.2	0.0	2.0	6.7	1.7	0.0	3.1	1.4	7.5	0.2	0.1	299.9
Max	230.0	219.9	126.5	181.6	166.9	136.3	90.0	128.3	253.3	330.0	272.5	203.0	1069.0
Moy	55.6	49.4	50.0	65.1	62.0	44.0	24.3	44.3	76.5	91.5	83.1	67.3	700.5
Mediane	41.4	35.7	47.3	59.7	50.9	41.2	15.7	37.0	65.7	80.4	67.5	59.5	697.3
Décile0.1	7.9	6.9	8.3	20.5	13.6	9.2	3.3	10.6	14.6	19.3	26.1	17.0	488.3
Décile0.9	118.4	103.1	92.1	114.0	132.7	77.9	63.0	88.8	154.0	162.5	154.0	140.5	933.5

Figure A8 - 1 : Pluviométrie estimée sur la zone d'étude calculée à partir de la fonction de pondération (cf.texte)

Somme de pluie Efficace (calculé à partir du modèle Gardenia de l'Argens)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 Total généra	
1959	1.5	6.4	27.3	26.2	16.3	2.2	0.0	0.4	4.2	33.7	42.7	104.7	265.7
1960	14.5	41.5	68.4	11.3	1.3	2.5	0.1	1.6	7.7	87.6	82.1	96.4	415.0
1961	15.3	1.2	0.0	25.9	17.5	6.3	0.0	0.0	0.9	21.5	55.2	11.0	154.8
1962	18.2	34.5	17.0	5.7	2.0	3.6	0.1	0.0	0.6	3.0	35.7	24.0	144.3
1963	25.7	55.5	12.0	42.3	1.4	15.5	2.8	4.0	32.8	17.6	37.6	28.2	275.5
1964	20.0	36.7	41.1	16.4	6.4	3.6	0.0	1.8	1.1	4.8	2.4	6.8	141.0
1965	6.0	1.3	14.2	0.0	0.3	1.2	1.3	3.6	13.2	8.8	10.7	16.0	76.6
1966	11.8	61.3	1.2	17.6	10.9	3.0	0.5	0.3	0.9	8.8	27.3	5.3	149.1
1967	2.0	5.9	1.7	3.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.3	0.1	4.3	1.2	19.2
1968	0.0	12.8	3.8	7.8	17.4	6.0	0.0	1.1	8.1	7.1	36.4	19.2	119.9
1969	33.8	26.6	42.0	3.8	18.5	8.5	6.1	1.2	8.1	0.6	5.8	7.6	162.8
1970	21.6	10.7	14.6	0.9	3.4	6.0	0.0	0.0	0.0	3.8	8.2	14.0	83.3
1971	22.0	2.7	22.9	43.6	25.4	13.6	1.1	0.7	0.3	0.2	16.1	6.6	155.1
1972	19.9	121.5	35.9	25.8	9.5	18.7	1.0	0.6	2.8	35.7	8.1	62.6	342.2
1973	39.7	13.4	10.7	12.5	1.1	3.4	2.9	1.1	1.7	30.3	10.0	42.7	169.6
1974	38.7	81.2	42.0	56.1	25.1	1.1	0.0	0.2	11.7	2.4	4.8	3.3	266.3
1975	4.1	21.2	32.9	11.6	15.5	3.8	0.1	0.9	6.0	1.1	9.9	21.4	128.4
1976	8.2	14.3	22.0	26.3	12.6	0.5	4.1	3.3	4.6	90.5	56.0	35.5	278.1
1977	60.6	39.4	35.6	8.2	38.6	12.3	12.6	26.5	0.0	21.9	20.9	40.4	317.0
1978	150.1	48.3	33.8	40.4	59.5	11.8	2.6	1.0	0.8	0.1	0.0	2.9	351.1
1979	15.7	24.8	35.2	10.1	2.2	3.5	0.1	0.0	0.1	95.1	16.6	38.6	242.0
1980	16.4	0.0	23.3	10.6	30.9	8.1	2.1	2.3	0.0	2.5	6.9	0.1	103.3
1981	1.6	0.3	11.1	13.7	7.7	1.6	0.6	0.0	3.1	1.4	0.0	46.9	88.0
1982	5.3	6.4	5.1	3.0	0.3	0.8	0.0	0.1	0.2	4.5	30.5	9.7	65.9
1983	0.0	20.2	22.8	6.4	13.9	5.5	0.0	6.0	0.6	12.1	1.8	27.0	116.3
1984	19.0	15.4	22.0	4.5	37.3	26.3	0.0	5.2	3.7	19.9	43.5	30.6	227.3
1985	17.5	17.8	58.2	3.8	42.9	1.6	0.1	0.8	0.0	0.3	1.2	4.9	149.0
1986	25.8	22.4	3.3	54.5	1.3	4.2	0.1	4.5	9.7	5.6	12.6	6.8	151.0
1987	18.1	27.0	7.6	27.3	4.4	1.4	2.9	7.2	1.9	39.8	36.7	25.3	199.6
1988	42.8	7.0	25.1	37.6	26.5	6.6	0.0	0.0	0.0	20.5	3.8	5.2	175.2
1989	1.6	9.8	2.2	19.5	0.4	0.5	0.0	0.0	0.2	0.3	4.1	2.8	41.5
1990	1.9	1.6	2.6	10.8	13.2	1.1	0.1	0.4	0.4	17.2	11.9	24.0	85.3
1991	7.9	5.9	28.3	10.1	5.0	1.2	0.0	0.0	10.9	27.9	19.7	0.0	116.9
1992	7.2	4.7	7.3	3.6	1.4	11.6	3.0	1.3	10.2	29.6	24.7	5.9	110.4
1993	0.0	2.8	3.8	44.1	13.0	1.2	0.6	0.1	30.7	53.2	34.5	6.6	190.6
1994	102.9	81.0	6.4	19.8	11.0	3.4	0.0	0.2	50.2	57.5	75.5	6.2	414.1
1995	19.0	37.6	10.5	74.8	42.4	0.0	1.0	0.9	5.8	6.6	16.5	48.5	263.7
1996	96.6	16.2	19.1	17.9	9.5	5.8	1.5	3.8	30.6	26.4	120.7	48.8	396.9
1997	96.9	0.9	0.0	2.6	0.6	3.6	0.2	3.6	0.9	1.1	10.1	15.0	135.5
1998	14.5	3.3	0.9	15.0	9.9	2.6	0.0	1.1	11.9	13.0	4.8	6.6	83.6
1999	40.5	1.3	15.6	15.2	9.4	0.0	0.2	0.4	16.5	47.0	31.0	8.5	185.6
2000	0.6	1.9	12.1	31.0	5.3	7.5	0.6	0.0	4.8	17.4	83.2	55.0	219.5
2001	49.7	13.2	33.6	8.3	44.5	0.0	0.5	0.0	0.8	2.1	1.6	0.0	154.2
2002	2.5	10.8	7.9	5.0	38.7	9.7	1.9	1.8	13.4	12.6	89.1	28.4	221.7
2003	29.4	4.3	2.2	23.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.9	9.5	22.1	74.9	167.1
2004	12.4	10.0	1.1	4.2	3.3	0.1	0.0	0.6	1.0	10.5	3.5	10.9	57.6
2005	1.0	0.0	1.7	8.0	5.0	0.5	0.0	0.0	9.4	5.7	11.4	16.5	59.1
2006	19.5	10.9	6.0	0.8	1.0	0.0	0.1	0.0	4.7	3.3	2.7	21.1	70.1
2007	2.8	6.5	2.0	1.9	9.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.1	1.9	1.2	31.0
2008	9.1	7.0	2.5	11.6	27.8	9.3	0.0	0.1	0.6	10.2	48.5	107.8	234.5
2009	27.4	32.9	18.3	39.3	10.2	2.4	0.1	0.1	4.1	6.7	9.6	42.9	194.1
2010	35.5	38.9	37.9	18.3	27.2	21.0	0.0	0.2	0.3	10.8	20.5	28.3	238.8
2011	10.0	17.2	41.5	8.3	0.0	8.0	2.5	2.6	1.2	4.8	118.7	5.6	220.5
2012	3.8	0.0	0.5	12.8	11.4	0.4	0.1	0.0	0.2	19.1	67.7	16.2	132.3
2013	23.7	2.5	47.9	29.1	32.2	0.4	2.5	0.3	0.4	1.2	2.3	22.1	164.5
2014	84.6	83.0	19.0	4.2	0.3	3.7	0.9	3.2	1.1	4.2	44.6	15.0	263.9
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	19.2
Max	150.1	121.5	68.4	74.8	59.5	26.3	12.6	26.5	50.2	95.1	120.7	107.8	415.0
Moy	24.6	21.1	18.3	17.8	14.0	5.0	1.0	1.7	6.0	17.5	26.9	24.3	178.3
Mediane	16.9	11.9	14.4	12.1	9.8	3.4	0.1	0.5	1.5	9.1	16.3	16.1	159.0
Décile0.1	1.5	1.2	1.4	3.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4	2.1	2.8	68.0
Décile0.9	55.1	51.9	41.3	41.4	38.0	12.0	2.8	3.9	13.3	43.4	71.6	51.9	297.5

Figure A8 - 2 : Pluie efficace estimée sur la zone d'étude calculée à partir du modèle Gardenia de la source de l'Argens (cf. texte)

Somme de Alim G1=recharge (calculé à partir du modèle Gardenia de l'Argens)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1959	4.04	3.39	6.76	7.94	6.92	4.61	2.40	1.22	1.46	5.82	8.92	19.74	73.24
1960	6.47	10.07	13.80	8.26	3.79	2.46	1.37	1.16	1.82	13.92	16.88	17.27	97.26
1961	8.73	3.48	1.98	4.55	6.65	6.17	2.41	1.17	0.76	5.81	9.12	8.98	59.81
1962	7.83	5.22	10.26	4.46	2.52	2.58	1.50	0.78	0.48	0.88	7.69	6.05	50.24
1963	10.68	11.38	6.55	10.11	5.66	5.98	3.28	2.59	7.10	6.19	11.00	8.89	89.41
1964	7.35	7.39	11.24	8.91	4.03	3.33	2.12	1.50	1.08	2.24	1.83	2.43	53.46
1965	3.01	2.44	4.85	2.78	1.42	1.15	0.93	1.34	2.77	5.38	4.86	6.11	37.05
1966	5.06	10.63	7.44	5.75	5.75	3.36	2.08	1.16	0.71	2.62	6.74	5.31	56.60
1967	3.25	2.70	2.67	2.10	1.34	0.85	0.53	0.30	0.23	0.18	1.08	1.37	16.61
1968	1.04	1.87	4.35	3.54	3.78	5.69	3.08	1.47	3.07	3.41	9.24	7.66	48.20
1969	9.17	6.74	11.95	5.24	6.63	4.15	4.54	2.31	2.74	2.48	2.12	2.44	60.49
1970	7.23	5.21	5.53	3.70	2.77	2.90	1.82	0.92	0.51	1.37	2.59	3.85	38.40
1971	6.26	5.59	6.13	10.35	8.93	7.64	3.43	1.68	1.02	0.67	3.89	3.24	58.82
1972	7.23	17.54	12.33	7.93	6.21	6.50	3.66	1.80	1.84	6.85	5.39	9.54	86.82
1973	13.56	7.29	4.70	6.08	3.33	2.44	2.19	1.56	1.33	7.93	5.45	7.33	63.20
1974	10.93	14.97	12.48	10.58	10.75	5.01	2.26	1.13	1.94	3.90	2.50	2.42	78.88
1975	2.63	5.98	9.42	6.10	5.94	3.51	2.00	1.10	1.94	2.14	2.92	6.62	50.31
1976	4.05	6.57	6.99	7.71	6.99	3.07	2.46	1.96	2.56	11.80	16.02	8.35	78.54
1977	14.87	10.16	10.63	5.53	9.75	7.18	5.17	6.18	6.28	5.85	7.53	11.00	100.14
1978	18.58	13.49	9.13	9.39	14.03	9.26	4.52	2.13	1.38	0.79	0.43	0.82	83.97
1979	3.65	7.14	9.57	6.81	3.87	2.91	1.54	0.82	0.45	10.91	11.17	8.45	67.30
1980	8.00	4.84	6.15	5.85	7.67	6.69	3.49	1.83	1.51	1.32	2.80	1.87	52.03
1981	1.35	0.84	1.33	5.60	5.18	2.66	1.88	1.04	0.91	1.60	0.99	6.02	29.41
1982	8.01	3.97	3.46	2.93	1.73	1.14	0.69	0.40	0.28	1.00	5.79	7.27	36.67
1983	2.90	4.07	7.28	5.84	5.76	3.60	2.78	1.85	2.39	2.17	4.04	6.37	49.07
1984	6.44	5.84	7.95	5.84	8.21	9.68	3.33	2.16	2.84	5.92	9.61	10.89	78.70
1985	5.89	7.08	13.15	5.14	9.74	4.61	2.22	1.27	0.78	0.51	0.65	1.45	52.48
1986	3.50	9.20	5.00	10.70	5.30	2.85	1.93	1.40	2.74	4.44	4.63	4.57	56.29
1987	5.90	7.84	4.93	8.41	3.95	2.44	2.03	2.35	2.64	8.83	9.67	9.50	68.49
1988	10.06	6.71	5.69	10.90	9.25	5.28	3.37	1.51	0.78	4.50	4.19	3.61	65.83
1989	1.86	1.90	3.71	5.63	3.63	1.83	0.98	0.54	0.37	0.27	0.84	2.12	23.68
1990	1.29	1.58	1.77	3.36	4.33	3.89	1.83	1.02	0.69	3.30	4.72	8.19	35.96
1991	5.60	3.52	7.86	5.56	4.11	2.21	1.19	0.65	0.95	7.90	7.90	3.77	51.23
1992	3.27	2.81	3.09	3.51	2.15	3.53	3.55	1.89	2.20	7.44	9.54	4.75	47.72
1993	2.18	1.19	2.44	6.40	9.44	3.42	1.98	1.03	3.48	12.07	10.20	7.39	61.21
1994	16.46	13.99	6.83	5.35	6.11	3.61	2.37	1.15	6.08	13.36	16.11	5.13	96.56
1995	5.65	8.10	8.26	9.92	13.03	5.87	2.55	1.44	1.93	3.61	4.10	9.10	73.56
1996	18.16	10.00	6.82	5.23	6.92	3.95	2.50	1.99	6.35	9.49	17.21	13.04	101.67
1997	18.55	5.15	2.36	1.46	1.55	1.77	1.29	1.18	1.61	1.23	2.97	4.87	43.98
1998	6.22	3.42	2.58	3.01	4.97	4.39	1.97	1.35	2.99	5.74	3.76	2.44	42.85
1999	9.48	4.60	4.93	5.48	6.21	2.35	1.20	0.81	2.83	9.11	10.97	6.04	64.01
2000	2.86	1.65	1.98	7.82	6.84	4.23	2.42	1.26	0.93	5.14	14.27	12.68	62.06
2001	13.10	6.87	10.47	5.00	11.01	4.80	2.11	1.10	0.64	1.13	1.20	0.87	58.31
2002	0.83	2.93	4.66	3.17	9.53	5.95	2.91	1.82	4.43	5.34	11.76	11.84	65.18
2003	10.03	5.42	3.05	5.60	4.12	1.87	0.98	0.53	0.37	0.98	5.93	14.72	53.61
2004	5.76	4.82	3.79	2.23	3.01	1.53	0.84	0.63	0.67	1.18	3.72	3.59	31.77
2005	3.59	1.61	1.12	2.62	3.16	2.09	1.14	0.62	2.58	2.79	4.82	6.24	32.37
2006	4.76	6.12	4.77	2.71	1.83	0.96	0.57	0.35	0.89	2.09	2.02	6.44	33.52
2007	3.18	2.91	2.71	2.05	3.59	3.33	1.93	0.97	0.51	0.31	0.44	1.03	22.96
2008	3.01	3.75	2.18	3.05	6.08	7.73	2.91	1.36	0.82	1.93	9.47	18.51	60.79
2009	8.72	10.49	6.17	9.71	7.30	4.13	1.97	1.03	1.37	2.39	3.31	8.91	65.48
2010	11.79	9.15	10.62	8.65	8.98	6.56	3.81	1.68	0.94	1.06	6.20	8.38	77.82
2011	6.26	6.28	9.32	6.79	3.89	3.86	2.11	2.37	1.58	1.44	16.77	5.45	66.12
2012	3.14	1.75	1.06	2.63	4.85	3.58	1.70	0.88	0.48	2.08	10.99	11.30	44.44
2013	7.14	5.12	8.64	9.15	10.79	5.24	2.55	1.71	0.89	0.97	1.02	3.71	56.94
2014	12.26	17.41	9.77	4.60	2.66	1.95	1.78	1.92	1.31	2.17	8.28	8.48	72.58
Min	0.8	0.8	1.1	1.5	1.3	0.9	0.5	0.3	0.2	0.2	0.4	0.8	16.6
Max	18.6	17.5	13.8	10.9	14.0	9.7	5.2	6.2	7.1	13.9	17.2	19.7	101.7
Moy	7.0	6.3	6.3	5.9	5.9	4.0	2.3	1.4	1.9	4.2	6.6	6.9	58.6
Mediane	6.2	5.5	6.1	5.6	5.7	3.6	2.1	1.3	1.4	2.7	5.4	6.3	58.6
Décile0.1	2.4	1.8	2.1	2.7	2.3	1.8	1.0	0.6	0.5	0.8	1.1	2.0	32.9
Décile0.9	13.3	11.0	10.9	9.8	9.7	6.6	3.5	2.1	3.3	9.3	13.0	12.3	85.4

Figure A8 - 3 : Recharge estimée sur la zone d'étude calculée à partir du modèle Gardenia de la source de l'Argens (cf.texte)

Moyenne de Q_observation de la Sce Argens (Code Y50002020)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 Total généra	
1975							0.126	0.138	0.122	0.114	0.118	0.347	0.165
1976	0.169	0.754	0.739	1.248	0.796	0.312	0.209	0.152	0.134	1.868	1.975	0.911	0.771
1977	2.350	1.347	1.018	0.520	0.803	0.441	0.243	0.388	0.410	0.252	0.382	1.104	0.770
1978	2.729	1.784	1.181	0.831	1.759	1.092	0.330	0.230	0.147	0.126	0.117	0.114	0.866
1979	0.459	0.967	1.233	0.529	0.303	0.217	0.167	0.123	0.119	1.220	0.969	1.045	0.611
1980	0.811	0.624	0.496	0.425	1.274	0.657	0.267	0.168	0.137	0.127	0.131	0.121	0.437
1981	0.131	0.133	0.204	0.736	0.279	0.136	0.123	0.117	0.111	0.107	0.106	0.665	0.238
1982	0.443	0.144	0.142	0.143	0.139	0.121	0.119	0.110	0.104	0.106	0.592	0.426	0.216
1983	0.207	0.616	1.026	0.676	0.506	0.323	0.226	0.217	0.219	0.200	0.323	1.046	0.465
1984	0.550	0.591	1.050	0.713	1.261	1.677	0.452	0.283	0.216	0.303	0.709	0.930	0.727
1985	0.832	0.789	1.529	0.474	1.165	0.542	0.288	0.202	0.148	0.138	0.124	0.121	0.529
1986	0.219	1.558	0.765	1.285	0.472	0.280	0.236	0.190	0.146	0.127	0.234	0.179	0.465
1987	0.591	1.023	0.348	1.032	0.327	0.220	0.190	0.131	0.134	0.443	0.583	0.589	0.463
1988	0.812	0.515	0.353	0.720	0.375	0.383	0.258	0.181	0.130	0.410	0.213	0.185	0.377
1989	0.130	0.203	0.306	0.582	0.315	0.159	0.121	0.112	0.105	0.102	0.106	0.108	0.195
1990	0.101	0.104	0.106	0.211	0.543	0.265	0.128	0.115	0.106	0.300	0.296	0.753	0.254
1991	0.383	0.274	0.882	0.487	0.337	0.229	0.155	0.125	0.125	0.447	0.331	0.187	0.331
1992	0.133	0.129	0.127	0.263	0.139	0.359	0.191	0.126	0.175	0.465	0.738	0.170	0.251
1993	0.125	0.116	0.135	1.024	0.959	0.283	0.196	0.138	0.227	0.727	0.737	0.358	0.420
1994	1.679	1.364	0.334	0.256	0.241	0.176	0.150	0.138	0.432	0.803	1.459	0.268	0.602
1995	0.255	0.395	0.356	1.381	0.802	0.296	0.183	0.158	0.153	0.146	0.323	0.553	0.416
1996	2.262	0.841	0.500	0.428	0.656	0.205	0.146	0.126	0.161	0.192	1.518	1.176	0.684
1997	2.191	0.463	0.253	0.209	0.171	0.144	0.127	0.151	0.132	0.123	0.165	0.350	0.375
1998	0.288	0.193	0.138	0.209	0.451	0.215	0.133	0.121	0.139	0.250	0.136	0.117	0.199
1999	0.936	0.286	0.264	0.472	0.539	0.214	0.140	0.128	0.348	0.801	0.713	0.492	0.446
2000	0.292	0.201	0.150	0.720	0.475	0.211	0.138	0.106	0.091	0.284	1.166	1.261	0.425
2001	1.237	0.618	1.756	0.507	1.465	0.444	0.280	0.206	0.158	0.141	0.139	0.130	0.566
2002	0.121	0.226	0.249	0.178	1.234	0.317	0.147	0.109	0.202	0.169	0.978	0.774	0.393
2003	0.780	0.324	0.162	0.378	0.228	0.137	0.092	0.087	0.080	0.079	0.397	1.211	0.331
2004	0.233	0.305	0.232	0.147	0.125	0.101	0.087	0.188	0.084	0.124	0.210	0.238	0.172
2005	0.161	0.084	0.080	0.300	0.162	0.105	0.076	0.064	0.192	0.089	0.126	0.234	0.139
2006	0.459	0.549	0.364	0.280	0.190	0.149	0.137	0.097	0.235	0.141	0.113	0.582	0.273
2007	0.152	0.149	0.148	0.127	0.211	0.244	0.110	0.084	0.068	0.063	0.073	0.067	0.124
2008	0.276	0.223	0.098	0.325	0.760	0.676	0.218	0.146	0.104	0.088	0.526	1.740	0.433
2009	0.837	1.243	0.354	0.928	0.455	0.221	0.172	0.145	0.335	0.112			0.506
2010	1.175	0.793	0.652	0.479	0.686	0.561	0.263	0.144	0.103	0.082	0.312	0.667	0.492
2011	0.246	0.615	1.176	0.683	0.221	0.143	0.116	0.103	0.092	0.124	2.498	0.431	0.533
2012	0.250	0.160	0.122	0.215	0.611	0.386	0.142	0.095	0.085	0.184	1.082	0.982	0.360
2013													
2014													
Min	0.101	0.084	0.080	0.127	0.125	0.101	0.076	0.064	0.068	0.063	0.073	0.067	0.124
Max	2.729	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000	0.866
Moy	0.684	0.597	0.580	0.635	0.696	0.490	0.356	0.350	0.390	0.553	0.835	0.859	0.422
Mediane	0.413	0.489	0.351	0.483	0.474	0.255	0.155	0.138	0.137	0.146	0.327	0.462	0.422
Décile0.1	0.131	0.132	0.125	0.200	0.168	0.137	0.115	0.097	0.090	0.089	0.116	0.120	0.188
Décile0.9	1.832	1.352	1.197	1.097	1.265	0.663	0.282	0.220	0.337	0.801	1.477	1.187	0.697

Figure A8 - 4 : Eléments de statistiques descriptives des débits observés à la source de l'Argens (data banque Hydro).

Moyenne de Q_Simul Sce Argens													12 Total généra
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1959	0.477	0.431	0.817	1.053	0.872	0.565	0.340	0.251	0.227	0.754	1.225	5.336	1.037
1960	0.877	1.824	2.762	1.305	0.589	0.442	0.335	0.277	0.275	2.623	3.898	4.464	1.640
1961	1.394	0.626	0.439	0.735	0.837	0.828	0.375	0.277	0.226	0.615	1.437	1.247	0.753
1962	1.028	0.763	1.618	0.573	0.372	0.345	0.258	0.203	0.166	0.147	0.968	0.624	0.588
1963	1.621	2.326	0.808	1.592	0.749	0.788	0.437	0.356	1.017	0.755	1.951	1.290	1.129
1964	1.022	1.202	1.803	1.485	0.571	0.477	0.355	0.283	0.234	0.249	0.215	0.231	0.675
1965	0.257	0.236	0.426	0.263	0.175	0.150	0.127	0.128	0.207	0.454	0.432	0.591	0.288
1966	0.485	2.034	0.995	0.693	0.656	0.409	0.295	0.227	0.184	0.255	0.732	0.533	0.615
1967	0.320	0.293	0.262	0.221	0.172	0.140	0.115	0.095	0.078	0.065	0.073	0.080	0.159
1968	0.071	0.145	0.298	0.258	0.302	0.537	0.269	0.171	0.259	0.275	1.232	0.890	0.392
1969	1.311	1.007	1.979	0.696	0.869	0.528	0.544	0.332	0.339	0.291	0.257	0.255	0.701
1970	0.817	0.599	0.574	0.401	0.301	0.302	0.222	0.169	0.137	0.140	0.206	0.303	0.347
1971	0.618	0.630	0.715	1.584	1.211	1.035	0.441	0.298	0.239	0.195	0.397	0.299	0.637
1972	0.782	4.832	2.201	1.162	0.817	0.906	0.503	0.340	0.301	0.942	0.630	1.701	1.246
1973	2.457	1.114	0.629	0.801	0.450	0.356	0.305	0.246	0.210	0.942	0.603	1.194	0.776
1974	1.694	3.496	2.473	1.904	1.970	0.767	0.452	0.343	0.341	0.430	0.309	0.278	1.190
1975	0.272	0.743	1.326	0.740	0.694	0.409	0.284	0.217	0.224	0.215	0.262	0.705	0.507
1976	0.388	0.769	0.809	1.025	0.845	0.391	0.312	0.260	0.274	2.273	3.691	1.183	1.016
1977	2.936	1.925	1.794	0.852	1.529	1.070	0.717	0.885	0.900	0.756	1.049	1.852	1.355
1978	5.688	3.156	1.573	1.639	2.851	1.607	0.739	0.477	0.382	0.305	0.247	0.210	1.566
1979	0.360	0.919	1.322	0.839	0.446	0.356	0.251	0.198	0.161	2.409	1.852	1.216	0.861
1980	1.061	0.649	0.800	0.725	1.007	0.875	0.449	0.309	0.262	0.220	0.277	0.210	0.570
1981	0.170	0.142	0.147	0.509	0.458	0.250	0.192	0.148	0.129	0.137	0.111	0.802	0.267
1982	0.941	0.404	0.321	0.285	0.203	0.164	0.134	0.109	0.090	0.094	0.581	0.755	0.340
1983	0.263	0.442	0.806	0.645	0.629	0.387	0.307	0.237	0.248	0.231	0.365	0.774	0.445
1984	0.693	0.677	0.966	0.723	1.136	1.547	0.447	0.333	0.344	0.638	1.405	1.787	0.891
1985	0.748	1.031	2.463	0.717	1.593	0.641	0.390	0.300	0.243	0.198	0.167	0.166	0.722
1986	0.334	1.357	0.514	1.885	0.619	0.356	0.273	0.226	0.287	0.404	0.471	0.437	0.589
1987	0.649	1.131	0.529	1.193	0.450	0.323	0.268	0.268	0.270	1.200	1.434	1.335	0.750
1988	1.614	0.963	0.728	1.769	1.338	0.720	0.481	0.325	0.257	0.542	0.442	0.376	0.795
1989	0.239	0.253	0.332	0.577	0.352	0.223	0.170	0.137	0.113	0.093	0.094	0.130	0.226
1990	0.099	0.113	0.115	0.229	0.343	0.319	0.170	0.130	0.108	0.266	0.404	0.954	0.272
1991	0.553	0.371	0.991	0.626	0.434	0.282	0.211	0.169	0.168	0.884	0.976	0.391	0.506
1992	0.332	0.299	0.297	0.334	0.228	0.318	0.316	0.201	0.227	0.790	1.408	0.505	0.437
1993	0.282	0.218	0.245	0.831	1.317	0.389	0.267	0.203	0.540	1.907	1.638	0.976	0.737
1994	4.422	3.762	1.055	0.792	0.819	0.524	0.388	0.289	1.053	2.467	4.202	0.709	1.691
1995	0.819	1.357	1.191	2.482	2.372	0.899	0.467	0.355	0.331	0.407	0.471	1.262	1.032
1996	4.135	1.844	0.989	0.731	0.932	0.539	0.384	0.314	0.869	1.325	4.680	2.344	1.588
1997	4.686	0.910	0.521	0.408	0.349	0.312	0.255	0.216	0.205	0.170	0.255	0.468	0.733
1998	0.615	0.354	0.260	0.292	0.470	0.432	0.228	0.182	0.268	0.542	0.351	0.239	0.353
1999	1.371	0.535	0.515	0.610	0.714	0.308	0.224	0.183	0.331	1.449	1.711	0.703	0.722
2000	0.364	0.273	0.262	0.970	0.803	0.469	0.300	0.222	0.186	0.513	2.895	2.365	0.801
2001	2.323	1.075	1.675	0.716	1.785	0.700	0.403	0.310	0.251	0.220	0.194	0.161	0.819
2002	0.139	0.267	0.391	0.271	1.251	0.664	0.315	0.235	0.438	0.545	2.628	1.938	0.758
2003	1.511	0.789	0.441	0.742	0.500	0.310	0.239	0.192	0.157	0.149	0.576	3.338	0.748
2004	0.634	0.574	0.428	0.293	0.316	0.222	0.174	0.144	0.124	0.131	0.282	0.281	0.300
2005	0.283	0.169	0.134	0.210	0.235	0.176	0.129	0.103	0.189	0.191	0.403	0.626	0.238
2006	0.470	0.713	0.466	0.296	0.224	0.174	0.141	0.115	0.112	0.143	0.144	0.624	0.300
2007	0.256	0.260	0.229	0.189	0.290	0.277	0.185	0.137	0.112	0.092	0.079	0.081	0.182
2008	0.187	0.282	0.158	0.240	0.600	0.947	0.291	0.194	0.156	0.183	1.292	4.861	0.787
2009	1.252	2.064	0.828	1.528	1.004	0.579	0.369	0.285	0.257	0.278	0.329	1.236	0.826
2010	1.956	1.507	1.673	1.297	1.366	0.991	0.536	0.347	0.275	0.242	0.677	1.115	0.996
2011	0.725	0.857	1.384	0.894	0.491	0.471	0.306	0.291	0.231	0.204	4.927	0.641	0.945
2012	0.387	0.284	0.221	0.275	0.463	0.353	0.212	0.163	0.133	0.225	1.839	1.754	0.526
2013	0.895	0.662	1.265	1.408	1.718	0.726	0.402	0.318	0.250	0.212	0.184	0.424	0.707
2014	2.257	4.837	1.523	0.636	0.421	0.338	0.289	0.261	0.213	0.228	1.146	1.124	1.081
Min	0.071	0.113	0.115	0.189	0.172	0.140	0.115	0.095	0.078	0.065	0.073	0.080	0.159
Max	5.688	4.837	2.762	2.482	2.851	1.607	0.739	0.885	1.053	2.623	4.927	5.336	1.691
Moy	1.117	1.080	0.902	0.824	0.795	0.529	0.321	0.250	0.282	0.582	1.084	1.078	0.735
Mediane	0.709	0.728	0.764	0.724	0.624	0.421	0.303	0.236	0.236	0.276	0.579	0.707	0.728
Décile0.1	0.247	0.244	0.237	0.260	0.262	0.222	0.170	0.133	0.118	0.138	0.176	0.210	0.280
Décile0.9	2.390	2.195	1.798	1.588	1.561	0.927	0.474	0.342	0.410	1.387	2.762	2.141	1.218

Figure A8 - 5 : Eléments de statistiques descriptives des débits simulés à la source de l'Argens par le modèle GARDENIA.

Somme de Alim G1=recharge (calculé à partir du modèle Gardenia de l'Argens)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1958													
1959	3.5	3.0	5.8	6.9	6.1	4.3	2.4	1.3	1.4	4.7	7.5	16.6	63.5
1960	6.0	8.5	11.7	7.4	3.6	2.4	1.5	1.2	1.6	11.3	14.2	14.7	84.1
1961	7.9	3.3	2.0	3.9	5.8	5.5	2.4	1.3	0.9	4.8	7.5	7.8	53.1
1962	6.8	4.6	8.8	4.1	2.5	2.4	1.5	0.9	0.6	0.8	6.2	5.2	44.4
1963	9.0	9.6	5.9	8.5	5.2	5.3	3.1	2.5	5.9	5.5	9.3	7.7	77.5
1964	6.4	6.3	9.5	7.8	3.8	3.1	2.1	1.5	1.1	2.0	1.7	2.1	47.5
1965	2.6	2.2	4.1	2.6	1.5	1.2	1.0	1.2	2.3	4.5	4.2	5.2	32.5
1966	4.4	8.8	6.7	5.1	5.1	3.1	2.1	1.3	0.8	2.2	5.5	4.6	49.7
1967	3.0	2.4	2.4	2.0	1.4	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.9	1.2	15.7
1968	1.0	1.5	3.6	3.1	3.3	4.9	2.9	1.5	2.7	3.0	7.6	6.6	41.7
1969	7.8	5.9	10.1	4.9	5.8	3.8	4.1	2.3	2.5	2.3	1.9	2.2	53.5
1970	6.0	4.5	4.8	3.4	2.6	2.6	1.8	1.0	0.6	1.2	2.2	3.2	34.0
1971	5.2	4.8	5.3	8.7	7.7	6.7	3.3	1.8	1.1	0.8	3.2	2.9	51.5
1972	6.0	14.5	10.8	6.9	5.5	5.7	3.5	1.9	1.8	5.7	4.8	7.9	74.9
1973	11.5	6.5	4.3	5.3	3.2	2.3	2.1	1.5	1.3	6.5	4.8	6.2	55.6
1974	9.4	12.5	10.8	9.0	9.4	4.6	2.3	1.3	1.8	3.3	2.3	2.2	68.9
1975	2.3	5.0	8.0	5.4	5.2	3.3	2.0	1.2	1.8	1.9	2.5	5.5	44.0
1976	3.7	5.6	6.0	6.6	6.1	3.0	2.4	1.9	2.3	9.5	13.7	7.4	68.1
1977	12.5	8.7	9.1	5.1	8.3	6.4	4.7	5.4	5.6	5.1	6.4	9.4	86.7
1978	15.6	11.7	8.1	8.1	11.9	8.2	4.3	2.2	1.5	0.9	0.6	0.8	73.7
1979	3.0	5.9	8.0	6.0	3.6	2.7	1.6	0.9	0.6	8.7	9.7	7.3	58.0
1980	7.0	4.4	5.3	5.1	6.6	5.9	3.3	1.9	1.5	1.3	2.4	1.8	46.5
1981	1.3	0.9	1.2	4.6	4.5	2.5	1.8	1.1	0.9	1.4	1.0	4.8	26.2
1982	6.9	3.6	3.2	2.7	1.7	1.2	0.8	0.5	0.4	0.9	4.6	6.2	32.5
1983	2.8	3.5	6.1	5.2	5.0	3.3	2.6	1.8	2.2	2.0	3.5	5.3	43.3
1984	5.6	5.1	6.8	5.2	6.9	8.4	3.3	2.1	2.6	5.0	8.0	9.3	68.2
1985	5.2	6.1	11.1	4.8	8.3	4.3	2.3	1.4	0.9	0.6	0.7	1.3	46.9
1986	2.9	7.6	4.6	9.0	4.9	2.8	1.9	1.4	2.4	3.8	4.0	4.0	49.1
1987	5.0	6.6	4.5	7.2	3.7	2.4	2.0	2.2	2.4	7.3	8.2	8.2	59.5
1988	8.5	6.0	5.0	9.2	8.0	4.8	3.2	1.6	0.9	3.7	3.7	3.2	57.9
1989	1.8	1.7	3.2	4.7	3.3	1.8	1.1	0.7	0.5	0.4	0.7	1.8	21.8
1990	1.2	1.4	1.6	2.8	3.7	3.5	1.8	1.1	0.8	2.7	4.0	6.8	31.3
1991	4.9	3.2	6.6	4.9	3.7	2.2	1.3	0.8	0.9	6.3	6.7	3.6	45.2
1992	3.0	2.5	2.8	3.1	2.1	3.1	3.2	1.9	2.0	6.1	8.1	4.3	42.0
1993	2.2	1.3	2.2	5.3	8.1	3.3	2.0	1.2	2.9	10.0	8.7	6.5	53.6
1994	14.0	12.0	6.2	4.8	5.4	3.4	2.3	1.3	4.9	11.1	13.8	4.9	84.1
1995	5.0	6.8	7.2	8.4	11.3	5.4	2.6	1.6	1.8	3.1	3.5	7.5	64.3
1996	15.1	8.9	6.1	4.7	6.0	3.7	2.4	1.9	5.3	8.1	14.3	11.3	87.6
1997	15.7	4.9	2.5	1.6	1.6	1.7	1.3	1.2	1.5	1.2	2.5	4.1	39.5
1998	5.3	3.1	2.4	2.7	4.3	3.9	2.0	1.4	2.6	4.8	3.4	2.3	38.1
1999	7.8	4.3	4.4	4.7	5.4	2.4	1.3	0.9	2.4	7.4	9.4	5.4	55.8
2000	2.8	1.7	1.9	6.5	6.0	3.9	2.4	1.4	1.0	4.2	11.6	10.9	54.1
2001	11.2	6.1	8.9	4.6	9.3	4.5	2.2	1.2	0.8	1.1	1.1	0.9	51.9
2002	0.8	2.4	3.9	2.8	7.9	5.3	2.8	1.8	3.7	4.6	9.6	10.3	56.1
2003	8.6	4.9	2.9	4.8	3.8	1.9	1.1	0.7	0.5	0.9	4.7	12.5	47.3
2004	5.2	4.3	3.5	2.2	2.7	1.5	0.9	0.7	0.7	1.0	3.1	3.1	28.9
2005	3.2	1.6	1.2	2.3	2.8	2.0	1.2	0.7	2.1	2.4	4.0	5.3	28.7
2006	4.1	5.2	4.3	2.6	1.8	1.1	0.7	0.5	0.8	1.7	1.8	5.3	29.8
2007	3.0	2.6	2.5	1.9	3.1	2.9	1.9	1.1	0.6	0.4	0.5	0.9	21.3
2008	2.4	3.2	2.0	2.6	5.1	6.6	2.9	1.5	0.9	1.7	7.7	15.5	52.1
2009	7.8	9.0	5.6	8.2	6.5	3.8	2.0	1.2	1.3	2.1	2.8	7.3	57.5
2010	10.0	7.8	9.1	7.5	7.8	5.8	3.6	1.8	1.1	1.1	5.0	7.0	67.5
2011	5.6	5.4	7.9	6.0	3.6	3.5	2.1	2.2	1.5	1.4	14.1	5.1	58.4
2012	3.0	1.8	1.2	2.3	4.1	3.3	1.7	1.0	0.6	1.7	8.8	9.7	39.3
2013													
2014													
Min	0.8	0.9	1.2	1.6	1.4	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.5	0.8	15.7
Max	15.7	14.5	11.7	9.2	11.9	8.4	4.7	5.4	5.9	11.3	14.3	16.6	87.6
Moy	6.0	5.3	5.4	5.1	5.1	3.7	2.2	1.4	1.7	3.6	5.6	6.0	51.2
Mediane	5.2	4.9	5.1	4.9	5.0	3.3	2.1	1.3	1.4	2.6	4.6	5.3	51.7
Décile0.1	2.2	1.7	2.0	2.4	2.2	1.7	1.1	0.7	0.6	0.8	1.0	1.8	29.2
Décile0.9	11.4	9.0	9.4	8.4	8.2	5.9	3.3	2.1	2.8	7.9	11.1	10.7	74.6

Figure A8 - 6 : Eléments de statistiques descriptives du flux de recharge calculé à l'aide du modèle GARDENIA (source de l'Argens).

Annexe 9

Informations complémentaires relative au modèle Gardenia du puits de l'Arc

<i>Figure A9 - 1. Correction apportée à la hauteur d'eau mesurée sur l'ancien canal d'évacuation des eaux d'exhaure des puits de l'Arc (Données SCP, ancien seuil)</i>	<i>161</i>
<i>Figure A9 - 2. Eléments de statistiques descriptives du débit de surverse (QG1) calculé à l'aide du modèle GARDENIA du puits de l'Arc.....</i>	<i>162</i>
<i>Figure A9 - 3. Eléments de statistiques descriptives du débit de « fuite » (QG2) calculé à l'aide du modèle GARDENIA du puits de l'Arc.....</i>	<i>163</i>

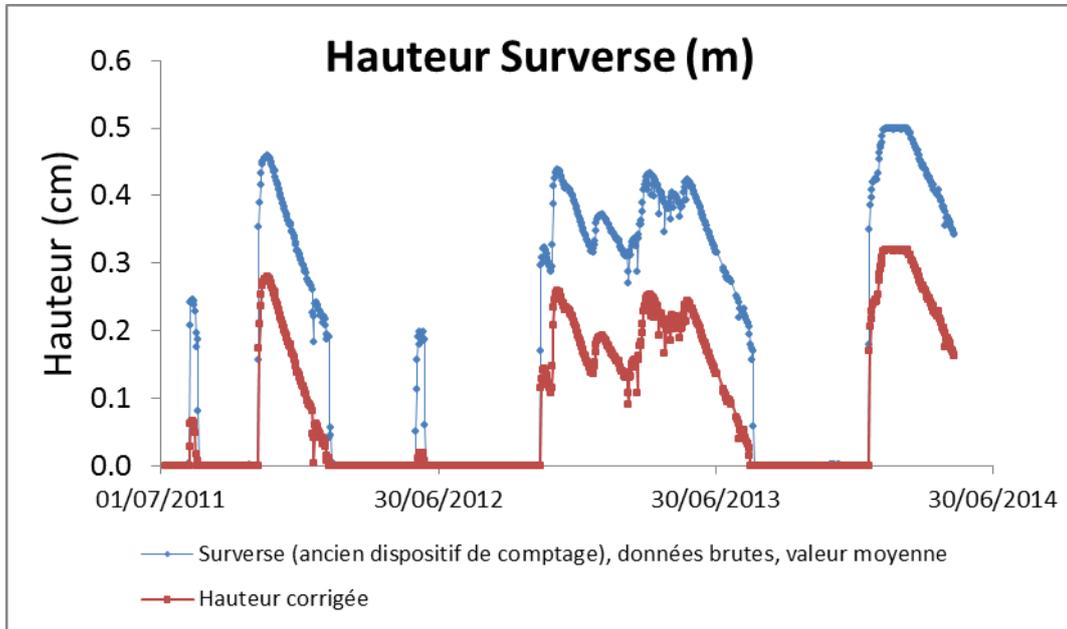


Figure A9 - 1. Correction apportée à la hauteur d'eau mesurée sur l'ancien canal d'évacuation des eaux d'exhaure des puits de l'Arc (Données SCP, ancien seuil)

Moyenne de Q_G1 (m3/s)													
Année\Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Moy
1970	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1971	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.21	0.15	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05
1972	0.00	0.20	0.64	0.60	0.54	0.47	0.38	0.26	0.17	0.17	0.19	0.21	0.32
1973	0.45	0.49	0.40	0.36	0.28	0.19	0.11	0.04	0.00	0.03	0.06	0.06	0.20
1974	0.25	0.50	0.71	0.70	0.81	0.68	0.52	0.37	0.26	0.22	0.13	0.07	0.44
1975	0.02	0.04	0.14	0.16	0.14	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
1976	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.47	0.53	0.10
1977	0.70	0.75	0.77	0.71	0.67	0.64	0.53	0.45	0.44	0.36	0.35	0.45	0.57
1978	0.69	1.15	1.11	1.02	1.06	1.08	0.90	0.69	0.53	0.38	0.26	0.16	0.75
1979	0.11	0.15	0.21	0.25	0.19	0.12	0.04	0.00	0.00	0.00	0.33	0.34	0.15
1980	0.40	0.34	0.28	0.27	0.26	0.28	0.20	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	0.18
1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.07	0.09	0.24	0.17	0.09	0.04	0.05	0.13	0.29	0.10
1985	0.25	0.27	0.44	0.41	0.42	0.39	0.27	0.17	0.08	0.01	0.00	0.00	0.23
1986	0.00	0.00	0.00	0.15	0.19	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
1987	0.00	0.00	0.04	0.12	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.22	0.05
1988	0.27	0.33	0.27	0.35	0.40	0.36	0.27	0.17	0.08	0.05	0.06	0.02	0.22
1989	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1993	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04	0.26	0.28	0.05
1994	0.60	0.91	0.87	0.71	0.62	0.50	0.37	0.25	0.21	0.40	0.81	0.73	0.58
1995	0.60	0.58	0.60	0.55	0.80	0.75	0.57	0.42	0.30	0.24	0.17	0.22	0.48
1996	0.51	0.75	0.64	0.55	0.51	0.40	0.29	0.19	0.17	0.27	0.50	0.83	0.47
1997	1.14	1.08	0.85	0.65	0.50	0.37	0.26	0.16	0.09	0.02	0.00	0.00	0.42
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.19	0.02
2000	0.12	0.04	0.00	0.03	0.10	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.38	0.07
2001	0.57	0.58	0.60	0.53	0.56	0.50	0.36	0.24	0.14	0.06	0.01	0.00	0.34
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.37	0.03
2003	0.43	0.41	0.30	0.25	0.22	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.16
2004	0.26	0.22	0.17	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
2005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.01
2009	0.52	0.63	0.55	0.55	0.54	0.43	0.31	0.20	0.11	0.05	0.03	0.07	0.33
2010	0.28	0.33	0.43	0.47	0.48	0.43	0.36	0.24	0.14	0.06	0.08	0.12	0.28
2011	0.16	0.15	0.20	0.26	0.19	0.14	0.06	0.02	0.00	0.00	0.29	0.42	0.16
2012	0.31	0.21	0.12	0.06	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.07
2013	0.22	0.22	0.22	0.33	0.40	0.39	0.27	0.17	0.08	0.02	0.00	0.00	0.19
2014	0.04	0.60	0.70	0.59	0.45	0.32	0.22	0.14	0.06	0.01	0.06	0.18	0.28
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Max	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.8	0.8	0.7
Moy	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Mediane	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Décile0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Décile0.9	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5

Figure A9 - 2. Eléments de statistiques descriptives du débit de surverse (QG1) calculé à l'aide du modèle GARDENIA du puits de l'Arc.

Moyenne de Q_G2 (m3/s)													
Année\Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Moy
1970	0.36	0.38	0.39	0.40	0.38	0.36	0.33	0.30	0.26	0.23	0.20	0.20	0.31
1971	0.21	0.25	0.28	0.35	0.42	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.36	0.35	0.36
1972	0.35	0.42	0.47	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
1973	0.45	0.46	0.45	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.41	0.42	0.42	0.43
1974	0.43	0.46	0.48	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.45
1975	0.41	0.42	0.42	0.43	0.42	0.42	0.41	0.40	0.38	0.35	0.32	0.31	0.39
1976	0.33	0.34	0.37	0.41	0.42	0.42	0.41	0.40	0.37	0.37	0.45	0.46	0.40
1977	0.47	0.48	0.48	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.44	0.45	0.46
1978	0.47	0.51	0.51	0.50	0.51	0.51	0.49	0.47	0.46	0.45	0.43	0.43	0.48
1979	0.42	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.38	0.37	0.44	0.44	0.42
1980	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.37	0.42
1981	0.33	0.29	0.26	0.25	0.26	0.27	0.26	0.24	0.21	0.19	0.17	0.16	0.24
1982	0.23	0.28	0.31	0.31	0.29	0.27	0.24	0.21	0.18	0.15	0.15	0.20	0.24
1983	0.24	0.25	0.28	0.33	0.35	0.37	0.37	0.34	0.32	0.29	0.28	0.27	0.31
1984	0.31	0.35	0.39	0.42	0.42	0.43	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.44	0.40
1985	0.43	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.37	0.43
1986	0.34	0.36	0.41	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.38	0.37	0.37	0.39
1987	0.37	0.39	0.42	0.42	0.42	0.41	0.40	0.38	0.36	0.36	0.41	0.43	0.40
1988	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.42	0.41	0.43
1989	0.40	0.37	0.35	0.34	0.35	0.33	0.30	0.26	0.23	0.20	0.17	0.15	0.29
1990	0.14	0.13	0.12	0.12	0.13	0.16	0.17	0.16	0.15	0.14	0.15	0.20	0.15
1991	0.26	0.29	0.32	0.37	0.39	0.38	0.35	0.31	0.27	0.27	0.32	0.36	0.32
1992	0.36	0.35	0.34	0.32	0.30	0.28	0.27	0.26	0.24	0.25	0.31	0.38	0.30
1993	0.39	0.37	0.34	0.32	0.38	0.42	0.41	0.38	0.35	0.39	0.44	0.44	0.38
1994	0.47	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.43	0.45	0.48	0.48	0.46
1995	0.47	0.46	0.47	0.46	0.48	0.48	0.46	0.45	0.44	0.43	0.43	0.43	0.46
1996	0.46	0.48	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.43	0.43	0.44	0.46	0.49	0.45
1997	0.51	0.51	0.49	0.47	0.46	0.45	0.43	0.43	0.42	0.41	0.41	0.40	0.45
1998	0.41	0.41	0.39	0.37	0.36	0.35	0.34	0.31	0.28	0.28	0.29	0.28	0.34
1999	0.29	0.35	0.38	0.39	0.41	0.41	0.38	0.34	0.31	0.31	0.40	0.43	0.37
2000	0.42	0.42	0.41	0.41	0.42	0.42	0.41	0.39	0.36	0.34	0.38	0.45	0.40
2001	0.46	0.46	0.47	0.46	0.46	0.46	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.44
2002	0.36	0.33	0.32	0.31	0.33	0.39	0.40	0.39	0.36	0.36	0.38	0.45	0.36
2003	0.45	0.45	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.38	0.34	0.32	0.41	0.41
2004	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.38	0.34	0.30	0.26	0.25	0.24	0.36
2005	0.24	0.23	0.21	0.19	0.19	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.19	0.18
2006	0.22	0.25	0.29	0.30	0.29	0.27	0.24	0.21	0.18	0.16	0.15	0.17	0.23
2007	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.16	0.14	0.12	0.11	0.17
2008	0.10	0.12	0.13	0.13	0.15	0.21	0.26	0.26	0.24	0.22	0.25	0.38	0.21
2009	0.46	0.47	0.46	0.46	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.42	0.44
2010	0.44	0.44	0.45	0.45	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.44
2011	0.43	0.43	0.43	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.40	0.37	0.42	0.45	0.42
2012	0.44	0.43	0.42	0.42	0.42	0.41	0.40	0.37	0.33	0.29	0.31	0.41	0.39
2013	0.43	0.43	0.43	0.44	0.45	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.37	0.42
2014	0.40	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.42	0.43	0.44
Min		0.12	0.12	0.12	0.13	0.16	0.17	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.15
Max	0.51	0.51	0.51	0.50	0.51	0.51	0.49	0.47	0.46	0.45	0.48	0.49	0.48
Moy	0.37	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.34	0.35	0.36	0.37
Mediane	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.38	0.37	0.40	0.41	0.40
Décile0.1	0.22	0.25	0.27	0.27	0.27	0.27	0.25	0.22	0.19	0.17	0.16	0.19	0.23
Décile0.9	0.46	0.47	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.43	0.43	0.43	0.44	0.45	0.45

Figure A9 - 3. Eléments de statistiques descriptives du débit de « fuite » (QG2) calculé à l'aide du modèle GARDENIA du puits de l'Arc.

Annexe 10

Annexe géochimique

Figure A10 - 1 : Evolution des teneurs en sulfate des eaux du puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les autres ouvrages.	167
Figure A10 - 2 : Evolution des teneurs en calcium des eaux du puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les autres ouvrages.	167
Figure A10 - 3 : Evolution des teneurs en magnésium des eaux du puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les autres ouvrages.	168
Figure A10 - 4 : Evolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$)....	169
Figure A10 - 5 : Tableau des résultats des gaz dissous (gaz nobles) contenus dans l'eau à l'état de trace.	170
Figure A10 - 6 : Concentration moyenne calculée à l'aide du modèle d'excès d'air non fractionné (Aeschbach-Hertig et al, 1999). Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters.	170
Figure A10 - 7 : Tableau des résultats des gaz dissous (composés halogénés) contenus dans l'eau à l'état de trace.	170
Figure A10 - 8 : Paramètres utilisées pour le calcul des âges de l'eau.	171
Figure A10 - 9 : Evolutions du SF6 et du CFC12 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge et report des concentrations en gaz dissous et des activités tritium mesurées dans les eaux du puits de l'Arc.....	172
Figure A10 - 10 : Evolutions du CFC11 et du CFC113 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge et report des concentrations en gaz dissous et des activités tritium mesurées dans les eaux du puits de l'Arc.....	173

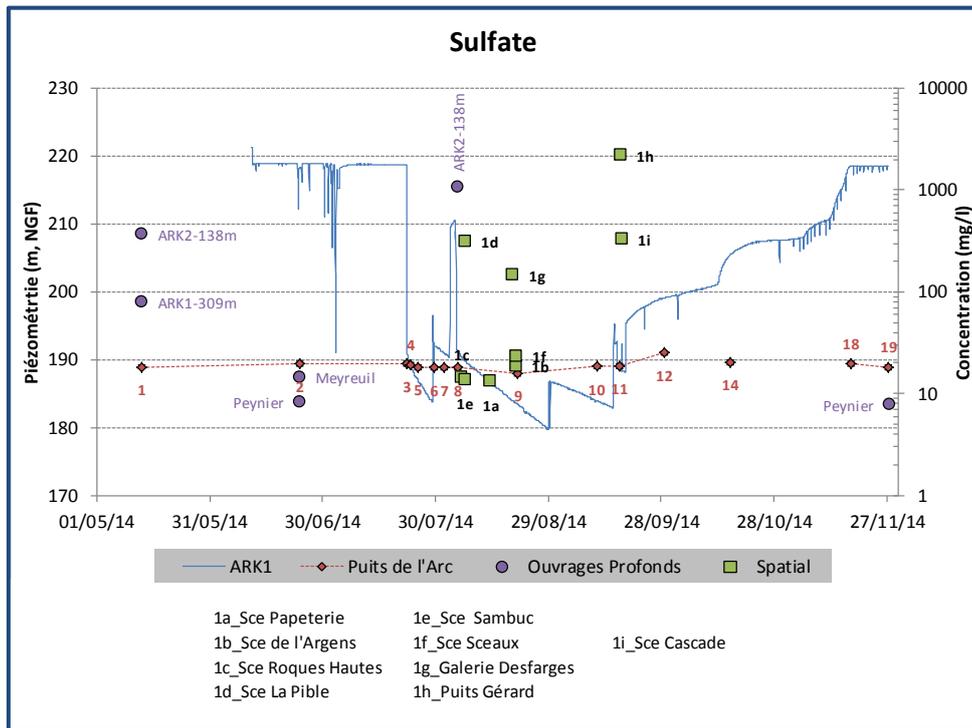


Figure A10 - 1 : Evolution des teneurs en sulfate des eaux du puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les autres ouvrages.

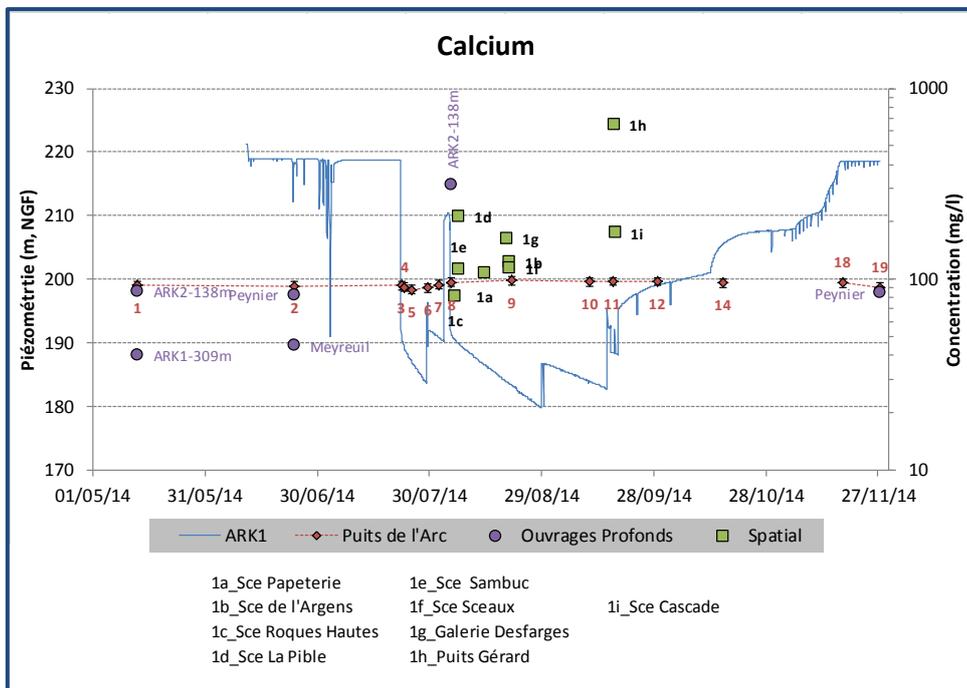


Figure A10 - 2 : Evolution des teneurs en calcium des eaux du puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les autres ouvrages.

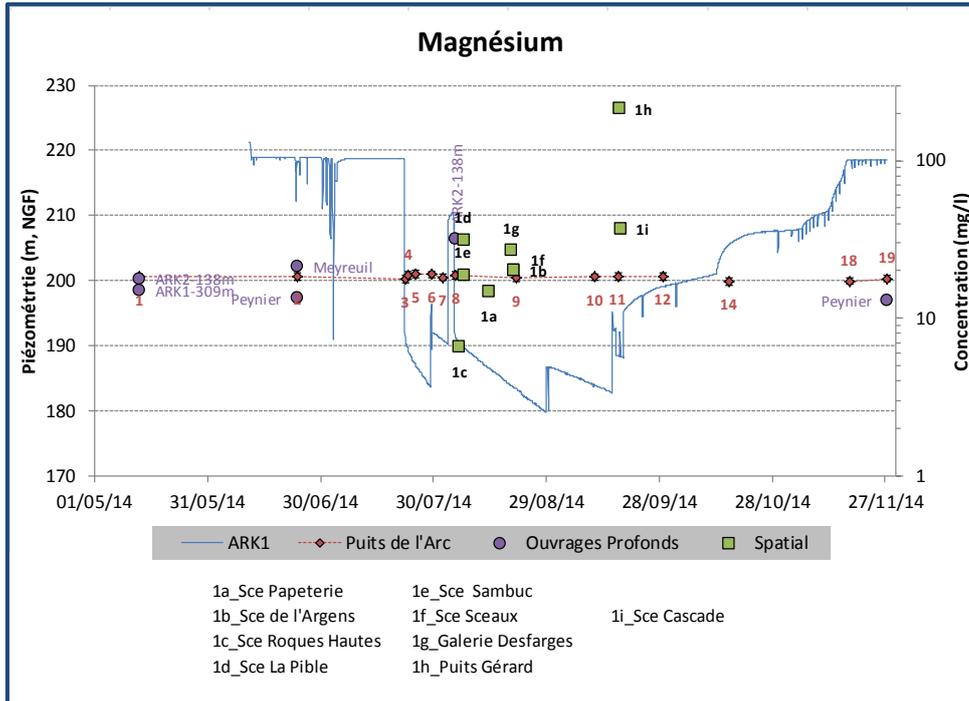


Figure A10 - 3 : Evolution des teneurs en magnésium des eaux du puits de l'Arc et report des signatures mesurées dans les autres ouvrages.

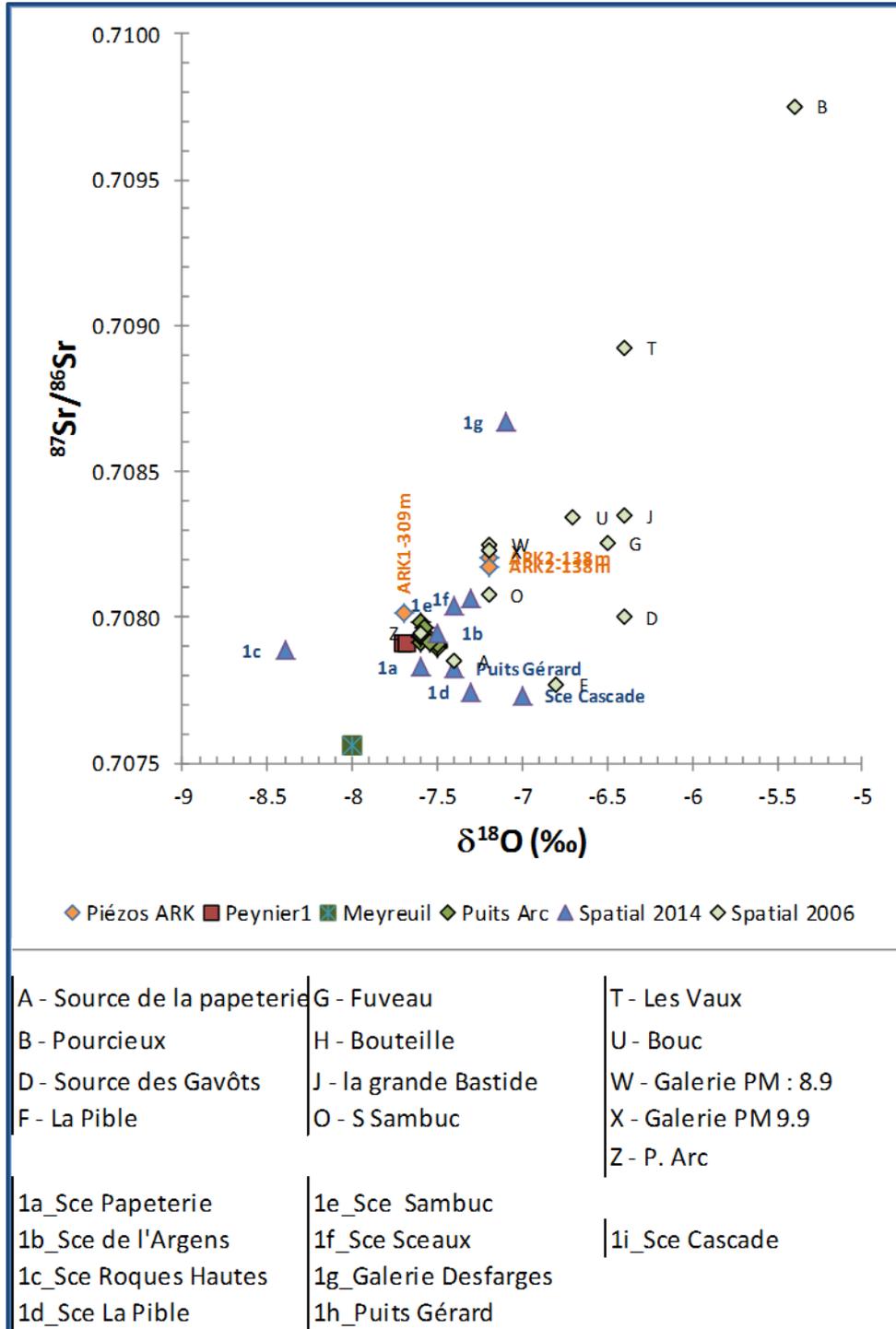


Figure A10 - 4 : Evolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la signature en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$).

Note relative à la figure A10-4 : Références A à Z (Moulin et al, 2006, rapport BRGM/RP55762-FR). Les autres échantillons concernent la présente étude, les résultats analytiques détaillés sont dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-64610-FR.

Laboratoire	Id	Point	Nom Graph	Prélèvement		Sugisaki mol/L				
				date	Ne	Ar	O2	N2	CH4	CO2
CONDATÉ-eau**	gn A4	Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15	9.298E-09	1.884E-05	3.819E-05	5.334E-04	5.248E-08	7.310E-04
CONDATÉ-eau**	gn 701	Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15	7.054E-09	1.936E-05	1.790E-05	5.270E-04	6.668E-08	7.620E-04
CONDATÉ-eau**	gnA11	Puits ARC2	Arc_2015	02/07/15	1.051E-08	1.933E-05	4.536E-05	5.833E-04	1.262E-07	8.018E-04
CONDATÉ-eau**	gn10	Puits ARC2	Arc_2015	02/07/15	9.246E-09	2.175E-05	2.061E-05	6.155E-04	2.742E-07	8.337E-04

(**) : Plateforme CONDATÉ-eau; osur-datation@univ-rennes1.fr

Figure A10 - 5 : Tableau des résultats des gaz dissous (gaz nobles) contenus dans l'eau à l'état de trace.

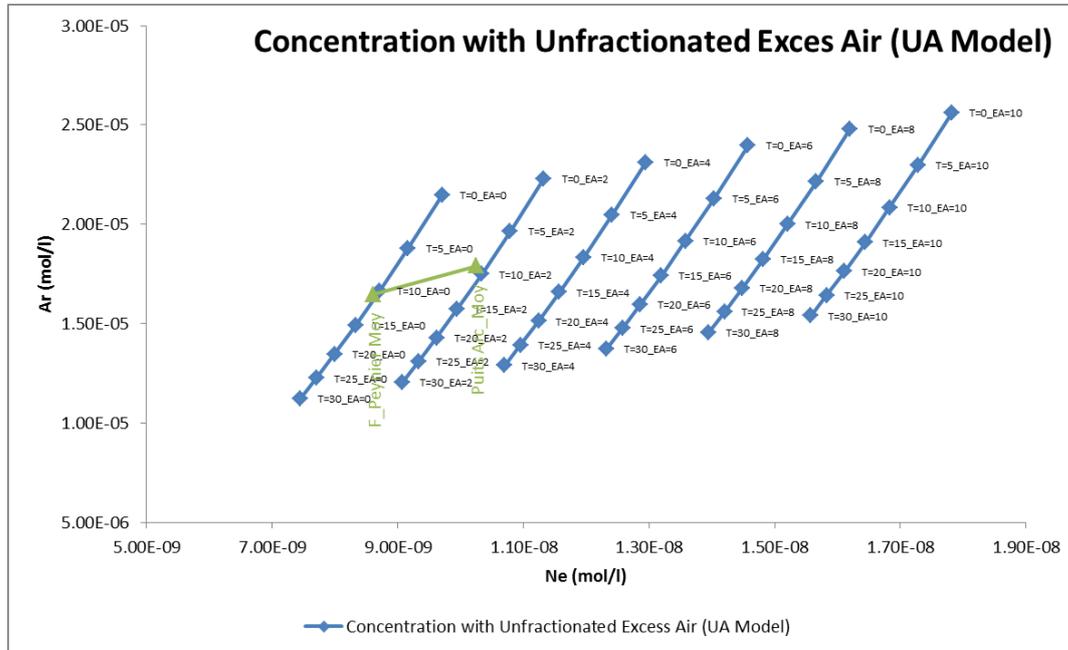


Figure A10 - 6 : Concentration moyenne calculée à l'aide du modèle d'excès d'air non fractionné (Aeschbach-Hertig et al, 1999). Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters.

Laboratoire	Id	nom	Nom Graph	date	SF6 pmol/l	±	CFC-12 pmol/l	±	CFC-11 pmol/l	±	CFC-113 pmol/l	±
Spurenstofflabor*	P837	Piézo ARK1-309 m	ARK1-309m	13/05/14	0.0014	0.0002	0.54	0.05	0.8	0.1	0.15	0.05
Spurenstofflabor*	P720	Piézo ARK2-138 m	ARK2-138m	13/05/14	0.0007	0.0001	1.8	0.1	11	3	0.08	0.05
Spurenstofflabor*	N866	Peynier_Artésien	Peynier_1	24/06/14	0.001	0.0001	0.78	0.05	1.5	0.2	0.12	0.05
Spurenstofflabor*	P981	Meyreuil_Artésien	Meyreuil	24/06/14	0.0002	0.0001	0.14	0.05	0.22	0.05	0.02	0.05
Spurenstofflabor*	P994	Puits ARC2_24/06/14	2	24/06/14	0.0011	0.0002	1.1	0.1	2.2	0.3	0.19	0.05
Spurenstofflabor*	P973	Puits ARC2_05/08/14	8	05/08/15	0.0008	0.0001	1.1	0.1	2.4	0.3	0.2	0.05
Spurenstofflabor*	P982	Puits ARC2_21/08/14	9	21/08/14	0.0009	0.0001	1.1	0.1	2.4	0.3	0.19	0.05
Spurenstofflabor*	P977	Puits ARC2_17/09/14	11	17/09/14	0.0008	0.0001	1.1	0.1	2.2	0.3	0.18	0.05
Spurenstofflabor*	P965	Puits ARC2_29/09/14	12	29/09/14	0.0013	0.0002	1.1	0.1	2.2	0.3	0.19	0.05
Spurenstofflabor*	R99	PUITS ARC LD25	19	27/11/14	0.0018	0.0002	1.2	0.1	2.2	0.3	0.21	0.05
Spurenstofflabor*	P810	Forage Peynier	Peynier_2	27/11/14	0.0009	0.0001	0.64	0.05	1.2	0.2	0.1	0.05
CONDATÉ-eau**	cfc514	Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15			0.70		1.32		0.12	
CONDATÉ-eau**	cfc553	Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15			0.67		1.29		0.34	
CONDATÉ-eau**	sf25	Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15	0.00091				1.32		0.11	
CONDATÉ-eau**	cfc46	Puits ARC2	Arc_2015	02/07/15			0.88		1.78		0.20	
CONDATÉ-eau**	cfc108	Puits ARC3	Arc_2015	02/07/15			0.89		1.78		0.19	
CONDATÉ-eau**	sf506	Puits ARC4	Arc_2015	02/07/15	0.0011				1.83		0.19	
CONDATÉ-eau**	sf37	Puits ARC5	Arc_2015	02/07/15	0.0012				1.83		0.18	

(*) : Spurenstofflabor; harald.oster@t-onlin.de

(**) : Plateforme CONDATÉ-eau; osur-datation@univ-rennes1.fr

Figure A10 - 7 : Tableau des résultats des gaz dissous (composés halogénés) contenus dans l'eau à l'état de trace.

Nota : Sur l'illustration précédente et suivante, les composants sont : CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (trichlorodifluorométhane), CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) et SF6 (hexafluorure de soufre).

Laboratoire	Id	nom	Nom Graph	date	Alt. moyenne de recharge (m)	T°C moyenne Air	T°C recharge	Excess Air cm3/L	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
Spurenstofflabor*	P837	Piézo ARK1-308 m	ARK1-309m	13/05/14	530	12.6	11.6	2	3.2	112.9	44.4	26.9
Spurenstofflabor*	P720	Piézo ARK2-138 m	ARK2-138m	13/05/14	414	13.1	12.1	2	1.6	379.3	617.5	14.5
Spurenstofflabor*	N866	Peynier_Artésien	Peynier_1	24/06/14	530	12.6	11.6	2	2.3	163.1	83.3	21.5
Spurenstofflabor*	P981	Meyreuil_Artésien	Meyreuil	24/06/14	599	12.3	11.3	2	0.5	29.1	12.1	3.6
Spurenstofflabor*	P994	Puits ARC2_24/06/14	2	24/06/14	500	12.7	11.7	2	2.5	230.4	122.5	34.2
Spurenstofflabor*	P973	Puits ARC2_05/08/14	8	05/08/15	500	12.7	11.7	2	1.8	230.4	133.7	36.0
Spurenstofflabor*	P982	Puits ARC2_21/08/14	9	21/08/14	500	12.7	11.7	2	2.1	230.4	133.7	34.2
Spurenstofflabor*	P977	Puits ARC2_17/09/14	11	17/09/14	500	12.7	11.7	2	1.8	230.4	122.5	32.4
Spurenstofflabor*	P965	Puits ARC2_29/09/14	12	29/09/14	500	12.7	11.7	2	3.0	230.4	122.5	34.2
Spurenstofflabor*	R99	PUITS ARC LD25	19	27/11/14	500	12.7	11.7	2	4.2	251.4	122.5	37.8
Spurenstofflabor*	P810	Forage Peynier	Peynier_2	27/11/14	530	12.6	11.7	2	2.1	134.6	67.1	18.0
CONDATE-eau**	Moyenne	Forage Peynier	Peynier_2015	02/07/15	500	12.7	11.7	2	2.1	143.5	72.9	34.2
CONDATE-eau**	Moyenne	Puits Arc_Artésien	Arc_2015	02/07/15	500	12.7	11.7	2	2.7	184.9	100.4	34.1

(*) : Spurenstofflabor; harald.oster@t-onlin.de
(**) : Plateforme CONDATE-eau; osur-datation@univ-rennes1.fr

Figure A10 - 8 : Paramètres utilisées pour le calcul des âges de l'eau.

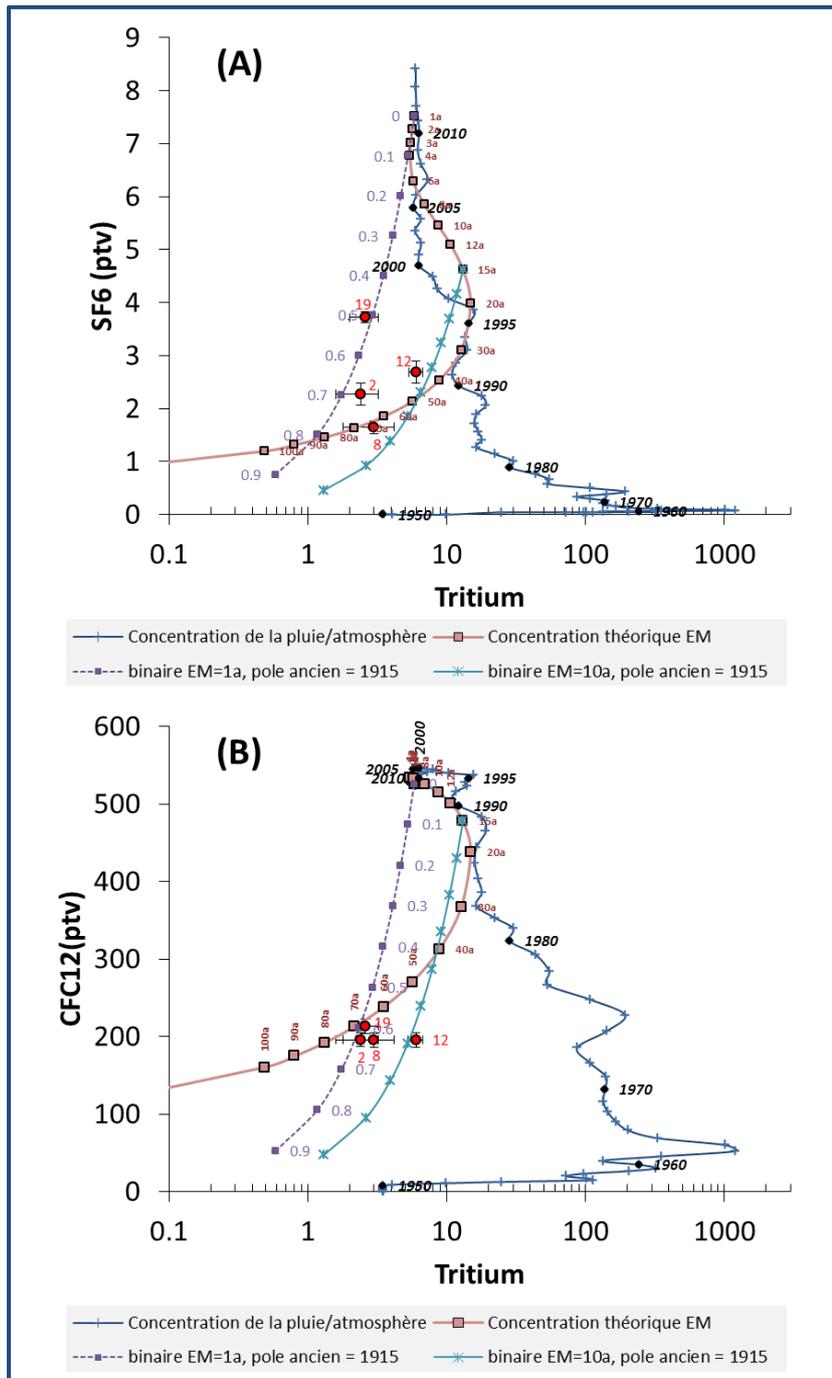


Figure A10 - 9 : Evolutions du SF6 et du CFC12 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge et report des concentrations en gaz dissous et des activités tritium mesurées dans les eaux du puits de l'Arc.

Note relative à la figure A10-9 :

Les évolutions théoriques calculées à l'aide du modèle exponentiel (EM) sont reportés pour des temps de résidence moyen (TRM) compris entre 1 an et 100 ans (les calculs prennent en compte la décroissance radioactive naturelle du tritium). Les évolutions théoriques du modèle binaire de mélange (ancien/récent) pour 2 cas différents sont présentés : courbe en tireté violet : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle Exponentiel de TRM =1a) ; pole ancien dépourvu de tritium et de SF6) ; courbe bleue : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle Exponentiel de TRM =15a) ; pole ancien dépourvu de tritium et de SF6).

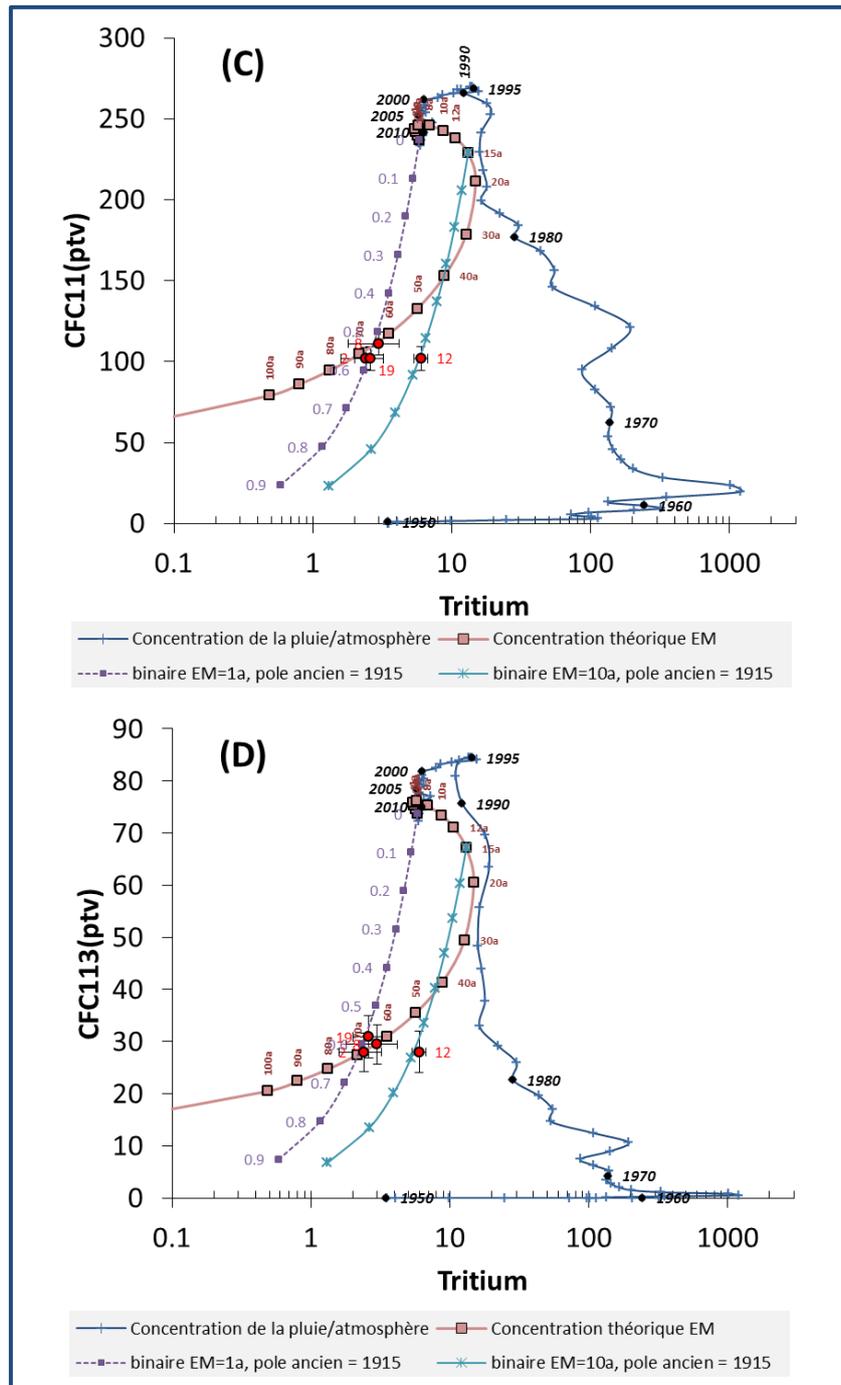


Figure A10 - 10 : Evolutions du CFC11 et du CFC113 en fonction des teneurs en tritium de l'eau de recharge et report des concentrations en gaz dissous et des activités tritium mesurées dans les eaux des puits de l'Arc.

Note relative à la figure A10-10 :

Les évolutions théoriques calculées à l'aide du modèle exponentiel (EM) sont reportés pour des temps de résidence moyen (TRM) compris entre 1 an et 100 ans (les calculs prennent en compte la décroissance radioactive naturelle du tritium). Les évolutions théoriques du modèle binaire de mélange (ancien/récent) pour 2 cas différents sont présentés : courbe en tireté violet : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle Exponentiel de TRM =1a) ; pole ancien dépourvu de tritium et de SF6) ; courbe bleue : modèle binaire de mélange (pôle récent : modèle Exponentiel de TRM =15a) ; pole ancien dépourvu de tritium et de SF6).

Annexe 11

Simulation de scénarios d'exploitation par modélisation

Figure A11 - 1 : Simulation de la piézométrie au puits de l'Arc pour un débit continu de 0.55 m³/s. 177

Figure A11 - 2 : Simulation de la piézométrie au puits de l'Arc pour un débit continu de 1.1 m³/s. . 177

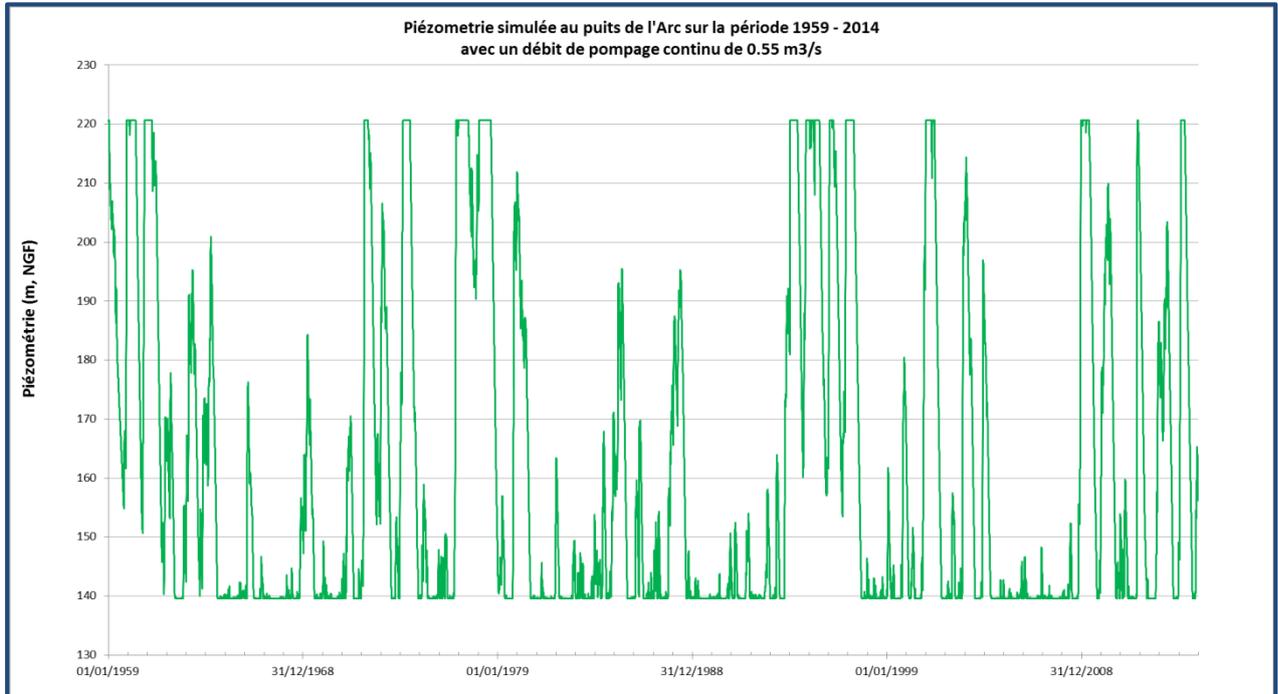


Figure A11 - 1 : Simulation de la piézométrie au puits de l'Arc pour un débit continu de 0.55 m³/s.

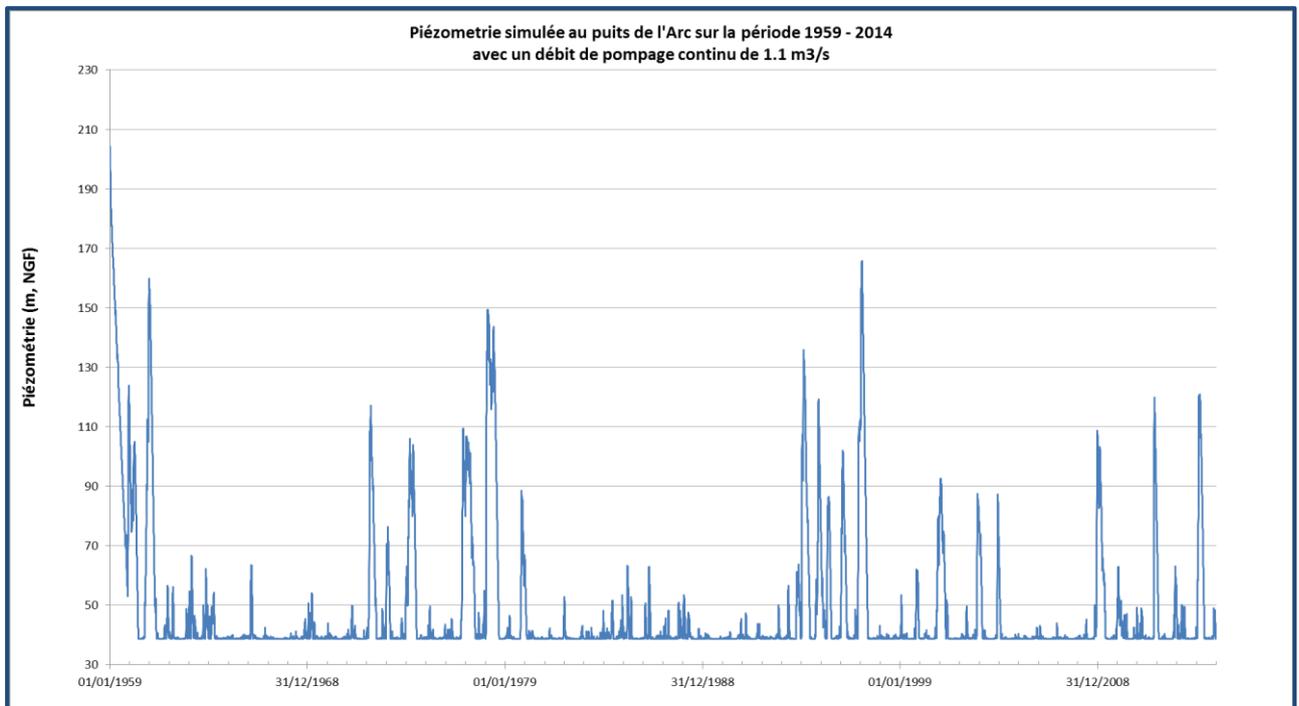


Figure A11 - 2 : Simulation de la piézométrie au puits de l'Arc pour un débit continu de 1.1 m³/s.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction Régionale Provence-Alpes-Cote-d'Azur

117 Avenue de Luminy
BP 168

13276 – Marseille CEDEX09 – France

Tél. : 04 91 17 74 77 - www.brgm.fr