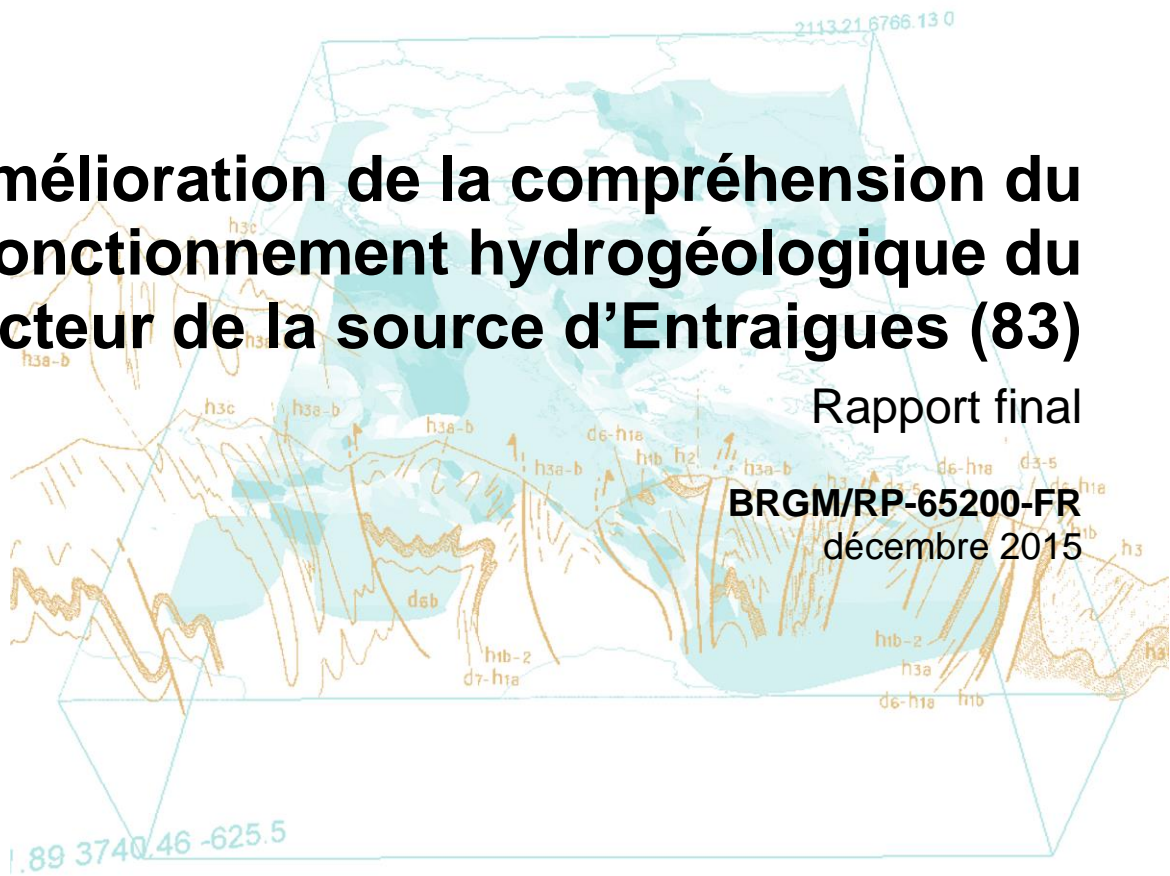




Amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur de la source d'Entraigues (83)

Rapport final

BRGM/RP-65200-FR
décembre 2015



Amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur de la source d'Entraigues (83)

Rapport final

BRGM/RP-65200-FR
décembre 2015

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM 13RSE1307

Moulin M., Dewandel B., Ladouche B., Bailly-Comte V.

Vérificateur :

Nom : Gourcy L.

Fonction : Correspondant Scientifique

Date : 15/12/2015

Signature :



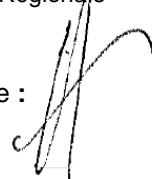
Approbateur :

Nom : Arnal C.

Fonction : Directrice Régionale

Date : 15/12/2015

Signature :



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

Mots-clés : Eaux souterraines, Muschelkalk, tufs, Argens, Entraigues, pompages d'essai, hydrogéochimie, vulnérabilité, pollution

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

Moulin M., Dewandel B. , Ladouche B., Bailly-Comte V. (2015) – Amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur de la source d'Entraigues (83). Rapport final. BRGM/RP-65200-FR, 185 p., 119 ill., 11 ann., 1 CD ROM.

Synthèse

Le Syndicat Intercommunal d'Adduction en Eau Potable (SIAE) de la Source d'Entraigues, qui regroupe neuf communes du département du Var et la commune de Vidauban exploitent deux champs captants mitoyens sur le site d'Entraigues.

Le SIAE souhaite disposer de données leur permettant de déposer un dossier de demande d'autorisation de prélèvements d'eau supplémentaires dans leurs ressources respectives. Elle passerait ainsi à 20 000 m³/an (250 l/s) pour le SIAE et à 8700 m³/an (120 l/s) pour la commune de Vidauban, soit le double des prélèvements actuels dans les forages et la source des Avens sur le site d'Entraigues.

Par ailleurs, l'Agence de l'Eau RM&C, afin de disposer d'informations sur les risques encourus par la ressource de voir une pollution l'atteindre, a financé le SIAE à hauteur de 80% du budget total de l'étude. Cela a permis de réaliser, en plus de l'évaluation des ressources exploitables, une étude de vulnérabilité s'étendant au-delà du strict périmètre des champs captants, et qui avait pour but de définir des zones à protéger contre tout risque de contamination et de surexploitation. Cela doit contribuer à mettre en place des Zones de Sauvegardes préconisées par le SDAGE RM&C 2016-2021, au sein des « Ressources Stratégiques »¹. La masse d'eau souterraine "FRDG169 - Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal" au droit de laquelle est situé le site d'Entraigues, a en effet été définie comme Ressource Stratégique.

Le champ initial d'investigations de l'étude a donc été élargi, pour analyser de manière sommaire les risques de dégradation de la ressource majeure stockée dans les formations aquifères en amont du site d'Entraigues.

Après un cadrage du contexte hydrogéologique mettant en évidence deux niveaux aquifères au site d'Entraigues (les tufs en surface et les formations carbonatées du Muschelkalk en profondeur), l'étude, s'est articulée autour de 3 parties :

- Analyse et réinterprétation des données hydrogéochimiques préexistantes et organisation / interprétation de campagnes de prélèvements dans les eaux souterraines et de surface (une campagne en 2014 et une autre en 2015). Les analyses portant sur les éléments chimiques « classiques », mais aussi les éléments en trace et les isotopes de l'eau et des espèces dissoutes. Une datation des eaux a en outre été tentée *via* l'analyse des teneurs en CFC / SF6.
- Organisation et analyse des pompages d'essai sur les ouvrages du site d'Entraigues (champs captants du SIAE et de la commune de Vidauban). Ces essais, précédés d'une réinterprétation de données d'essais antérieurs, ont concerné chaque ouvrage (essais de puits) et l'ensemble des ouvrages dans les deux champs captants (essais de nappe multi-puits). Ces essais se sont déroulés entre juin et novembre 2014.
- Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines et, par le croisement avec les pressions anthropiques, une approche des risques encourus par elles à l'échelle de la zone d'étude et plus spécifiquement du site d'Entraigues.

¹ : Ces masses d'eau doivent faire l'objet d'une ou de plusieurs études hydrogéologiques destinées à localiser, qualifier et surtout à proposer des mesures opérationnelles de protection ou de préservation permettant de réserver des secteurs à l'exploitation futures d'AEP. Cela passe entre autres par la mise en place de Zones de Sauvegarde de la ressource, qui ont vocation à être intégrées aux documents d'urbanisme.

*Avant d'aborder les aspects liés au fonctionnement hydrodynamique, les **approches fonctionnelles et hydrogéochimiques** mises en œuvre dans cette étude ont permis d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère. Ainsi, on démontre que l'aquifère fracturé - karstifié des calcaires du Muschelkalk est à la fois alimenté par des pertes de l'Argens et par la recharge sur l'impluvium du Muschelkalk.*

L'augmentation des teneurs en chlorures dans les eaux souterraines des tufs et de l'aquifère sous-jacent est bien corrélée à une période de recharge déficitaire par rapport à la moyenne (période 2004-2008). A l'inverse, la diminution des teneurs en chlorures qui est observée à partir de 2008 est bien corrélée à une période de recharge excédentaire par rapport à la moyenne. L'approche de modélisation GARDENIA a permis d'estimer l'ordre de grandeur de la recharge (310 mm sur la période [1963-2014]).

Les circulations d'eau souterraine au sein de l'aquifère du Muschelkalk se font globalement du nord-ouest vers le sud-est selon un transfert faiblement dispersif puisque les pics de concentrations en chlorures en différents points sont comparables mais décalés dans le temps. Ce décalage démontre que la dynamique du transfert de masse est lente en comparaison du transfert de pression au sein de l'aquifère.

Pour ce qui est des pompages d'essai, la réinterprétation des pompages d'essai historiques, les essais par paliers de débit réalisés entre juin et août 2014 et l'essai et le pompage de longue durée en multi-pompage du 06 au 14/11/2014 (8,1 jours à un débit de plus de 450 L/s), ont permis de caractériser l'aquifère des calcaires fracturés du Muschelkalk, l'aquifère sus-jacent des tufs (dont le développement est très local, mais qui joue un rôle important dans les transferts d'eau souterraine).

A l'issue des essais, les points suivants ont été démontrés :

- Les ouvrages du champ captant du SIAE ont vu leur rendement augmenter depuis leur mise en service. Ce n'est pas le cas pour le forage exploité dans le champ captant de la commune de Vidauban (du fait probablement d'un colmatage partiel de l'ouvrage) ;
- **une connexion hydraulique entre les tufs et l'Argens, du moins au niveau du barrage situé sur l'Argens, en amont immédiat du site d'Entraigues.**
- **une connexion hydraulique entre les tufs et les calcaires fracturés du Muschelkalk, ce qui jusqu'à présent n'avait pas été montrée.**

Deux modèles multicouches ont permis de simuler le fonctionnement hydrodynamique du système. Les paramètres hydrodynamiques issus des modélisations montrent que **l'aquifère du Muschelkalk est caractérisé par une forte transmissivité évaluée à $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, et un emmagasinement plutôt captif (S) égal à $5,5 \cdot 10^{-3}$. La transmissivité de l'aquifère de surface, les tufs, a été évaluée à $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, et son emmagasinement à 0,35, typique d'un aquifère libre.**

La fraction de l'aquifère sollicitée par les essais est relativement limitée latéralement, sa géométrie posée arbitrairement rectangulaire (longueur d'environ 3,2 km et largeur d'environ 2,3 km) couvre une surface de l'ordre de $7,4 \text{ km}^2$.

L'impact d'un manque à gagner sur le cours d'eau (l'Argens) lors des essais est estimé entre 13 et $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (3 à 4 l/s) avec l'hypothèse d'un faible degré d'incision du cours d'eau dans les tufs (1 à 3 m). Cela ne constitue qu'un impact limité, en regard du débit estimé de l'Argens lors des essais ($2 \text{ m}^3/\text{s}$).

De fortes connexions hydrauliques (conduits et cavités) existent au sein des tufs, engendrant des réactions très rapides parmi tous les ouvrages, en réponse à la sollicitation d'un d'entre eux.

Des simulations d'exploitation sont proposées (un petit outil numérique permettant de simuler des prélèvements a été remis aux gestionnaires des champs captants). Elles prennent place **en conditions hydroclimatiques pessimistes** (en considérant qu'il n'y a aucune recharge par les précipitations pendant 12 mois consécutifs).

Deux scénarios ont été envisagés (mais les gestionnaires peuvent en proposer d'autres par le biais de l'outil numérique) :

- Le premier considérant un débit constant des ouvrages ;
- le deuxième considérant un débit de 30% plus important en période estivale (juin à août) qu'en période hivernale (septembre-mai) afin de prendre en compte des besoins plus importants en été.

Les modélisations ont tenu compte des conditions de rabattements maximum admissibles (non dénoyage des crépines et des pompes), des débits possibles sur les ouvrages, des stratégies et des contraintes d'exploitation souhaitées par le SIAE et la commune de Vidauban. Les résultats montrent que :

- **pour le premier scénario** (pompage à débit constant) un débit moyen annuel (24h/24 ; 7j/7) de 250 l/s pour le SIAE et de 111 l/s pour Vidauban sont envisageables sans impact durable et majeur sur la ressource ;
- pour le deuxième scénario ((prélèvements de 30% plus importants en été) **des débits moyens annuels de 208 l/s pour le SIAE et de 90 l/s pour Vidauban sont également envisageables sans impact durable et majeur sur la ressource.**

Dans les conditions de pompage proposées, les rabattements maximums ne sont jamais atteints. Cependant, même si les rabattements estimés sur la source des Avens sont acceptables suite à la réalisation des scénarios énoncés, il est conseillé de continuer à suivre le niveau de la source en continu.

Un des modèles a permis d'estimer l'impact des pompages dans le Muschelkalk sur le cours d'eau de l'Argens : **il serait faible**, l'impact maximal sur le débit de l'Argens serait de l'ordre de 5% de son débit moyen.

*La dernière partie de l'étude était consacrée à la **vulnérabilité de la ressource** à une éventuelle pollution et au risque encouru par cette ressource de se voir polluer.*

Une datation des eaux a été réalisée par la méthode des CFC – SF6, qui permet de **proposer une circulation des eaux jusqu'au captage selon un modèle exponentiel, avec un temps moyen de séjour des eaux de l'ordre de 25 ans +/- 5 ans, soit un renouvellement d'environ 5% de l'eau souterraine tous les ans.**

De plus, une campagne de jaugeages différentiels entre deux points sur l'Argens en période de basses eaux a mis en évidence un **débit de perte depuis l'Argens de l'ordre de 800 l/s en amont du site d'Entraigues** (pour un débit journalier de 7810 l/s mesuré à la station de Carcès). Même si cette valeur est discutable compte-tenu de l'incertitude des mesures, des pertes sont toutefois avérées.

Ainsi, **la partie amont de l'Argens semble contribuer à l'alimentation des aquifères du Muschelkalk** par pertes plus ou moins identifiées (arguments fondés sur les comparaisons des teneurs en chlorures en différents points du bassin et sous différentes conditions de recharge). Par ailleurs, la comparaison des suivis de conductivité électrique de l'eau ne permet pas d'identifier des transferts de masse rapide depuis l'Argens, aucune corrélation ne pouvant être établie. **La zone d'alimentation de l'hydrosystème d'Entraigues par l'Argens est donc nécessairement relativement éloignée du site d'Entraigues.**

Une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau a d'abord été réalisée, à partir de la méthode PaPRIKa (analyse multi critères) sur une zone d'étude élargie à 115 km² (prise en compte de bassins versants connexes à l'entité hydrogéologique 571E). Cette cartographie indique que, si globalement **la couleur orange est majoritaire dans la zone d'étude** (traduisant une vulnérabilité moyenne), **le nord (secteur de Lorgues) est le plus vulnérable, alors que celui de Vidauban apparaît comme le moins vulnérable à une pollution éventuelle.**

Une fois dressée la carte de vulnérabilité globale, celle de l'occupation du sol, permettant d'accéder aux pressions anthropiques a été établie à la même échelle (1/50 000). La très grande majorité de la zone d'étude (près de 90% de la surface totale) est occupée par de la forêt et du couvert végétal. Les secteurs urbanisés ou de zones d'activité ne représentent que 2,5 % de la surface totale. L'essentiel des surfaces restantes (7,5 %) sont occupées par des activités agricoles (oliveraie et surtout vignoble).

La superposition de cette carte avec la carte de vulnérabilité donne accès à une carte des risques encourus par les eaux souterraines dans la zone d'étude. Quatre classes sont distinguées : **peu ou pas de risque** (là où il n'y a que de très faibles ou de faibles pressions ou bien là où la pression est moyenne ou forte mais où la vulnérabilité est très faible ou faible – **risque modéré** (où un des deux paramètres peut être fort si l'autre est moyen) – **risque fort**, si la pression et la vulnérabilité sont moyennes à très fortes – **risque très fort** (là où les deux paramètres sont forts ou très forts).

Enfin, trois zones de sauvegarde, telles que définies par le SDAGE Rhône – Méditerranée 2016, ont été définies dans la zone d'étude :

Une zone est classée ZSE (Zone de Sauvegarde déjà Exploitée) : la zone 1 que nous proposons d'intituler "Secteur du bassin d'alimentation directement sollicité par les pompages d'essai de 2014".

Deux autres zones classées ZSNEA (Zones de Sauvegarde Non Exploitées Aujourd'hui), qui s'appuient toutes deux pour partie sur la limite de l'entité BD LISA 571E "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan", englobée dans la masse d'eau stratégique FRDG169 décrite précédemment) :

- La zone 2 que nous proposons d'intituler "secteur nord du bassin d'alimentation"
- La zone 3 que nous proposons d'intituler "secteur amont du bassin d'alimentation et lit de l'Argens".

Dans chacune de ces zones, des préconisations sont énoncées, fonction des risques encourus par les eaux souterraines par rapport à la contamination anthropique.

Dans les secteurs à risques fort à très fort (lit de l'Argens, partie nord de la zone d'étude et extrémité ouest), une attention toute particulière doit être portée aux activités potentiellement polluantes, notamment celles qui produisent des effluents liquides. On veillera notamment :

- dans les zones de forêts à ce que les activités de gestion et d'entretiens soient réalisées en prenant toutes les précautions pour éviter l'introduction d'huiles ou d'hydrocarbures dans le sous-sol dans les zones d'assainissement non collectif, à ce que les dispositifs fonctionnent correctement ;
- dans les zones urbaines, à ce que les réseaux pluviaux ou *a fortiori* d'eaux usées ne soient pas fuyards ;
- à faire en sorte que les cuves enterrées de produits polluants disposent effectivement d'une fosse de rétention étanche ;
- à effectuer une nouvelle expertise des pertes identifiées dans le nord de la zone, en particulier celle située à proximité de la station d'épuration de Lorgues (aven des Pies).

Les perspectives d'amélioration de la connaissance à l'issue de ce travail sont les suivantes :

- améliorer la définition de l'impluvium : Le bilan hydrologique mené à l'échelle des 150 km² de la zone d'étude a renforcé l'idée qu'il existe une autre composante de recharge depuis des pertes de l'Argens (l'infiltration efficace des précipitations ne peut expliquer à elle seule les débits transitant à la source). Il faudrait préciser les modalités de cette recharge ;
- mener un inventaire plus exhaustif des pertes et étudier plus précisément leur lien avec le site d'Entraigues ;
- rechercher plus précise l'origine des chlorures dans l'Argens. On a vu que cet élément avait des teneurs croissantes d'amont en aval, mais comment l'eau de l'Argens (ou de ses affluents amont) acquière-t-elle cette composition ? cela permettrait de mieux connaître les conditions de recharge des calcaires du Muschelkalk ;
- les mesures de concentration de l'eau en CFC / SF6 à des fins de datation semblent indiquer une contamination générale des gaz au site d'Entraigues (tous les gaz mesurés sont en excès par rapport à l'équilibre avec l'atmosphère). Identifier les causes précises et l'extension de cette contamination est important pour la protection de l'eau souterraine prélevée sur le site.

Sommaire

1. Présentation du projet	19
1.1. LE CONTEXTE GENERAL	19
1.2. LES OBJECTIFS DE CE TRAVAIL	20
2. Présentation du secteur d'étude	23
2.1. APERÇU GEOGRAPHIQUE	23
2.2. LES CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	25
2.2.1. Les formations géologiques concernées	25
2.2.2. Les aspects tectoniques et structuraux : agencement des formations.....	31
2.2.3. Les contextes hydrographique et climatologique.....	33
2.2.4. L'hydrogéologie générale de la zone d'étude	36
2.2.5. L'hydrogéologie locale : les formations aquifères	38
3. Les outils d'aide à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du bassin d'alimentation du site d'Entraigues.....	41
3.1. SYNTHÈSE DES DONNÉES HYDROGEOLOGIQUES DISPONIBLES ET ACQUISES DANS LE PROJET	41
3.1.1. Données sur les prélèvements.....	41
3.1.2. Données piézométriques	44
3.1.3. Contexte d'émergence et estimation des débits naturels	48
3.2. CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE A L'AIDE DU LOGICIEL GARDENIA.....	51
3.2.1. Présentation de l'approche de modélisation.....	51
3.2.2. Données utilisées pour la modélisation	52
3.2.3. Examen des résultats de modélisation.....	54
3.3. BILAN DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES DISPONIBLES ET ACQUISES DANS LE PROJET	58
3.3.1. Bilan des données géochimiques disponibles sur les champs captants (SIAE et Commune de Vidauban)	59
3.3.2. Autres données géochimiques disponibles sur les points d'eau de la zone d'étude.....	59
3.3.3. Bilan des données géochimiques disponibles sur l'Argens (données Agence de l'Eau RM&C)	60
3.3.4. Description des campagnes spatiales d'échantillonnage.....	60
3.3.5. Examen des résultats disponibles et interprétations.....	63
3.4. SYNTHÈSE : APPORTS AU SCHEMA CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE	72

4. Les pompages d'essai	75
4.1. NATURE DES ESSAIS.....	75
4.1.1. Les essais de puits (essais de débits par paliers).....	76
4.1.2. L'essai de nappe (essai longue durée).....	79
4.2. ORGANISATION ET MISE EN PLACE DES ESSAIS.....	80
4.2.1. Analyse et réinterprétation des essais antérieurs.....	80
4.2.2. Mise en place du matériel de suivi des essais.....	81
4.2.3. Réalisation des essais de puits individuels.....	84
4.2.4. Préparation de l'essai de nappe (protocole de réalisation).....	86
4.3. INTERPRETATION DES ESSAIS.....	87
4.3.1. Essais de puits.....	87
4.3.2. Méthodologie d'interprétation des pompages d'essai.....	90
4.3.3. Modèles mathématiques utilisés pour interpréter les essais.....	95
4.3.4. Modélisation des essais historiques et des essais par paliers de 2014.....	103
4.3.5. Essai multi-puits réalisé en 2014.....	113
4.3.6. Impact sur le débit du cours d'eau.....	120
4.3.7. Simulation de débits d'exploitation.....	130
4.4. SYNTHÈSE SUR LES POMPAGES D'ESSAI.....	137
5. Etude de la vulnérabilité du bassin d'alimentation du site d'Entraigues et recommandations de préservation	141
5.1. NOTIONS DE POLLUTION ET DE VULNERABILITE A LA POLLUTION.....	141
5.1.1. Délimitation de la zone d'étude.....	141
5.1.2. Analyse des relations surface/souterrain entre l'Argens et le Muschelkalk dans la zone d'étude.....	147
5.1.3. Analyse des gaz anthropiques dissous (CFC/SF6).....	148
5.1.4. Présentation de la méthode PaPRIKa.....	151
5.2. DEFINITION DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE : APPLICATION DE LA METHODE PAPRIKA.....	152
5.2.1. Données sources.....	152
5.2.2. Critère P.....	153
5.2.3. Critère R.....	157
5.2.4. Critère I.....	159
5.2.5. Critère Ka.....	160
5.2.6. Vulnérabilité globale.....	161
5.3. OCCUPATION DES SOLS ET PRESSIONS ANTHROPIQUES.....	165
5.4. RECOMMANDATIONS EN TERME DE PRESERVATION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN D'ALIMENTATION.....	170
6. Conclusion générale	175

6.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS	175
6.1.1. Concernant le contexte hydrogéochimique et hydrologique	176
6.1.2. Concernant les essais sur le site d'Entraigues	177
6.1.3. Concernant l'étude de vulnérabilité de la ressource	180
6.2. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	183
7. Bibliographie	187

Liste des illustrations

Illustration 1 - Les communes du SIAE, la commune de Vidauban et la source d'Entraigues (ou source des Avens)	19
Illustration 2 - Le secteur concerné par l'étude.	22
Illustration 3 - Localisation du site d'Entraigues dans le département (carte des régions naturelles issue de la carte hydrogéologique du Var), et dans la commune de Vidauban (© carte IGN)	23
Illustration 4 - Le secteur d'étude autour de la source des Avens et des captages AEP du SIAE et de Vidauban.	25
Illustration 5 - Les tufs dans la vallée de l'Argens : cartographie des affleurements autour du site d'Entraigues et photo des faciès au pied du site (clichés BRGM).	27
Illustration 6 - Contexte géologique du secteur entre Vidauban et Carcès (carte géologique BRGM 1/50.000 1093 - Draguignan).	29
Illustration 7 - La tectonique au droit du site d'Entraigues (a) et en amont de Pont d'Argens (b).....	32
Illustration 8 - Données de débits et de lames d'eau mesurées ou calculées dans les stations DREAL le long de l'Argens (banque HYDRO, 2015).....	34
Illustration 9 - Hydrogrammes de l'Argens à Carcès (station Y5112010, banque HYDRO, 2014).	35
Illustration 10 – Statistiques sur la recharge calculée d'après le modèle SAFRAN sur le secteur d'Entraigues.	36
Illustration 11 - Carte des principaux aquifères calcaires du département du Var (d'après la carte hydrogéologique du Var, 1980)	37
Illustration 12 - Superposition des aquifères au droit du site d'Entraigues (les échelles ne sont pas respectées)	39
Illustration 13 - Chroniques du débit de pompage (débit cumulé, moyenne journalière) sur la période du 03/10/2010 au 01/05/2015) du SIAE (aquifère profond du Muschelkalk)	42

Illustration 14 - Chroniques de pompage (moyenne journalière) du SIAE et de la commune de Vidauban.	43
Illustration 15 - Chroniques de pompages dans le champ captant de Vidauban (Commune de Vidauban).....	44
Illustration 16 - Chronique piézométrique du forage F4-SIAE (hauteur d'eau mesurée au-dessus du capteur, moyenne journalière) du 18/06/2010 au 16/01/2015 (aquifère profond du Muschelkalk)	45
Illustration 17 - Evolution de la piézométrie mesurée (moyenne journalière) du 29/01/2014 au 20/06/2015.	45
Illustration 18 - Evolution de la piézométrie mesurée (forages de la commune de Vidauban et forages du SIAE) et du débit total pompé du 08/10/2014 au 17/01/2015.	46
Illustration 19 - Evolution de la piézométrie mesurée dans le forage F5-SIAE, le forage V2-Vidauban et la source (période du 08/10/2014 au 17/01/2015). L'évolution de la cote du plan d'eau du barrage est également reportée.	47
Illustration 20 - Chronique piézométrique synthétique de l'aquifère du Muschelkalk.	47
Illustration 21 - Schéma descriptif et localisation des sites de jaugeage.....	49
Illustration 22 - Résultats des jaugeages des sources d'Entraigues.	50
Illustration 23 - Comparaison des suivis piézométriques sur la source des Avens (moyenne journalières) et des résultats cumulés des jaugeages des venues d'eau sous le barrage et de la source des Avens.	50
Illustration 24 - Schématisation hydrogéologique adopté pour décrire le fonctionnement hydrogéologique du site d'Entraigues.....	52
Illustration 25 - Emprise des mailles SAFRAN sur la zone d'étude (105 km ²), extrait carte géologique harmonisée au 1/50.000 du BRGM, fond IGN 100000.	53
Illustration 26 - Chronique de pompage utilisée dans la modélisation GARDENIA	54
Illustration 27 - Evolution de la piézométrie et des débits simulés par le modèle GARDENIA sur la période 2008-2014. L'influence du pompage sur la piézométrie de l'aquifère est également reportée. Les évolutions reportées avant 2008 ont été calculées par le modèle en absence de pompage.....	55
Illustration 28 - Réponse impulsionnelle globale de l'aquifère à un pompage de 1 m ³ /s en un jour.....	56
Illustration 29 - Paramètres du modèle GARDENIA	57
Illustration 30 - Réponses impulsionnelles globales de l'aquifère à une recharge de 100 mm (piézo. et débit).	57
Illustration 31 - Evolution de la recharge et des débits simulés par le modèle GARDENIA.....	58
Illustration 32 - Localisation des points d'eau situés dans la formation du Muchelkalk, extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50 000 du BRGM, fond IGN au 1/100 000.	59
Illustration 33 - Liste des points d'eaux avec données chimiques (extraction ADES).	60
Illustration 34 - Localisation des points de prélèvements (extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50.000 du BRGM, fond IGN au 1/100000).	61

Illustration 35 - Modes opératoires et méthodes d'analyses des éléments majeurs et traces pour les échantillons prélevés.	63
Illustration 36 - Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses des isotopes considérés dans cette étude.	63
Illustration 37 - Evolution des teneurs en sulfate en fonction des teneurs en chlorures des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.	65
Illustration 38 - Evolution du rapport molaire SO_4/Cl en fonction du rapport molaire Mg/Cl des eaux du secteur d'étude.	67
Illustration 39 - Evolution des rapports molaires Sr/Cl vs Na/Cl et B/Cl vs Li/Cl des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.	68
Illustration 40 - Evolution des teneurs en chlorures des points d'eau situés dans l'emprise de l'entité hydrogéologique 571AE00 BD-LISA depuis 1998.	70
Illustration 41 - Evolution des teneurs en sulfates des points d'eau situés dans l'emprise de l'entité hydrogéologique 571AE00 BD-LISA.	71
Illustration 42 - Evolution du rapport du strontium ($^{87}Sr/^{86}Sr$) en fonction du rapport $1/Sr$ des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.	71
Illustration 43 : Liste des ouvrages des deux champs captants sur le site d'Entraigues (en vert : gérés par SIAE, en bleu par Vidauban et en gras ceux équipés d'une pompe fonctionnant au moment des essais).	76
Illustration 44 - Synoptique de réalisation d'essais de puits sur le site d'Entraigues.	78
Illustration 45 - Essais par paliers de débit réalisés dans le cadre de cette étude.	79
Illustration 46 - Débits pompés dans les ouvrages du site d'Entraigues pendant l'essai de nappe de 2014.	79
Illustration 47 - Historique des essais réalisés dans les deux champs captants, qui ont fait l'objet d'une réinterprétations (données provenant du SIAE et de Vidauban, références listées en bibliographie).	81
Illustration 48 - Installation d'un Diver sur un ouvrage (cliché BRGM).	82
Illustration 49 - Installation d'une centrale Orpheus Mini à la source des Avens (cliché BRGM).	82
Illustration 50 - Installation d'une centrale Ecolog 800 (à gauche) sur un point (clichés OTT France).	83
Illustration 51 - Exemple de données restituées concernant le point F5 du SIAE.	83
Illustration 52 - Récapitulatif des installations sur les points suivis dans les champs captants du SIAE et de Vidauban.	84
Illustration 53 - Plan des ouvrages et essais de puits réalisés entre mai et août 2014 (Fond de carte tiré de Geoportail, IGN 2015).	85
Illustration 54 - Débits de pompages durant l'essai de nappe de novembre 2014 dans les champs captants du SIAE et de Vidauban.	86
Illustration 55 - Combinaisons d'ouvrages à mettre en route dans le cadre de l'essai de nappe de novembre 2014 dans les champs captants du SIAE et de Vidauban.	86
Illustration 56 - Interprétation des essais par paliers aux puits F6 et V1.	88

Illustration 57 - Synthèse des pertes de charge évaluées à partir des essais par paliers de débit sur les ouvrages du site d'Entraigues.	89
Illustration 58 - Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.....	90
Illustration 59 - Exemple de succession de régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).....	91
Illustration 60 - Essais dans les ouvrages atteignant le Muschelkalk.....	93
Illustration 61 - Diagnostic du premier essai par palier de débit à la source des Avens (aquifère des tufs).	95
Illustration 62 - Modèle avec effet d'une limite alimentée située à proximité de l'ouvrage pompé (Theis +alimentée).....	96
Illustration 63 - Courbes types de la solution Theis + une limite alimentée : influence de la distance à la limite.....	96
Illustration 64 - Les modèles multicouches applicables au site d'Entraigues.	99
Illustration 65 - Paramètres des modèles à effet de drainance (modèles modifiés de Hantush, 1964 et Hunt et Scott, 2007).	100
Illustration 66 - Effet du facteur de drainance ($Br^{1/2}=T/[k'/e']^{1/2}$) sur les deux modèles proposés	101
Illustration 67 - Courbes pour des variations des paramètres de l'aquitard (T_0 et S_y) pour le modèle modifié de la solution de Hunt et Scott (2007).....	102
Illustration 68 - Modélisation de l'essai sur la source des Avens (paliers 04/06/2014). Modèle : Theis + limite alimentée.	105
Illustration 69 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le site d'Entraigues (tufs et Muschelkalk). En gras : puits de pompage, en italique : piézomètre d'observation.....	107
Illustration 70 - Modélisation de l'essai sur le forage F4 (SIAE) en 1983. Modèle : Hantush modifié.	109
Illustration 71 - Modélisation de l'essai sur le forage F6 (SIAE) en 2008 ; observation au puits de pompage et au piézomètre F4. Modèle : Hantush modifié.	110
Illustration 72 - Modélisation de l'essai sur le forage F6 (SIAE) en 2008 ; observation au puits de pompage et au piézomètre F4. Modèle : Hantush modifié.	111
Illustration 73 - Modélisation de l'essai sur le forage V1 (Cne de Vidauban) en 2000. Modèle : Hantush modifié.....	112
Illustration 74 - Evolution des débits et des rabattements dans les calcaires du Muschelkalk (F4, F5, F6, V1, V2 et V3) et dans les tufs (source des Avens, F3 et F8), au cours de l'essai multi-puis réalisé en 2014, pompage sur F4, F6, V1 et Sce des Avens.....	114
Illustration 75 - Mise en évidence des relations Argens / tufs lors d'un événement pluvieux durant l'essai de pompage multi-puits.	114
Illustration 76 - Evolution des débits et des rabattements dans les calcaires du Muschelkalk et les tufs- zoom sur la première journée de pompage.....	115

Illustration 77 - Modèle modifié de la solution de Hunt et Scott (2007) - effet de drainance d'un aquitard supérieur, abaissement de son niveau, anisotropie de perméabilité 2-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales. Version multi-puits avec pompage dans les aquifères supérieur et inférieur.	116
Illustration 78 - Modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle Hunt et Scott modifié version multi-puits avec pompages dans les aquifères supérieur (tufs) et inférieur (Muschelkalk).	118
Illustration 79 - Positionnement des puits et des piézomètres et des limites de l'aquifère (Lambert 93) ; modèle Hunt et Scott modifié.....	119
Illustration 80 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014.....	120
Illustration 81 - Modèle de Hunt (2003) modifié avec prise en compte de limites étanches ; version multi-puits.....	121
Illustration 82 - Modèle avec prise en compte d'un cours d'eau : modèles de Hunt (2003), et modèle modifié de Hunt. Seul le deuxième modèle prend en compte les effets de limites.....	122
Illustration 83 - Courbes types de la solution modifiée de Hunt 2003 : influence du facteur de drainance du semi-perméable ($Br^{1/2}$) et du cours d'eau.....	122
Illustration 84 - Positionnement des puits et des piézomètres et des limites de l'aquifère (Lambert 93) ; modèle Hunt (2003) modifié.	124
Illustration 85 - Modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk).	126
Illustration 86 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014.....	127
Illustration 87 - Evaluation de l'impact sur l'Argens modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk).	128
Illustration 88 - Effet de l'incision du cours d'eau sur la baisse de débit du cours d'eau (impact sur le cours d'eau). Essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk). Graphe du bas : zoom sur le graphe du haut.....	129
Illustration 89 - Evaluation des rabattements maximums admissibles aux forages F4, F5, F6 (SIAE), et V1 et la source des Avens (Cne de Vidauban).	131
Illustration 90 - Débits maximum testés et à ne pas dépasser dans les simulations pour le SIAE et la commune de Vidauban.	131
Illustration 91 - Débits utilisés dans les simulations de débits d'exploitations. SIAE et Cne de Vidauban.	133
Illustration 92 - Modélisation de débit d'exploitation, scénario 1, pompage constant toute l'année 24h/24, 7j/7	135
Illustration 93 - Modélisation de débit d'exploitation, scénario 2, pompage plus important en été.	136

Illustration 94 - Synthèse des résultats du scénario 1, pompage constant toute l'année (24h/24, 7j/7). Modèle de Hunt & Scott modifié et de Hunt 2003 modifié.	136
Illustration 95 - Synthèse des résultats du scénario 2, pompage toute l'année mais plus important en été (24h/24, 7j/7). Modèle de Hunt & Scott modifié et de Hunt 2003 modifié.	137
Illustration 96 - Les débits de l'Argens en aval de Carcès (données HYDRO, DREAL PACA).	143
Illustration 97 - Comparaison des suivis piézométriques sur la source des Avens (moyennes journalières) et des résultats cumulés des jaugeages des venues d'eau sous le barrage et de la source des Avens.	143
Illustration 98 - Comparaison des valeurs de conductivité des eaux de l'Argens et de la source des Avens.	144
Illustration 99 - Tracé de la PNAC et contour des bassins-versants connexes du système karstique des sources d'Entraigues sur le fond géologique vectoriel 1/50 000 du BRGM et le fond IGN 1/250 000.	145
Illustration 100 - Extrait de la carte hydrogéologique du Var au 1/200 000 (1980).	146
Illustration 101 - Profil en long de l'Argens en aval de Carcès mettant en évidence les échanges surface/souterrain supposés avec le Muschelkalk et la géologie à l'affleurement.	148
Illustration 102 – Graphiques SF6 = f(CFC) et CFCXXX = f(CFCYYY) concernant les point prélevés en 2015.	150
Illustration 103 - Carte de l'IDPR sur la zone d'étude.	153
Illustration 104 - Tableau de correspondance pour la détermination du sous-critère ES (état de surface) à partir de la géologie pour les bassins-versants des pertes.	154
Illustration 105 - Carte du critère P à partir des facteurs ES, E, S et ZNS du système karstique des sources d'Entraigues.	156
Illustration 106 - Carte du critère R du système karstique des sources d'Entraigues.	158
Illustration 107 - Tableau de correspondance pour la détermination des sous-critères S (nature du Sol), E (Epikarst) et L_ZNS (Lithologie de la ZNS) du critère P, et du critère R (Réservoir) à partir de la géologie.	158
Illustration 108 - Carte du critère I du système karstique des sources d'Entraigues.	160
Illustration 109 - Utilisation de l'IDPR pour la cartographie du critère Ka.	161
Illustration 110 - Carte du critère Ka du système karstique des sources d'Entraigues.	161
Illustration 111 - Différentes pondérations appliquées aux différents critères de la méthode PaPRIKa afin d'obtenir les cartes de vulnérabilité globale.	162
Illustration 112 - Influence du choix de la pondération sur la carte de vulnérabilité globale.	163
Illustration 113 - Regroupement Corine Land Cover sur la zone d'étude.	165
Illustration 114 - Tableau des risques fonction des valeurs de vulnérabilité (V) et de pressions (P).	166
Illustration 115 - Comparaison entre les cartes de vulnérabilité intrinsèque (à gauche) et d'occupation du sol dans la zone d'étude.	167

Illustration 116 - Carte des risques, évalués en comparant la vulnérabilité intrinsèque et les pressions anthropiques.	167
Illustration 117 - Bassin équivalent à l'aire sollicitée par les pompages multu-puits de novembre 2014 sur la source des Avens.	169
Illustration 118 - Emprise des Zones de Sauvegarde proposées dans le secteur d'étude du site d'Entraigues.	171
Illustration 119 – Préconisations en matière de préservation de la qualité de l'eau dans les zones de sauvegardes définies en amont du site d'Entraigues.	174

Liste des annexes

Annexe 1	Données hydroclimatiques issues du modèle SAFRAN.....	191
Annexe 2	Illustrations de l'installation du matériel sur les ouvrages des champs captants du SIAE et de Vidauban	197
Annexe 3	Coupes techniques et logs géologiques des ouvrages du site d'Entraigues	203
Annexe 4	Interprétation des essais par paliers	215
Annexe 5	Interprétation des essais par pompage.....	219
Annexe 6	Note sur les campagnes de jaugeage par dilution dans l'Argens en 2014	235
Annexe 7	Campagne de jaugeage par dilution dans l'Argens en 2014 : courbes de dilution.....	241
Annexe 8	Eléments de statistiques descriptives de la pluie et de la recharge sur la zone d'étude.....	247
Annexe 9	Tableaux de résultats et illustrations concernant les analyses chimiques	251
Annexe 10	Résultats détaillés des analyses SFG/CFC	261
Annexe 11	Carte de vulnérabilité globale selon la méthode PaPRIKA pondération n° 4 – Carte de l'occupation des sols – Carte des risques issue de la comparaison des cartes de vulnérabilité et des pressions	265

1. Présentation du projet

1.1. LE CONTEXTE GENERAL

Le Syndicat Intercommunal d'Adduction en Eau Potable (SIAE) de la Source d'Entraigues, qui regroupe neuf communes du département du Var et la commune de Vidauban exploitent deux champs captants mitoyens sur le site d'Entraigues.

Le Syndicat Intercommunal d'Adduction des Eaux (SIAE) de la source d'Entraigues assure la production et l'adduction d'eau potable de ses neuf communes adhérentes depuis 1969 (communes du Luc, des Mayons, du Cannet-des-Maures, de Lorgues, de Taradeau, du Thoronet, de Saint-Antonin-du-Var, de Gonfaron et de la Garde-Freinet, voir carte de l'illustration 1), soit une population de près de 34 000 habitants dont 15 600 abonnés au service public d'eau potable.

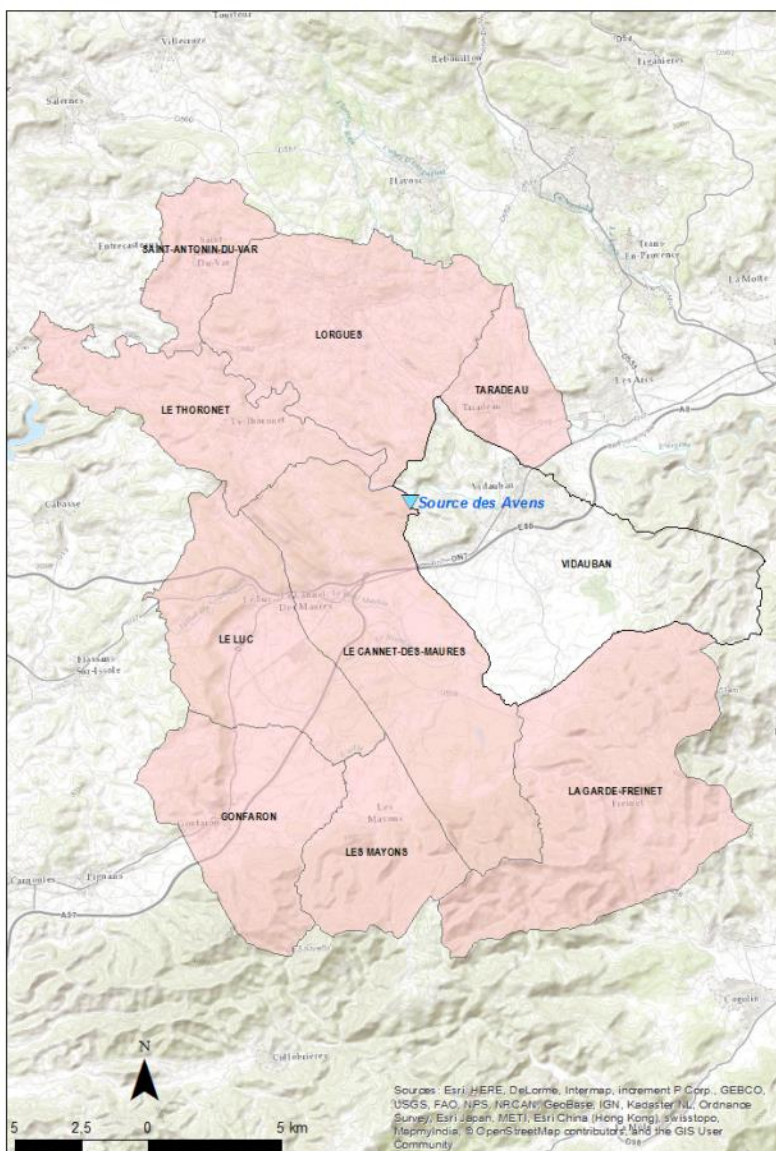


Illustration 1 - Les communes du SIAE, la commune de Vidauban et la source d'Entraigues (ou source des Avens)

Le droit actuel de prélèvement du SIAE, est de 9 000 m³/j (débit max : 125 l/s ; Déclaration d'Utilité Publique du 15 juillet 1970), établi à l'époque où seuls 3 forages étaient exploités. Il est aujourd'hui réalisé au moyen d'un champ captant de 6 forages (3 forages « superficiels » et 3 forages « profonds »). L'exploitation des ouvrages est assurée par SVAG/VEOLIA depuis 1974 (contrat renouvelé en septembre 2015).

Par ailleurs, la commune de Vidauban exploite en régie et sur le site adjacent à celui du SIAE la source des Avens (ou source d'Entraigues) ainsi que deux forages de 93 m de profondeur, le prélèvement autorisé étant de 4 320 m³/j (débit max : 60 l/s ; Arrêté Préfectoral du 16 mai 1971).

1.2. LES OBJECTIFS DE CE TRAVAIL

Bien que le syndicat dispose d'infrastructures saines et entretenues, il est constaté d'une part que les autorisations ont été établies sur la base d'infrastructures ayant évolué, et d'autre part que la limite des volumes prélevables de 9 000 m³/j est atteinte. Le prélèvement actuel ne permettra donc pas de satisfaire les besoins futurs liés à l'évolution démographique des neuf communes, membres du SIAE. En effet, les conclusions du Schéma Directeur de l'Eau montrent que les besoins du SIAE pour 2030 sont estimés à 20 000 m³/j (débit max : à minima 250 l/s), soit le double du prélèvement actuel.

C'est pourquoi les élus du SIAE ont souhaité la réalisation à court terme d'une étude hydrogéologique de la ressource d'Entraigues afin d'une part d'évaluer l'impact quantitatif et qualitatif de l'augmentation du prélèvement sur la ressource, notamment sur l'aquifère et le cours d'eau de l'Argens et, d'autre part, de justifier aux pouvoirs publics la possibilité de prélever à minima 250 l/s, soit 20 000 m³/j.

De même, la commune de Vidauban souhaite d'une part évaluer l'impact quantitatif et qualitatif de l'augmentation du prélèvement sur la ressource, notamment sur l'aquifère et le cours d'eau de l'Argens et, d'autre part, justifier aux pouvoirs publics la possibilité de prélever *a minima* 120 l/s, soit 8 700 m³/j.

Le BRGM, à travers ses activités de recherche et de service public, développe des actions sur la localisation, l'évaluation et la compréhension du fonctionnement de la ressource en eaux souterraines tant sur des aspects quantitatifs que qualitatifs. Son objectif, dans le cadre de sa mission de service public, vise en particulier à améliorer l'état des connaissances sur les aquifères et à mettre à disposition des autorités en charge de la gestion de l'eau son expertise reconnue et à leur fournir des outils techniques afin de pérenniser l'accès à une ressource de qualité pour les générations actuelles et futures. C'est donc avec la préoccupation commune d'une gestion durable de la ressource en eau et d'une amélioration de la connaissance hydrogéologique que le BRGM et le SIAE ont concrétisé la réalisation de ce projet à travers une convention bipartite (convention à coûts partagés, délibération 2013/16 du 10 septembre 2013) d'une durée initiale de 18 mois².

Par ailleurs, l'Agence de l'Eau RM&C, souhaitant disposer d'informations sur les risques encourus par la ressource de voir une pollution l'atteindre, a décidé de financer le SIAE à hauteur de 80% du budget total. Ce financement est assujéti à la réalisation d'une étude de vulnérabilité qui s'étend au-delà du strict périmètre du site d'Entraigues, et qui a pour but de définir des zones à protéger contre tout risque de contamination et de surexploitation : c'est le

² Durée portée *in fine* à 24 mois par un avenant du 02/04/2015.

sens de la mise en place des Zones de Sauvegardes préconisées par le futur SDAGE³ RM&C 2016-2021, au sein des « Ressources Stratégiques » (masses d'eau souterraine définies comme étant « stratégiques » du point de vue de la préservation des ressources pour l'eau potable. Ces masses d'eau doivent faire l'objet d'une ou de plusieurs études hydrogéologiques destinées à localiser, qualifier et surtout à proposer des mesures opérationnelles qui auront vocation à être intégrées aux documents d'urbanisme).

Il s'est donc agi d'élargir le champ d'investigations de l'étude, pour analyser, de manière sommaire, les risques de dégradation de la ressource majeure stockée dans les formations aquifères.

Cette démarche répond aux orientations fondamentales retenues dans le SDAGE Rhône-Méditerranée qui prévoit les dispositions particulières suivantes pour obtenir une eau brute de qualité pour assurer l'usage AEP :

- identifier et caractériser les ressources majeures à préserver pour l'alimentation en eau potable actuelle ou future ;
- engager des actions de restauration et de protection dans les aires d'alimentation des captages d'eau potable affectées par des pollutions diffuses ;
- mobiliser les outils réglementaires pour protéger les ressources majeures à préserver pour l'alimentation en eau potable actuelle et future.
- mobiliser les outils fonciers, agri-environnementaux et de planification sur les ressources à préserver.

Ainsi, la masse d'eau « Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal » (FRDG169) sur laquelle sont implantés la source des Avens et les ouvrages des champs captants du SIAE et de la commune de Vidauban, est définie comme « ressource stratégique pour l'eau potable ». Cette masse d'eau souterraine est très étendue et dépasse largement le secteur de la source d'Entraigues.

L'entité 571AE issue du référentiel national des entités hydrogéologiques BD LISA, intitulée "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan", portée également sur la carte de l'illustration 2 est plus restreinte et sert de base aux contours de l'étude, même si cette entité la dépasse également.

³ Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

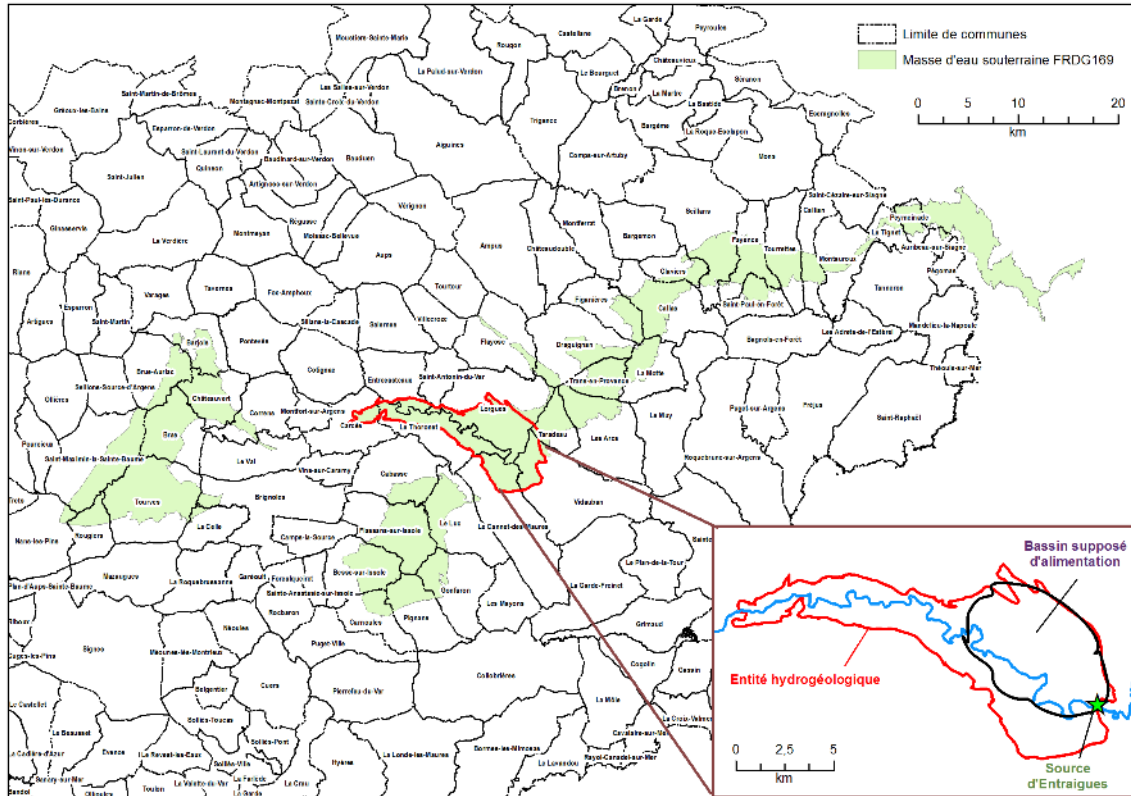


Illustration 2 - Le secteur concerné par l'étude.

Jusqu'à cette étude, on ne disposait que de relativement peu d'informations sur le fonctionnement hydrogéologique de cet aquifère complexe. L'aquifère apparaît comme très productif (débit d'exploitation de certains ouvrages dépassant les 600 m³/h) et pourrait le cas échéant subvenir aux besoins AEP plus importants à l'horizon 2030, du fait de l'évolution démographique du secteur.

Cette étude a donc été menée à deux échelles :

- une échelle « locale », celle des champs captants dont les potentialités ont été testées, où les relations entre les niveaux superficiel, profond et le cours d'eau de l'Argens ont été étudiées et où le suivi et l'exploitation scientifique des données d'un pompage à gros débit ont été réalisés ;
- une échelle plus vaste, qui a permis de prendre en compte le bassin d'alimentation de la zone locale et qui englobe notamment le cours de l'Argens. A cette échelle, a été menée une analyse des risques de pollution anthropique de la ressource (mise en place d'une méthode d'analyse multicritères de la vulnérabilité, des enjeux et des pressions).

2. Présentation du secteur d'étude

2.1. APERÇU GEOGRAPHIQUE

Niché au sein de la « Provence Verte », qui couvre un quart du département du Var, le site de la source d'Entraigues (également appelée « source des Avens ») est situé sur la commune de Vidauban, en limite avec la commune du Cannet-des-Maures, en bordure rive gauche d'une boucle de l'Argens, dont il surplombe le lit. Il se trouve en retrait de la route de Vidauban au Thoronet (RD82) et on y accède en franchissant un pont naturel qui enjambe l'Argens (voir cartes de l'illustration 3). L'altitude moyenne du site est de 116 m NGF, le lit de l'Argens étant situé à la cote 75 m NGF environ.

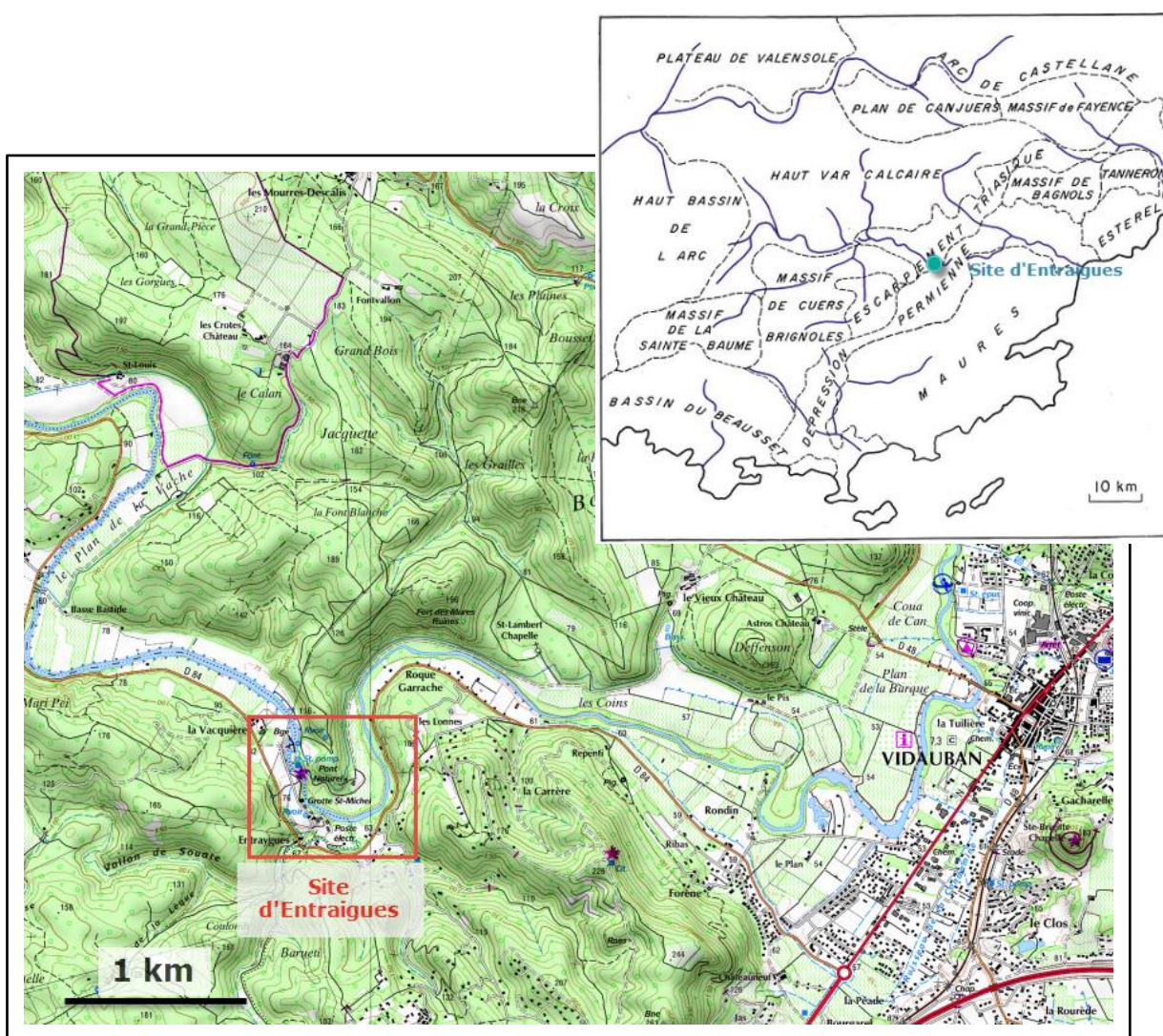


Illustration 3 - Localisation du site d'Entraigues dans le département (carte des régions naturelles issue de la carte hydrogéologique du Var), et dans la commune de Vidauban (© carte IGN)

Il est situé dans un secteur (environ 30 km en aval du fleuve lac de Carcès) où l'Argens a creusé son lit et serpente au sein de formations carbonatées constituées de massifs collinaires et de plateaux, peu avant d'atteindre l'agglomération de Vidauban et la plaine des Maures.

Les installations de captage de la source existent depuis de nombreuses décennies – les premières traces de captage remontent au XIX^{ème} siècle – et sont actuellement utilisée par la commune de Vidauban qui exploite pour son alimentation en eau potable les eaux de l'émergence⁴. Autour de ces installations ont été implantés des forages, qui ont été exploités d'une part par le SIAE et d'autre part par la commune.

Ces forages ont historiquement d'abord capté l'aquifère le plus superficiel, puis l'aquifère le plus profond (voir paragraphes suivants). Les plus récents sont ceux de la commune de Vidauban, qui a implanté trois forages le long du bâtiment de la source, mais qui captent l'aquifère sous-jacent à celle-ci.

Le schéma de l'illustration 4 résume la situation actuelle : deux champs captants mitoyens, implantés sur la presqu'île créée par l'Argens et un de ses bras mort (vers le canal d'Astros), en aval d'un barrage sur l'Argens alimentant une microcentrale hydroélectrique située en aval.

⁴ : Dans les années 1930, un système de pompage remontait l'eau pour l'utiliser en chute dans le barrage qui existait déjà en amont de la source en la remontant la nuit. Une partie de l'eau était parallèlement envoyée au réservoir qui desservait le village. Cette configuration perdure jusqu'à aujourd'hui, même si l'alimentation du barrage a été abandonnée : l'eau de la source est acheminée par pompage direct jusqu'à un réservoir qui alimente le centre du village de Vidauban.

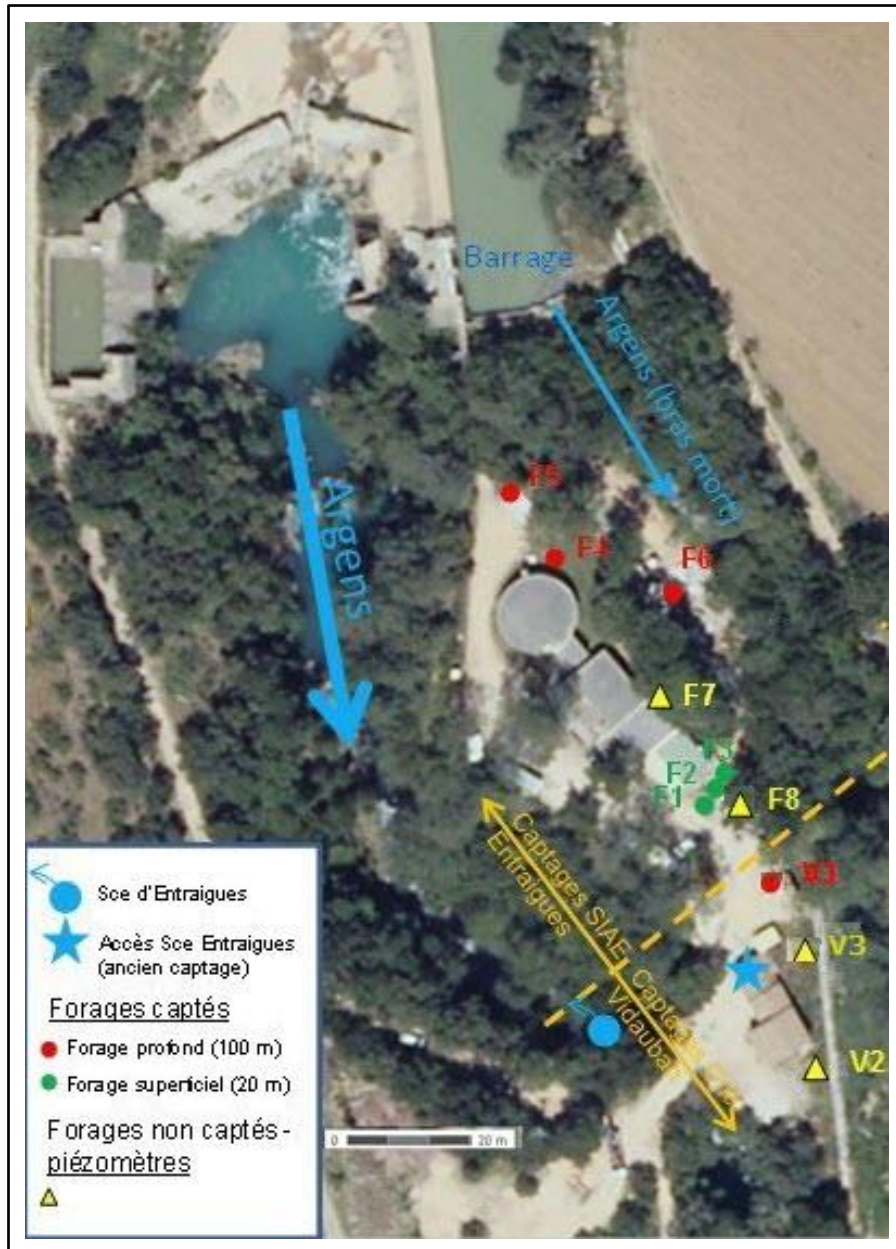


Illustration 4 - Le secteur d'étude autour de la source des Avens et des captages AEP du SIAE et de Vidauban.

2.2. LES CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Les formations géologiques concernées

La carte de l'illustration 6 est issue de la carte géologique N°1023 (Draguignan, édition 1969). Elle permet de découvrir les formations géologiques affleurantes ou sous couvertures concernées par le secteur de l'étude. Ce sont ces formations qui permettront *in fine* de délimiter la zone élargie de l'étude.

Les formations concernées directement ou indirectement, des plus récentes au plus anciennes, sont les suivantes :

Fz. Alluvions modernes : consistant en cailloutis et en tufs, elles sont réparties en deux niveaux, le plus récent (Holocène) à 3 - 4 m au-dessus des cours d'eau, l'autre à 10 - 12 mètres (Pléistocène récent). Des méandres correspondant à ce niveau ont été recoupés par la Bresque et l'Argens.

Fy. Alluvions anciennes : de même nature que les précédentes, en général elles forment un niveau qui arrive à dominer le réseau hydrographique actuel de 50 - 60 mètres. Les alluvions anciennes représentent probablement le Pléistocène ancien.

U. Tufs : en dehors des importantes masses de tufs intercalées dans les alluvions, existent de nombreux placages de tufs purs, étalés autour des sources (Cotignac, Lorgues). Difficiles à dater localement, il est cependant certain que leur dépôt s'est effectué en une série d'épisodes durant le Quaternaire et qu'il se poursuit encore de nos jours.

...

t3. Keuper : par suite d'effets tectoniques intenses, le secteur se prête mal à l'étude du Keuper. Celui-ci présente à peu près tous les termes de la série que l'on peut reconstituer plus au nord. Au sommet, se rencontrent des dolomies blanches qui alternent avec des marnes réséda surmontant des « marnes irisées » lie-de-vin et vert pastel, avec des blocs de cargneules géométriques. Plus bas, existent pêle-mêle des bancs dolomitiques très brisés, des cargneules, des marnes plus ou moins dolomitiques et du gypse en affleurements dispersés, sauf près de Flayosc où il est bien développé. Vers la base, se trouve un banc de calcaire dolomitique gris fumée clair, marbré de taches plus foncées, passant à la cargneule, et qu'il ne faut pas confondre avec le Muschelkalk.

t2c. Muschelkalk supérieur dolomitique (Lettenkohle) : ce niveau est formé de dolomies grises bien stratifiées, zonées, avec quelques bancs de marne verdâtre. Assez mince au Sud, la Lettenkohle s'épaissit localement et surtout vers le NE, où elle assimile le sommet des calcaires du Muschelkalk.

t2, t2b. Muschelkalk calcaire : il est constitué de calcaires gris fumée durs, de 50 à 60 m de puissance, alternant avec des marno-calcaires jaunes ou gris et quelques lits de marne jaune. Vers le sommet, s'observent des bancs minces et discontinus de calcaires dolomitiques jaunes ou rosés.

t2a. Muschelkalk inférieur dolomitique (Anhydritgruppe) : au moins 100 m (épaisseurs rencontrées dans les affleurements), ce niveau constitué par des dolomies grises très altérées, avec de nombreuses calcifications secondaires, a probablement renfermé du sel gemme, comme en témoignent des émergences salées en dehors du secteur.

t1. Grès bigarré : 10 à 30 mètres de puissance, constitués en une barre caractéristique de grès blancs et roses, grossiers, arkosiques et micacés, tachés de malachite. Il est légèrement discordant sur le Permien.

r. Permien : formant le soubassement des séries, et affleurant dans le sillon et la vallée des Maures, les formations permienues (arkoses avec galets de roches cristallophylliennes et fragments de rhyolites), elles reposent en discordance sur les séries primaires des Maures. Les couches s'affinent vers l'Ouest.

Lithologiquement, les terrains concernés au droit du site et autour (globalement au nord et au nord-ouest, entre Carcès et Vidauban) sont donc des calcaires (carbonates de calcium) et des dolomies (carbonates de calcium et de magnésium), roches massives plus ou moins plissées,

mais surtout parcourues par des fissures, des fractures et des conduits creusés par les écoulements d'eaux chargées en CO₂ plus ou moins bien organisés en réseau : il s'agit de milieux potentiellement karstifiés.

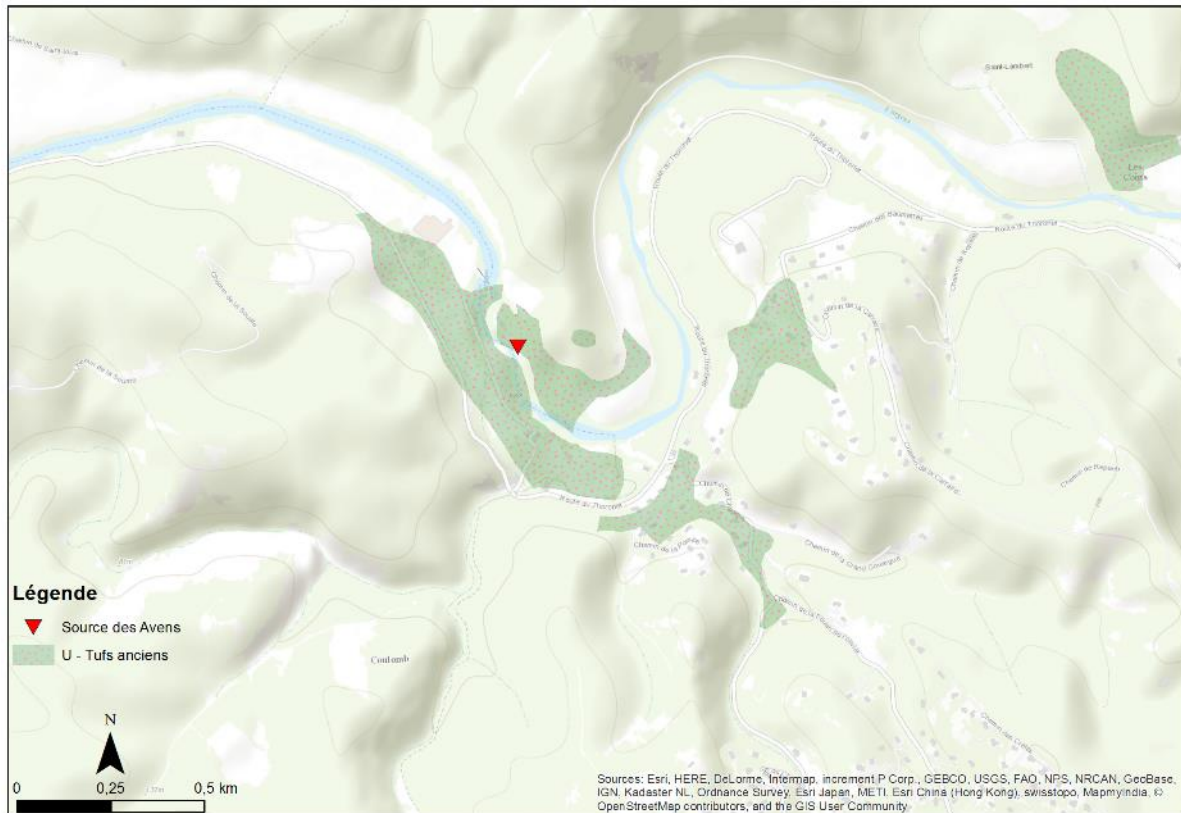


Illustration 5 - Les tufs dans la vallée de l'Argens : cartographie des affleurement autour du site d'Entraigues et photo des faciès au pied du site (clichés BRGM).

Ces formations carbonatées sont, à l'échelle du site, et très localement, recouvertes par des tufs (concrétions calcaires liées à l'activité biologique, fréquemment présentes dans les zones

d'émergences), qui se sont accumulés sur une quarantaine de mètres d'épaisseur et au travers desquels l'Argens a creusé son lit (voir photos et carte de l'illustration 5). A titre d'illustration, la superficie de l'affleurement au droit du site, qui forme le pont naturel et au sein de laquelle l'Argens a creusé des grottes et cavités est de l'ordre de 4 ha.

Les tufs sont séparés des calcaires du Muschelkalk sous-jacents par un niveau marneux de quelques mètres d'épaisseur, dont la continuité spatiale n'a cependant pas été démontrée, mais qui est récurrent dans les logs des forages créés sur le site (voir paragraphes suivants).

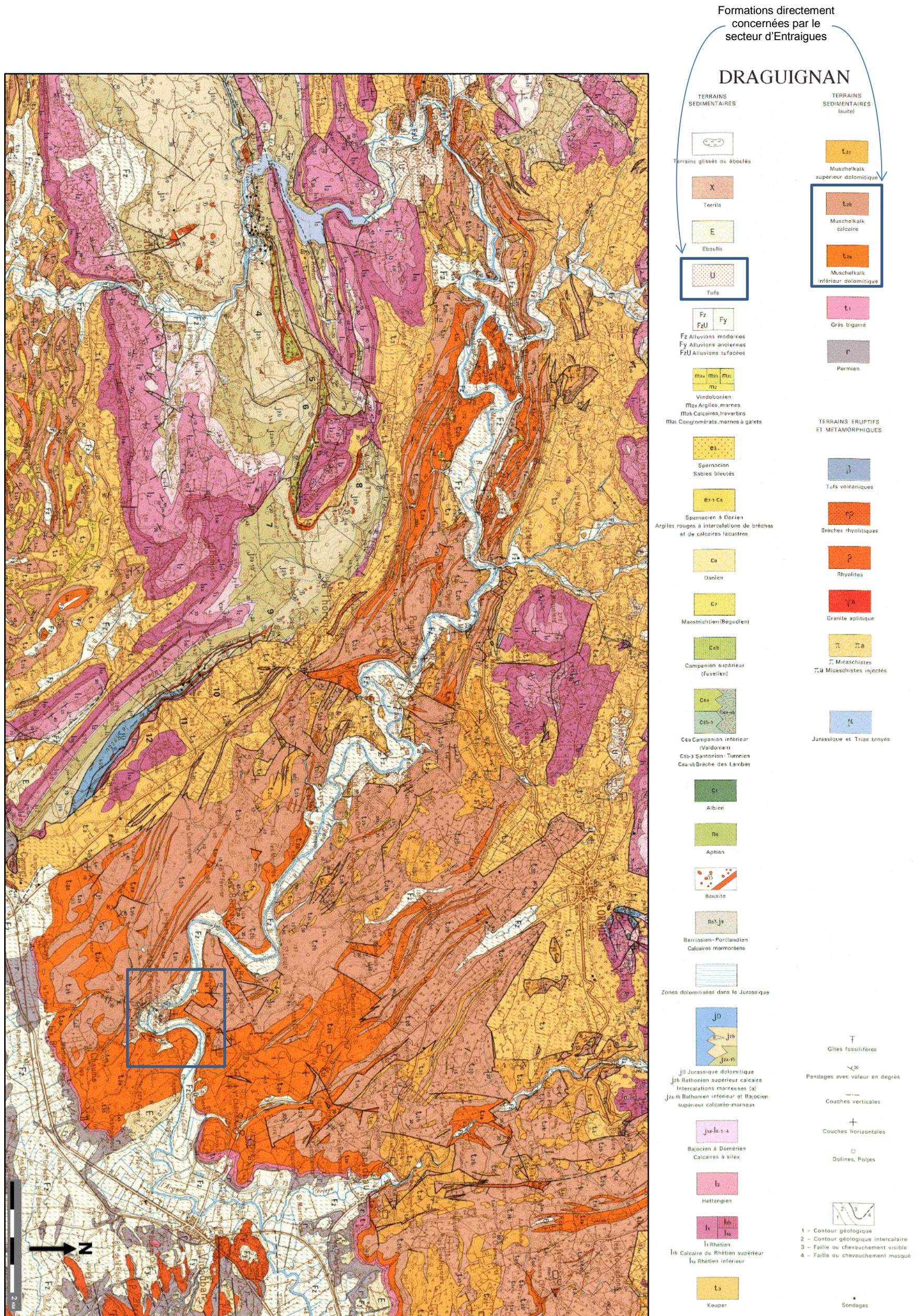


Illustration 6 - Contexte géologique du secteur entre Vidauban et Carcès (carte géologique BRGM 1/50.000 1093 - Draguignan).

2.2.2. Les aspects tectoniques et structuraux : agencement des formations

La tectonique s'est esquissée dès le Crétacé supérieur avec d'abord la formation de la dépression du bassin d'Aix se faisant sentir au-delà de Vins, puis celle de la gouttière dano-éocène de Rians - Salernes, où des brèches témoignent de mouvements positifs sur leurs bordures, liés à des flexures. La gouttière dano-éocène a été en outre recoupée par des failles transversales se traduisant par des modifications dans la sédimentation (faille de Salgues notamment).

La tectonique majeure date du début du Bartonien, c'est-à-dire du premier stade de la phase provençale. Le deuxième stade est responsable, d'une part d'une partie des accidents de l'angle NO de la feuille, où apparaît la zone tectonique transversale de Montmeyan, d'autre part de l'arc du Villard et des accidents qui le bordent.

Du Ludien au Miocène inférieur, la région a été en proie à l'érosion et largement pédiplanée, puis disséquée par un réseau de paléo-thalwegs se dirigeant dans leur ensemble vers le NO (paléorivière de Salernes notamment). La dépression permienne a commencé à se former dès cette époque près du Luc.

La base de l'Anhydritgruppe et le sommet du Keuper constituent régionalement des surfaces de décollement entre le Muschelkalk calcaire, qui s'organise en anticlinoriums ou en anticlinaux serrés (partie septentrionale du massif de Flassans, arc de Carcès, arc du Villard) et le socle métamorphique des Maures et de son tégument permo-triasique inférieur, déformé en plis de fond souvent très accentués et failles. La complexité géométrique des déformations est due à la présence de la disharmonie liée au Keuper qui individualise le comportement des compartiments qu'elle sépare.

Le Jurassique dessine dans la partie nord de la feuille des structures beaucoup plus régulières, avec des chevauchements dus à la rupture de flexures bordant les synclinaux quand le rejet des plis faillés a été suffisant pour décoller la couverture jurassique. Des étirements différentiels intenses au voisinage des arcs triasiques traduisent un diapirisme de voussoir du Keuper. Dans le secteur du Vieux-Cannet et du Thoronet, la surface chevauchante paraît s'être renversée par collapse structure. Elle est fauchée à angle droit par la flexure du Vieux-Cannet affectant le Permien.

Dans le secteur des sites, les formations du Muschelkalk carbonaté ont des pendages de directions variées :

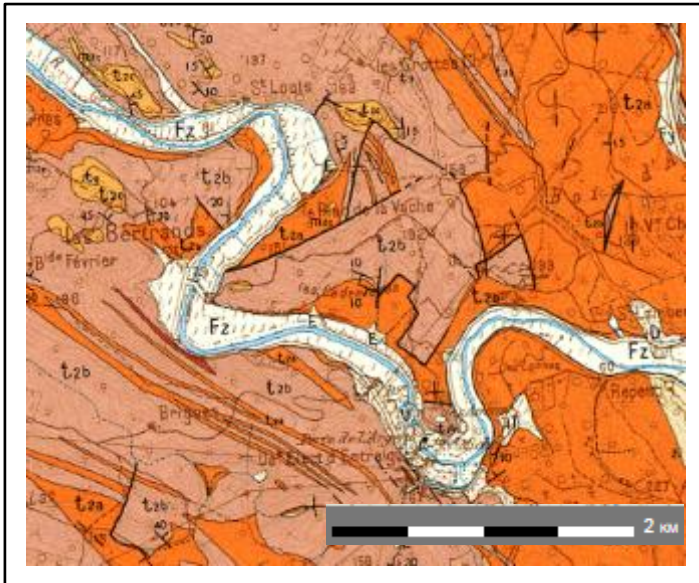
- en rive droite de l'Argens, le pendage des dolomies (t2a) est 10°N300, alors que celui des calcaires sus-jacents (t2b) montre une discordance : 45°N250.
- en rive gauche de l'Argens, les pendages des deux formations sont concordants : 10°N250.

Le secteur est très faillé, des contacts anormaux de chevauchements ont été cartés et, même s'ils demeurent faibles (0 à 20°), les pendages montrent des discontinuités de directions et le passage des calcaires aux dolomies est régi par une tectonique cassante, avec des accidents sub-verticaux (Illustration 7).

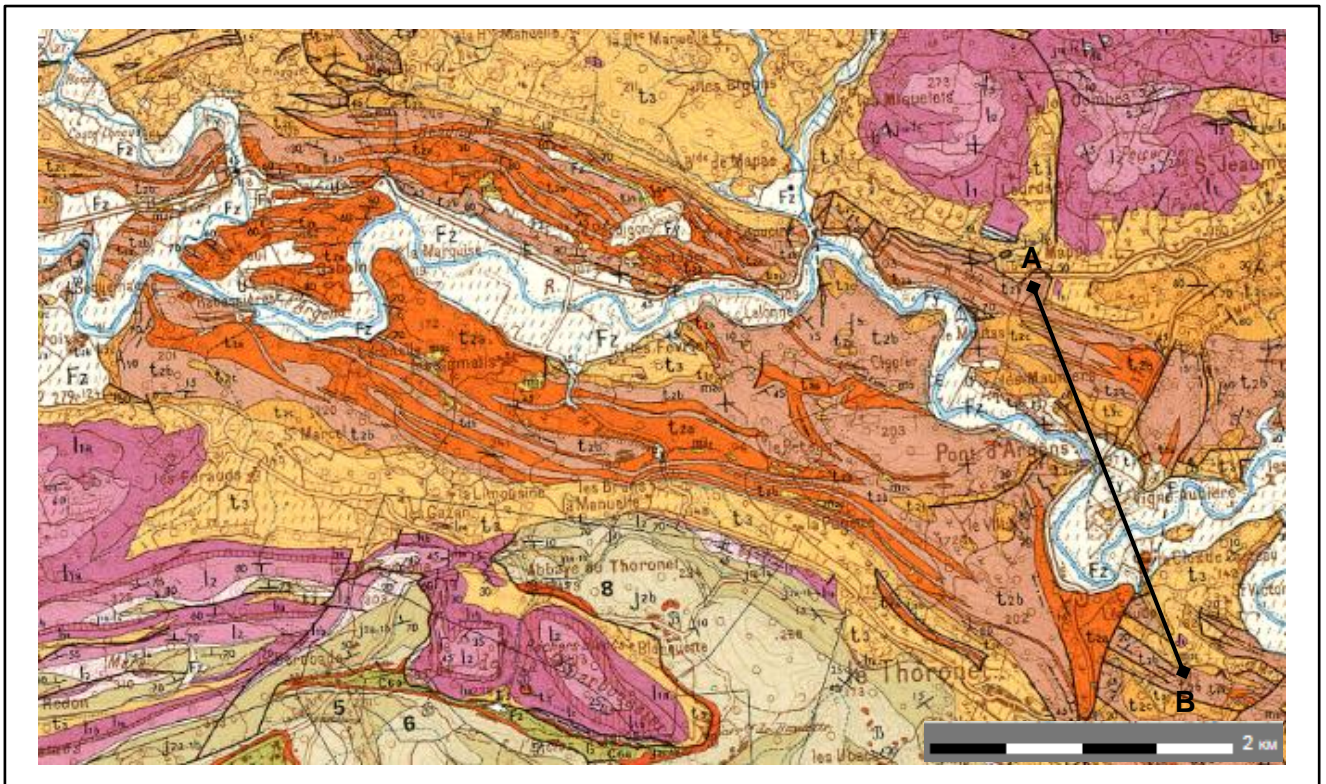
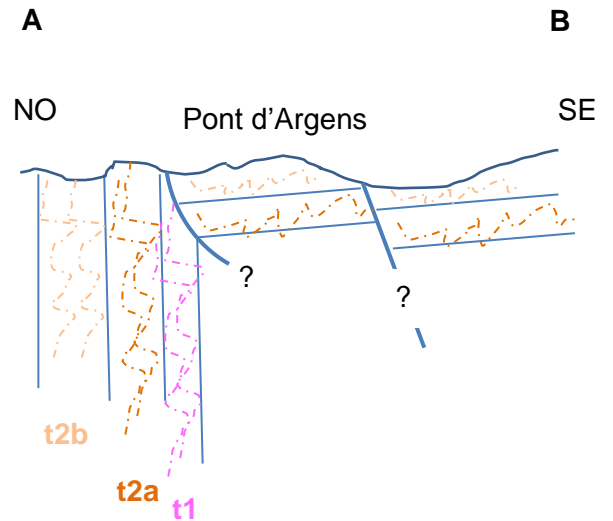
Au nord-ouest de Pont d'Argens, et en remontant vers Carcès, les pendages s'accroissent, les plis se font plus flexurés et les séries acquièrent des pendages verticaux. Des anticlinaux de structures complexes s'enchaînent alors.

Une zone de contact anormal, (zone entourée en bleu dans la carte (b) de l'illustration 7, qui se prolonge vers le nord de la carte géologique), à la hauteur de pont d'Argens, semble indiquer

que le passage entre ces deux situations est brutal et qu'il s'agit d'une zone de contact entre deux compartiments :



(a) : au droit du site d'Entraigues



(b) : en amont de Pont d'Argens

Illustration 7 - La tectonique au droit du site d'Entraigues (a) et en amont de Pont d'Argens (b) (fond : carte géologique BRGM 1/50.000 1093 - Draguignan).

(a) : Les contacts entre calcaires et dolomies sont subverticaux, les pendages des deux formations sont concordants au nord de l'Argens et discordants au sud.

(b) Les séries sont verticalisées et les accidents moins cassants.

Le site d'Entraigues prend ainsi place au sein d'une zone tectoniquement et structuralement complexe, où les terrains sont compartimentés et où les changements d'échelles ne sont pas faciles.

2.2.3. Les contextes hydrographique et climatologique

a) Hydrographie

❖ L'Argens, fleuve structurant

Depuis le XIX^{ème} siècle, le fleuve Var ne parcourt plus le département du même nom. C'est l'Argens et son bassin de 2 800 km² qui constitue l'axe drainant le département. D'une longueur de près de 116 km, il prend naissance au nord de Saint-Maximin-la-Sainte-Baume à une altitude de 269 m et s'écoule vers l'ouest pour rejoindre la mer à Fréjus avec une pente moyenne de 2,35 m/km. Comme c'est le cas au droit du site d'Entraigues, le fleuve traverse des gorges parfois encaissées, notamment dans la partie amont de son cours, mais aussi des plaines, comme celle des Maures ou celle de sa basse vallée. Ses principaux affluents sont en rive droite le Cauron, le Caramy et l'Issole (qui confluent au barrage de Carcès) et l'Aille. En rive gauche, elle reçoit l'Eau Salée (en amont du site d'Entraigues), la Bresque, la Nartuby, l'Endre et le Reyran.

Les principales données de débit et de lames d'eau mesurés ou calculés sur les stations de la DREAL (issues de la banque HYDRO) le long de son cours sont portées dans le tableau de l'illustration 8.

Le régime hydrologique de l'Argens est caractérisé par des étiages prononcés (en général entre les mois de juin et d'octobre), qui contrastent avec des périodes de crues parfois catastrophiques (crues de juin 2010, octobre 2011 ou juin 2014).

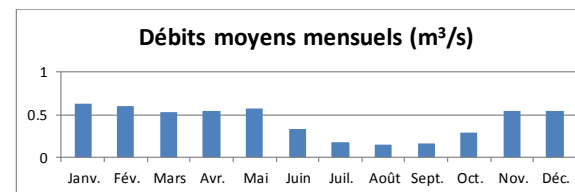
Le module (calculé sur 45 ans avec un intervalle de confiance de 95%) à son embouchure est de 19,5 m³/s et le débit spécifique de 7,7 l/s/km².

A Carcès, c'est-à-dire à la station la plus proche en amont du site d'Entraigues, le module (calculé sur 45 ans avec un intervalle de confiance de 95%) est de 7,67 m³/s et le débit spécifique de 6,5 l/s/km².

Sur l'illustration 9 sont portés les hydrogrammes entre 2006 et 2014 mesurés à la station de Carcès.

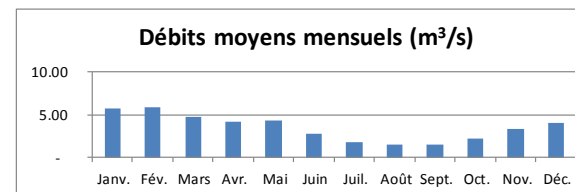
Seillons-Source-d'Argens (source, station Y5002020) - données calculées sur 41 ans - 131 km²

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débits (m ³ /s)	0.631	0.595	0.534	0.549	0.568	0.33	0.181	0.147	0.159	0.293	0.551	0.542	0.422
Qsp (l/s/km ²)	4.7	4.4	4	4.1	4.2	2.4	1.3	1.1	1.2	2.2	4.1	4	3.1
Lame d'eau (mm)	12	11	10	10	11	6	3	2	3	5	10	10	99



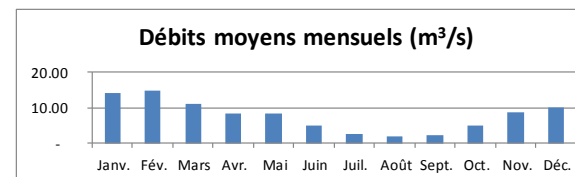
Châteauvert (station Y5032010) - données calculées sur 45 ans - 485 km²

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débits (m ³ /s)	5.67	5.90	4.76	4.22	4.26	2.80	1.74	1.45	1.46	2.22	3.32	4.06	3.47
Qsp (l/s/km ²)	11.70	12.20	9.80	8.70	8.80	5.80	3.60	3.00	3.00	4.60	6.80	8.40	7.20
Lame d'eau (mm)	31.00	30.00	26.00	22.00	23.00	14.00	9.00	8.00	7.00	12.00	17.00	22.00	226.00



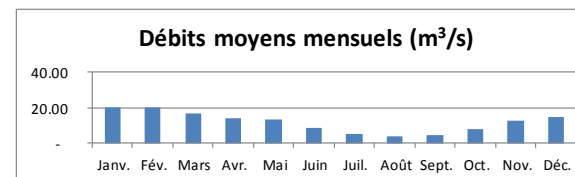
Carcès aval (station Y512010) - données calculées sur 45 ans - 1181 km²

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débits (m ³ /s)	14.10	14.90	11.20	8.44	8.51	5.00	2.57	1.99	2.29	4.89	8.63	10.00	7.67
Qsp (l/s/km ²)	12.00	12.60	9.50	7.10	7.20	4.20	2.20	1.70	1.90	4.10	7.30	8.50	6.50
Lame d'eau (mm)	32.00	31.00	25.00	18.00	19.00	10.00	5.00	4.00	5.00	11.00	18.00	22.00	205.00



Les Arcs (station Y5202010) - données calculées sur 50 ans - 1730 km²

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débits (m ³ /s)	20.30	20.30	16.50	13.80	13.30	8.55	4.94	3.89	4.35	7.66	12.70	14.60	11.70
Qsp (l/s/km ²)	11.70	11.70	9.60	8.00	7.70	4.90	2.90	2.30	2.50	4.40	7.30	8.40	6.80
Lame d'eau (mm)	31.00	29.00	25.00	20.00	20.00	12.00	7.00	6.00	6.00	11.00	18.00	22.00	214.00



Roquebrune-sur-Argens (embouchure, station Y5312010) - données calculées sur 45 ans

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débits (m ³ /s)	34.60	32.80	25.60	21.80	19.90	11.20	7.32	5.99	7.41	15.00	26.30	26.90	19.50
Qsp (l/s/km ²)	13.70	13.00	10.10	8.60	7.90	4.40	2.90	2.40	2.90	5.90	10.40	10.60	7.70
Lame d'eau (mm)	36.00	32.00	27.00	22.00	21.00	11.00	7.00	6.00	7.00	15.00	26.00	28.00	244.00

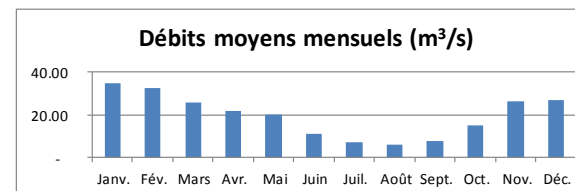


Illustration 8 - Données de débits et de lames d'eau mesurées ou calculées dans les stations DREAL le long de l'Argens (banque HYDRO, 2015).

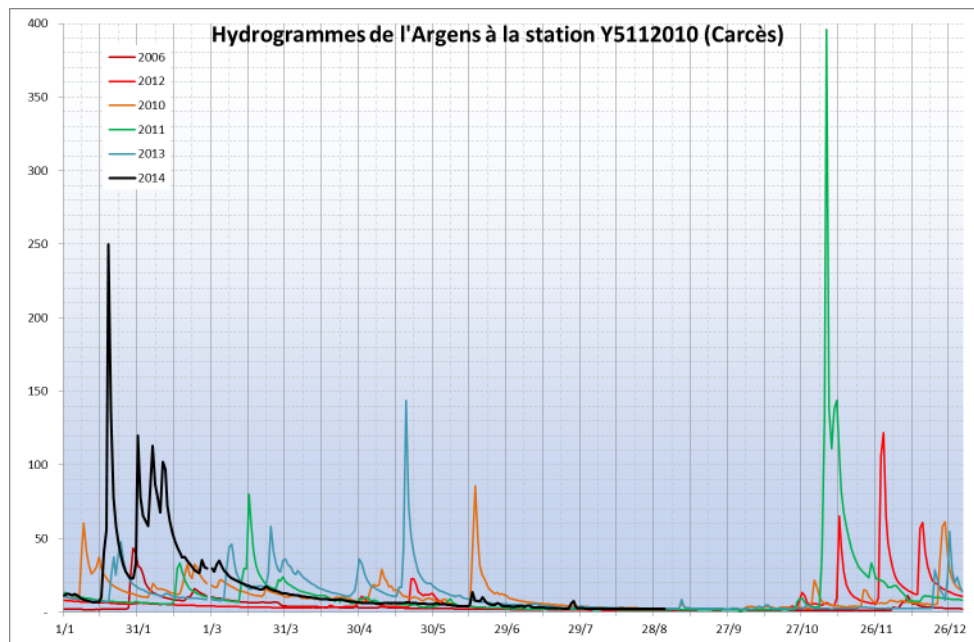


Illustration 9 - Hydrogrammes de l'Argens à Carcès (station Y5112010, banque HYDRO, 2014).

❖ Les autres rivières et fleuves côtiers du département

Au nord, le département du Var est limité par le Verdon, à l'est par la Siagne qui reçoit en rive gauche le Jabron et l'Artuby et à l'ouest, l'Arc et l'Huveaune dont les hauts bassins sont dans le département.

D'ouest en est, les fleuves côtiers sont les suivants :

- Le Grand Vallat
- La Reppe
- Le Las
- L'Eygoutier
- Le Gapeau et son affluent le Réal Martin
- Le Pansard
- Le Batailler
- La Giscle et la Môle
- Le Préconil

b) Climatologie

Le climat du département est essentiellement méditerranéen, mais en altitudes plus élevées (massifs de la Sainte-Baume des Maures et de l'Esterel, Montagne de Lachens, Plan de Canjuers...), il évolue vers un climat subalpin.

Les écarts de températures entre hiver et été sont importants, d'autant qu'on s'éloigne du littoral. Les amplitudes thermiques (été-hiver) sont de l'ordre de 15 ou 16 °C à l'intérieur du département comme sur le littoral ; les moyennes mensuelles minimales peuvent atteindre 1,5 °C à 1000 m et les moyennes mensuelles maximales 25 °C au niveau de la mer.

Les précipitations sont inégalement réparties au cours de l'année : elles ont lieu principalement en automne et au printemps. Elles sont irrégulières et parfois torrentielles. Selon la latitude,

l'altitude et l'exposition au vent, elles peuvent varier significativement. Ainsi, le littoral est le secteur le moins arrosé (environ 710 mm/an), tandis que la région de Callas (NE de Draguignan) est la plus pluvieuse (~1000 mm/an). Il en va de même pour les massifs occidentaux (Sainte-Baume et Agnis, plus de 1000 mm/an).

Les précipitations et l'évapotranspiration sur le secteur d'Entraigues sont tirées du modèle SAFRAN de Météo France.

Les tableaux de données hydroclimatiques (précipitations, températures, précipitations efficaces et recharge mensuelle) issues de ce modèles ou calculées à partir de celui-ci sont présentés en annexes 1 et 8 de ce rapport.

Le tableau de l'illustration 10 ci-dessous présente les valeurs statistiques de recharge interannuelle, calculées sur la base de ces données.

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
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
Max	298,9	204,0	104,5	88,9	109,6	150,6	20,9	21,4	62,7	269,2	292,3	168,3
Moyenne	52,0	36,9	26,6	20,6	16,1	7,5	0,7	2,1	10,0	37,8	55,6	44,1
Ecart-type	61,5	45,0	28,2	20,1	20,9	22,1	3,0	4,9	14,9	55,3	65,5	36,5
Médiane	35,5	19,8	14,9	15,7	9,7	1,3	0,0	0,2	2,0	17,3	28,7	42,6
1^{er} décile	2,1	0,4	0,9	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,6	3,6
9^{ème} décile	125,3	89,2	76,7	47,4	41,5	14,3	1,0	6,9	35,5	98,4	132,2	92,7

Illustration 10 – Statistiques sur la recharge calculée d'après le modèle SAFRAN sur le secteur d'Entraigues.

2.2.4. L'hydrogéologie générale de la zone d'étude

Outre les séries du Mésozoïque très développées dans le département du Var, qui donnent naissance à des massifs karstiques nombreux mais bien identifiés, séries du Trias se révèlent des aquifères très intéressants.

Les grès bigarrés (t1), qui forment la base de ces séries peuvent se révéler perméables mais, n'affleurant que peu, ils n'alimentent que de petites émergences, sauf quand ils drainent les terrains sus-jacent (comme dans le secteur de la Farlède par exemple).

Du fait de l'existence de la disharmonie entre les formations du Trias décrite au paragraphe 2.2.2, l'hydrogéologie de ces formations est particulière : les calcaires et dolomies du Muschelkalk (t2a et t2b) se sont déformés différemment suite aux mouvements intervenus durant le Crétacé et le Tertiaire et les calcaires (situés au-dessus du niveau disharmonique) se sont plissés plus intensément que les dolomies sous-jacentes. De plus, ils ont été plus affectés par des phénomènes d'altération (effondrements liés à la dissolution du gypse sous-jacent...).

Des circulations perchées dans les calcaires et dans les réseaux karstifiés des formations inférieures coexistent ainsi. Du fait de l'importance des affleurements calcaires du Trias, ceux-ci constituent un des aquifères les plus développés du département.

Le Keuper (t3, complexe argilo-gypseux), qui affleure beaucoup au nord de Draguignan, joue globalement le rôle d'imperméable et de semelle des séries jurassiques sus-jacentes.

Cependant, les eaux, circulant au sein des dolomies et des cagnoules donnent naissance à des sources souvent sulfatées et chlorurées (elles-mêmes alimentant des eaux de surface comme l'Eau Salée, affluent de l'Argens).

La source des Avens constitue une des émergences les plus importantes de ces formations, comme le montre la carte de l'illustration 11 ci-dessous.

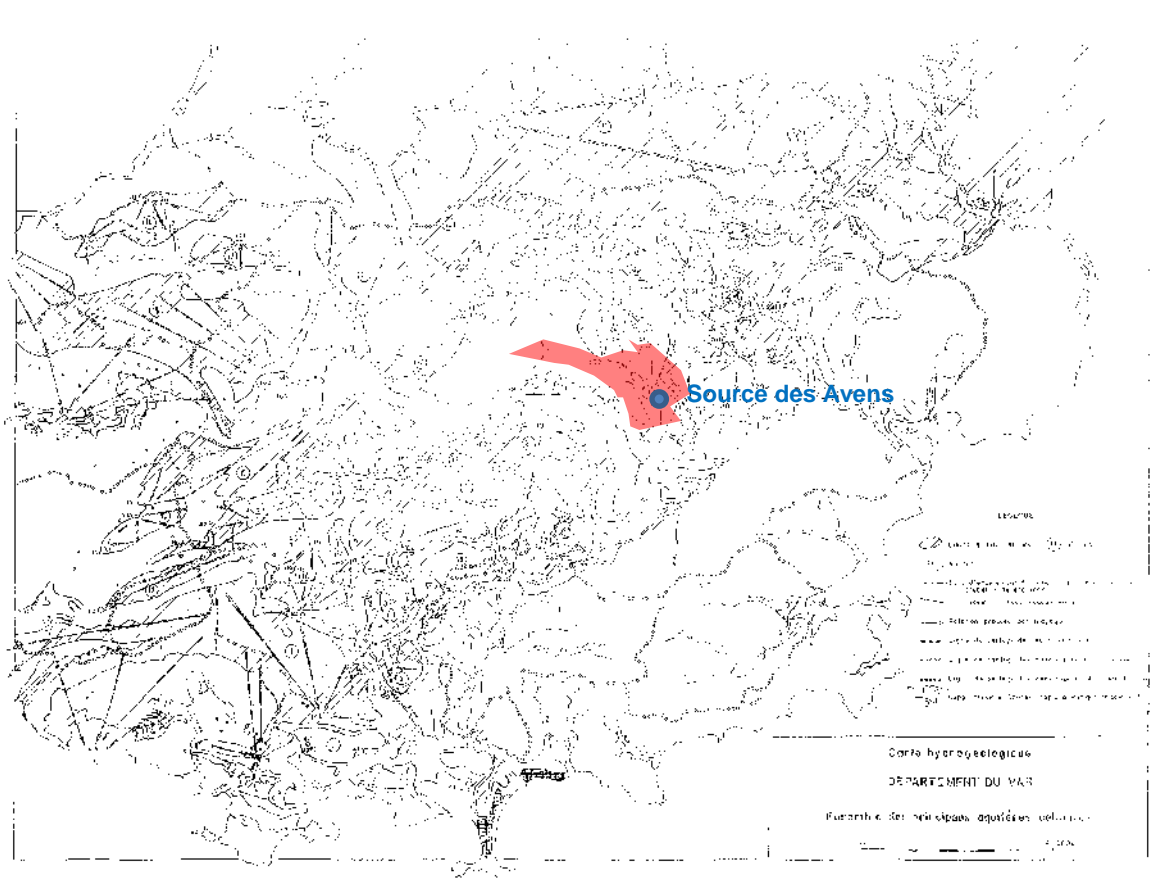


Illustration 11 - Carte des principaux aquifères calcaires du département du Var (d'après la carte hydrogéologique du Var, 1980)

L'entité surlignée en rouge dans cette carte englobe le bassin d'alimentation de la source et était appelée dans la carte hydrogéologique du Var "massif de Taradeau (Carcès – Lorgues – les Arcs)". Elle a été reprise dans la synthèse hydrogéologique régionale (Moulin, 2012) et intégrée au référentiel BDLISA⁵ en 2012 sous le code et la dénomination : "571AE - Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan".

Le SDAGE Rhône-Méditerranée et Corse, mis en œuvre dans sa version révisée sur la période 2016-2021, s'appuie en outre sur la notion de "masse d'eau souterraine" (MESO) dont le référentiel a été actualisé en 2013. Dans ce cadre, le massif de Taradeau est inclus dans une MESO très vaste (dont le code et le libellé sont : "FRDG169 - Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal").

⁵ Base de Données des Limites de Systèmes Aquifères, qui constitue le référentiel français des entités hydrogéologiques.

La carte présentée en Illustration 2 en page 22 de ce rapport présente les contours de l'entité hydrogéologique et ceux, plus vastes encore, de la masse d'eau souterraine.

Ces notions sont intéressantes, notamment en termes de gestion et de protection, et elles seront reprises dans la suite de ce rapport, notamment dans le chapitre consacré à la vulnérabilité de la ressource.

2.2.5. L'hydrogéologie locale : les formations aquifères

A l'échelle du site d'Entraigues, les aquifères sont les suivants :

(a) Les tufs qui surmontent localement les formations du Muschelkalk

Comme cela est clairement décrit dans Nicod, 2010, ces formations ont pour origine *les eaux des sources issues des massifs calcaires et dolomitiques qui, fortement chargées en carbonates, voient ces carbonates se déposer à plus ou moins grande distance des émergences. Ces constructions s'édifient en fonction de processus physico-chimiques (dégazage du CO₂ équilibrant) et biologiques : la précipitation du carbonate de calcium s'effectue sur la végétation aquatique (mousses, roseaux, etc.) par action des cyanophycées (algues incrustantes). À l'origine, le tuf, dépôt carbonaté, est poreux et friable. Par diagenèse, au cours des millénaires, il devient un travertin, roche légère et de taille aisée, qui a été très largement utilisée dans les constructions avant l'usage des parpaings.*

La circulation de l'eau dans ces formations se fait donc à travers des fissures, des fractures, voire des réseaux karstiques. Même si les capacités de stockage sont limitées de par le fait qu'ils ne sont présents que sur une superficie très restreinte (autour du site d'Entraigues, au nord de l'Argens sur quelques centaines de mètres), les tufs peuvent constituer des formations de transfert d'eaux venant soit des précipitations, soit des eaux de surface, soit d'autres aquifères.

(b) Les formations carbonatées du Muschelkalk

Les calcaires (partie supérieure) ou les dolomies du Muschelkalk constitue le réservoir le plus développé du secteur. Leur puissance dépasse 100 m, mais la tectonique qui a présidé suite à leur mise en place rend la géométrie de l'aquifère très complexe (voir paragraphe 2.2.2). On a donc affaire à des compartiments chahutés, mais dont la surface d'affleurement est importante, constituant en particulier la surface de l'entité 571AE en amont du site d'Entraigues et le long du lit de l'Argens. Peu de données préexistent à cette étude sur la productivité de ces calcaires, la source des Avens étant le principal exutoire dans le secteur (d'autres petites émergences de quelques dizaines de l/s sont recensées). Un drainage de ces formations doit également s'effectuer par la Nartuby dans le secteur de Trans-en-Provence.

Entre ces deux aquifères, un niveau semi perméable a été rencontré par les forages les plus profonds dans les champs captants du SIAE et de la commune de Vidauban. Il pourrait jouer un rôle important dans les répartitions des charges entre les deux aquifères.

Le schéma suivant, simplifié, peut-être proposé en Illustration 12.

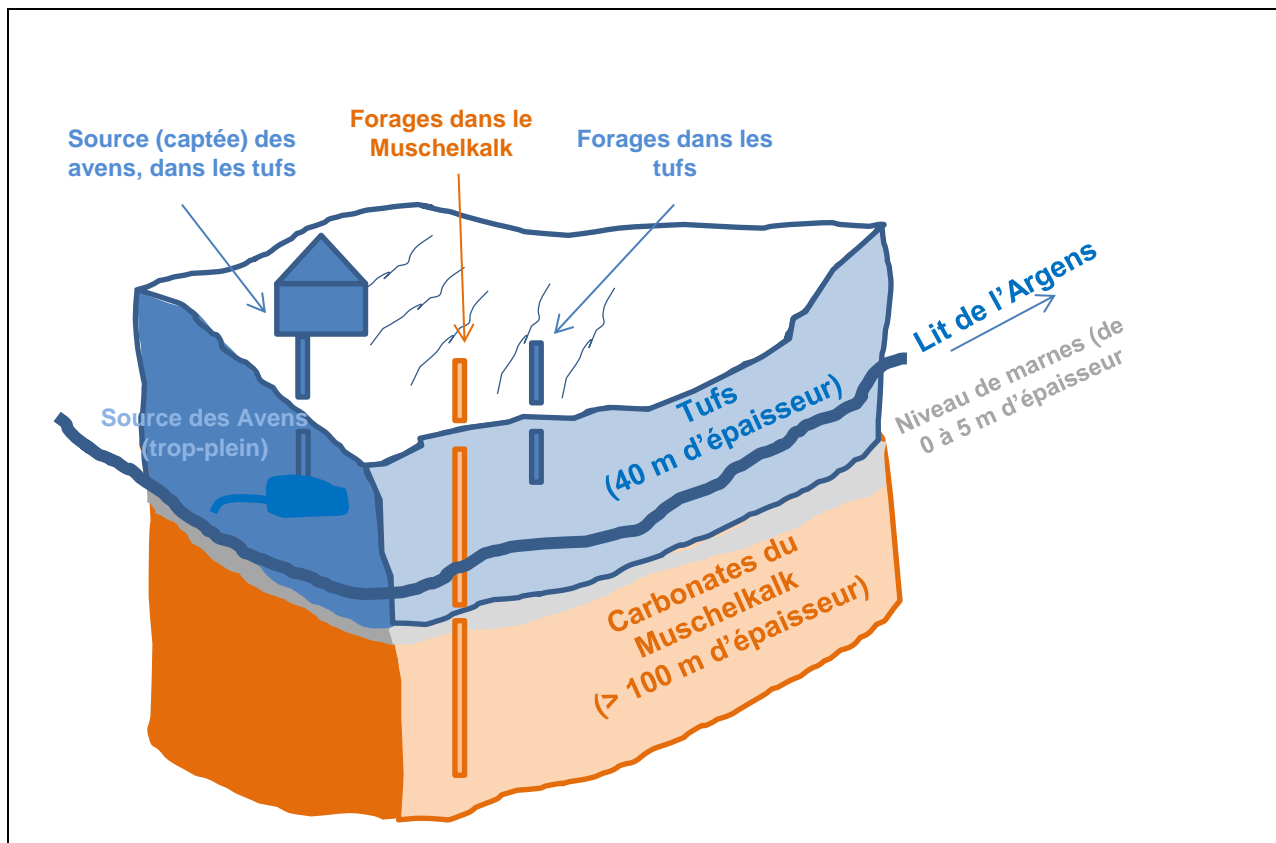


Illustration 12 - Superposition des aquifères au droit du site d'Entraigues (les échelles ne sont pas respectées)

A ce stade, il faut bien préciser les points suivants et poser les questions suivantes :

- Les aquifères superposés contiennent des « nappes » qui sont à des niveaux différents. Le niveau piézométrique peut être réel (nappe libre) ou virtuel (nappe captive). Si les formations du Trias contiennent de l'eau dont la charge est supérieure à celle de l'eau dans les tufs, le gradient d'écoulement se fera du bas vers le haut. Dans le cas contraire, il se fera du haut vers le bas.
- Attention à ne pas confondre transferts de charge et transferts de masse.
- Rien n'est dit sur la continuité des écoulements : le niveau marneux est-il réellement imperméable ; la charge de la nappe du Muschelkalk permet-elle une recharge des tufs par le Trias ?

Ces points seront abordés et les questions résolues dans les chapitres suivants, consacrés successivement à l'hydrologie et l'hydrochimie du secteur d'étude (chapitre 3), aux essais de pompage réalisés dans le passé sur les deux champs captants et sur ceux réalisés dans le cadre de cette étude (chapitre 4) et à la vulnérabilité du bassin d'alimentation du site d'Entraigues (chapitre 5).

Au cours de ces chapitres, seront notamment abordés la problématique des échanges entre les eaux de surfaces (en particulier celles de l'Argens) et les eaux souterraines, celle de la définition de l'impluvium alimentant le site d'Entraigues et l'estimation de la ressource renouvelable.

3. Les outils d'aide à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du bassin d'alimentation du site d'Entraigues

En complément des pompages d'essais qui sont décrits en détail dans le chapitre 4 ci-dessous, les outils hydrogéologiques et hydrochimiques permettent d'apporter des informations importantes sur le fonctionnement hydrogéologique et géochimique de l'aquifère des calcaires et calcaires dolomitiques fracturés-karstifiés du Muschelkalk à l'échelle du bassin d'alimentation de la source d'Entraigues. Ils permettent notamment d'identifier plus précisément les relations entre les eaux de surface (cours d'eau ou précipitations) et les eaux souterraines.

Deux approches mêlant hydrologie et hydrogéochimie ont été mises en œuvre dans le cadre de cette étude :

- une approche dite "fonctionnelle", fondée sur l'analyse des données de piézométrie et de débits de pompage des forages du site d'Entraigues (forages du SIAE et de la Commune de Vidauban), grâce à une modélisation globale (logiciel GARDENIA),
- une approche "géochimique" afin d'identifier les différents pôles hydrochimiques qui sont susceptibles d'expliquer les évolutions observées à la source et aux forages.

Ce travail a été réalisé en valorisant les informations disponibles (données des suivis existants, bibliographie) mais aussi en acquérant des données complémentaires :

- équipements d'ouvrages de capteur de pression, de conductivité et de température
- estimation des débits des émergences d'Entraigues par jaugeages dans l'Argens (par dilution)
- analyses chimiques de l'eau par l'intermédiaire d'une campagne d'échantillonnage non seulement sur les ouvrages des champs captants, mais aussi sur des ouvrages en amont.

3.1. SYNTHÈSE DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES DISPONIBLES ET ACQUISES DANS LE PROJET

3.1.1. Données sur les prélèvements

Une collecte des données de prélèvements disponibles en format numérique a été réalisée auprès du SIAE et de la commune de Vidauban.

L'illustration 13 présente l'évolution du cumul de pompage des branches nord et ouest du SIAE ainsi que le cumul des débits pompés aux ouvrages F4, F5 et F6 sur la période du 09/10/2014 au 01/05/2015. **Ces prélèvements concernent l'aquifère profond du Muschelkalk.**

Rappelons que pour les besoins de l'étude, le SIAE a équipé les ouvrages F4 et F5 de débitmètres. L'essai de pompage a été réalisé du 06 au 14/11/2014, le cumul des prélèvements du SIAE est de 0,33 m³/s (1176 m³/h) au cours de l'essai. Pour la période 2010-2012, nous supposons que les débits des branches nord et Ouest du SIAE permettent de renseigner le cumul des débits pompés aux ouvrages F4, F5 et F6.

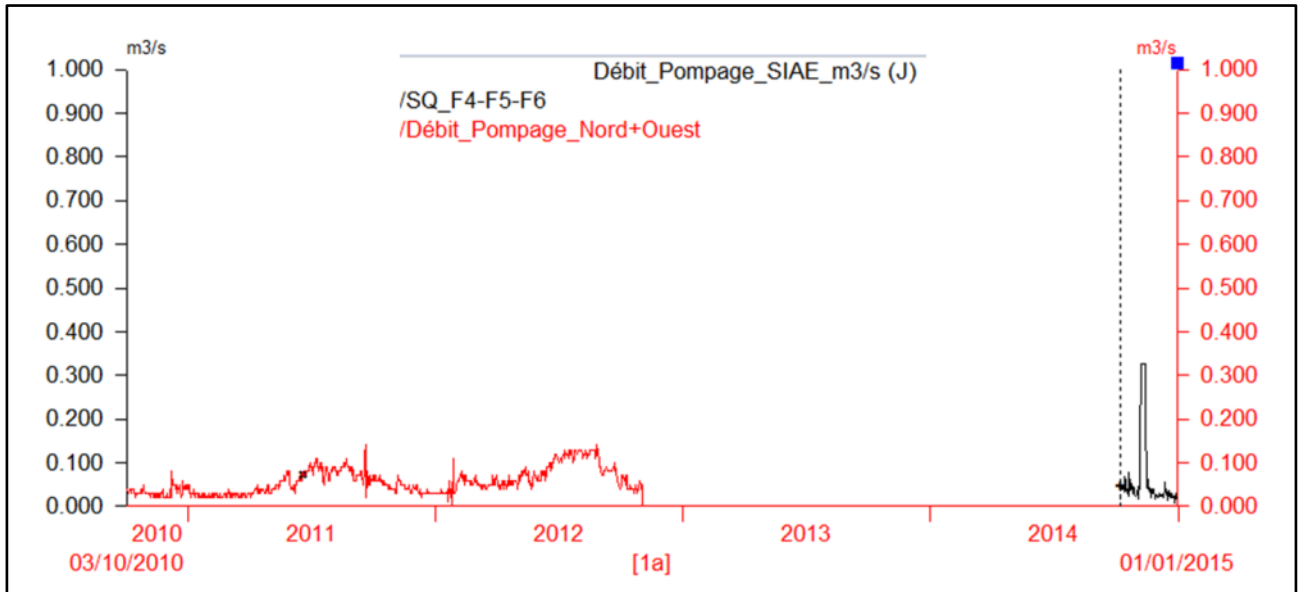


Illustration 13 - Chroniques du débit de pompage (débit cumulé, moyenne journalière) sur la période du 03/10/2010 au 01/05/2015) du SIAE (aquifère profond du Muschelkalk)

Pour les besoins de l'approche de modélisation mise en œuvre avec le logiciel GARDENIA (voir paragraphe 3.2 ci-dessous), les lacunes de données de débits de prélèvements (fin 2012 à octobre 2014) ont été estimées sur la base des prélèvements moyens de la période d'octobre 2010 à octobre 2012 (Illustration 14).

L'illustration 13 présente l'évolution des chroniques de pompages réalisés par le SIAE depuis 2009 (graphique du haut) et par la commune de Vidauban (graphique du bas) depuis 2005. Ces prélèvements concernent l'aquifère superficiel des tufs au niveau de la source des Avens (Débit Astros) et concernent également l'aquifère profond du Muschelkalk.

Sur l'illustration 15 est reportée l'évolution des débits pompés au forage V1 dans l'aquifère profond du Muschelkalk. Au cours de l'essai de pompage (du 06 au 14/11/2014), le pompage a été de 0,1 m³/s (375 m³/h). Dans les tufs, au niveau de la source des Avens, le prélèvement à la source a été de 0,04 m³/s (154 m³/h) au cours de l'essai de pompage (du 06 au 14/11/2014).

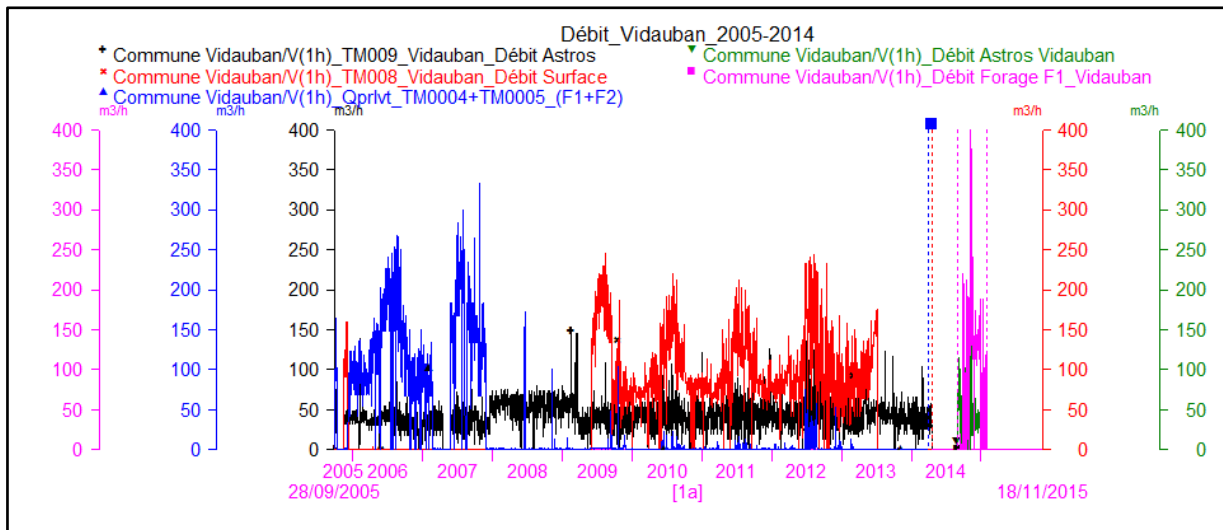
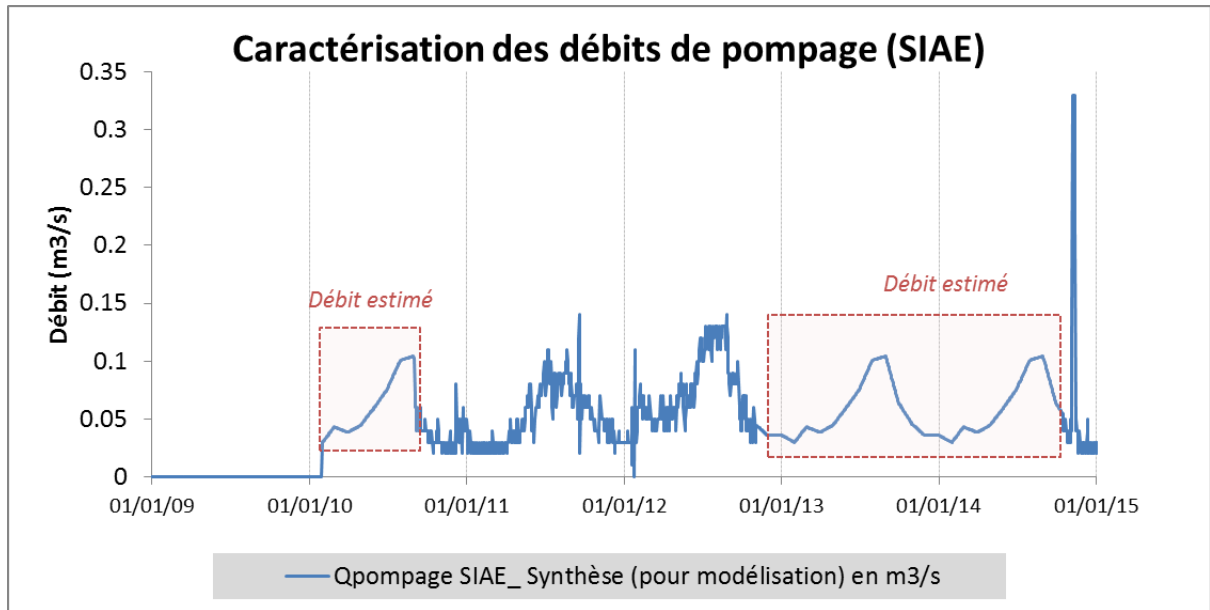
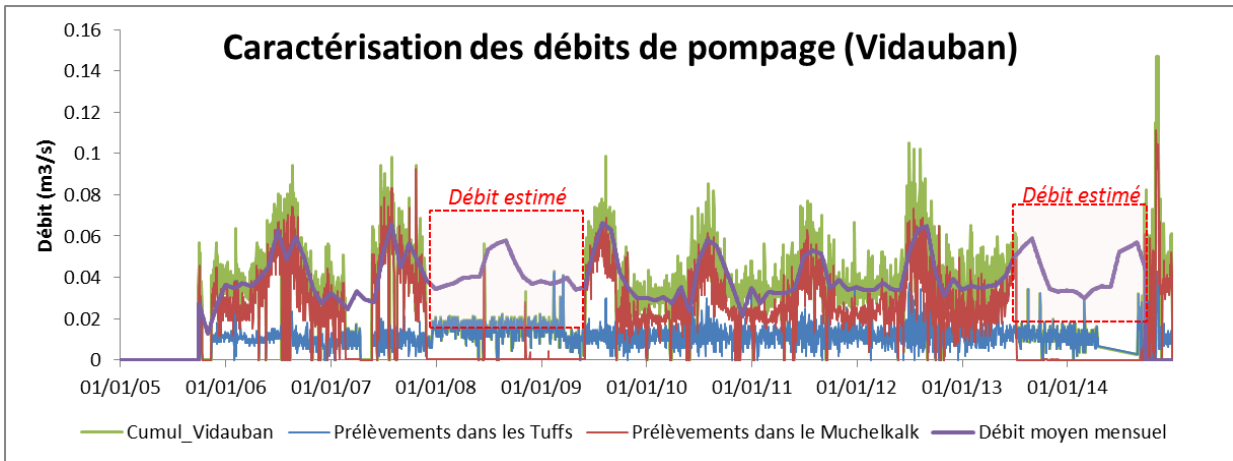
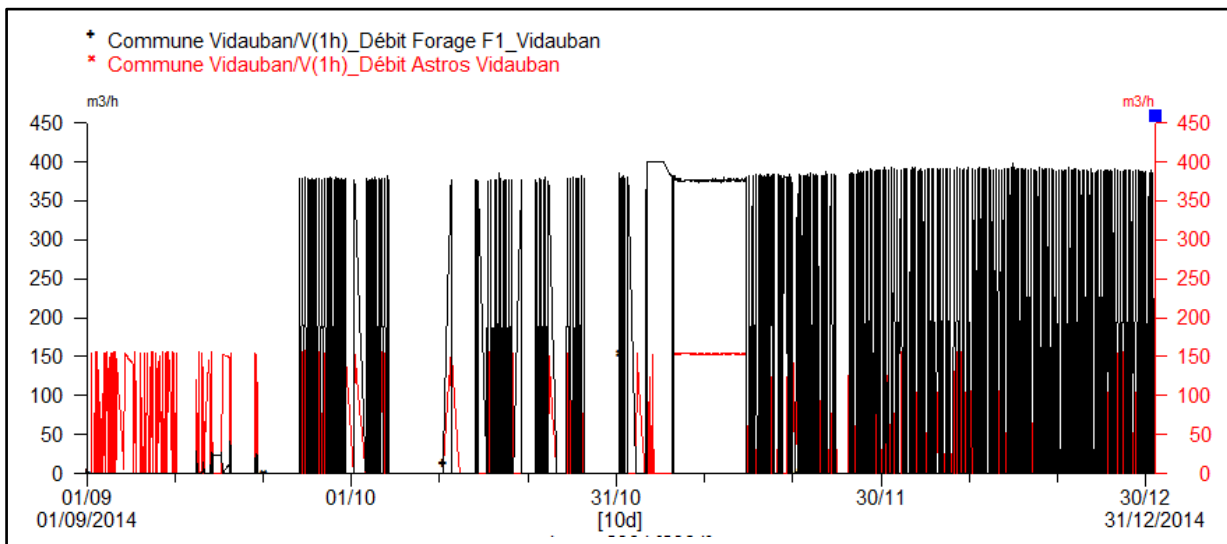


Illustration 14 - Chroniques de pompage (moyenne journalière) du SIAE et de la commune de Vidauban.



Chroniques de pompage de la commune de Vidauban (la chronique "Cumul_Vidauban" a été considérée pour les besoins de la simulation GARDENIA).



Chroniques de pompage de la commune de Vidauban du 01/09/2014 au 31/12/2014) dans l'aquifère profond du Muschelkalk (Forage F1) et dans les tufs au niveau de la source des Avens (Débit Astros).

Illustration 15 - Chroniques de pompages dans le champ captant de Vidauban (Commune de Vidauban).

3.1.2. Données piézométriques

Pour les besoins de l'étude, le SIAE a équipé le forage F4 d'un enregistreur piézométrique. Cet ouvrage avait été suivi dans le passé (2010-2012). L'illustration 16 présente l'évolution de la piézométrie moyenne journalière mesurée au forage F4 depuis 2010.

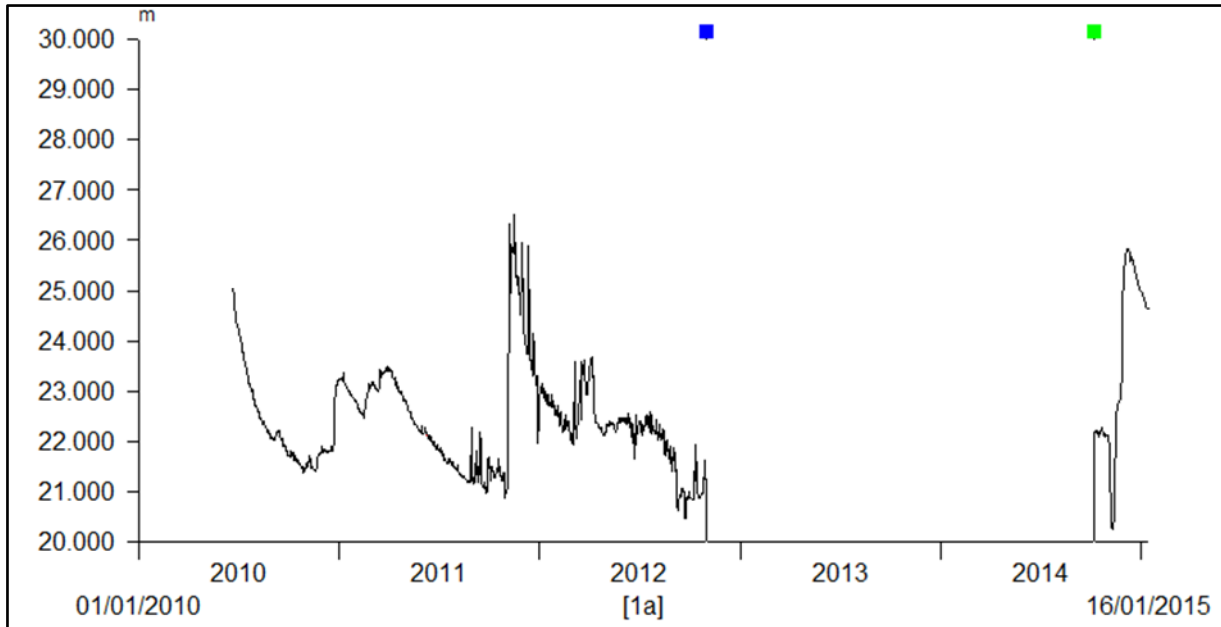


Illustration 16 - Chronique piézométrique du forage F4-SIAE (hauteur d'eau mesurée au-dessus du capteur, moyenne journalière) du 18/06/2010 au 16/01/2015 (aquifère profond du Muschelkalk)

L'illustration 17 présente les évolutions piézométriques mesurées entre le 29/01/2014 et le 20/06/2015.

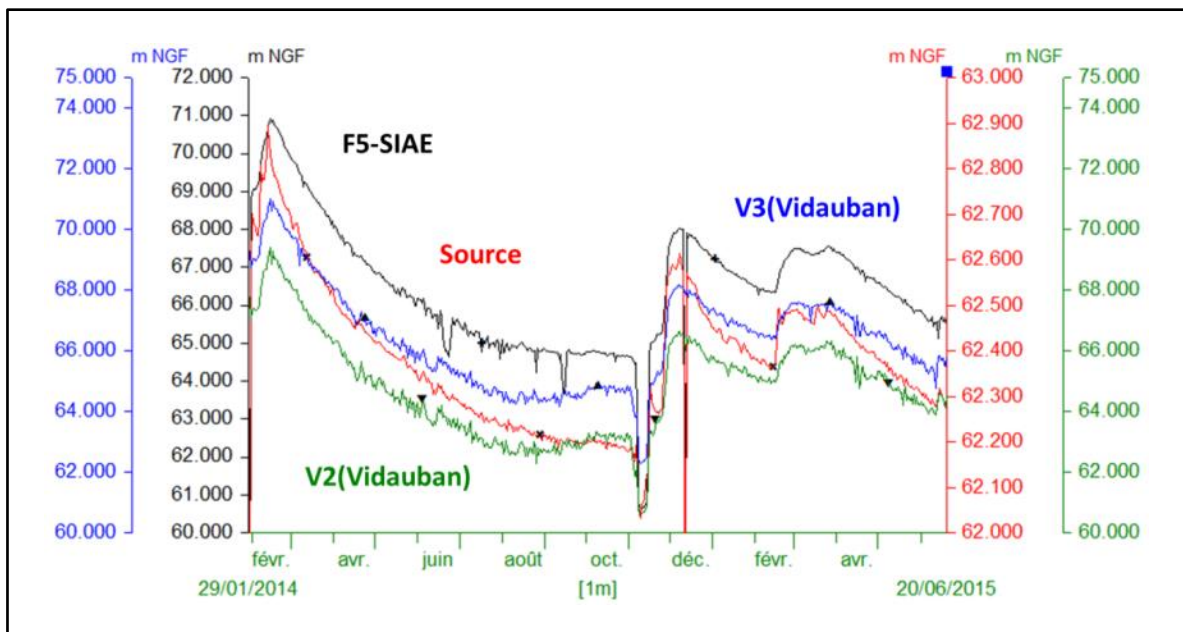


Illustration 17 - Evolution de la piézométrie mesurée (moyenne journalière) du 29/01/2014 au 20/06/2015.

Les variations piézométriques de l'aquifère profond du Muschelkalk mesurées dans les ouvrages F5, V2 (Vidauban) et V3 (Vidauban) présentent des évolutions comparables, les amplitudes piézométriques entre les périodes de hautes et basses eaux sont de l'ordre de 6 m. La piézométrie de la source présente globalement la même évolution temporelle que celle mesurée dans l'aquifère profond du Muschelkalk. Toutefois, les amplitudes entre les périodes de hautes et basses eaux sont nettement plus faible, de l'ordre de 0,6 m (10 fois plus faible).

On montre ainsi que la charge hydraulique dans l'aquifère profond est globalement supérieure à celle de la source située dans les tufs ce qui dénote l'existence d'une drainance verticale ascendante (cela apparaît bien visible dans l'illustration 17).

L'illustration 18 présente l'évolution des débits horaires de pompage et la piézométrie horaire mesurée dans les ouvrages au cours de l'essai de pompage de 2014. L'illustration 19 permet d'établir une comparaison des différentes charges hydrauliques mesurées avant, pendant et après l'essai de pompage du mois de novembre 2014. Elle permet également de visualiser les niveaux d'eaux mesurés au barrage en 2014. Au cours de l'essai de pompage à 0,43 m³/s (cumul des prélèvements de l'aquifère profond du Muschelkalk), on observe que la charge hydraulique dans l'aquifère profond du Muschelkalk devient inférieure à celle mesurée dans les tufs (source), ce qui dénoterait une inversion du gradient de charge par rapport à la situation d'avant pompage à 0,43 m³/s.

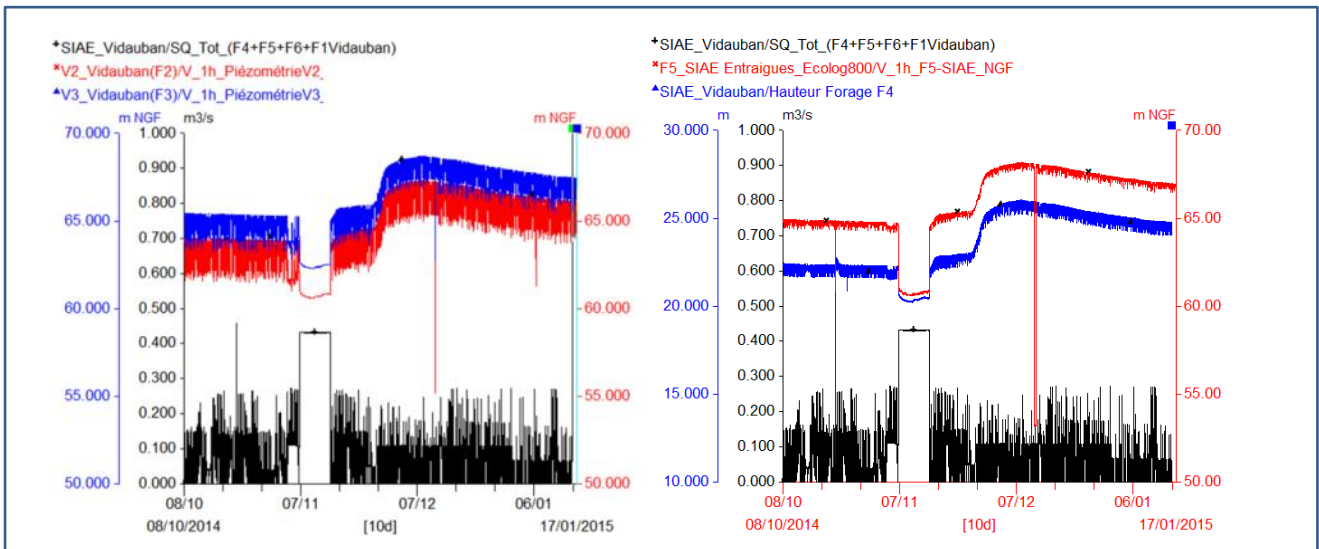


Illustration 18 - Evolution de la piézométrie mesurée (forages de la commune de Vidauban et forages du SIAE) et du débit total pompé du 08/10/2014 au 17/01/2015.

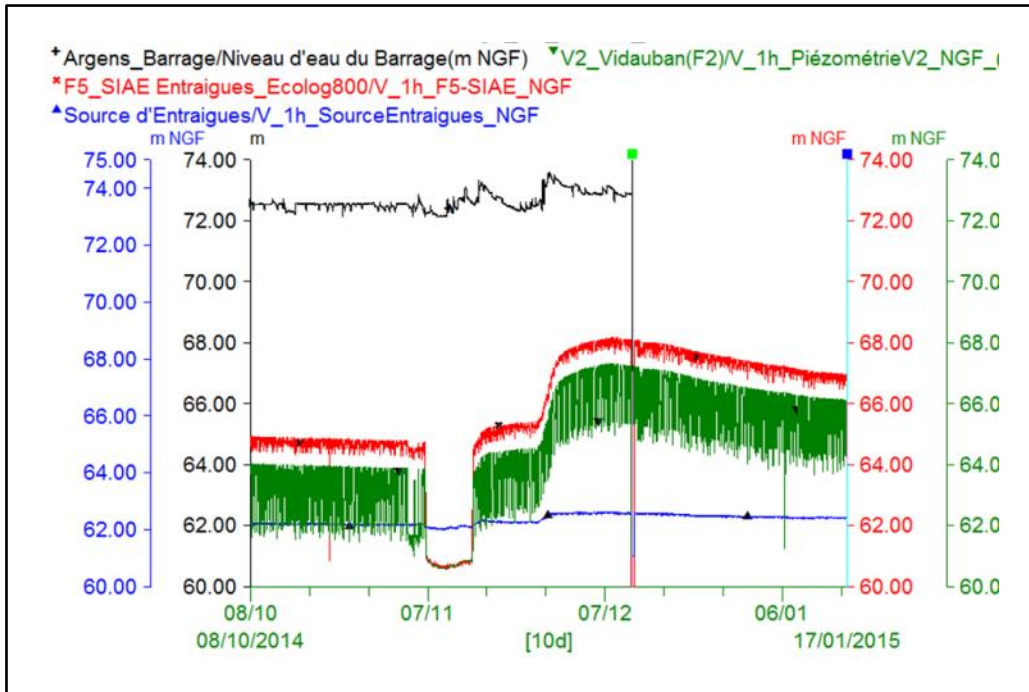


Illustration 19 - Evolution de la piézométrie mesurée dans le forage F5-SIAE, le forage V2-Vidauban et la source (période du 08/10/2014 au 17/01/2015). L'évolution de la cote du plan d'eau du barrage est également reportée.

Pour les besoins de l'approche de modélisation mise en œuvre avec le logiciel GARDENIA (voir paragraphe 3.2 page 51), une chronique synthétique de l'évolution de la charge hydraulique au sein du Muschelkalk a été constituée (Illustration 20) à partir des chroniques du forage F1 de Vidauban, du forage F4 du SIAE et du Forage F5 (suivi BRGM, ce projet).

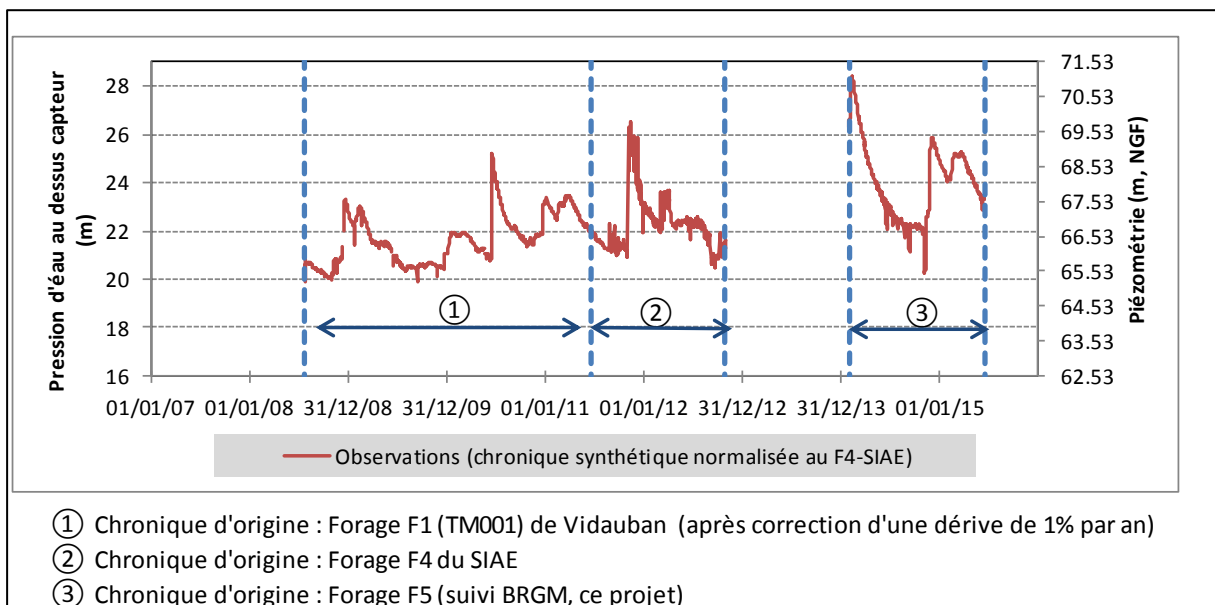


Illustration 20 - Chronique piézométrique synthétique de l'aquifère du Muschelkalk.

3.1.3. Contexte d'émergence et estimation des débits naturels

L'Argens en amont immédiat du site d'Entraigues fait l'objet d'un aménagement hydro-électrique. Le barrage actuel est installé sur un seuil naturel recouvert de tufs. Ce barrage maçonné de type poids recouvre le tuf sur une hauteur de 4,5 m par rapport au terrain naturel. Ce barrage court-circuite le cours de l'Argens sur une longueur de 500 m, les eaux turbinées étant restituées à l'Argens à l'aval immédiat de l'usine.

Ce tronçon de l'Argens court-circuité est alimenté par des résurgences karstiques :

- en pied de barrage (débit constant d'environ 300l/s d'après l'avis de l'autorité environnementale pour le projet de renouvellement d'autorisation de la centrale hydroélectrique d'Entraigues sur l'Argens du 14/12/2012)
- par la source des Avens, en aval du champ captant
- et dans une moindre mesure, par la source de la grotte St-Michel.

Cette alimentation karstique confère à ce tronçon une qualité de l'eau aux caractéristiques physico-chimiques et biologiques spécifiques, avec une constance des débits remarquables pour un milieu karstique.

Dans le cadre du projet, 3 campagnes de jaugeages des sources d'Entraigues, à savoir les venues d'eau sous le barrage et la source des Avens ont été programmées les 17/07/2014, 02/10/2014 et 18/06/2015 dans le but de couvrir différentes conditions hydrogéologiques. Dans le cadre du projet, trois campagnes de jaugeages des « sources d'Entraigues » (à savoir les venues d'eau sous le barrage et la source des Avens) ont été réalisées les 17/07/2014, 02/10/2014 et 18/06/2015 dans le but de couvrir différentes conditions hydrogéologiques.

Les sections à jauger étant naturelles, la méthode retenue est celle du jaugeage par dilution de traceur fluorescent, le suivi étant réalisé par un fluorimètre de terrain de type GGUN-FL24, dont le principe est présenté dans la note en annexe 5 de ce rapport.

L'injection d'une masse connue de traceur permet de calculer le débit de l'eau ayant emporté le nuage de traceur tel qu'il est mesuré par le fluorimètre. Cette méthode suppose notamment que le traceur utilisé soit conservatif, et que la condition de bon mélange soit respectée afin que la position du fluorimètre n'influence pas le résultat.

L'utilisation d'Uranine est justifiée pour ce type d'expérience compte tenu de son faible impact éco-toxicologique (OFEV, 2002), de ses bonnes propriétés de mobilité et de la possibilité de contrôler visuellement la condition de bon mélange lors de l'opération.

En l'absence de déversement du barrage (17/07/2014) ou en présence d'un débit de déversement négligeable (18/06/2015), deux sites de jaugeages ont été choisis : un dans le cours de l'Argens en aval du barrage afin d'estimer les apports d'eau souterraine sous le barrage, et l'autre en aval immédiat de la cascade en aval du champ captant pour jauger le débit de la source des Avens (Illustration 21). Il n'a pas été possible de jauger ces sources le 02/10/2014 en raison d'un débit de surverse du barrage trop élevé pour traverser l'Argens et atteindre la cascade de la source des Avens.

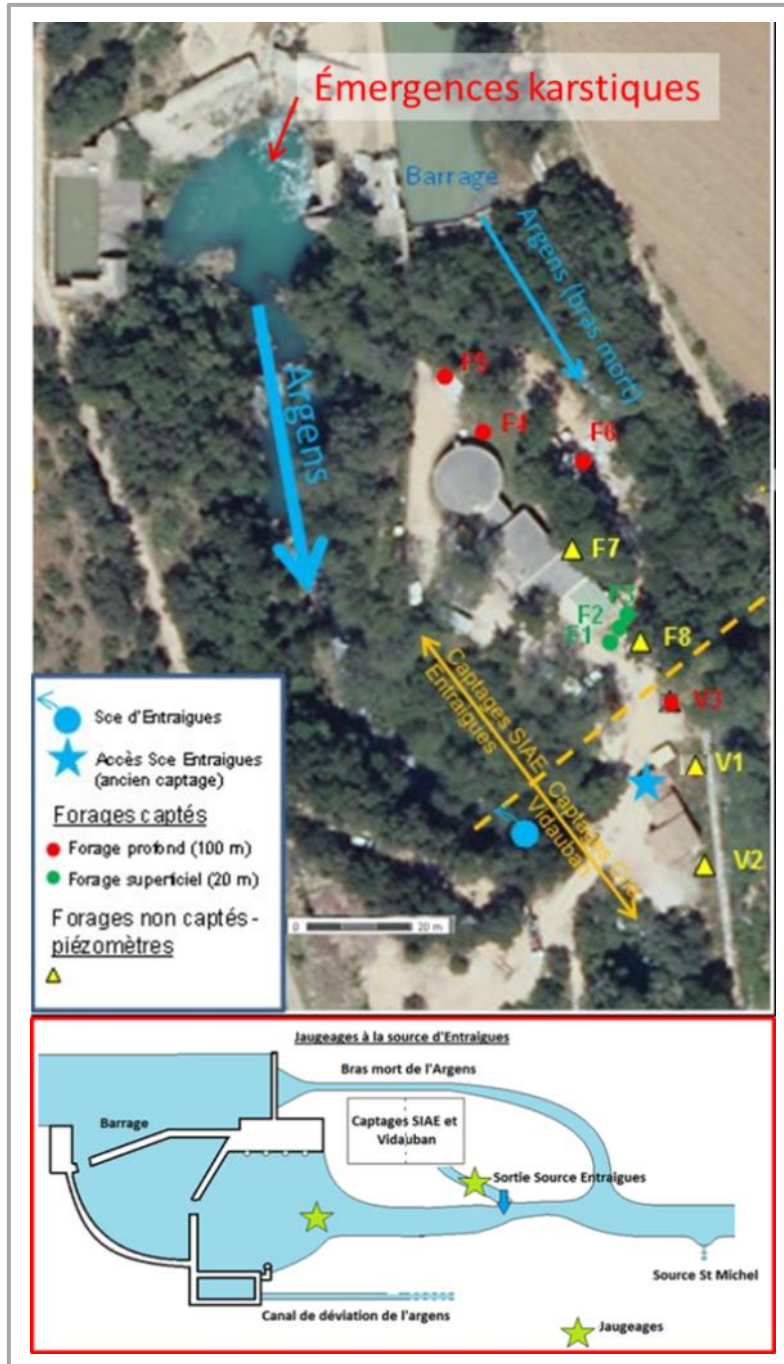


Illustration 21 - Schéma descriptif et localisation des sites de jaugeage.

Le 17/07/2014, il a été vérifié par mesure de la conductivité de l'eau que les eaux drainées sous le barrage (1111 $\mu\text{S}/\text{cm}$) étaient très proches de celles de la source des Avens (1052 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et de la grotte St-Michel (1023 $\mu\text{S}/\text{cm}$), et se démarquaient des eaux de l'Argens en amont du barrage (1443 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Ceci confirme que les eaux drainées sous le barrage ont une origine souterraine, et non une recirculation des eaux de l'Argens.

Les résultats obtenus pour les 2 campagnes de jaugeages sont reportés dans le tableau de l'illustration 22, les courbes de dilution de traceur étant reportées en annexe 6 de ce rapport.

Date	Site de jaugeage	m(g)	Q (l/s)	Incertitude type	IC 95%	
17/07/2014	Source des Avens	2.36	523	35	147	
		1.59	481	36		
		1.46	627	49		
		544				
	Source en aval du barrage	5.17	492	28		41
		1.95	503	35		
1.83		463	33			
	Total source d'Entraigues		1030		188	
18/06/2015	Source des Avens	1.33	510	41		
	Source en aval du barrage	1.54	466	35		
	Total source d'Entraigues		976		76	

Illustration 22 - Résultats des jaugeages des sources d'Entraigues.

Ces résultats sont comparés aux suivis piézométriques mis en place dans la vasque en amont de la cascade de la source des Avens (Illustration 23).

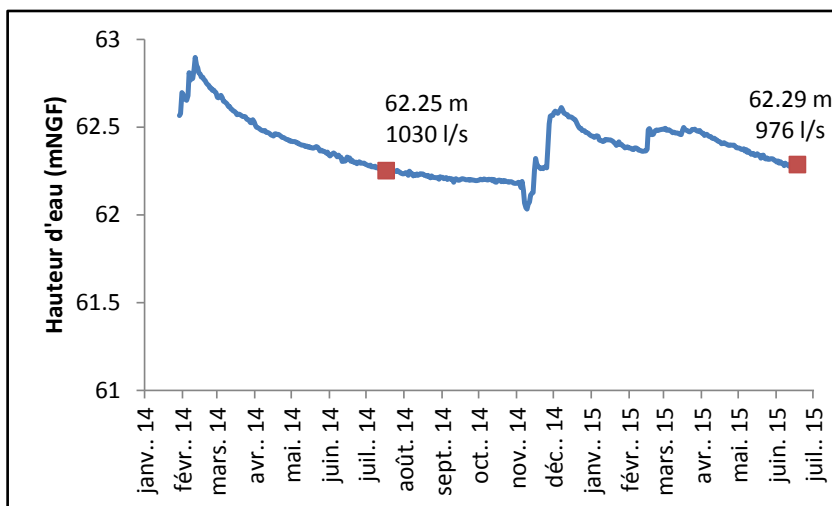


Illustration 23 - Comparaison des suivis piézométriques sur la source des Avens (moyenne journalières) et des résultats cumulés des jaugeages des venues d'eau sous le barrage et de la source des Avens.

Les débits jaugés correspondent au débit d'étiage des exutoires souterrains, de l'ordre de 1 m³/s en cumul. La précision obtenue par cette méthode de jaugeage ne permet pas de discuter de la différence observée pour des niveaux d'eau qui ne diffèrent que de 4 cm dans la vasque entre ces deux dates. Il n'est donc pas possible d'extrapoler ces données pour évaluer

le débit des émergences souterraines lorsque le niveau d'eau dans la vasque s'approche de 63 m NGF.

Signalons que le débit (source + apports des émergences) a été mesuré à 0,77 m³/s le 02/02/1964 d'après les informations de la littérature.

3.2. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE A L'AIDE DU LOGICIEL GARDENIA

3.2.1. Présentation de l'approche de modélisation

Le modèle **GARDENIA** (modèle **G**lobal **A** Reservoir pour la simulation des **DE**bits et des **NI**veaux **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 peut être, 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 (Illustration 24) :

- 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.

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 déduit *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'observations (chroniques 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, 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 (Thiéry, 2014).

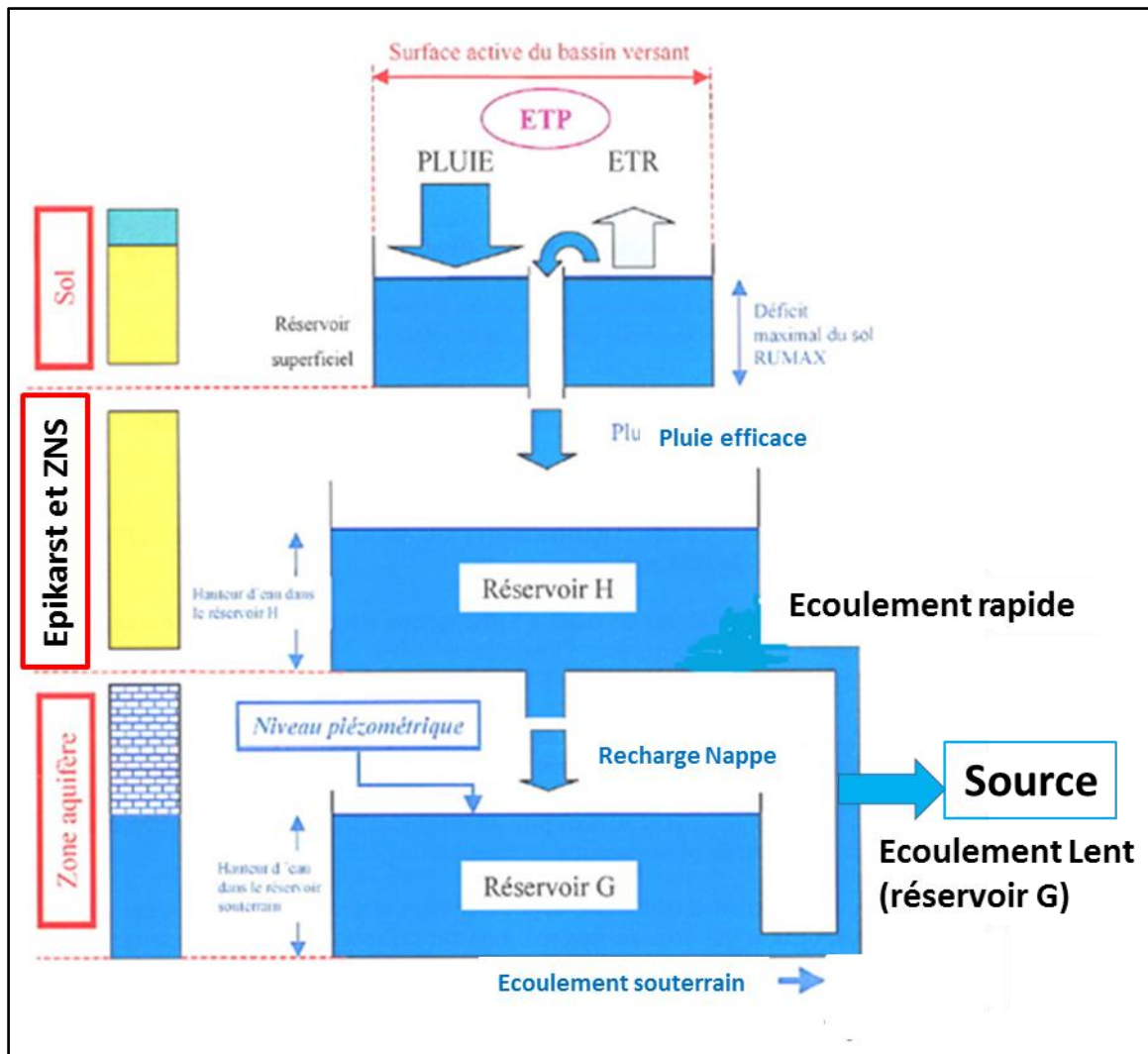


Illustration 24 - Schématisation hydrogéologique adopté pour décrire le fonctionnement hydrogéologique du site d'Entraigues

3.2.2. Données utilisées pour la modélisation

Données d'entrées

Les données journalières d'évapotranspiration potentielle et de précipitations sont issues d'une pondération surfacique des données Météo-France des mailles SAFRAN n° 8969 à 8972 et 9055 à 9058 correspondant à l'emprise sur la zone d'étude définie par les calcaires du Muschelkalk et les bassins versants des cours d'eau temporaires qui contribuent ponctuellement à alimenter le Muschelkalk (Illustration 25). La surface totale considérée est de 105 km² dont 76 km² pour les calcaires du Muschelkalk (en orange sur la carte).

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

$$F(p) = [1,008 \cdot PI(8969) + 16,3 \cdot PI(8970) + 31,899 \cdot PI(8971) + 1,87 \cdot PI(8972) + 2,272 \cdot PI(9056) + 39,257 \cdot PI(9057) + 12,443 \cdot PI(9058)] / 105,049$$

La même pondération est utilisée pour l'ETP.

Des éléments de statistiques descriptives de la pluie sur la période 1959-2014 sont présentés en annexe 7 de ce rapport. Sur la période considérée, le cumul annuel de la précipitation est compris entre 358 mm et 1404 mm, la médiane et la moyenne sont estimées à 850 mm. Concernant la période récente, les années 2003 à 2007 sont déficitaires en précipitation, les

années 2008 à 2014 sont excédentaires en précipitations, par rapport à la moyenne sur la période 1964-2014.

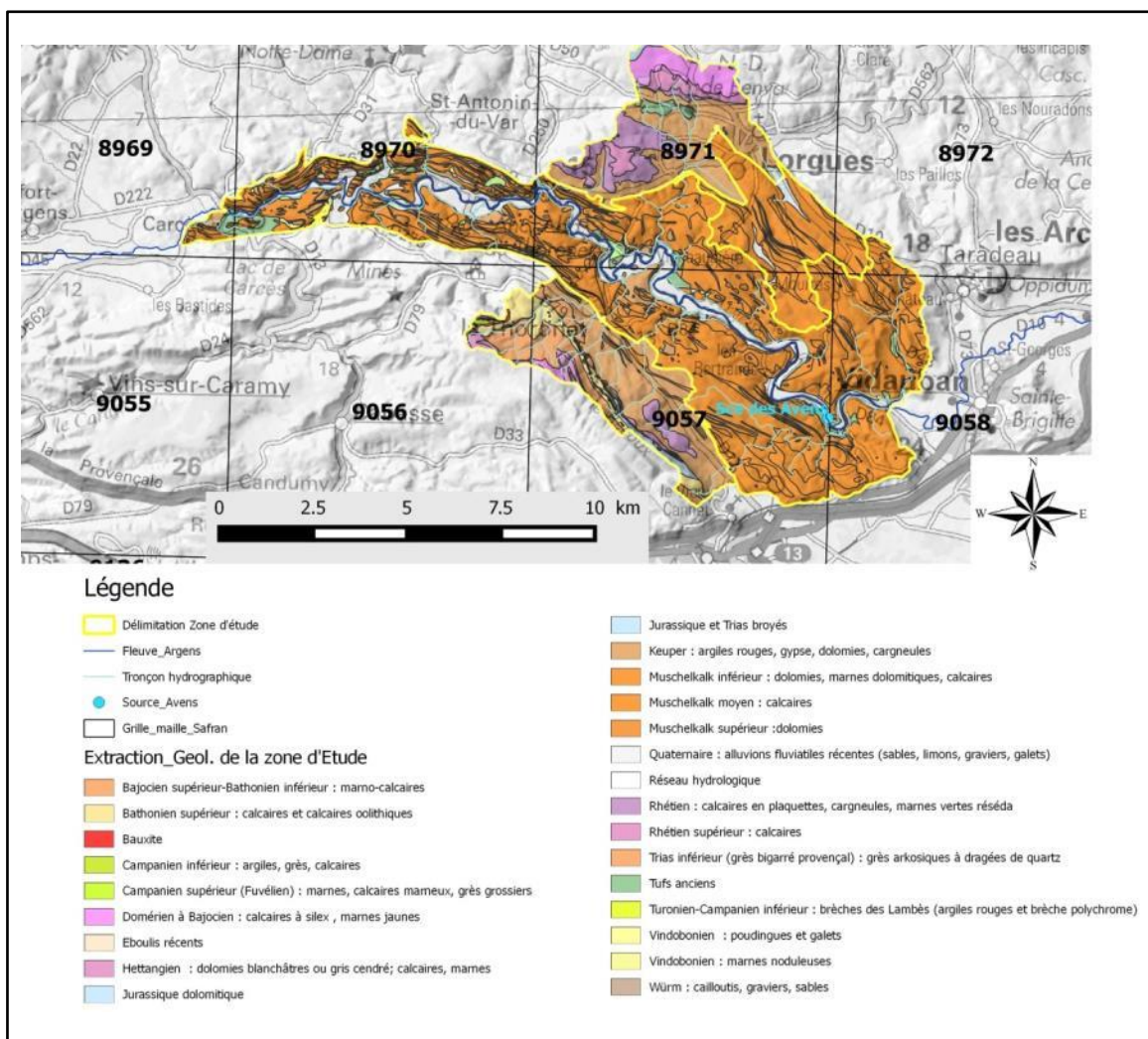


Illustration 25 - Emprise des mailles SAFRAN sur la zone d'étude (105 km²), extrait carte géologique harmonisée au 1/50.000 du BRGM, fond IGN 100000.

Les données de prélèvements disponibles ont été décrites précédemment (cf. paragraphe 3.1.1). La chronique de pompage considérée dans la modélisation (Illustration 26) correspond au débit cumulé de pompage de la commune de Vidauban et du SIAE.

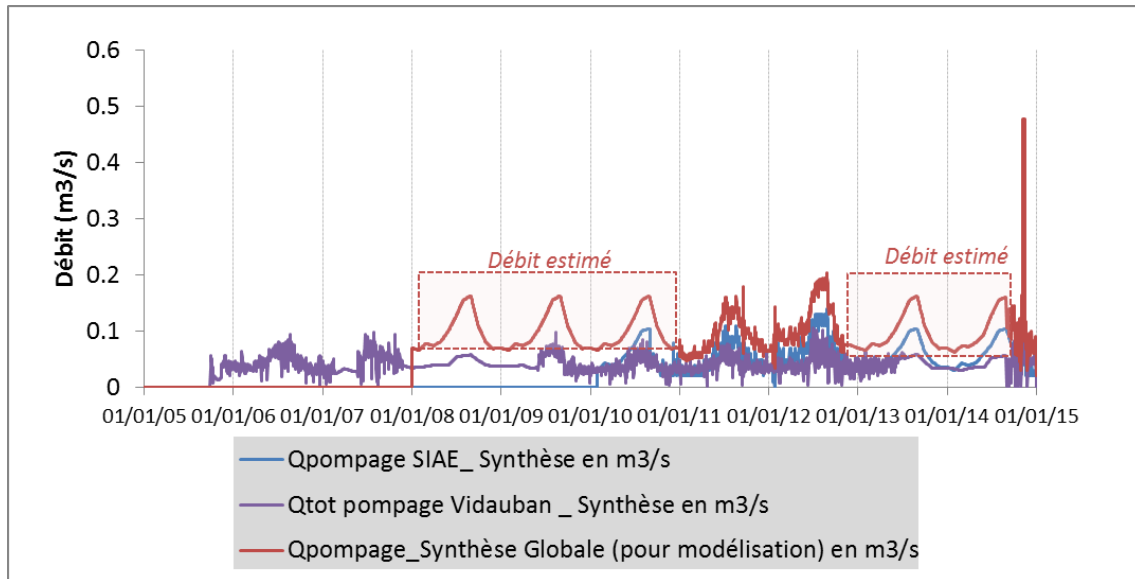


Illustration 26 - Chronique de pompage utilisée dans la modélisation GARDENIA

Données de sortie

Le modèle a été calibré sur la chronique piézométrique synthétique de l'aquifère du Muschelkalk (Illustration 20 en page 47) précédemment caractérisé (cf. paragraphe 3.1.2) et sur les débits ponctuels mesurés en 1964, 2014 et 2015 (3 valeurs, cf. paragraphe 3.1.3).

3.2.3. Examen des résultats de modélisation

La modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème qualifié à l'aide de la piézométrie, des débits ponctuels de la source et du prélèvement global sur la ressource (cumul de tous les pompages) a été réalisée sur la période 2008-2014. Dans cette modélisation, l'aquifère est considéré comme un seul ensemble, aucune distinction n'est faite entre le réservoir du Muschelkalk et le réservoir des tufs. Les différents paramètres ont été estimés par la procédure de calage automatique du logiciel.

Les résultats de modélisation obtenus pour la piézométrie et le débit sont présentés sur l'illustration 27 et les paramètres dans le tableau de l'illustration 29. Le critère de Nash sur le niveau piézométrique est de 0,73. Le critère de Nash sur les débits est de 0,82. Le critère de Nash Global (calculé par pondération entre les coefficients de corrélation du débit et du niveau) est de 0,77. C'est ce coefficient qui a été maximisé par le calage automatique. L'allure de la piézométrie simulée et le Nash Global sur la période 2008-2014 sont jugés satisfaisants ce qui permet une discussion des résultats. Les résultats présentés pour la période antérieure à 2008 sont donnés à titre indicatif. Ils permettent d'illustrer l'évolution de la piézométrie et du débit de la source en absence de pompage (calculés à partir des paramètres du modèle). Les paramètres du modèle obtenus par calage automatique sont rassemblés dans l'illustration 29.

La superficie du bassin d'alimentation de la source n'a pas été imposée car il subsiste des doutes quant à la délimitation de l'impluvium en raison notamment d'une mauvaise connaissance des apports par les eaux de surface au niveau des zones de pertes, et en particulier sur la contribution de l'Argens. La superficie estimée par le modèle est de 67 km² environ, soit une valeur comparable à la surface des calcaires affleurant du Muschelkalk (76 km²). Compte tenu de la valeur très élevée du paramètre "RUI_PERCO" (paramètre de répartition Ruissellement-percolation), les résultats indiquent que la presque quasi-totalité de la

pluie efficace précipitée sur la superficie de 67 km² contribue à la recharge, la part de l'écoulement rapide étant négligeable. Dans ce contexte, aucun ruissellement ne pourrait se produire sur les calcaires du Muschelkalk ce qui apparaît peu vraisemblable notamment lors des épisodes de pluie de forte intensité.

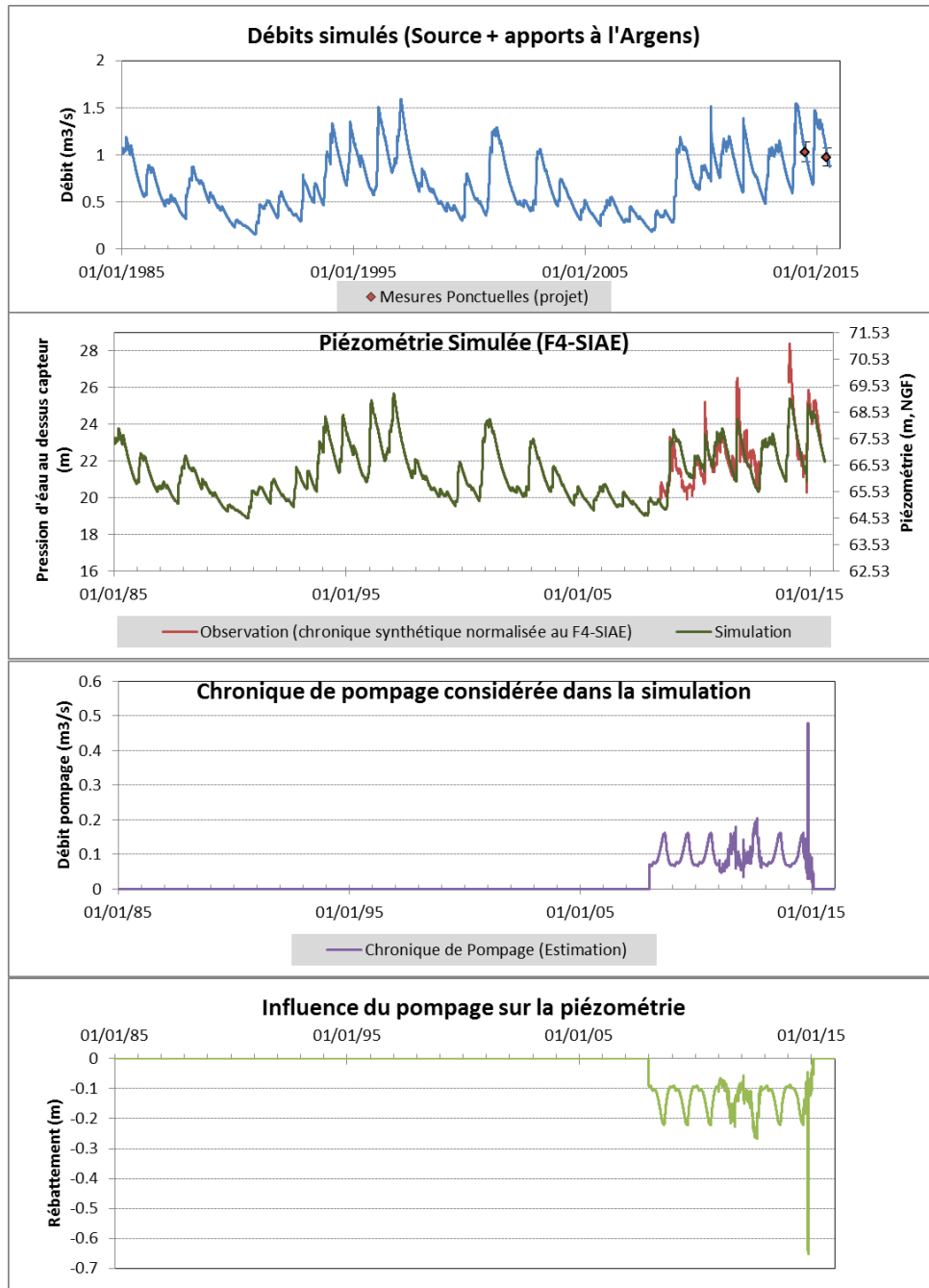


Illustration 27 - Evolution de la piézométrie et des débits simulés par le modèle GARDENIA sur la période 2008-2014. L'influence du pompage sur la piézométrie de l'aquifère est également reportée. Les évolutions reportées avant 2008 ont été calculées par le modèle en absence de pompage.

Dans ce contexte, la superficie de 67 km² calculée par le modèle permet juste de fixer l'ordre de grandeur de la borne inférieure de l'impluvium du système d'Entraigues dans un contexte où la recharge est égale à la pluie efficace. Etant entendu qu'une partie de la pluie efficace contribue

à générer des ruissellements lors des crues, la superficie du bassin d'alimentation de la source est donc supérieur à 67 km². Ce modèle ne permet pas non plus de discuter du rôle joué par les apports des eaux de surface et par les pertes de l'Argens notamment.

Le coefficient d'emménagement apparent global de l'aquifère est de $7,78 \cdot 10^{-2}$, cette valeur globale pour l'aquifère est intermédiaire entre les valeurs calculées pour le Muschelkalk ($5,5 \cdot 10^{-3}$) et pour les tufs (0,35).

Le temps de demi-percolation (T1/2_PERCO) est très faible (0,03814 mois, soit 1,14 jours) ce qui dénote un transfert rapide de la recharge en direction de l'aquifère comme le témoigne également la réponse impulsionnelle de l'aquifère (Illustration 30).

Le temps de demi-tarissement (T1/2_Tari) est de plus de 6 mois ce qui dénote une forte inertie de l'aquifère, la réponse théorique de l'aquifère à 100 mm de recharge se fait sentir sur près de 1000 jours (Illustration 30). L'évolution piézométrique théorique de l'aquifère apparaît quasi linéaire dans les 100 premiers jours qui suivent un épisode de recharge.

Les temps de demi-réaction et de demi-stabilisation au pompage sont très faibles (<1 jour) ce qui indique le caractère captif de la nappe. L'influence du pompage sur les variations piézométriques apparaît faible (quelques dizaines de centimètres). La réponse théorique maximale de l'aquifère à un pompage de 1 m³/s pendant 1 jour est évaluée à 0,9 m au piézomètre d'observation (Illustration 28).

A titre d'information, et dans le but de fixer les ordres de grandeur des débits de la source, nous présentons l'évolution calculée par le modèle en fonction de la recharge (Illustration 31). Les débits de la source seraient compris entre 0,15 m³/s et 1,6 m³/s, le débit moyen serait de 0,68 m³/s. Les éléments de statistiques descriptives de la recharge sont présentés en annexes 4 et 8, la recharge moyenne est estimée à 310 mm [1963-2014] comme le montre le tableau de l'illustration 10 en page 36.

Les résultats de la simulation indiquent qu'en période d'année déficitaire en précipitation (années 2003 à 2007), le débit de la source serait faible, de l'ordre de 0,46 m³/s en moyenne. En période d'années excédentaires en précipitation (années 2008 à 2014), le débit de la source serait de l'ordre de 0,86 m³/s en moyenne.

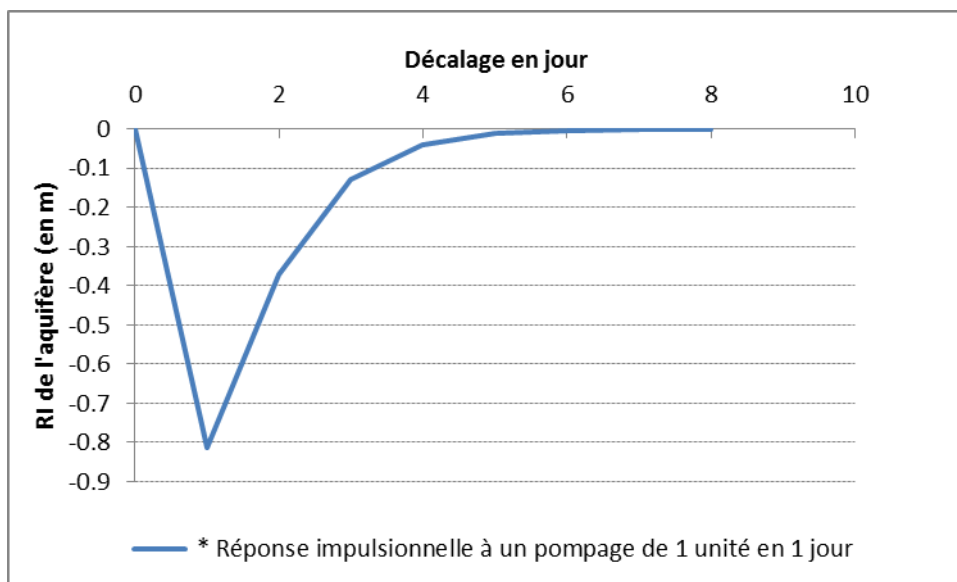


Illustration 28 - Réponse impulsionnelle globale de l'aquifère à un pompage de 1 m³/s en un jour

Nom	Bassin	Entraigues_Muchelkack & Tufts		Descriptif
Superficie	km2	66.842	calage automatique	c'est la superficie du bassin versant. 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.
Débit_extér	m3/s	0		Débit extérieur (Qext) éventuel. Ce débit extérieur est non contrôlé 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	-	7.78E-02	calage automatique	Coefficient d'emmagasinement équivalent de la nappe. C'est le coefficient d'emmagasinement apparent global de la nappe
Niv_Base	m	18.113	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
Corr_Pluv	%	0		Coefficient de correction de la pluie
Corr_ETP	%	0		Coefficient de correction de le ETP
Rsup_Progr	mm	128.429	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	9997.7	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	0.03814	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	6.554	calage automatique	Temps de ½ tarissement souterrain. C'est le temps au bout duquel, en absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par 2.
F_Pom_Nap	-	-1.366	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	1.49E-02	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	1.60E-02	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
Compte tenu de la valeur, il n'y a pas de ruissellement, tout s'infiltr				

Illustration 29 - Paramètres du modèle GARDENIA

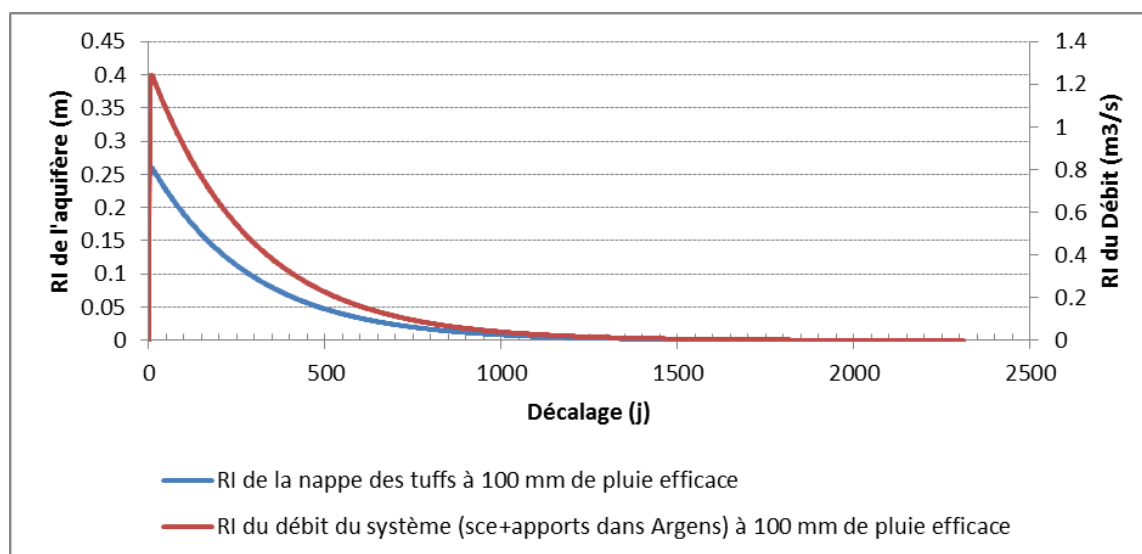


Illustration 30 - Réponses impulsionnelles globales de l'aquifère à une recharge de 100 mm (piézo. et débit).

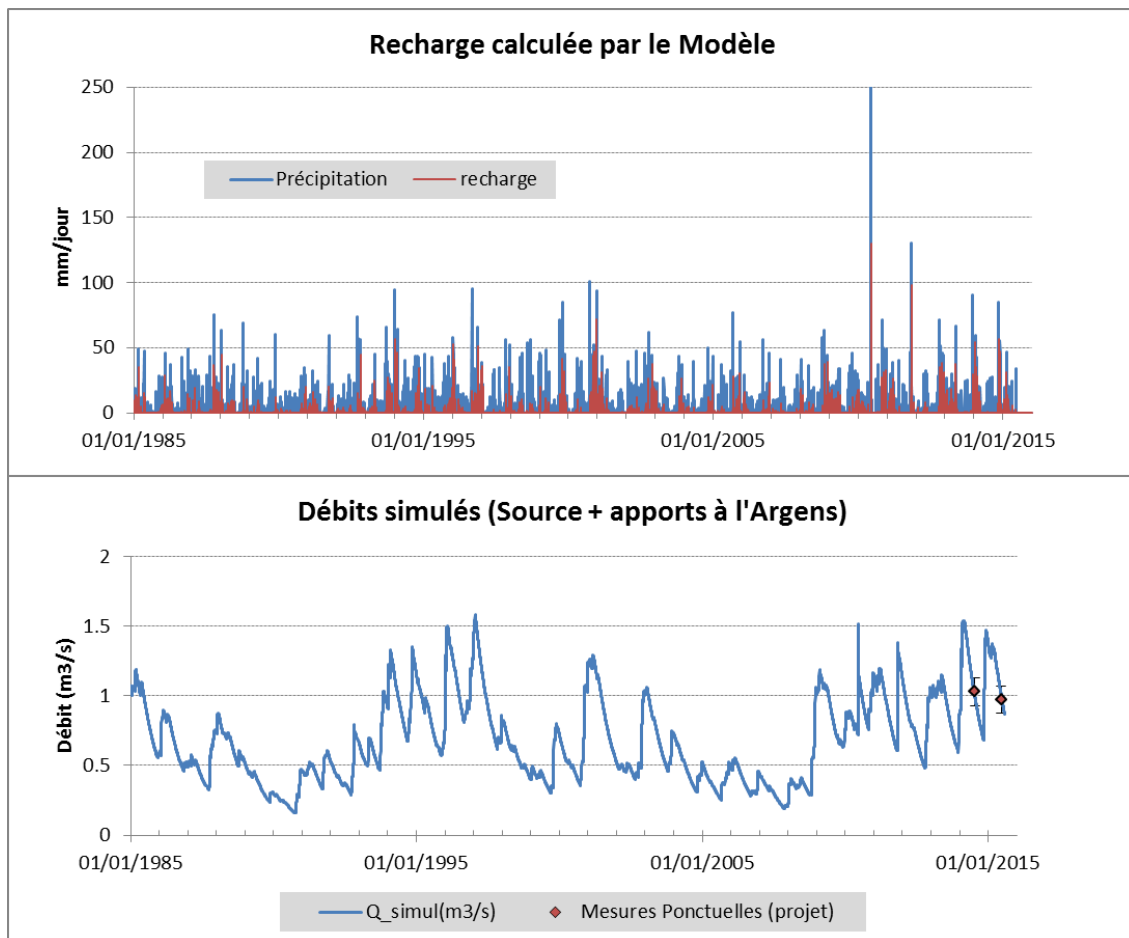


Illustration 31 - Evolution de la recharge et des débits simulés par le modèle GARDENIA.

3.3. BILAN DES DONNEES HYDROCHIMIQUES DISPONIBLES ET ACQUISES DANS LE PROJET

Dans la perspective de l'amélioration de la connaissance sur la structure et le fonctionnement du système aquifère, depuis l'échelle locale (source, forage) jusqu'à l'échelle régionale (unité hydrogéologique alimentant la source d'Entraigues), une caractérisation des différents réservoirs d'eau (aquifère superficiels, profonds, cours d'eau) a été réalisée dans le but de préciser l'importance et la nature des phénomènes de mélange entre ces réservoirs, voire d'une éventuelle pollution géogénique ou anthropique. Cette étude s'est appuyée sur les données historiques des points d'eau AEP du secteur d'étude (analyse en première adduction, suivis réglementaires de l'ARS, etc.) et sur les données "qualité" de l'Agence de l'Eau RM&C concernant les eaux de surface du secteur d'étude et de l'Argens en particulier. L'acquisition de données par l'intermédiaire des trois campagnes spatiales d'échantillonnage a permis de compléter le jeu de données.

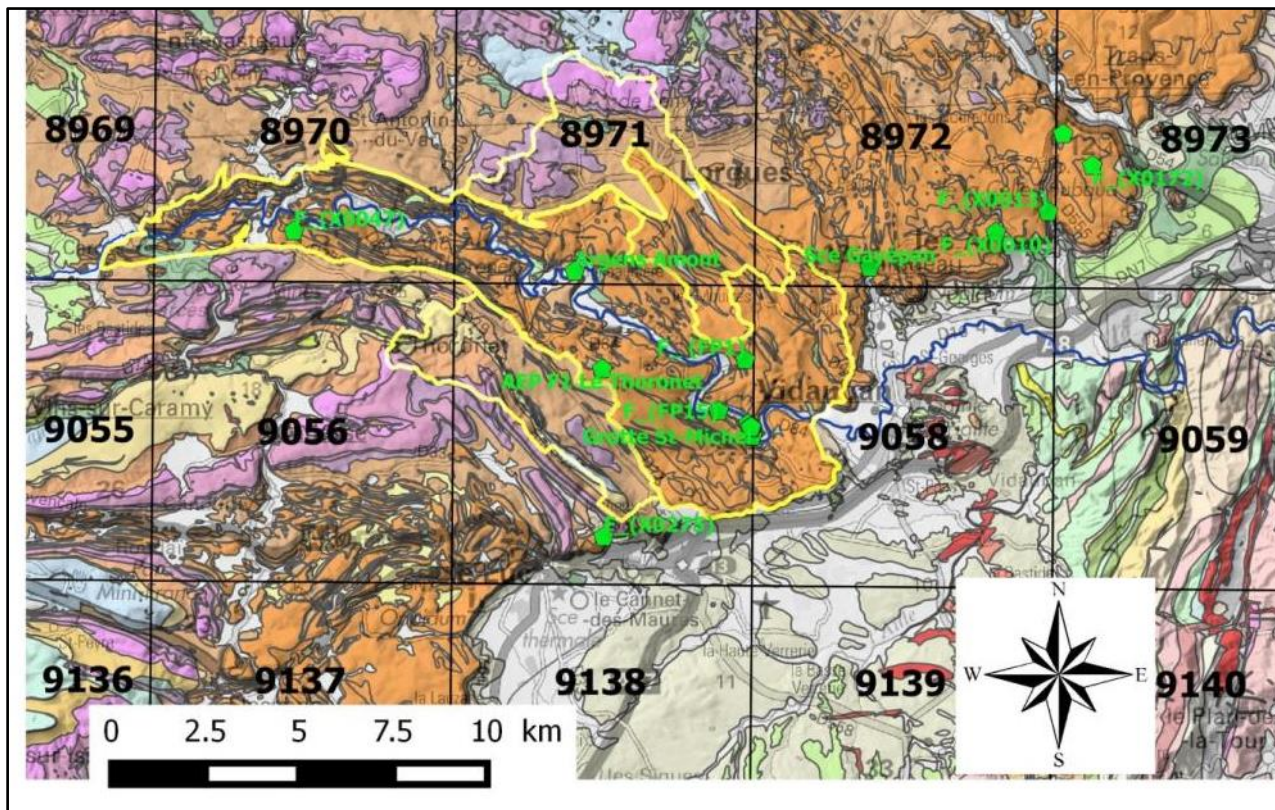


Illustration 32 - Localisation des points d'eau situés dans la formation du Muchelkalk, extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50 000 du BRGM, fond IGN au 1/100 000.

3.3.1. Bilan des données géochimiques disponibles sur les champs captants (SIAE et Commune de Vidauban)

Toutes les données des suivis de la qualité chimique des eaux des champs captant d'Entraigues et de Vidauban bancarisées dans ADES ont été récupérées (à la date du 25/09/2015). Les données qualité des autocontrôles du SIAE ont été également considérées (ouvrages et bassin du Vieux Canet). Celles des ouvrages AEP (Forages du Thoronet, 10237X0217 et 10232X0047/F) situés dans l'emprise de l'entité hydrogéologique ont été également considérées. Les caractéristiques chimiques des eaux souterraines sont rassemblées dans les tableaux de synthèses en annexe 8.

3.3.2. Autres données géochimiques disponibles sur les points d'eau de la zone d'étude

Dans le but de replacer les caractéristiques chimiques des eaux de l'unité hydrogéologique des champs captant d'Entraigues et Vidauban (571AE00 BD-LISA) dans un contexte plus régional, les données géochimiques des entités hydrogéologiques adjacentes développées dans le Muschelkalk ont été également considérées (entités 571AE02 et A573AA00). La liste des points d'eaux est reportée sur l'illustration 33. Les données sont rassemblées dans les tableaux de synthèse en annexe 9.

Point bss	x	y	Entité bdlisa	Prof. (m)	Usage	Niveau capté	Géologie
10237X0272/FS (F5-SIAE)	973912	6264301	571AE00	100, 45	AEP	De 43 m à 100 m	Calcaires Muschelkalk
10237X0087/HY (Sce Avens)	973902	6264245	571AE00		AEP	Source	
10237X0274/F1 (Vidauban)	973893	6264316	571AE00	93	AEP	De 70 m à 93 m	
10237X0271/F1 (Le Thoronet)	969930	6265871	571AE00	150	AEP	Crépiné de 102m à 141m	dolomies et calcaires fissurés du Muschelkalk
10232X0047/F	961729	6269545	571AE00	60	AEP	Crépiné de 20 à 60m	Calcaires Muschelkalk
Point bss	x	y	Entité bdlisa	Prof. (m)	Usage	Niveau capté	Géologie
10241X0172/F	982971	6271282	571AE02	90	AEP	Crépiné de 54 à 66m	Calcaires Muschelkalk
10241X0132/FE X2	982196	6272128	571AE02	50	AEP	Crépine de 25 à 33m et de 45 à 52 m.	Calcaires Muschelkalk
10238X0010/HY	980408	6269507	571AE02		AEP	Source	Calcaires Muschelkalk
10238X0009/HY (sce Gayépan)	977051	6268578	571AE02		AEP	Source	Calcaires Muschelkalk
10237X0275/HY	969972	6261408	571AC00/ 573AA00		AEP	Source	Calcaires Muschelkalk/Marno-calcaires du Trias

Illustration 33 - Liste des points d'eaux avec données chimiques (extraction ADES).

3.3.3. Bilan des données géochimiques disponibles sur l'Argens (données Agence de l'Eau RM&C)

Les données de qualité de l'Argens, disponibles aux stations 06300121 et 06205090 (Argens au Thoronet) ont été considérées. Les données sont rassemblées dans les tableaux de synthèse en annexe 8. A titre d'illustration, les graphiques des teneurs et chlorures et en sulfates sont portés dans les graphiques de l'illustration 40 (page 70) et de l'illustration 41 (page 71).

3.3.4. Description des campagnes spatiales d'échantillonnage

Dans la perspective d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement de l'hydrosystème de l'échelle locale et, plus globalement à l'échelle de l'entité hydrogéologique, une caractérisation géochimique des aquifères (Muschelkalk et Tuf) et de l'Argens a été réalisée au travers de trois campagnes de prélèvements (août et octobre 2014 et juin 2015). L'objectif de ces campagnes

spatiales était de réaliser une "photographie" à un instant donné, de l'état hydrochimique des différentes composantes de l'hydrosystème (aquifères superficiels et profonds, cours d'eau).

Les différents points de prélèvements sont localisés sur l'illustration 34, les caractéristiques physico-chimiques mesurées *in situ* sont rassemblées dans le tableau de l'annexe 9.

Les prélèvements réalisés en août 2014 concernent les forages F5, F1_{SIAE}, F3_{SIAE}, la source des Avens, l'Argens au barrage ainsi que 3 autres ouvrages implantés au sein de l'entité hydrogéologique (forage AEP du Thoronet et 2 forages privés FP1 et FP15 (10237X0140/F et 10237X0110/F respectivement) et la source de Gayepan située en dehors de la masse d'eau (Illustration 33 et Illustration 34).

Les prélèvements réalisés en octobre 2014 concernent la source Michel située légèrement à l'aval du champ captant et l'Argens en 2 points : l'Argens au niveau du barrage et l'Argens en amont à proximité du Thoronet (Illustration 34).

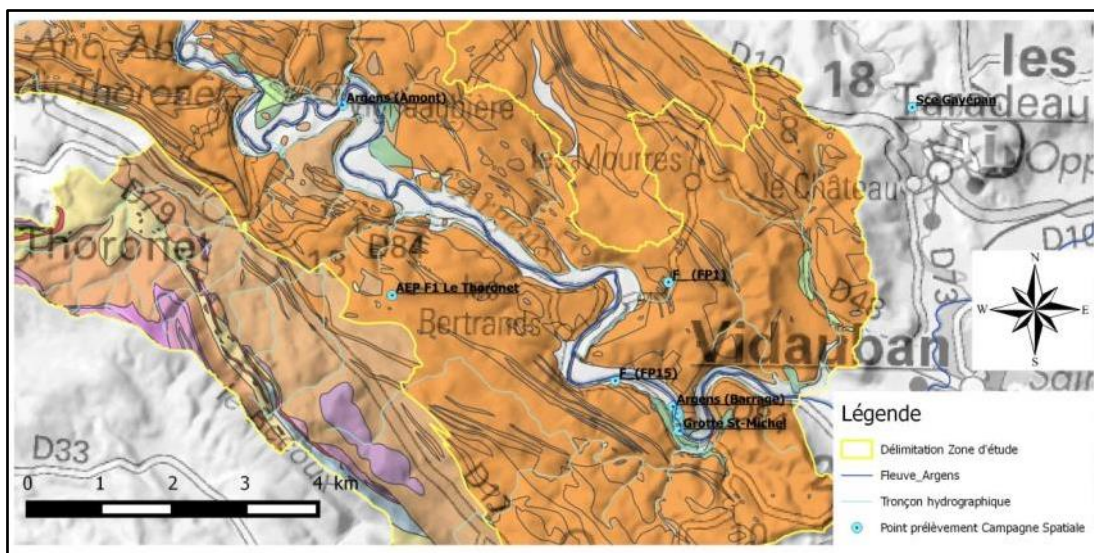


Illustration 34 - Localisation des points de prélèvements (extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50.000 du BRGM, fond IGN au 1/100000).

En Juin 2015, une campagne de prélèvement complémentaire a été réalisée sur les ouvrages profonds du champ captant (F5_{SIAE} et F6_{SIAE}, F1_V1_{Vidauban}) et le forage AEP du Thoronet afin de mieux caractériser les eaux de l'aquifère profond du Muschelkalk. L'aquifère superficiel des tufs (source des Avens et le forage F1_{SIAE}) ont été également prélevés ainsi que l'Argens, en 3 points distincts le long du fleuve. Sur les forages profonds et la source des prélèvements en gaz dissous ont été réalisés afin d'analyser la teneur en CFC et SF6 des eaux pour dater l'eau au sein des aquifères du Muschelkalk et des tufs (paragraphe 5.1.3).⁶

❖ Prélèvement et conditionnement des échantillons

⁶ Initialement, les éléments majeurs et traces devaient être analysés. Hélas, les échantillons envoyés par Chronopost ont été détruits par erreur lors du transport. Seuls les résultats en gaz dissous (CFC et SF6) des eaux sont donc disponibles pour l'interprétation.

La caractérisation hydrogéo-chimique est basée sur les éléments majeurs et traces, les terres rares⁷, le Carbone Organique Dissous (COD) et sur des traceurs isotopiques naturels classiquement utilisés lors des études environnementales (oxygène 18/deutérium ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) de l'eau et rapport isotopique du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).

Les prélèvements destinés aux analyses des cations et des anions ont été conditionnés dans des bouteilles de 125 ml en polypropylène. Les échantillons ont été filtrés à 0,45 μm sur des filtres en acétate de cellulose préalablement rincé. Les flacons destinés à l'analyse des cations, éléments traces et terres rares ont été acidifiés *in situ* à pH = 2 avec de l' HNO_3 Suprapur. Les analyses isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) sont réalisées à partir des flacons destinés à l'analyse des cations. Les prélèvements destinés aux terres rares ont été conditionnés dans des bouteilles de 1000 ml en polypropylène, après filtration et acidification *in situ* à pH = 2 avec de l' HNO_3 Suprapur. Les prélèvements destinés aux analyses du COD ont été réalisés dans des flacons en verre ambré de 250 ml, eau brute acidifiée avec de l'acide sulfurique. Les échantillons ont ensuite été conservés à 6°C à l'abri de la lumière jusqu'à l'analyse. Des eaux brutes ont été prélevées dans des bouteilles de 60 ml en polypropylène pour l'analyse des isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$).

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées *in situ* lors du prélèvement selon les normes NF EN ISO/CEI 17025 et NF EN ISO 9001-2000. Les paramètres mesurés étaient les suivants : pH, température, teneur en oxygène dissous, conductivité et potentiel d'oxydo-réduction (Eh). Le pH-mètre avait été préalablement calibré à l'aide de solutions standard à pH = 4, pH = 7 et pH = 10. Le conductimètre est étalonné avec une solution standard à 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.

❖ Méthodes analytiques

Les analyses chimiques et isotopiques ont été effectuées dans les laboratoires du BRGM à Orléans. Les anions ont été analysés par chromatographie ionique, les cations et les traces par ICP-MS (Illustration 35). Les incertitudes des résultats concernant les majeurs et les traces sont respectivement de 5% et 10%.

Les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$) ont été mesurés par spectrométrie de masse en phase gazeuse. La composition isotopique de l'eau ($\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$) est exprimée en différence relative en part pour mille (‰) par rapport au standard international V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). L'incertitude des résultats concernant les isotopes de l'eau est de 0,8‰ pour le deutérium et de 0,1‰ pour l'oxygène.

Les analyses isotopiques du strontium ont été faites par spectrométrie de masse à source solide (TIMS spectrométrie de masse à thermo-ionisation) après séparation sur résine. La justesse et la reproductibilité des mesures des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont obtenues par l'analyse répétée du standard international NBS 987. Durant la période d'analyse, 42 déterminations du standard Sr NBS987 ont donné une valeur moyenne de $0,710250 \pm 0,000008$ (2σ). Les rapports isotopiques des échantillons sont normalisés à la valeur certifiée du standard NBS 987 (0,710240).

⁷ Les terres rares (ou lanthanides) constituent un ensemble d'éléments chimiques de caractéristiques similaires comprenant Ce, Gd, Sm, Dy, La, Tb, Er, Lu, Tm, Eu, Nd, Y, Ho, Pr, Yb.

Elément	Mode opératoire	Commentaire	LQ	Précision analytique
HCO ₃	NF EN ISO 9963-1	Méthode potentiométrique	5 mg/L	5%
CO ₃				
Ca (calcium)	NF en ISO 11885	Analyse ICP	0,5 mg/L	10% (15% pour K)
Mg (magnésium)				
K (potassium)				
Na (sodium)				
Cl (chlorure)	NF en ISO 10304	Méthode par chromatographie ionique (DIONEX) selon NF EN 1034-1 (juin 1995) pour les eaux faiblement contaminées et ISO EN 10304-2 pour les eaux usées.	0,5 mg/L	10%
SO ₄ (sulfates)				
NO ₃ (nitrates exprimés en NO ₃)				
Sr (strontium)	MO002	Analyse d'éléments infra-traces par ICP-MS	0,1 µg/L	10%
Rb (rubidium)				
Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, F, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Sb, Zn	MO002	ICP-AES ou ICP-MS	0,5 µg/L	10%

Illustration 35 - Modes opératoires et méthodes d'analyses des éléments majeurs et traces pour les échantillons prélevés.

Analyses isotopiques et CFC/SF ₆	Méthode	Précision analytique
Rapport ¹⁸ O/ ¹⁶ O de l'eau	Equilibration avec un CO ₂ de composition connue	± 0,1 ‰
Rapport ² H/ ¹ H de l'eau	réduction sur zinc	± 0,8 ‰
Rapport ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr du strontium total dissous dans l'eau	TIMS (Thermal ionization mass spectrometry)	± 0,05 %
Rapport ¹⁸ O/ ¹⁶ O des sulfates dissous	Analyseur élémentaire Thermo couplé en flux continu avec un spectromètre de masse Delta+XP	± 0,3 ‰
Rapport ³⁴ S/ ³² S des sulfates dissous		± 0,4 ‰
Teneur en ³ H	Enrichissement électrolytique et comptage par scintillation liquide	± 10%
CFC-13, CFC12, CFC-11, SF ₆	Purge and trap et chromatographe en phase gazeuse équipé d'un détecteur à capture d'électron	± 5 %
Rapport ¹³ C/ ¹² C	Spectrométrie de masse en phase gazeuse après purification	± 0,1 ‰
Activité de ¹⁴ C	Spectrométrie de masse par accélération après purification	0,1-0,4 pCM

Illustration 36 - Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses des isotopes considérés dans cette étude.

3.3.5. Examen des résultats disponibles et interprétations

Nota : dans un souci de clarté, les éléments des descriptions et les généralités sur les approches isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et sur les terres rares sont présentés en annexe 8.

La synthèse des données existantes permet une caractérisation des évolutions spatio-temporelles des teneurs en chlorures et sulfates des différents forages implantés au sein de l'entité 571AE00 (BD-LISA). Elle permet également d'initier la comparaison avec les eaux de l'Argens et plus largement avec les autres aquifères de la zone d'étude développés dans le Muschelkalk.

Il ressort que les eaux souterraines de l'entité présente des conductivités électriques élevées (comprises entre 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$), caractérisées notamment par de fortes teneurs en sulfates (comprises entre 120 mg/l et 160 mg/l) et des teneurs en chlorures élevées (jusqu'à 200 mg/l mesuré en 2008) mais variables dans le temps et suivant la localisation de l'ouvrage. L'ouvrage 10232X0047 (Forage F AEP du Thoronet) situé au nord-ouest de la zone d'étude (Illustration 34) sur la commune du Thoronet présente les plus faibles teneurs en chlorures (11 mg/l). Le forage 10237X0271/F1 ((Forage F1 AEP du Thoronet), également situé la commune du Thoronet au sud-est du précédent, présente quant à lui, des teneurs plus élevées comprises entre 83 mg/l et 130 mg/l. Les eaux souterraines du champ captant du SIAE/Vidauban présentent également des teneurs élevées en Cl, les variations mesurées depuis 1998 sont comprises entre 100 et 200 mg/l.

Les eaux de l'Argens au Thoronet présentent des teneurs élevées en chlorures (entre 80 mg/l et 380 mg/l), les concentrations apparaissent variables, les plus faibles teneurs apparaissent être associées aux périodes de hautes eaux, probablement sous l'effet de la dilution des pluies. Les teneurs en sulfates des eaux de l'Argens sont comparables à celles des eaux souterraines à l'exception des périodes de hautes eaux où les teneurs sont plus faibles en raison de la dilution par les pluies.

Les eaux souterraines du site d'Entraigues présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien à tendance chloruré et sulfaté calcique et magnésien selon la classification de Piper (annexe 9). Les eaux de l'Argens sont chlorurées sodiques et potassiques.

Les concentrations élevées en Na, Cl et SO_4 , Ca, Sr et B témoignent de l'interaction eau-roche avec les formations évaporitiques du Trias (halite et gypse) présentes dans le secteur d'étude. Les eaux qui interagissent avec un pôle gypse « pur » sont caractérisées par de fortes teneurs en SO_4 , Ca, Sr et de faibles concentrations en Na et Cl.

Les eaux du point 10237X0275 (source des Moulières au Cannet-des-Maures) permettent d'illustrer ce type d'eau en interaction avec un pôle gypse « pur » (Illustration 38, page 67) qui présente les teneurs en SO_4 vs Cl° . A l'inverse, les eaux qui interagissent avec un pôle halite « pur » sont caractérisées par des fortes teneurs en Na et Cl et de faibles teneurs en SO_4 , Ca et Sr.

Dans le secteur d'étude, ce sont les eaux de l'Argens qui apparaissent le plus influencées par le pôle halite « pur ».

Lorsque les eaux sont influencées par les deux pôles du Trias, les concentrations en Na, Cl et SO_4 , Ca, Sr et B sont élevées pour tous les éléments chimiques, comme le révèlent par exemple, les points 10241X0132/FEX2 et 10241X0172/F. Les eaux de la source des Avens et des forages profonds du champ captant SIAE/Vidauban sont à rattacher à ce groupe. Les variations de concentrations observées à ces points permettent d'illustrer le phénomène de mélange avec les eaux de pluie lors de la recharge. Les eaux qui subissent peu d'interaction avec le Trias sont caractérisées par des minéralisations beaucoup plus faibles, comme par exemple la source de Gayepan.

⁸ Les résultats des analyses hydrochimiques sont classiquement représentés sous forme de graphiques binaires ou ternaires. Le principe de l'interprétation repose sur la définition de pôles chimiques, à partir desquels s'effectuent des mélanges. L'évolution de tel élément en fonction de tel autre apporte des informations sur les cheminements des eaux.

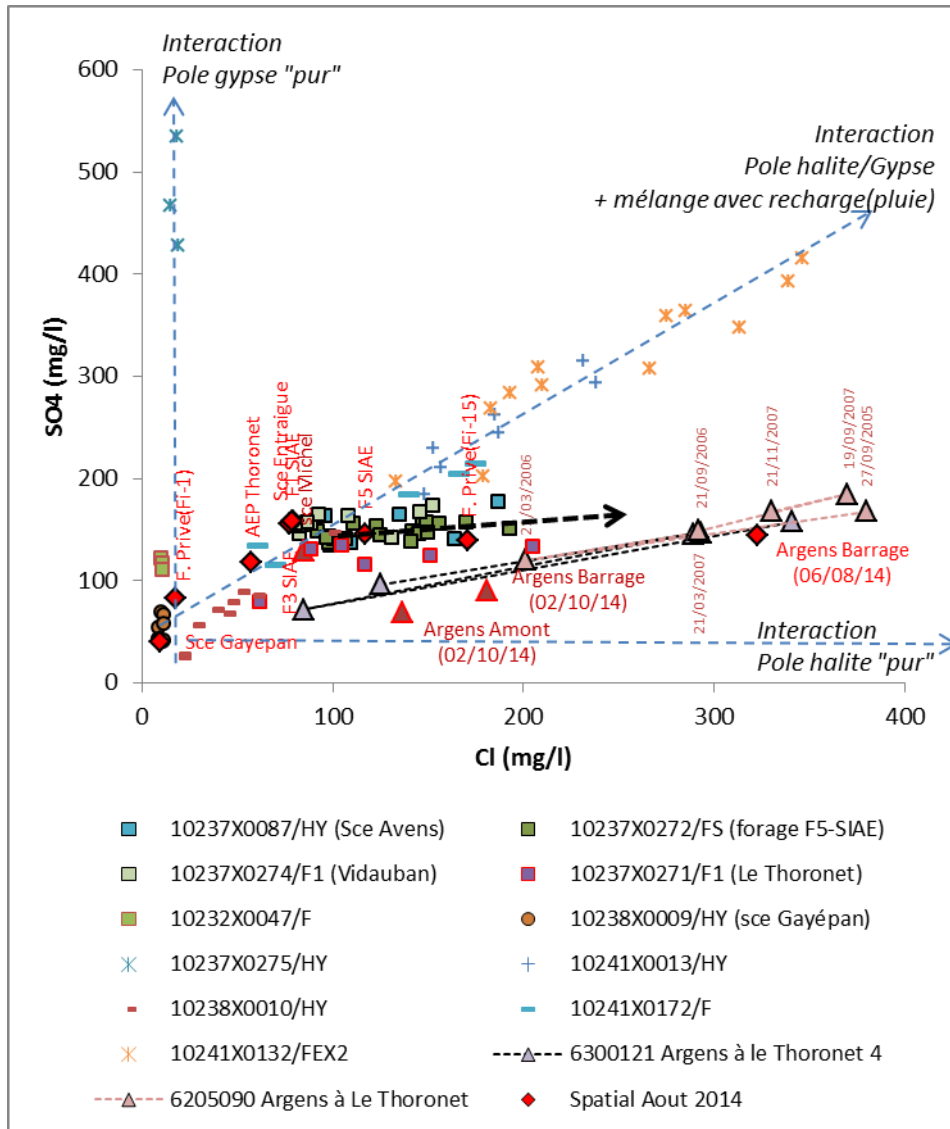


Illustration 37 - Evolution des teneurs en sulfate en fonction des teneurs en chlorures des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.

La confrontation des teneurs en chlorures aux teneurs en sulfates (Illustration 37) permet une bonne distinction entre les eaux souterraines et les eaux de l'Argens. Les eaux de l'Argens apparaissent globalement enrichies en Cl et appauvries en SO4 par rapport aux eaux souterraines. Dans cette représentation, on montre que les eaux du forage du Thoronet (10237X0271/F1) et les eaux du champ captant du SIAE/Vidauban apparaissent influencées par les eaux de l'Argens. A l'inverse, les eaux du forage 10232X0047 ne sont pas influencées par celles de l'Argens, les teneurs en chlorures apparaissent comparables à celles de la source de Gayépan (10238X0009). Ces 2 points permettent de qualifier la signature en chlorures des eaux souterraines uniquement alimentées par les précipitations efficaces.

Dans ce contexte, les échanges surface / souterrain avec les eaux de l'Argens se produisent vraisemblablement entre les deux captages AEP du Thoronet : à l'aval du point F (10232X0047) mais en amont hydraulique du point F1 (10237X0271/F1), puisque ce dernier est impacté par les teneurs en chlorures de l'Argens. La localisation de la zone des pertes le long du cours d'eau ne peut pas être précisée à ce stade de l'étude par l'approche géochimique,

toutefois, compte-tenu du contexte géologique, des pertes de l'Argens pourraient se produire dans le secteur de Vignaubière.

La campagne spatiale d'échantillonnage du mois d'août 2014, permet de montrer que la signature des eaux dans les tufs (source des Avens, F1_{SIAE} et F2_{SIAE}) est significativement différente de celles issues du Muschelkalk (F5_{SIAE}). Les eaux profondes (F5_{SIAE}) du Muschelkalk apparaissent plus minéralisées en Na et Cl que les eaux des tufs (source des Avens, F1_{SIAE} et F2_{SIAE}). Pour les sulfates, le strontium, le bore et les nitrates, c'est l'inverse qui est observé (cf. Illustrations B vs Cl, Sr vs Cl et NO₃ vs Cl en annexe 8). Dans ces différentes illustrations, les résultats suggèrent que les eaux du Muschelkalk (F5_{SIAE}) sont influencées par une contribution d'eau en provenance de l'Argens. La campagne analytique a également permis de montrer qu'à un instant donné, les eaux au sein de l'entité hydrogéologique présentent une forte hétérogénéité chimique. Les eaux de l'ouvrage FP15 (prof = 25 m) apparaissent nettement influencées par les eaux de l'Argens. L'examen des teneurs en NO₃ en fonction des teneurs en Cl permet également d'illustrer cette hétérogénéité de signature chimique. Les teneurs en nitrates mesurées dans l'ouvrage FP1 (prof = 83 m) apparaissent nettement supérieures à celles mesurées au forage du Thoronet ou à la source Michel.

Une distinction semble se dessiner suivant la localisation des ouvrages. Le Muschelkalk situé en rive droite de l'Argens semble présenter des concentrations plus faibles en nitrates (ceci demandera à être confirmé dans le futur). Les eaux de la source des Avens et les forages des Tufs (F1_{SIAE} et F3_{SIAE}) présentent une concentration en nitrates (8 mg/l) supérieure à celle des forages F5_{SIAE} (4,5 mg/l) et "AEP_Thoronet" (6.7 mg/l) ce qui suggère une contribution d'eaux plus chargées en NO₃ en provenance du Muschelkalk situé en rive gauche de l'Argens. L'examen des teneurs en bore et strontium en fonction des chlorures permet également d'illustrer les différentes singularités de signature chimique au sein de l'aquifère. Contrairement aux éléments majeurs et traces, les signatures isotopiques (¹⁸O et ²H) des différentes composantes de l'hydrosystème ne présentent pas ou peu de différence, compte-tenu de l'incertitude analytique (illustration en annexe 9).

Dans cette étude, cet outil n'est donc pas adapté pour décrire les phénomènes de mélange, notamment avec l'Argens.

La composition chimique de l'eau au sein d'un aquifère peut varier en raison d'interactions eau-roche plus ou moins importantes en fonction du temps de résidence de l'eau et du volume d'eau au contact avec les roches. Au sein d'un même réservoir, on peut donc observer des contrastes de concentration qui sont liés à un effet dit de « dilution-concentration ». Afin de s'affranchir de cet effet dans l'interprétation, une méthode consiste à « normer » les différents éléments chimiques par rapport à l'un d'entre eux. Dans cette étude, la normalisation par rapport au Cl permet une bonne différenciation des différentes eaux. Dans ce type de représentation, l'effet de « dilution - concentration » lié au temps de résidence de l'eau au sein d'un même aquifère est déconvolué et les différentes eaux se ramènent à un point. Si l'on observe des évolutions dans les rapports chimiques, c'est qu'il existe un phénomène de mélange avec une eau issue d'un autre réservoir ou origine.

Dans le but de « déconvoluer » ce qui est lié aux phénomènes de mélange et à l'effet « dilution-concentration », le rapport molaire SO₄/Cl a été exprimé en fonction du rapport molaire Mg/Cl (Illustration 38). Les rapports SO₄/Cl et Mg/Cl permettent de caractériser les deux composantes des évaporites (pole halite et pole gypse).

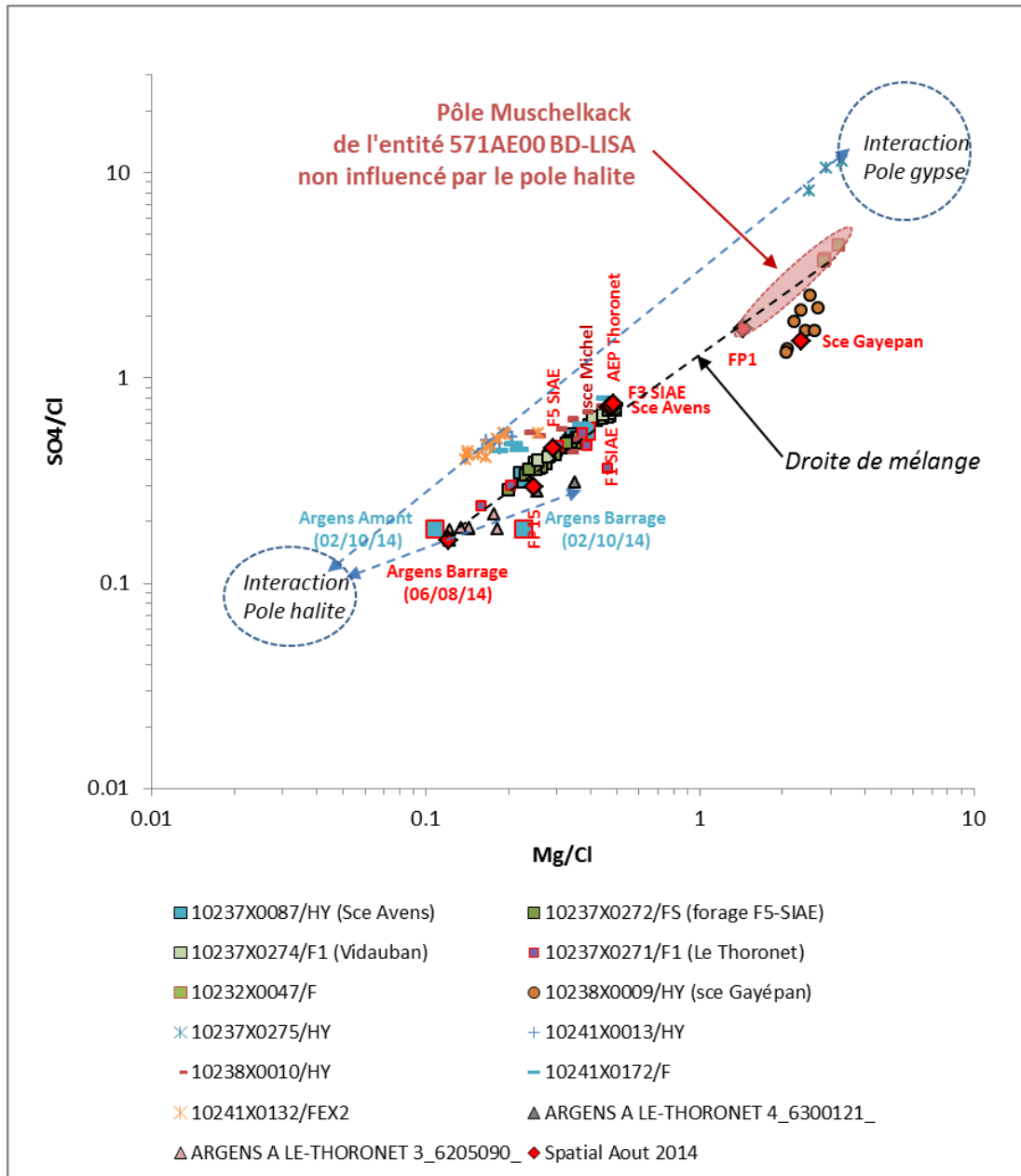


Illustration 38 - Evolution du rapport molaire SO_4/Cl en fonction du rapport molaire Mg/Cl des eaux du secteur d'étude.

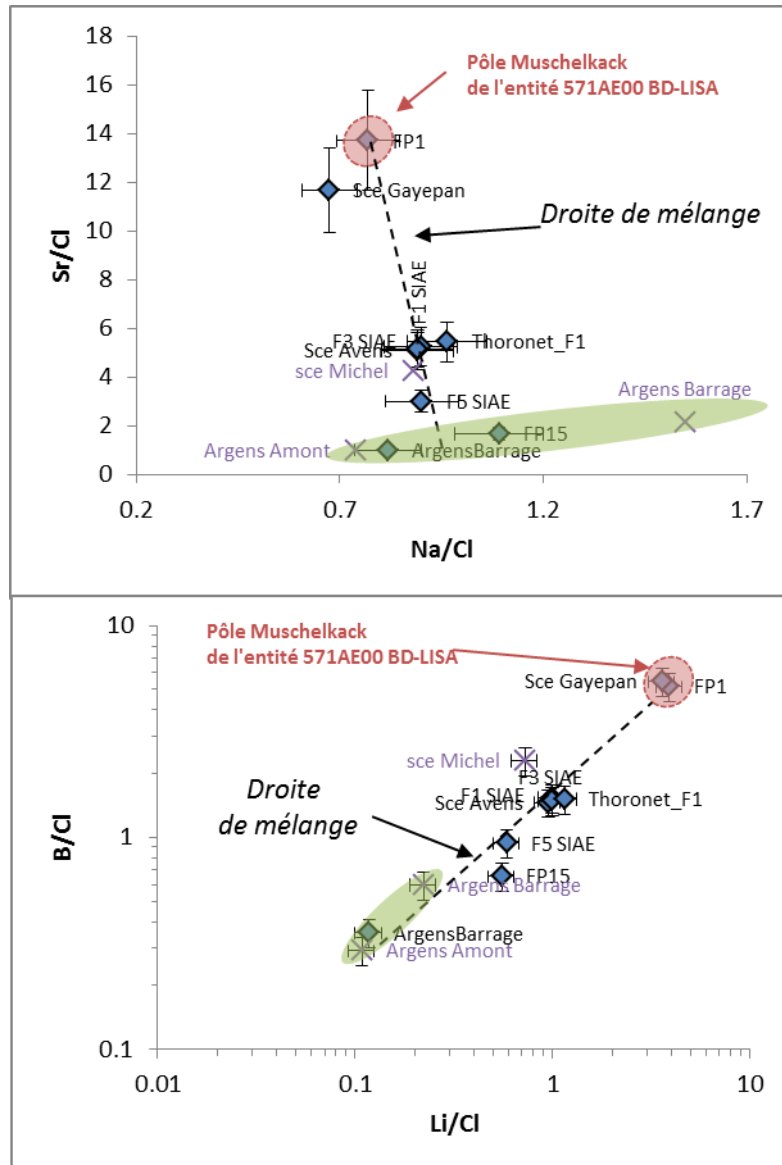


Illustration 39 - Evolution des rapports molaires Sr/Cl vs Na/Cl et B/Cl vs Li/Cl des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.

La campagne spatiale d'échantillonnage permet de montrer qu'à un instant donné (« photographie »), **les rapports molaires SO₄/Cl et Mg/Cl des eaux de la source des Avens, des forages F1_{SIAE}, F3_{SIAE} et du Thoronet (10237X0271/F1) sont identiques, ce qui semble indiquer qu'ils appartiennent bien à une même réserve.**

Dans cette représentation, les rapports chimiques des eaux des ouvrages FP1 et 10232X0047/F permettent la caractérisation du pôle « Muschelkalk » de l'entité hydrogéologique (571AE00 BD-LISA) qui n'est pas ou peu influencée par le pôle « halite ». En considérant ce pôle et celui défini par les eaux de l'Argens (fortement influencée par le pôle « halite »), on montre que les eaux de l'entité se répartissent le long d'une droite de mélange définie par ces deux pôles. Les rapports SO₄/Cl et Mg/Cl calculés à partir des suivis chimiques réalisés depuis 1998 permettent de démontrer que l'eau de l'Argens contribue à l'alimentation de l'entité, cette recharge se produisant nécessairement en amont hydraulique du forage AEP

du Thoronet (10237X0271/F1). Ces résultats sont également corroborés par les éléments traces Sr, Li et B normés au Cl (Illustration 38). Les rapports isotopiques du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en fonction du rapport 1/Sr (Illustration 40 page 70) permettent également de montrer que les eaux du forage du Thoronet se positionnent sur une droite de mélange définie par le pôle « Muschelkalk » de l'entité hydrogéologique (pas ou peu influencée par le pôle « halite » et les eaux de l'Argens).

La campagne spatiale d'échantillonnage permet également de montrer qu'à un instant donné (« photographie »), les rapports molaires SO_4/Cl et Mg/Cl des eaux du forage profond F5_{SIAE} sont plus faibles que ceux de la source des Avens (et des forages F1_{SIAE}, F3_{SIAE} et du Thoronet), ce qui indiquerait une plus forte contribution des eaux de l'Argens au point F5 (cf. Illustration 39).

De même, l'ouvrage FP15 apparaît très influencé par les eaux de l'Argens. La source Michel présente une signature intermédiaire à celle de la source des Avens et du Forage F5. L'origine de la contribution plus forte d'eau de l'Argens pour le F5 par rapport à la source des Avens ne peut pas être élucidée du fait de la perte accidentelle de points d'analyse lors du transport de la campagne de juin 2015.

L'examen des résultats apportés par les terres rares permet également de souligner le rôle de l'Argens dans le fonctionnement de l'aquifère (illustration en annexe 8). L'Argens semble imposer son profil « terres rares » aux eaux de l'aquifère. Les eaux de l'entité ne présentent pas d'anomalie positive en gadolinium⁹ ce qui indique que la qualité de l'aquifère n'est pas impactée par des apports anthropiques d'eaux usées.

L'examen des évolutions temporelles des teneurs en chlorures (Illustration 40, page 70) indiquent que les teneurs en chlorures sont variables dans le temps à l'ouvrage 10237X0271/F1 et aux ouvrages du site d'Entraigues. Une augmentation des teneurs en chlorures est observée entre fin 2004 et 2008 (doublement des concentrations) suivi d'une diminution, les valeurs mesurées en 2014 sont maintenant comparables celles mesurées avant 2004. Les sulfates, sur cette même période présentent également le même type d'évolution, mais les augmentations de concentrations demeurent beaucoup plus faibles (+20 mg/l pour les sulfates contre +100 mg/l (doublement) pour les chlorures).

Dans ce système karstique binaire, alimenté à la fois par la recharge par les pluies sur les calcaires affleurant et des pertes de l'Argens, le flux d'alimentation par les pertes de l'Argens est vraisemblablement assez constant d'un cycle hydrologique à l'autre, contrairement au flux de recharge sur l'impluvium des calcaires, lié aux variations hydroclimatiques interannuelles. Dans ce contexte, l'augmentation graduelle de chlorures observée lors de la succession d'années déficitaires serait liée à la diminution de la pluie, et donc à une augmentation de la contribution relative des eaux de l'Argens chargée en chlorures par rapport au Muschelkalk. La confrontation des concentrations mesurées avec les valeurs de recharge estimées à l'aide de l'approche de modélisation GARDENIA (cf. paragraphe 3.2) permet de montrer que l'augmentation des teneurs en chlorures dans les eaux souterraines est bien corrélée à une période de recharge déficitaire par rapport à la moyenne. A l'inverse, la diminution des teneurs en chlorures qui est observée à partir de 2008 est bien corrélée à une période de recharge excédentaire par rapport à la moyenne.

⁹ Parmi les terres rares (Ce, Gd, Sm, Dy, La, Tb, Er, Lu, Tm, Eu, Nd, Y, Ho, Pr, Yb), le gadolinium (Gd) fait l'objet d'attentions plus particulières du fait que cet élément est un marqueur des apports anthropiques de type eaux usées. En effet le gadolinium est utilisé en médecine comme agent de contraste en imagerie médicale. Le rejet de cet élément dans l'environnement où il se trouve naturellement en très faible quantité se marque par une anomalie positive en gadolinium notée Gd* (Bau et Dulski, 1996) sur le profil normalisé des terres rares.

Les valeurs maximales mesurées au forage du Thoronet (10237X0271/F1) sont comparables à celles mesurées dans les ouvrages du site d'Entraigues, toutefois le pic de chlorures (205 mg/l) mesuré en septembre 2007 au Thoronet semble se produire plus tôt que celui observé au champ captant (en février 2009, légèrement atténué). Le décalage temporel du signal entre le forage du Thoronet et le forage F5_{SIAE} laisse penser que les circulations au sein de l'aquifère du Muschelkalk se font globalement du nord-ouest vers le sud-est selon un transfert faiblement dispersif puisque les amplitudes des pics sont comparables. Ce décalage dans le pic de réponse en chlorures de l'aquifère permet d'illustrer que la dynamique du transfert de masse est lente en comparaison du transfert de pression au sein de l'aquifère (cf. paragraphe 3.2).

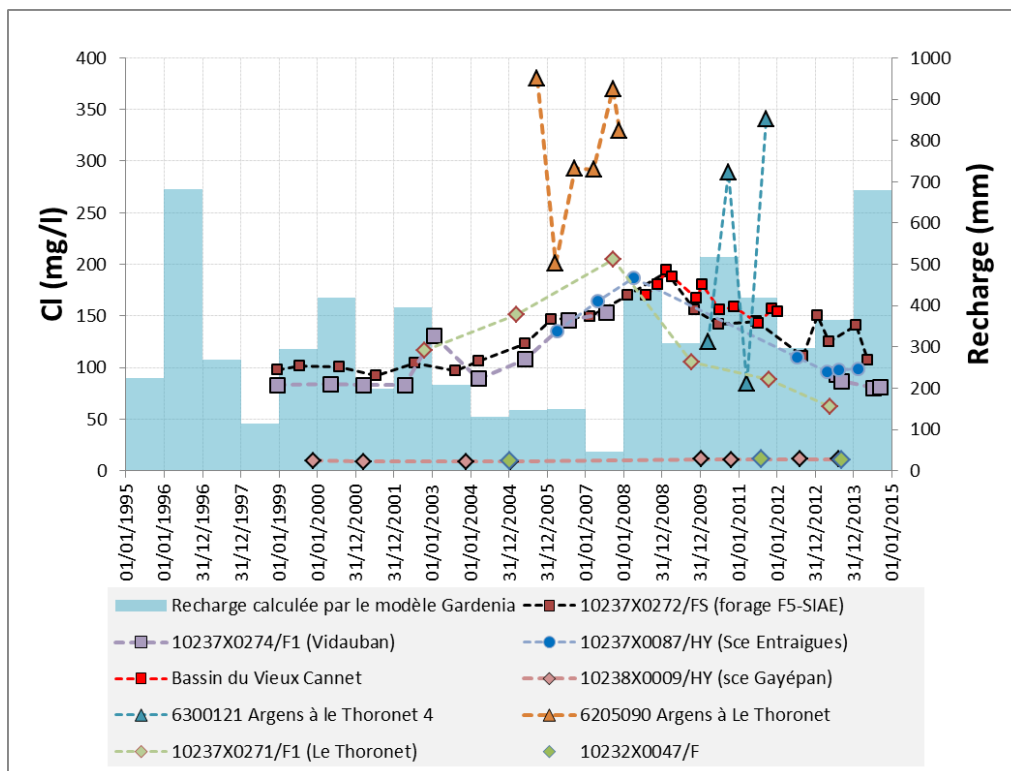


Illustration 40 - Evolution des teneurs en chlorures des points d'eau situés dans l'emprise de l'entité hydrogéologique 571AE00 BD-LISA depuis 1998.

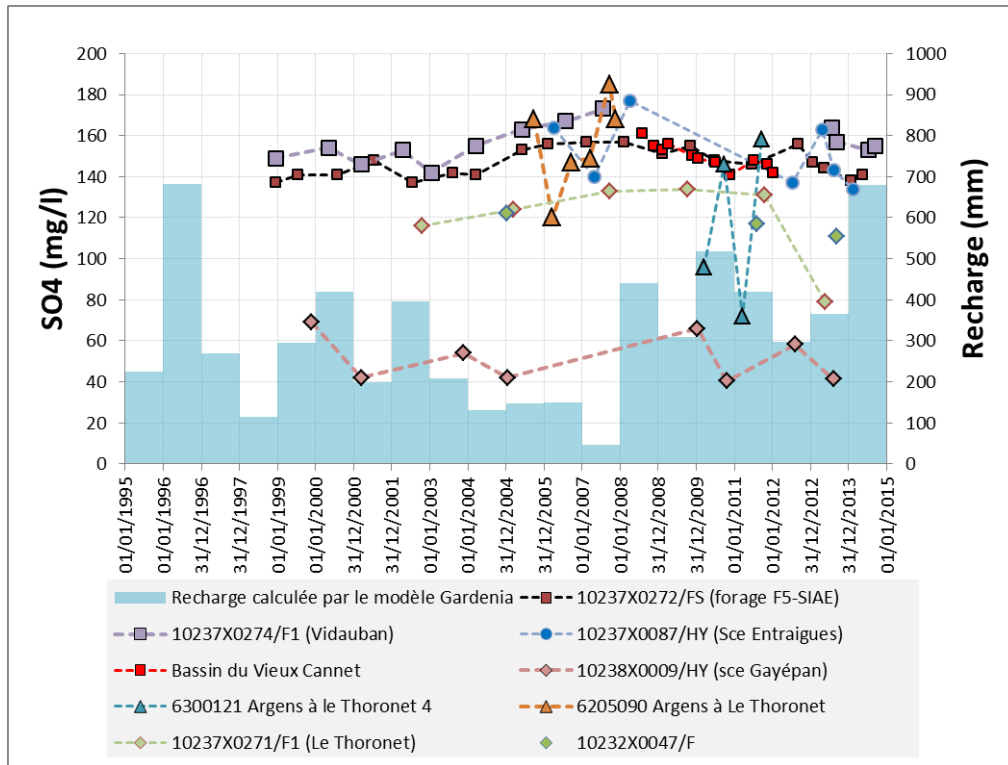


Illustration 41 - Evolution des teneurs en sulfates des points d'eau situés dans l'emprise de l'entité hydrogéologique 571AE00 BD-LISA

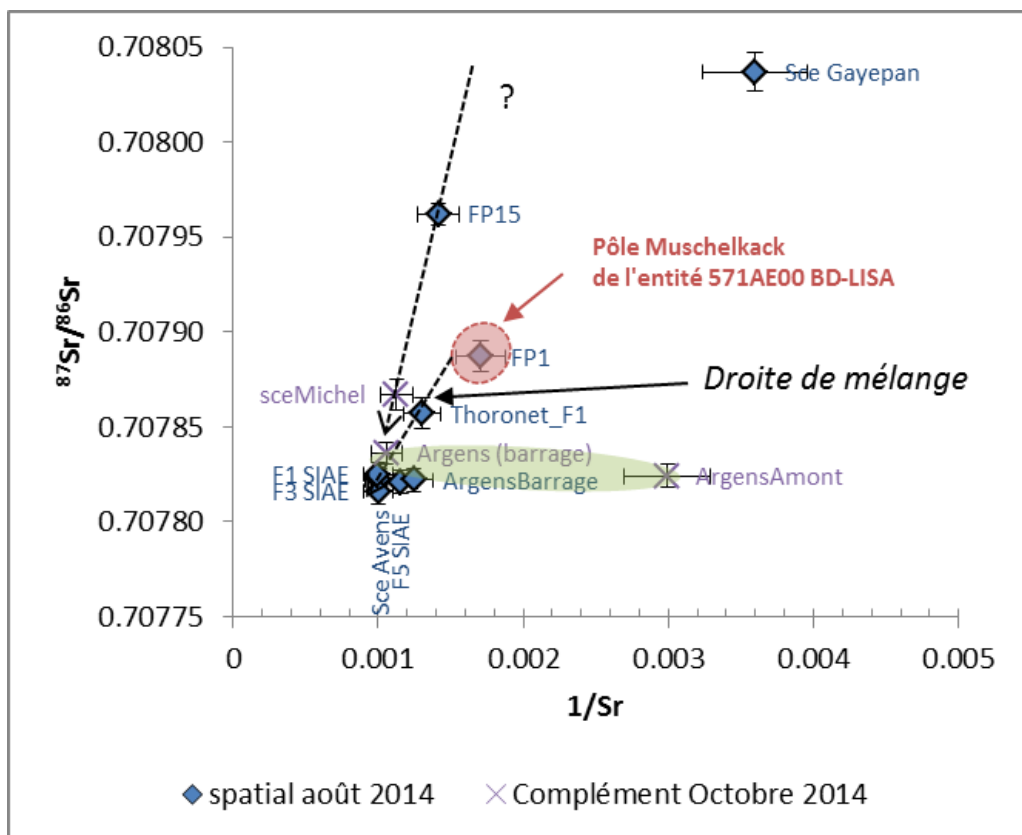


Illustration 42 - Evolution du rapport du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en fonction du rapport $1/\text{Sr}$ des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.

3.4. SYNTHÈSE : APPORTS AU SCHEMA CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

Les approches fonctionnelles et géochimiques mise en œuvre dans cette étude permettent d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère fracturé - karstifié des calcaires du Muschelkalk qui alimentent la source d'Avens.

Des différentes observations et caractérisations réalisées, nous pouvons conclure que l'aquifère fracturé - karstifié des calcaires du Muschelkalk est à la fois alimenté par des pertes de l'Argens et par la recharge sur l'impluvium du Muschelkalk. Dans ce système karstique binaire, le flux d'alimentation par les pertes de l'Argens est supposé vraisemblablement assez constant d'un cycle hydrologique à l'autre, contrairement au flux de recharge sur l'impluvium des calcaires qui est lié aux variations hydroclimatiques interannuelles. La confrontation des concentrations mesurées dans l'aquifère avec les valeurs de la recharge estimées à l'aide du modèle GARDENIA permet de montrer que l'augmentation des teneurs en chlorures dans les eaux souterraines est bien corrélée à une période de recharge déficitaire par rapport à la moyenne (période 2004-2008). A l'inverse, la diminution des teneurs en chlorures qui est observée à partir de 2008 est bien corrélée à une période de recharge excédentaire par rapport à la moyenne. L'approche de modélisation GARDENIA permet d'estimer l'ordre de grandeur de la recharge annuelle (310 mm sur la période [1963-2014]).

Dans ce contexte, l'augmentation graduelle de chlorures observée lors de la succession d'années déficitaires (entre 2004 et 2008) serait liée à la diminution de contribution relative de la recharge par la pluie, et corolairement à une augmentation de la contribution relative des eaux de l'Argens enrichies en chlorures par rapport au Muschelkalk. Les résultats hydrochimiques démontrent également que la recharge par les pertes de l'Argens se produit en amont hydraulique du forage AEP du Thoronet (102370271/F1) mais en aval hydraulique de l'ouvrage 10232X0047/F, car ce dernier ne présente pas d'enrichissement de minéralisation lié à la contribution de l'Argens. Compte tenu du contexte géologique, des pertes de l'Argens pourraient se produire dans le secteur de Vignaubière. L'approche géochimique permet également de montrer que les eaux pompées au forage AEP du Thoronet (102370271/F1) appartiennent au même réservoir que celles prélevées au site d'Entraigues.

L'examen des chroniques de chlorures des ouvrages du Thoronet (10237X0271/F1) et du champ captant SIAE/Vidauban mettent en évidence que le pic de chlorures (205 mg/l) mesuré en septembre 2007 au Thoronet semble se produire près d'un an et demi plus tôt que celui observé au champ captant (en février 2009, légèrement atténué, 200 mg/l). Le décalage temporel du signal entre le forage du Thoronet et le forage F5_{SIAE} laisse penser que les circulations au sein de l'aquifère du Muschelkalk se font globalement du nord-ouest vers le sud-est selon un transfert faiblement dispersif puisque ces pics sont comparables. Ce décalage dans le pic de réponse en chlorures de l'aquifère permet d'illustrer que la dynamique du transfert de masse est lente en comparaison du transfert de pression au sein de l'aquifère. En effet, l'approche de modélisation montre que la réponse de l'aquifère à un épisode de recharge est rapide (<1 jour) ce qui dénote un transfert de charges en nappe captive. L'inertie de la nappe est importante (le temps de demi tarissement (T1/2_TARI) du réservoir est de plus de 6 mois), la réponse théorique de l'aquifère à 100 mm de recharge se fait sentir sur près de 1000 jours. Le coefficient d'emmagasinement apparent global de l'aquifère est de $7,78 \cdot 10^{-2}$.

Cette valeur globale pour l'aquifère entre dans la gamme de celles évaluées par les approches utilisant des modèles analytiques (chapitre 3) : pour le Muschelkalk $5,5 \cdot 10^{-3}$ et pour les tufs 0,35.

- Les débits de la source estimés par modélisation seraient compris entre 0,15 m³/s et 1,6 m³/s, le débit moyen serait de 0,68 m³/s, sur la période 1964-2014. Les résultats de la simulation indiquent qu'en période d'année déficitaire en précipitations (années 2003 à 2007), le débit de la source serait faible, de l'ordre de 0,46 m³/s en moyenne. En période d'années excédentaires en précipitations (années 2008 à 2014), le débit de la source serait de l'ordre de 0,86 m³/s en moyenne.

4. Les pompages d'essai

4.1. NATURE DES ESSAIS

Une des actions majeures de ce travail a constitué en l'organisation et le suivi de pompages d'essai sur les ouvrages existants dans les champs captants du SIAE et de la commune de Vidauban.

Par "pompage d'essai" il faut entendre des mesures spécifiques réalisées sur des forages (ou dans une cavité naturelle) munis de pompes dont le débit d'exhaure est contrôlé, et équipés de matériel de mesures et de stockage des données de variations de hauteur d'eau.

Un pompage implique en effet dans la très grande majorité des cas des variations du niveau de la nappe¹⁰. Le suivi dans l'ouvrage pompé, mais aussi dans les ouvrages voisins permet d'avoir accès à la productivité des ouvrages eux-mêmes ("essais de puits"), aux caractéristiques de la nappe et de l'aquifère (géométrie de l'aquifère, évolution du front d'appel des pompages, paramètres hydrodynamiques, présences de limites...).

En faisant des pompages d'essai, on réalise ainsi *la modélisation du fonctionnement hydrodynamique des nappes au droit et autour des captages*.

Les ouvrages concernés par les essais sont présentés en détails dans les paragraphes suivants et leurs caractéristiques sont synthétisées dans le tableau de l'illustration 43. Leur localisation est portée dans l'illustration 4 et l'illustration 53.

Les résultats des essais sont présentés au paragraphe 4.3 en page 87 de ce rapport.

¹⁰ : On parle de rabattement pour qualifier l'écart entre un niveau mesuré en pompage (le "niveau dynamique") et le niveau de la nappe au repos ("niveau statique").

Ouvrages	Type d'ouvrage	Prof. (m)	Prof. crépines (m)	Venues d'eau (m)	Diamètre crépines (mm)	Formation captée	Etat
SIAE F1	Forage secours (piézomètre)	17	10 à 17	cavité: 13,5-15,3	320	Tufs	bon
SIAE F2	Forage secours	17	10 à 17	cavité: 11,3-14,8 m	320	Tufs	bon
SIAE F3	Forage secours	18	13 à 17	cavité: 7-9 & 13-17	323	Tufs	bon
SIAE F4	Forage exploité	100,5	40,5 à 100,5	44 54 82	350	Muschelkalk	bon
SIAE F5	Forage exploité	100,5	52,5 à 100,5	44 54 82	350	Muschelkalk	bon
SIAE F6	Forage exploité	100,45	43,45 à 100,45	N.A.	304	Muschelkalk	bon
SIAE F7	Forage non exploité	90	trou nu à partir de 61,2	N.A.	102	Muschelkalk + brèches	rebouché
SIAE P8	Forage non exploité (piézomètre)	17 (?)	N.A.	N.A.	N.A.	Tufs	bon
Vidauban V1	Forage exploité	93	69 à 93	N.A.	244	Muschelkalk	bon
Vidauban V2	Forage non exploité (piézomètre)	93	70 à 93	N.A.	244	Muschelkalk	bon
Vidauban V3	Forage non exploité (piézomètre)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	Muschelkalk	bon
Vidauban Source des Avens	Source Exploitée (équipée sur trop-plein)	N.A.	N.A.	cavité de qq. m de prof.	Sans objet	Tufs	bon

Illustration 43 : Liste des ouvrages des deux champs captants sur le site d'Entraigues (en vert : gérés par SIAE, en bleu par Vidauban et en gras ceux équipés d'une pompe fonctionnant au moment des essais) Les ouvrages indiqués en "piézomètres" sont équipés de matériel de suivi.

4.1.1. Les essais de puits (essais de débits par paliers)

A réaliser dans un premier temps, ils reposent sur la technique des essais par paliers de débits permettant de définir les propriétés propres à chaque ouvrage pompé, en définissant et quantifiant notamment les pertes de charges engendrés par l'équipement des ouvrages et éventuellement le "débit critique" c'est-à-dire le débit limite d'exploitation de l'ouvrage.

Dans le cas des ouvrages des champs captants du site d'Entraigues, le schéma synoptique de l'illustration 44 a été mis en œuvre pour chaque ouvrage.

Exceptée la source des Avens (source d'Entraigues), exploitée par la commune de Vidauban et où le captage se situe à l'émergence de la source (une pompe immergée dans la source remonte directement l'eau vers le réservoir), tous les autres ouvrages sont des forages.

D'un point de vue géologique, la source, les forages F1, F2, F3 et P8 (forages et piézomètres dans le champ captant du SIAE) captent les tufs ; on notera que les forages ont rencontré plusieurs cavités de dimensions métriques.

Les autres forages F4, F5 et F6 du SIAE, V1 et V2 (champ captant de Vidauban), captent les calcaires très fracturés et probablement karstifiés du Muschelkalk sous environ 20 m de tufs suivis de 2 à 3 m de marnes très peu perméables. Il n'y a cependant pas eu de mise en évidence de vides lors de la foration.

Le forage F7 (SIAE) est un ancien piézomètre captant uniquement les calcaires du Muschelkalk, mais aujourd'hui rebouché.

Le forage V3 (commune de Vidauban) a rencontré une épaisseur de marnes beaucoup plus importante supérieure à 10 m (source CD 83 ; absence de log géologique). Ce dernier est très peu productif comparé aux autres ouvrages.

Les ouvrages actuellement exploités sont, pour la commune de Vidauban : la source des Avens et V3, et pour le SIAE : F4, F5 et F6, les ouvrages F1, F2 et F3 n'intervenant qu'en cas de secours. Les coupes techniques et géologiques des ouvrages sont disponibles en annexe 2 de ce rapport.

Dans le cadre de ce travail, entre mai et août 2014, chaque ouvrage a fait l'objet d'essais spécifiques, ce qui a permis d'obtenir des données exploitables pour la suite des essais (voir paragraphes suivants).

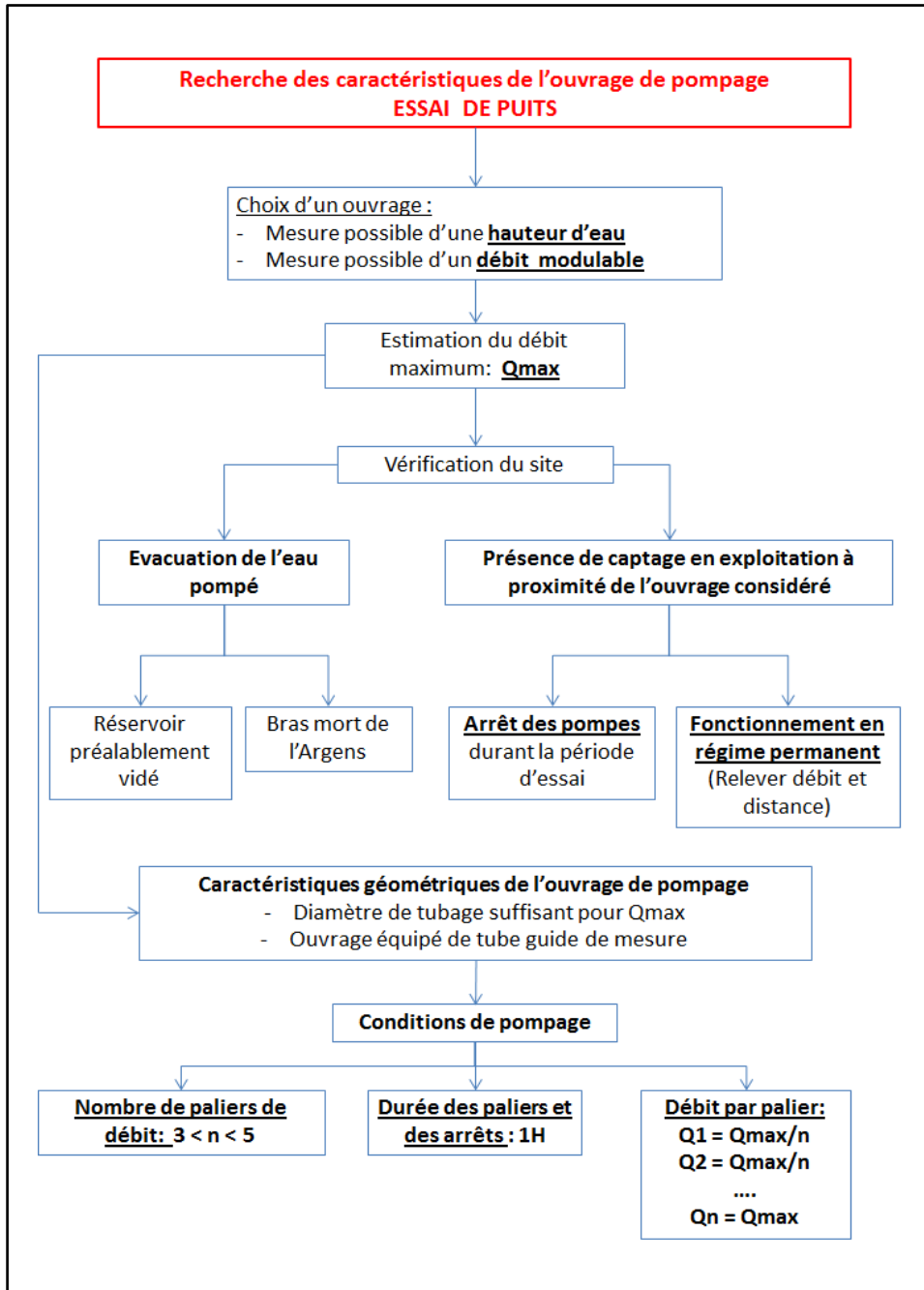


Illustration 44 - Synoptique de réalisation d'essais de puits sur le site d'Entraigues.

Quatre paliers de débit, chacun suivi d'une heure de remontée au maximum, sauf si le niveau est recouvert avant ont été réalisés sur chaque ouvrage. Certains de ces essais ont fait l'objet de suivi sur un piézomètre (essais sur F6 et V1). Le tableau de l'illustration 45 résume les débits de chaque palier.

<i>Forages</i>	<i>débit (m³/h)</i>
SIAE F4 19/08/2014	395; 429; 457; 478
SIAE F5 25/08/2014	471; 537; 578; 615
SIAE F6 03/06/2014	203; 381; 475; 578
<i>Obs. SIAE F5</i>	-
Vidauban V1 22/05/2014	152; 199; 251; 289
<i>Obs. Vidauban V2</i>	-
<i>Obs. Vidauban V3</i>	-
Vidauban Source des Avens 04/06/2014	97; 123; 140; 154

*Illustration 45 - Essais par paliers de débit réalisés dans le cadre de cette étude.
En gras : puits de pompage, en italique : piézomètre d'observation.
Les courbes de ces essais sont portées en Annexe 4 de ce rapport.*

4.1.2. L'essai de nappe (essai longue durée)

Mené sur une durée de plusieurs jours (8 j prévus initialement, 6 jours réalisés en novembre 2014) il est aussi appelé "essai multi-puits".

L'idée était d'effectuer un pompage le plus élevé possible compte tenu des capacités de pompages et des conditions d'évacuation des eaux, en mettant successivement en route toutes les pompes des ouvrages des deux champs captants.

Le tableau de l'illustration 46 résume les débits pompés sur les ouvrages pendant cet essai.

<i>Forages</i>	<i>Formation captée</i>	<i>type d'observation</i>	<i>débit (m3/h)</i>
Vidauban V1	Muschelkalk	Puits	375
SIAE F4	Muschelkalk	puits mais a servi de piézomètre	non-pompé
SIAE F5	Muschelkalk	Puits	606
SIAE F6	Muschelkalk	Puits	570
Vidauban Source des Avens	Tufs	Puits	154
SIAE F3	Tufs	piézo	-
SIAE P8	Tufs	piézo	-
Vidauban V2	Muschelkalk	piézo	-
Vidauban V3	Muschelkalk	piézo	-

Illustration 46 - Débits pompés dans les ouvrages du site d'Entraigues pendant l'essai de nappe de 2014.

Plusieurs conditions devaient être remplies pour assurer la qualité et l'exploitabilité de cet essai :

- il devait être réalisé en situation de plus basses eaux possible ;
- il ne devait pas être influencé par des précipitations conséquentes venant interférer sur le niveau des nappes : si une remontée était constatée suite à des précipitations importantes, l'interprétation de l'essai en serait affectée ;
- les rejets de l'eau ne devaient pas retourner directement aux ouvrages pompés (phénomène de recyclage) ;

- les données de débits et de hauteurs d'eau devaient être enregistrées partout et, si possible, à un pas de temps commun.

C'est ainsi que l'essai de longue durée, programmé d'abord fin septembre 2014 a dû être ajourné deux fois du fait des conditions météorologiques incertaines ou franchement défavorables et n'a pu être mené qu'en novembre 2014.

Il s'agissait d'un pompage de longue durée en multi-pompages désynchronisés, c'est-à-dire que les pompes n'ont pas été mises en route simultanément. Les ouvrages pompés furent F5, F6, V1 et la source pour un total d'environ 1700 m³/h (474 l/s). Le forage F4, bien qu'exploité, n'a pas été pompé ; il a cependant constitué le seul piézomètre fiable au sein du Muschelkalk.

4.2. ORGANISATION ET MISE EN PLACE DES ESSAIS

La complexité de la situation du site d'Entraigues a nécessité l'utilisation de méthodes récentes d'interprétation (développées dans les paragraphes suivants) qui ont nécessité la mise en place d'un protocole particulier :

1. Analyse et réinterprétation des essais antérieurs → élaboration d'un « pré modèle » permettant de calibrer les essais à réaliser et d'orienter les interprétations ;
2. Mise en place du matériel de suivi plusieurs semaines avant les essais, pour obtenir suffisamment de données nécessaires à l'interprétation des essais ;
3. Réalisation des essais de puits individuels pour acquérir des informations fiables sur le comportement de chaque ouvrage et pour affiner l'ébauche de modèle précédemment obtenu ;
4. Préparation de l'essai de nappe (protocole de réalisation) ;
5. Réalisation de l'essai de nappe proprement dit ;
6. Interprétation des résultats.

4.2.1. Analyse et réinterprétation des essais antérieurs

Pourquoi réinterpréter les essais précédents ?

Pour deux raisons :

- pour profiter des outils récents, notamment informatiques, qui permettent une nouvelle interprétation, plus poussées que celles réalisées il y a plusieurs décennies. Les résultats obtenus seront ainsi directement comparables à ceux obtenus dans le cadre de cette étude ;
- pour prédéfinir un modèle qui servira de base aux interprétations des essais menés dans le cadre de cette étude.

Le tableau de l'illustration 47 permet de visualiser les essais passés qui ont fait l'objet de réinterprétation.

Forages	type d'observation	durée du test (j)	Débit (m³/h)	Source
F4 1983	Puits	1,0	166 à 332	DDAF83, 1992
F5 1983	Puits	0,9	146 à 340	DDAF83, 1992
Obs.F7	piézo	-	-	DDAF83, 1992
Test interférences F4 / F5 1983	Puits	1.9	F4: 325 F5: 485	DDAF83, 1992
Obs.F7	piézo	-	-	DDAF83, 1992
Vidauban V1 Avr.2000	Puits	1.2	500	Boniface, 2000
Vidauban V2 Avr.2000	Puits	0,8	150	Boniface, 2000
F6 Juil.2008	Puits	2.5	316 à 618	Riou, 2008
Obs.F4	piézo	-	-	Riou, 2008

Illustration 47 - Historique des essais réalisés dans les deux champs captants, qui ont fait l'objet d'une réinterprétations (données provenant du SIAE et de Vidauban, références listées en bibliographie).

La méthodologie déployée et les résultats - issus de ces essais antérieurs à 2014 - sont développés dans les paragraphes suivants.

4.2.2. Mise en place du matériel de suivi des essais

A partir du début de l'année 2014, des appareils ont été mis en place dans les champs captants du SIAE (sur 3 points, dont deux ouvrages de captages, F3 et F5, et un piézomètre, F8) et de Vidauban (sur la source elle-même, sur V2, ouvrage non équipés, et V3, alors ouvrage unique de captage de Vidauban par forage), ainsi que sur le barrage sur l'Argens en amont immédiat du champ captant du SIAE, de manière à acquérir des données portant sur les niveaux d'eau et sur un certain nombre de paramètres physico-chimiques de terrain (température de l'eau, conductivité électrique de l'eau). Ces appareils sont constitués d'une ou de plusieurs sondes qui mesurent le paramètre désiré et qui le stockent sous forme numérique dans une mémoire statique. Des passages réguliers sur site permettent de recueillir les données et de les centraliser pour les exploiter ultérieurement.

Quatre types de matériels furent installés les 28 et 29 janvier 2014 :

- Sondes Diver (incluant une mémoire flash) de Schlumberger (Illustration 48) : pression absolue + une sonde barométrique (pour corriger la pression totale de la pression atmosphérique) :



Illustration 48 - Installation d'un Diver sur un ouvrage (cliché BRGM).

Les ouvrages de Vidauban V2 et V3, ainsi que le tube guide contre le barrage sur l'Argens en amont des champs captants ont été équipés de ces matériels. La sonde barométrique installée sur V2 permet de corriger les pressions absolues.

- Centrales Orpheus Mini de OTT (Illustration 49) : sonde pression immergée (pression corrigée par un capillaire en équilibre avec l'atmosphère) + centrale intégrée.

Cet appareil a été installé à la source, au niveau du trop-plein.



Illustration 49 - Installation d'une centrale Orpheus Mini à la source des Avens (cliché BRGM).

- Centrales Ecolog 800 de OTT (Illustration 50) : sonde pression immergée (pression corrigée par un capillaire en équilibre avec l'atmosphère) + centrale.



Illustration 50 - Installation d'une centrale Ecolog 800 (à gauche) sur un point (clichés OTT France).

Deux centrales Ecolog ont ainsi été installées sur les points F3 et F5 du SIAE.

- Centrale Dipper 3 de SEBA : sonde pression immergée (pression corrigée par un capillaire en équilibre avec l'atmosphère) + centrale.

Ce matériel a été installé sur le point F8 du SIAE.

Les données issues de ces appareils sont stockées dans un fichier numérique, ce qui permet de les exporter, les afficher dans des courbes, comme le montre le graphique de l'illustration 51.

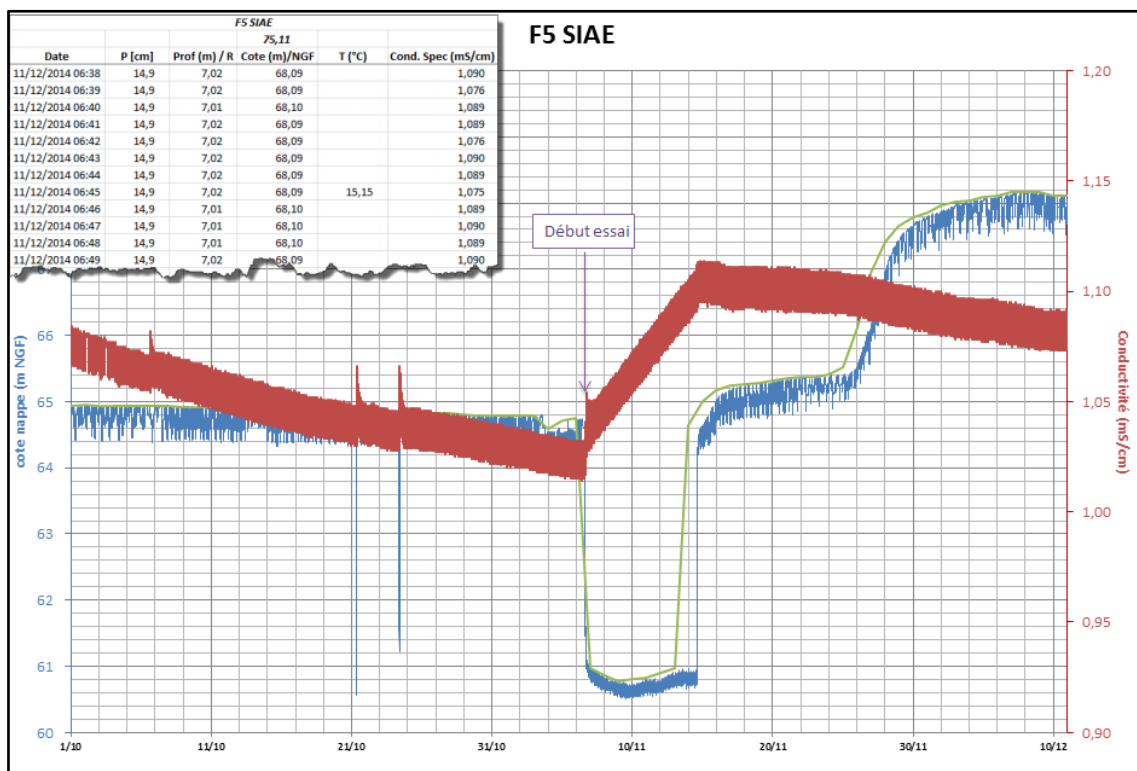


Illustration 51 - Exemple de données restituées concernant le point F5 du SIAE.

En conclusion, le tableau de l'illustration 52 récapitule les informations sur chaque point.

Point	Cote repère (m NGF)	Champ captant	Equipement	Paramètres suivis	Fréquence acquisition	Commentaire
BARRAGE	75,57	amont	Diver Schlumberger	Hauteur d'eau + conductivité	5' hors et en pompage	Dans tube-guide contre barrage RG Argens
F3 SIAE	73,63	SIAE	Ecolog 800 OTT	Piézométrie	15' hors pompage, 5' en pompage	Proche du F8
F5 SIAE	75,11	SIAE	Ecolog 800 OTT	Piézométrie	5' hors pompage, 1' en pompage	Au bout du CC, le plus proche du barrage
F8 SIAE	74,84	SIAE	Dipper 3 SEBA	Piézométrie	15' hors et en pompage	Piézomètre non équipé
SOURCE	65,6	Vidauban	Orpheus Mini OTT	Hauteur d'eau + conductivité	15' hors pompage, 5' en pompage	équipée au niveau du trop-plein
V2	72,78	Vidauban	Diver Schlumberger	Piézométrie	15' hors pompage, 5' en pompage	Anciennement F3 VIDAUBAN (avec baromètre)
V3	73,64	Vidauban	Diver Schlumberger	Piézométrie	15' hors pompage, 5' en pompage	Anciennement F2 VIDAUBAN (limite CC SIAE)

Illustration 52 - Récapitulatif des installations sur les points suivis dans les champs captants du SIAE et de Vidauban.

En annexe 1 de ce rapport sont portées des illustrations de l'installation des matériels sur les points suivis dans chaque champ captant et sur le barrage.

4.2.3. Réalisation des essais de puits individuels

Une fois le matériel de suivi installé et avant la réalisation de l'essai de nappe, il est nécessaire de réaliser des essais sur chacun des puits pompant isolément, les suivis s'effectuant sur les autres ouvrages laissés au repos. Ces essais, également appelés « essais par paliers de débit » permettent de caractériser le fonctionnement de chaque ouvrage et de participer à l'établissement du modèle d'aquifère qui sera élaboré suite à l'essai de nappe.

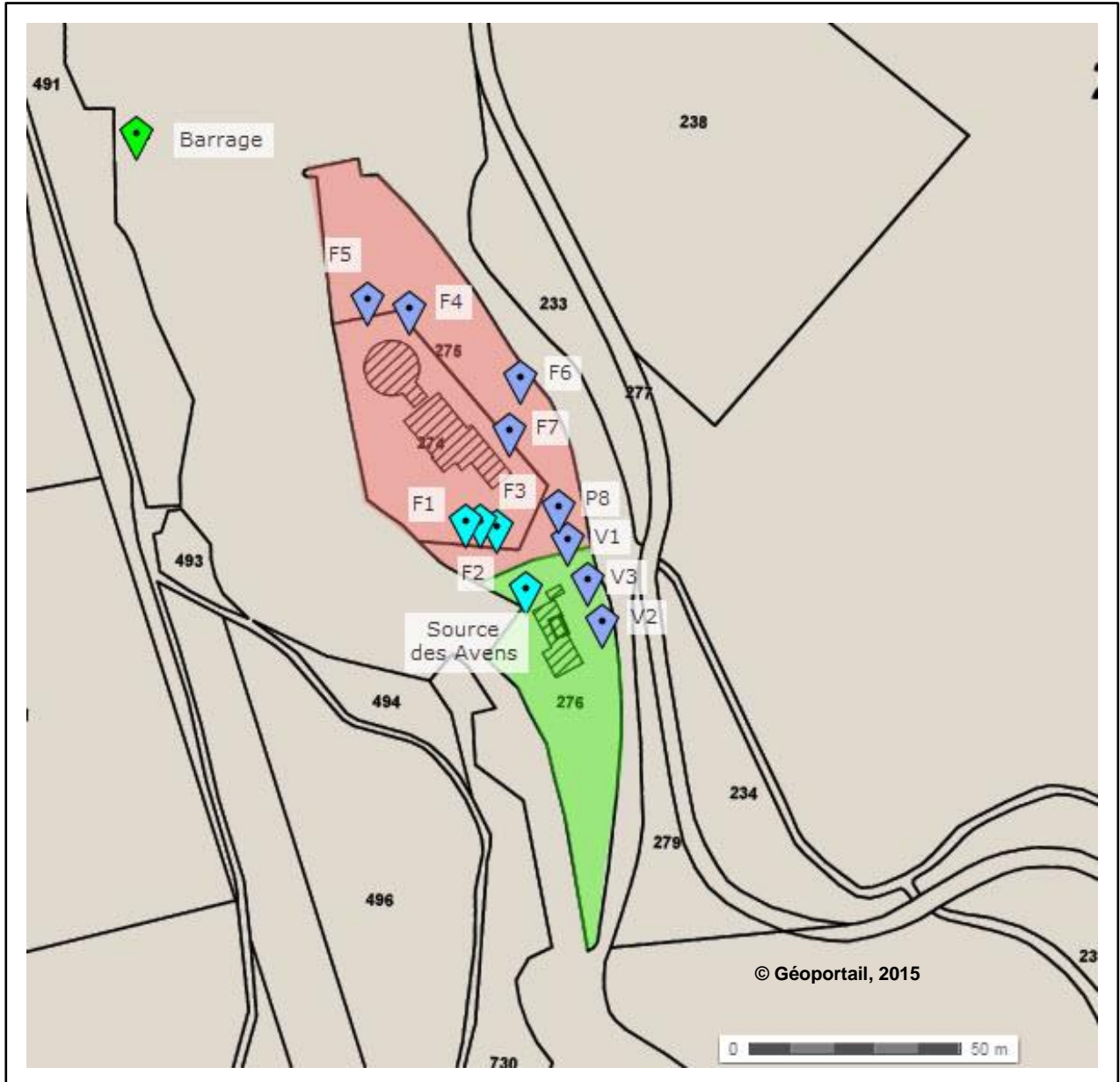
Les ouvrages équipés de pompes sont les suivants (voir tableau de l'illustration 53) :

- F4, F5, F6 pour le champ captant du SIAE, sollicitant les calcaires du Muschelkalk ;
- V3 pour le champ captant de Vidauban, sollicitant les calcaires du Muschelkalk ;
- la source des Avens, dans le champ captant de Vidauban, mais sollicitant les tufs.

Le principe de ces essais est, pour chaque puits, de réaliser au moins trois pompages de même durée à trois débits croissants et de mesurer le rabattement à un temps donné. Cela permet de dresser des courbes débits – rabattements et d'en déduire des informations sur les pertes de charges qui l'affectent, voire dans certains cas sur le débit critique de l'ouvrage.

Le tableau de l'illustration 53 résume les essais réalisés entre mai et août 2014.

Les interprétations des résultats et la modélisation qui en découle sont présentées dans les paragraphes suivants.



Essais par paliers de débit (2014)					
1 h de pompage + 1 h de remontée					
Forages	Date essai	Q ₁ (m ³ /h)	Q ₂ (m ³ /h)	Q ₃ (m ³ /h)	Q ₄ (m ³ /h)
F4 SIAE	19/08/2014	395	429	457	478
F5 SIAE	25/08/2014	471	537	578	615
F6 SIAE	03/06/2014	203	381	475	578
V3 Vidauban	22/05/2014	152	199	251	289
Source	04/06/2014	97	123	140	154

Illustration 53 - Plan des ouvrages et essais de puits réalisés entre mai et août 2014 (Fond de carte tiré de Geoportail, IGN 2015).

4.2.4. Préparation de l'essai de nappe (protocole de réalisation)

Il a finalement débuté le 06/11/2014, suivant le protocole suivant, défini en fonction notamment des résultats des essais de puits :

Pour répondre aux questions posées par les demandes du SIAE et de la commune de Vidauban, à savoir un doublement des prélèvements instantanés (125 à 250 l/s pour le SIAE, 60 à 120 l/s pour Vidauban, incluant des pompages discontinus dans la source de 150 à 160 m³/h), *il était impératif que l'essai se déroule à des débits instantanés cumulés au moins égaux à 350 l/s, et si possible, proches de 400 l/s (total SIAE + Vidauban). Il était également impératif que les tous débits puissent être mesurés à un pas de temps si possible équivalent à celui des hauteurs piézométriques, et sinon d'au moins 15 min, 5 min constituant le pas de temps idéal.*

Les résultats des pompages d'essais de puits, réalisés entre mai et août sur les forages F4, F5 et F6 du SIAE, F1 de Vidauban et sur la source, ont montré que les débits unitaires suivants pouvaient être pompés sans problème (Illustration 54) :

OUVRAGE	F4 SIAE	F5 SIAE	F6 SIAE	V1 VIDAUBAN	SOURCE*
Q (l/s)	133	171	161	80	43
Q (m ³ /h)	479	616	580	288	155

*prélèvement supposé en continu

Illustration 54 - Débits de pompages durant l'essai de nappe de novembre 2014 dans les champs captants du SIAE et de Vidauban

En faisant tourner deux des trois pompes en continu pour le SIAE, la pompe du forage de Vidauban et de la source, on voit que le débit atteint dépasse toujours 400 l/s :

COMBINAISONS	F5 + F6 +V1 + SOURCE	F4 + F5 +V1 + SOURCE	F4 + F6 +V1 + SOURCE
Q (l/s)	455	427	417
Q (m ³ /h)	1 638	1 538	1 502

*Illustration 55 - Combinaisons d'ouvrages à mettre en route dans le cadre de l'essai de nappe de novembre 2014 dans les champs captants du SIAE et de Vidauban.
En vert foncé la combinaison la plus avantageuse.*

Si toutes les pompes étaient mises en service simultanément au débit unitaire maximal testé, le débit instantané cumulé serait d'environ 588 l/s (2 117 m³/h), ce qui est très supérieur à la demande, mais permettrait de mieux qualifier la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

Pour tenir compte des contraintes d'exploitation et de rejet des eaux durant l'essai, le protocole suivant a été proposé – et accepté :

A- Dans un premier temps (sur 5 jours) : les pompes F5, F6, V1 et la pompe de la source tournent simultanément

- 1) coupure quelques heures avant le début de l'essai de la pompe de la source
- 2) mise en route de la pompe V1 au débit de 80 l/s (288 m³/h)
- 3) deux heures après, mise en route de la pompe F5 au débit de 171 l/s (616 m³/h)

- 4) quatre heures après la mise en route de la pompe F5, mise en route de la pompe F6 au débit de 161 l/s (580 m³/h)
- 5) deux heures après, mise en route de la pompe de la source (150 à 160 m³/h). Il est préférable que la pompe de la source tourne en continu durant l'essai (avec rejet du trop-plein dans le bras mort). Dans le cas contraire, on privilégiera des pompages à débit moindre mais plus long à des pompages plus forts mais plus courts.

Le débit de l'essai devrait donc être atteint au bout de 6 h. Il faudra tenter de maintenir ce débit constant sur les 3 à 5 jours qui suivent.

B- Dans un second temps (sur les 3 jours restants) : les pompes F4, F5, F6 et V1 tournent simultanément :

- 6) Mise en route de la pompe F4, 4^{ème} après le démarrage du pompage au débit de 133 l/s (479 m³/h)

Le débit maximal d'exploitation des deux champs captants devrait donc être dépassé et maintenu sur les derniers jours de l'essai.

Pour la fin de l'essai, il était proposé l'arrêt des pompes une après l'autre, toutes les deux heures, de F6 jusqu'à V1, et de laisser la remontée s'effectuer pour disposer des données de remontée non influencée.

In fine, les données de débits et de hauteurs mesurés et stockés par le SIAE (Veolia) et Vidauban ont été être remises au BRGM, elles constituent en effet les paramètres fondamentaux d'interprétation de l'essai.

L'essai de nappe s'est donc déroulé à partir du 06/11/2014. Il a dû être interrompu le 11/11/2014, suite à d'importantes précipitations qui ont affecté les niveaux de nappe. Il a donc duré près de 5 jours (7000 minutes), contre les 8 jours prévus initialement. Après interprétation des résultats, il n'a pas été jugé utile de refaire un essai plus long (voir paragraphes suivants).

Du fait de cette interruption, la pompe du forage F4 n'a pas pu être mise en route.

4.3. INTERPRETATION DES ESSAIS

4.3.1. Essais de puits

Les essais de puits ou essais par paliers de débit sont destinés à estimer les pertes de charge quadratiques liées au puits. Elles 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 l'aquifère. Ces essais ont été interprétés suivant la méthode de Jacob (Cooper et Jacob, 1946), où le rabattement, s , à la fin de chaque palier est décrit par la relation suivante :

$$s=BQ+CQ^2$$

avec :

B : coefficient de pertes de charge linéaires liées à l'aquifère (m⁻³s),

C : coefficient de pertes de charge quadratiques liées au puits (m⁻⁵s²),

s : rabattement en mètre après un certain temps de pompage (en général 1 ou 2 heures)

Q (m³/h) le débit de chacun des paliers.

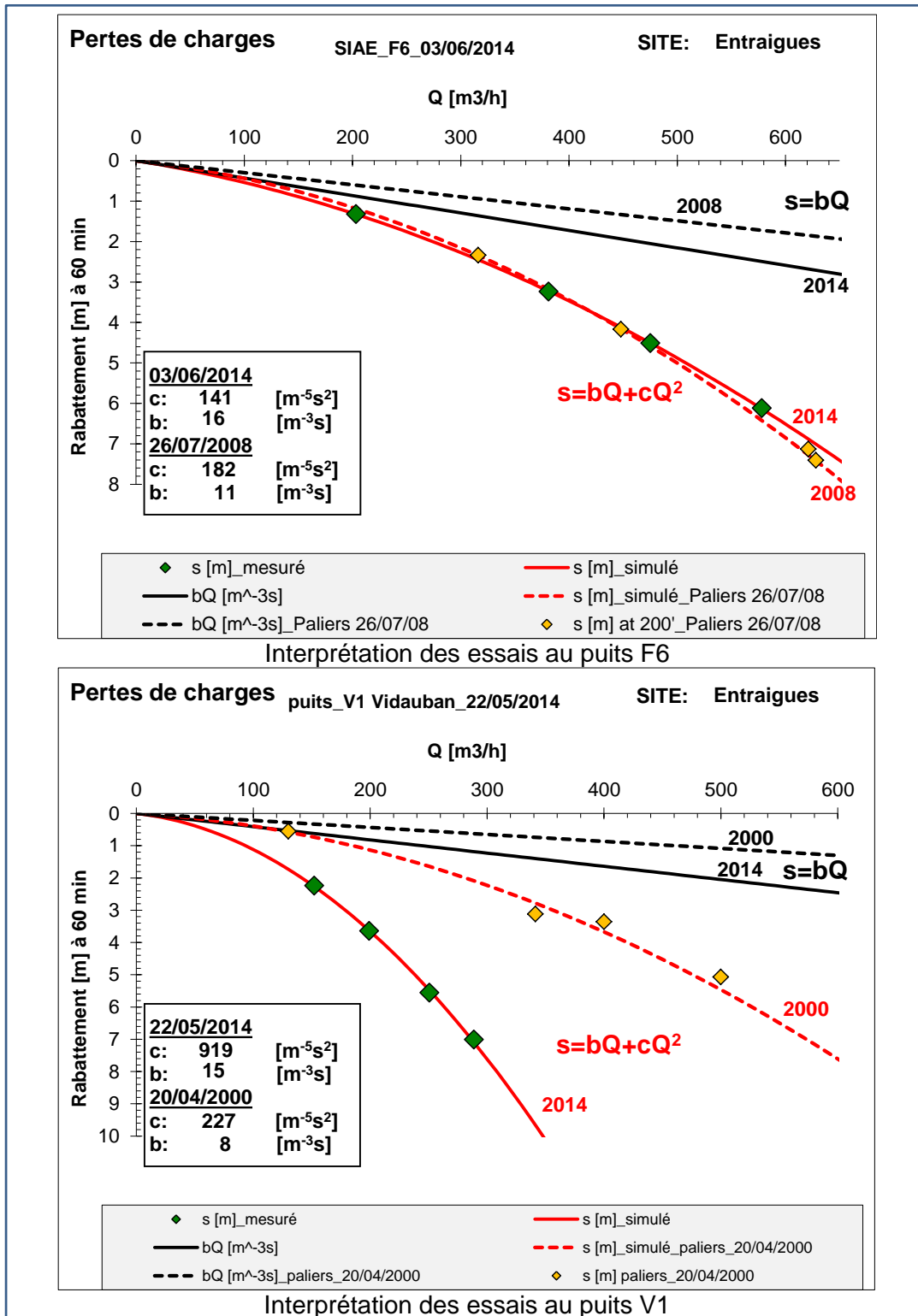


Illustration 56 - Interprétation des essais par paliers aux puits F6 et V1

Les graphiques de l'illustration 56 présentent l'interprétation des essais aux puits F6 et V1 avec la comparaison aux essais par paliers antérieurs disponibles. Les autres interprétations, uniquement disponibles pour 2014 (pas d'essai par paliers antérieur), sont présentées en annexe 3. Le tableau de l'illustration 57 en synthétise les résultats.

<i>Forages</i>	<i>débit (m³/h)</i>	<i>C (m⁻⁵s²)</i>	<i>B (m³s)</i>
SIAE F4 19/08/2014	395; 429; 457; 478	484	13
SIAE F5 25/08/2014	471; 537; 578; 615	78	4
SIAE F6 26/07/2008	316; 448; 628; 621	182	11
SIAE F6 03/06/2014	203; 381; 475; 578	141	16
Vidauban V1 20/04/2000	130; 341; 400; 500	227	8
Vidauban V1 22/05/2014	152; 199; 251; 289	919	15
Vidauban Source des Avens 04/06/2014	97; 123; 140; 154	8	0.4

Illustration 57 - Synthèse des pertes de charge évaluées à partir des essais par paliers de débit sur les ouvrages du site d'Entraigues.

B : coefficient de pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère) et C : coefficient de pertes de charge quadratiques (liées au puits).

Dans les calcaires fracturés du Muschelkalk (F4, F5, F6 et V1), les coefficients C (pertes de charge liées au puits) sont assez variables :

- ils sont plutôt faibles dans F5 et F6 (80 à 140 m⁻⁵s²) et traduisent de bons échanges entre l'aquifère et les puits,
- ils sont moyennement élevés en F4 (500 m⁻⁵s²) à élevés en V1 (900 m⁻⁵s²; essai 2014) traduisant pour ce dernier cas de moins bons échanges.

La comparaison des essais de 2014 avec les essais antérieurs, uniquement disponibles pour F6 et V1, montre dans le cas de F6 une légère amélioration de la productivité du puits. Par contre, pour V1 les pertes de charge quadratiques ont quadruplé entre 2000 et 2014 ce qui traduit vraisemblablement une diminution de la qualité des échanges entre le puits et l'aquifère entre ces deux périodes, et donc une probable détérioration partielle de l'ouvrage. Les coefficients B (pertes de charge liées à l'aquifère) déduits de l'ensemble des interprétations sont faibles (aux alentours de 10 m⁻³s), traduisant la très bonne perméabilité de l'aquifère du Muschelkalk.

Concernant les tufs (source des Avens), la faible amplitude des rabattements – 2 à 3 cm – pour les débits appliqués (97 à 154 m³/h) ne permet pas une estimation fiable de ces coefficients. On retiendra que ceux-ci sont très faibles, plus que dans les forages et traduisent le fait que les tufs sont plus transmissifs que les calcaires fracturés du Muschelkalk (B < 1 m⁻³s). Ce qui est finalement attendu pour des tufs « caverneux » (nombreuses cavités ; cf. coupes géologiques des ouvrages en annexe 2).

Les valeurs des coefficients de pertes de charge au puits ont pu, dans certains cas, être affinées par la modélisation des essais (F6, V1, source des Avens). Par contre, dans les cas de F4 et F5 les essais par paliers de débit ont été légèrement perturbés par les pompages d'exploitation au forage V1 et n'ont pas pu être modélisés. Cependant, les ordres de grandeur indiqués dans le tableau de l'illustration 57 sont corrects. Pour ces cas, seul l'essai multi-puits de novembre 2014 permettra d'améliorer l'estimation de ces coefficients pour ces puits et/ou de constater une éventuelle amélioration/détérioration des ouvrages.

4.3.2. Méthodologie d'interprétation des pompages d'essai

a) Principe

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma suivant (Illustration 58). Elle sera utilisée pour interpréter les essais réalisés sur les forages du site d'Entraigues (essais historiques et essais par paliers de débit).

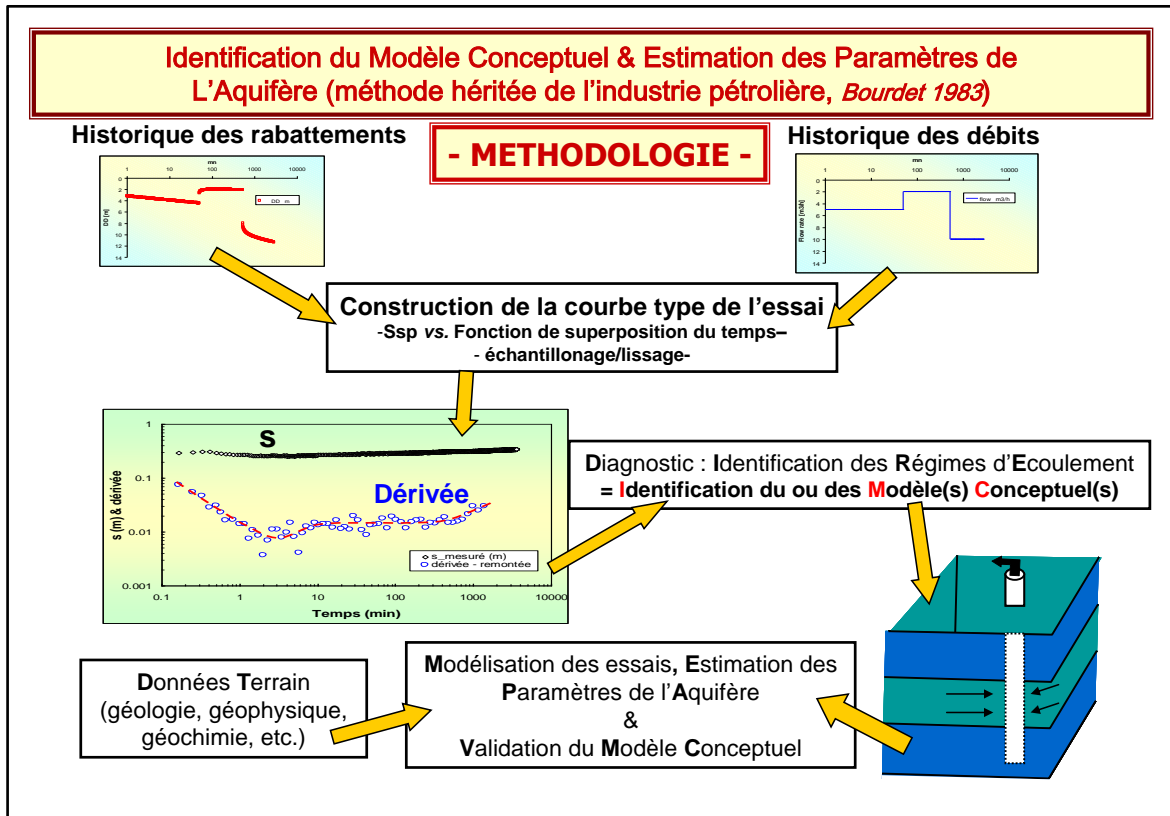


Illustration 58 - Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.

Dans les paragraphes qui suivent, et c'est bien le principe de la modélisation, on assimile les aquifères à des milieux homogènes et continus, ce qui ne constitue qu'une approximation et une schématisation de la réalité.

L'interprétation des essais de pompage dans les formations fracturées, karstifiées ou dans les formations sédimentaires hétérogènes est souvent complexe, conséquence de la géométrie des réseaux de fractures, des conduits karstiques, 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, 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 ($\partial s / \partial \ln t$; 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 ; Spang and Wurster, 1993...). L'avantage de cette

méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère, mais aussi qu'à chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l'aquifère par exemple) 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, Shlumberger, 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. Le graphique de l'illustration 59 présente comme exemple les différents types d'écoulements que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère situé dans un aquifère rectangulaire où, tour à tour, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.

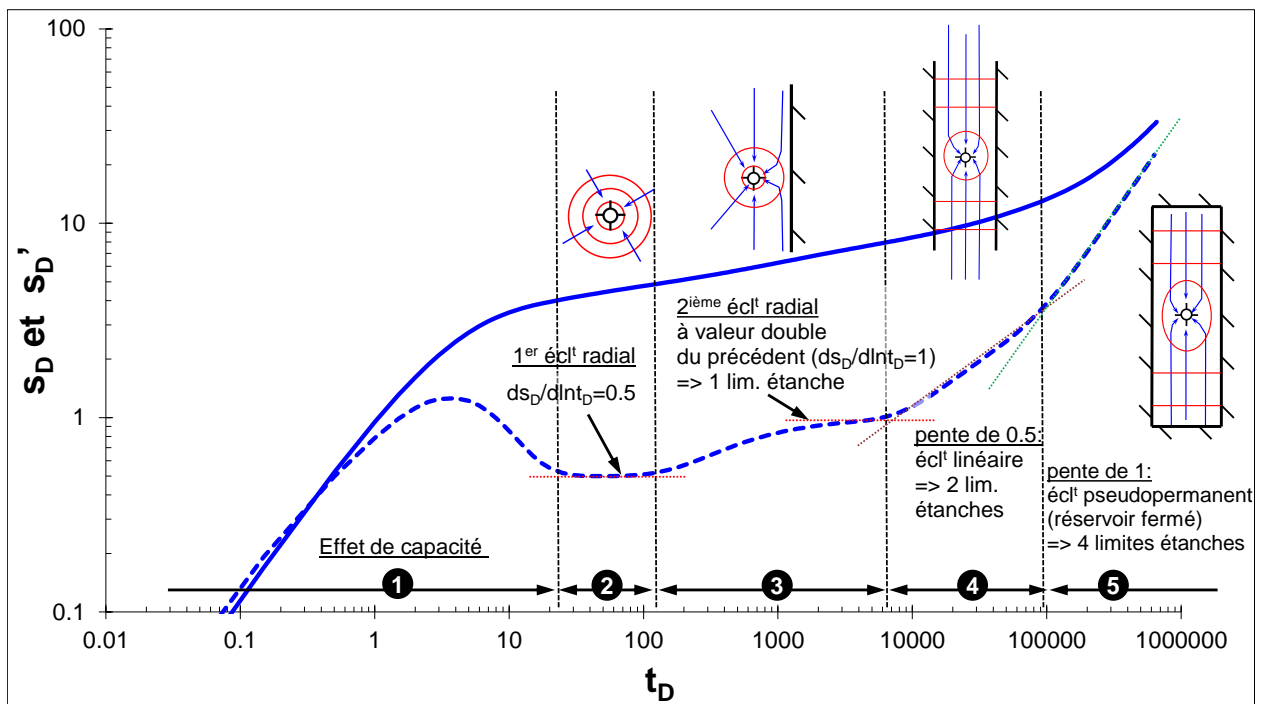


Illustration 59 - Exemple de succession de régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, 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 donc 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.

b) Diagnostic des essais

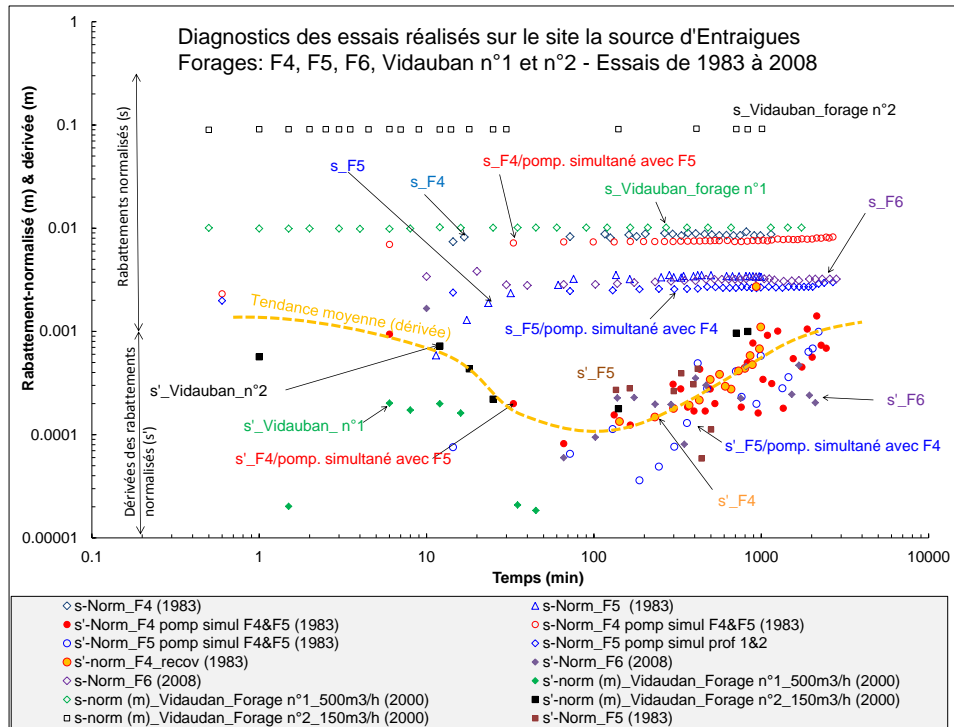
❖ Calcaires fracturés du Muschelkalk

Les essais disponibles pour les diagnostics sont les essais historiques effectués au moment de la réalisation des ouvrages. Ces essais, réalisés de 1983 à 2008 concernent les ouvrages F4, F5, F6, V1 et V2 (F4 et F5 en 1983, F6 en 2008 et V1 & V2 en 2000) ; soit, excepté V2, l'ensemble des forages dans les calcaires fracturés du Muschelkalk aujourd'hui exploités (graphiques de l'illustration 60). Ceux-ci ont été choisis car ils sont les moins perturbés par l'exploitation du site et donc par un pompage voisin pouvant perturber la réponse au puits pompé et rendant la méthodologie décrite inappropriée. Néanmoins, et à titre indicatif, les courbes de l'essai multi-puits entre F4 et F5 de 1983 ont aussi été utilisées (le pompage synchrone des deux ouvrages n'a dans ce cas pas trop perturbé la tendance de la courbe de dérivée).

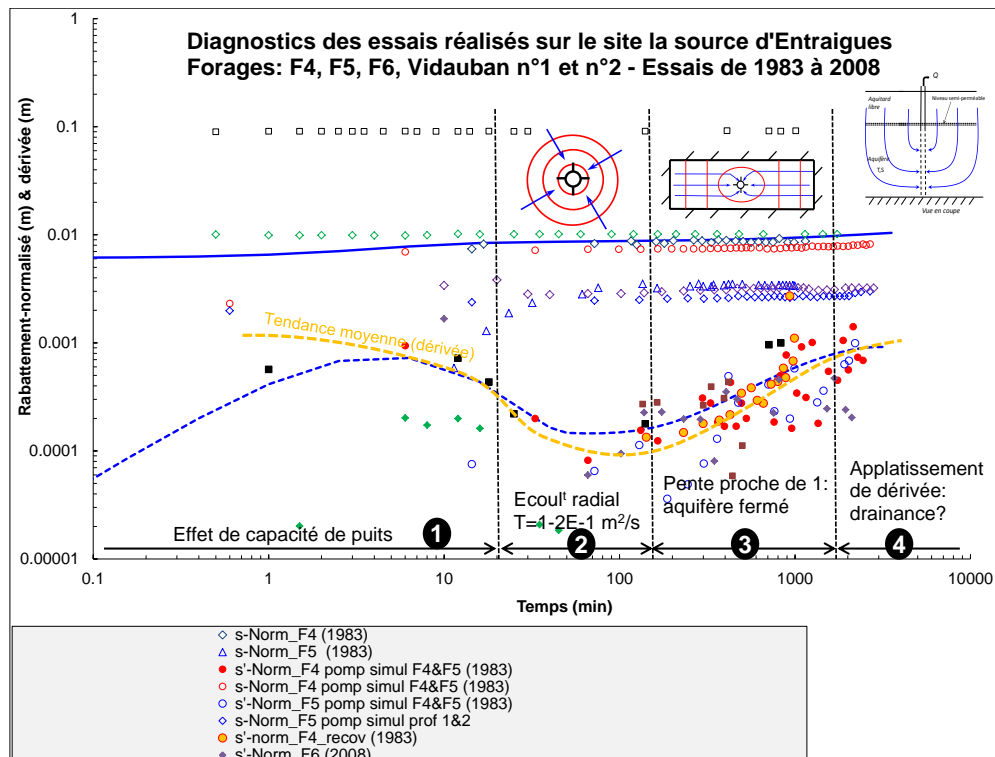
En raison de la numérisation des graphiques, ce qui a introduit des artéfacts lors de la numérisation, mais aussi en raison de la quasi-stabilisation des niveaux dans les ouvrages, les courbes de dérivées (s'-Norm) sont bruitées mais décrivent toutes une forme commune montrant que les forages captent tous un même aquifère. Concernant les courbes de rabattement normalisé, les valeurs sont différentes d'un puits à l'autre à cause des pertes de charge intrinsèques à chaque puits.

L'analyse des courbes de dérivées permet d'identifier une succession d'écoulements distincts plus ou moins aisément discernables à cause du bruit des courbes de dérivées. Ces écoulements sont :

- 1- du début de l'essai à environ 10-20 minutes, les courbes décrivent un effet capacitif lié à l'équipement du puits. Celui-ci peut être différent d'un puits à l'autre ;
- 2- de 20 à environ 200 minutes : les courbes tendent à montrer un plateau, synonyme d'un écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère peut être déduite (T : de 1 à $2 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$) ;
- 3- de 200 à 1 700 minutes environ, la dérivée augmente constamment suivant une pente proche de 1 caractéristique d'un aquifère fermé. C'est-à-dire que rapidement, vers 200 min, le rabattement atteint une série de limites étanches, suffisamment nombreuses pour clore le système ;
- 4- et de 1 700 à la fin des essais (environ 3 000 minutes pour les plus longs), les courbes de dérivées tendent à s'aplatir traduisant vraisemblablement un effet de drainance.



Rabattements normalisés et dérivées des essais sur les forages du site d'Entraigues (F4, F5, F6, V1 et V2, aquifère du Muschelkalk).



Diagnostic des essais réalisés sur le site d'Entraigues. (F4, F5, F6, V1 et V2, aquifère du Muschelkalk).
s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente et recov : à la remontée du niveau. Modèle : courbes bleues, continue : rabattement, pointillée : dérivée

Illustration 60 - Essais dans les ouvrages atteignant le Muschelkalk.

Ce diagnostic montre que les forages sont implantés dans un aquifère transmissif, transmissivité de 0,1 à 0,2 m²/s, que celui-ci est limité dans l'espace et, éventuellement, soumis à des effets de drainance. Ces effets de drainance peuvent provenir du flux d'eau profonde, le même que celui alimentant la source des Avens et/ou des formations sus-jacentes (eau des tufs transitant par les formations marno-sableuses situées à l'interface tufs / calcaires fracturés du Muschelkalk). Ce diagnostic montre la réaction typique d'un aquifère multicouche limité dans l'espace par au moins quatre limites étanches orthogonales. La forte transmissivité du Muschelkalk correspond certainement à une zone très fracturées, voire localement karstifiées. L'illustration 60 présente un exemple de modélisation des rabattements et dérivées normalisés (courbes bleues ; modélisation au puits F4 essai de 1983). La modélisation des essais, avec la prise en compte des variations de débit permettra de vérifier la cohérence de ce diagnostic.

❖ Tufs

Pour les tufs, le seul essai dont nous disposons est l'essai de puits : 4 paliers de débit de 60 minutes réalisé en 2014. Le diagnostic de cet essai a été réalisé sur le premier palier de débit, il montre (Illustration 61) :

- 1- du début de l'essai à environ 1 à 2 minutes, la courbe décrit un plateau à partir duquel la transmissivité de l'aquifère peut être déduite, de l'ordre de 5×10^{-1} m²/s ;
- 2- et de 2 minutes à la fin de l'essai, la dérivée diminue (stabilisation du niveau) suivant une pente proche de -1, caractéristique d'une limite d'alimentation.

Ce diagnostic montre que la source des Avens est localisée au sein d'un aquifère très transmissif et plus transmissif, comme pressentie lors de l'analyse des essais par paliers de débit, que celui des calcaires fracturés du Muschelkalk (T de l'ordre de de 0,5 m²/s). Ce diagnostic suggère la présence d'une limite alimentée (c'est à dire une limite à potentiel imposé), vraisemblablement liée à l'Argens et/ou aux nombreux conduits situés dans les tufs. Le graphique de l'illustration 61 présente la modélisation du rabattement et de la dérivée normalisés (courbes bleues). Comme dans les essais dans le Muschelkalk, la modélisation de l'essai permettra de vérifier la cohérence de ce diagnostic.

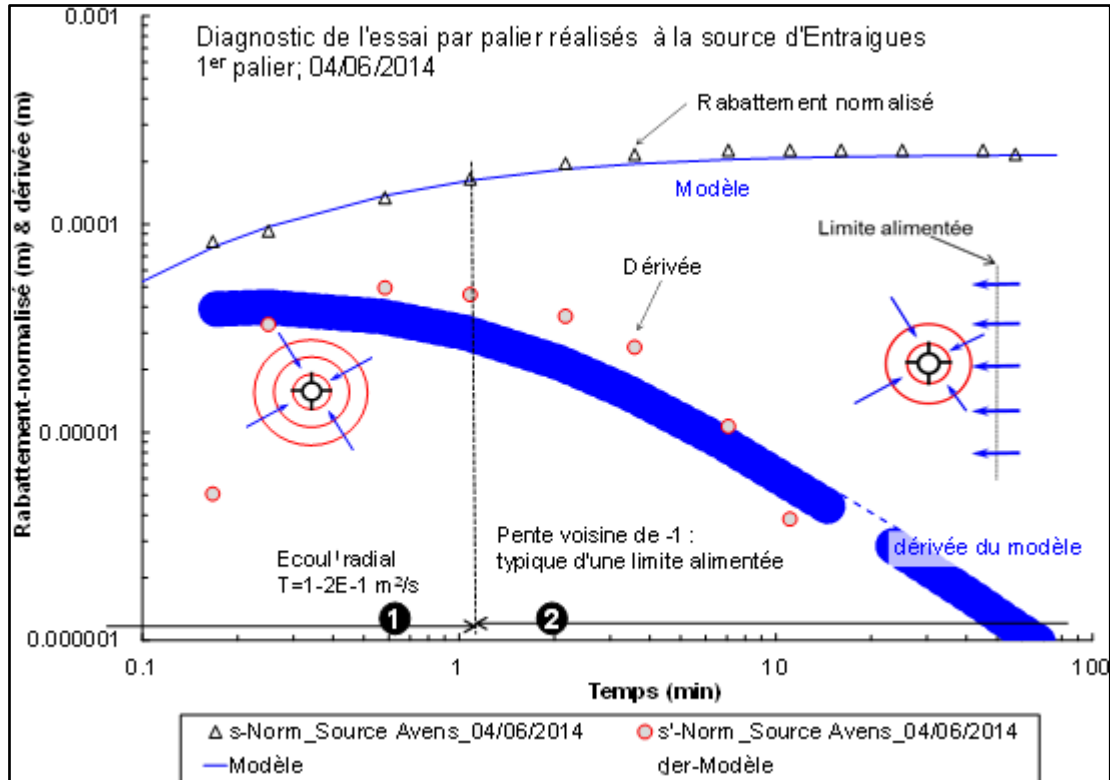


Illustration 61 - Diagnostic du premier essai par palier de débit à la source des Avens (aquifère des tufs). s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente et recov : à la remontée du niveau. Modèle : courbes bleues, continue : rabattement, pointillée : dérivée.

4.3.3. Modèles mathématiques utilisés pour interpréter les essais

a) Modèle avec une limite alimentée

Le modèle suivant (Illustration 62) présente la solution pour le calcul du rabattement pour un essai par pompage dans un aquifère homogène isotrope situé à proximité d'une limite alimentée. Dans ce modèle, les paramètres de l'aquifère sont : la transmissivité (T) et son emmagasinement (S). Le puits est situé à une distance 'a' du puits de pompage. Ce modèle correspond au modèle de Theis + une limite alimentée. Le modèle prend aussi en compte des effets liés au puits : capacité de puits, skin, pertes de charge quadratiques. Le skin de puits, ou effet pariétal, peut être positif, il traduit dans ce cas une réduction des échanges entre le puits d'aquifère voire une possible détérioration de l'ouvrage, ou négatif, dans ce cas il traduit un fort développement du puits et donc de très bon échanges entre le puits et l'aquifère.

L'illustration 63 présente les courbes types du comportement du rabattement et de sa dérivée pour une limite alimentée située de plus en plus loin du puits (distances en temps d'influence adimensionnel de $3 \cdot 10^3$ à l'infini ; ce dernier cas correspond au cas sans limite donc à la solution de Theis). On remarque que les premiers temps du pompage sont affectés par les effets de puits, ils sont caractérisés par un bombement de la courbe de dérivée. Puis, un écoulement radial s'établit (pour $t_D > 1500$) et la dérivée prend l'allure d'un plateau (valeur de 0,5 en adimensionnel). Une fois que la limite alimentée est atteinte la dérivée décroît suivant une pente de -1 traduisant une stabilisation du rabattement. La valeur de cette pente est caractéristique de l'atteinte d'une limite alimentée. Seul l'essai sur la source des Avens a montré un tel comportement (essai par paliers de débit du 04/06/2014).

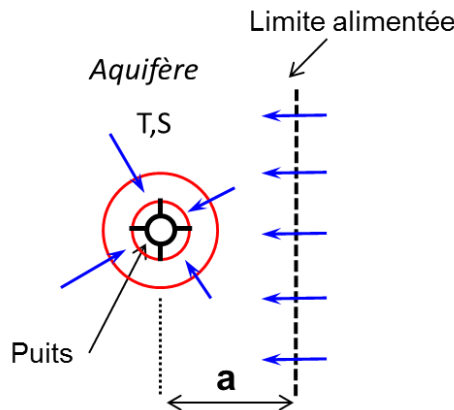


Illustration 62 - Modèle avec effet d'une limite alimentée située à proximité de l'ouvrage pompé (Theis +alimentée).

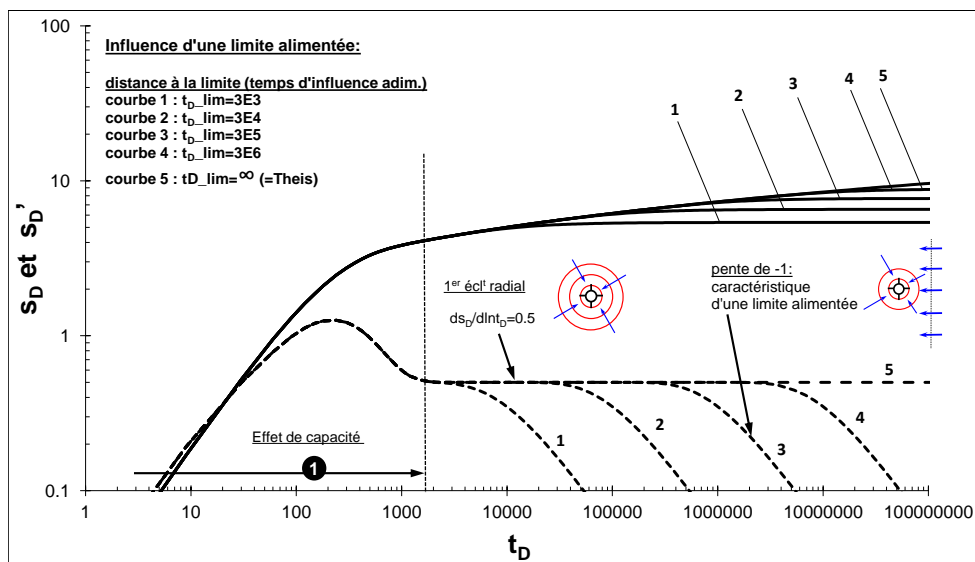


Illustration 63 - Courbes types de la solution Theis + une limite alimentée : influence de la distance à la limite.

b) Modèles multicouches et limités dans l'espace

Les modèles mathématiques choisis pour modéliser les essais dans les calcaires du Muschelkalk sont des modèles génériques 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. Deux modèles à effet de drainance sont utilisés pour interpréter les essais par pompage :

- l'un, issu de la solution de Hantush (1964), considère que la variation du niveau dans l'aquitard supérieur est négligeable durant l'essai (Illustration 64). Ce modèle sera utilisé pour modéliser l'ensemble des essais historiques et les essais par paliers de 2014, car ceux-ci ne disposent pas d'observation du niveau sur l'aquifère de surface (tufs),
- le second, issu de la solution de Hunt et Scott (2007), tient compte d'un abaissement du niveau piézométrique de l'aquitard durant le pompage. Il est défini par une transmissivité T_0 et un emmagasinement S_y . Notons que cette seconde solution est identique à la précédente pour $T_0 \rightarrow \infty$ ou $S_y \rightarrow \infty$; dans ce cas, le niveau dans l'aquitard n'évolue pas

durant l'essai. Cette solution sera utilisée uniquement pour modéliser l'essai multi-puits de novembre 2014.

Un troisième modèle, non décrit dans cette partie, et dérivant des travaux de Hunt (2003), sera utilisé pour évaluer l'impact sur le cours d'eau. Il est présenté dans l'évaluation de l'impact en termes de débit sur l'Argens (paragraphe 4.3.6).

Les deux modèles issus des travaux de Hantush (1964) et de Hunt et Scott (2007) ont été étendus par le BRGM, pour le premier aux notions d'anisotropie 3-D et de limites étanches, et pour le second aux notions d'anisotropie 2-D et de limites étanches. Ces modèles permettent aussi de prendre en compte plusieurs puits de pompage (cf. modélisation de l'essai multi-puits sur F4 et F5 en 1983 en annexe). Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- *un aquifère multicouche surmonté d'un aquitard séparé du premier par un semi-perméable, (effet de drainance). Suivant le modèle choisi le niveau d'eau dans l'aquitard peut varier (Hunt et Scott modifié) ou non (Hantush modifié) ;*
- *prise en compte d'une anisotropie de perméabilité (ou transmissivité) 2-D (Hunt et Scott modifié) ou 3-D (Hantush modifié), suivant le modèle choisi. 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) ;*
- *captage partiel du forage et du piézomètre dans l'aquifère, uniquement pour le modèle Hantush modifié ;*
- *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 ;*
- *calcul du rabattement dans l'aquifère de surface (aquitard) ; modèle de Hunt et Scott modifié uniquement ;*
- *et prise en compte des effets liés au puits (capacité de puits, skin, pertes de charge quadratiques).*

Le choix d'une modélisation "aquitard sur aquifère" peut sembler contradictoire avec ce qui est énoncé par ailleurs, notamment par le fait que les tufs sont aquifères, mais il se justifie par la présence d'une éponte marneuse semi-perméable de quelques mètres d'épaisseur, qu'on assimile à cet aquitard

En résumé, deux modèles ont été utilisés pour reproduire l'essai de longue durée :

- a. Le modèle de Hunt et Scott (2007) modifié qui prend en compte de bas en haut : un aquifère profond (Muschelkalk), un aquitard (niveau marneux entre le Muschelkalk et les Tufs) et un aquifère de surface ; dans ce modèle les tufs et le Muschelkalk sont pompés.

Ce modèle est le plus fiable pour ce qui est de la modélisation des rabattements au niveau des différents ouvrages et donc pour les modélisations qui suivent.

Cependant, même si les modélisations dans les tufs sont de bonne qualité, elles n'ont pu se faire qu'avec un paramètre de perméabilité pour l'aquitard un peu plus perméable, ce qui traduit vraisemblablement une connexion hydraulique assez forte à proximité de la

source entre les tufs et le Muschelkalk, a priori la structure drainante qui alimente la source.

- b. Le modèle de Hunt 2003 modifié, qui est utilisé pour estimer l'ordre de grandeur de l'impact des pompages dans le Muschelkalk sur le débit de l'Argens. Ce modèle est composé de deux niveaux :
- un niveau aquifère inférieur pompé (Muschelkalk)
 - un aquitard sus-jacent.

Dans ce modèle l'aquitard est supposé représenter l'ensemble marne + tufs. Comme le niveau marneux est très peu perméable dans ce cas les erreurs sur l'estimation du débit sont minimales, en revanche le niveau modélisé dans l'aquitard n'est que très approximatif.

Les paramètres de ce modèle sont identiques à ceux du modèle précédent (T, S, limites, propriétés de l'aquitard), les niveaux dans le Muschelkalk sont, cependant, reproduits avec la même qualité que ceux du modèle précédent.

Les figures de l'illustration 64 présentent les modèles et le tableau de l'illustration 65 leurs paramètres.

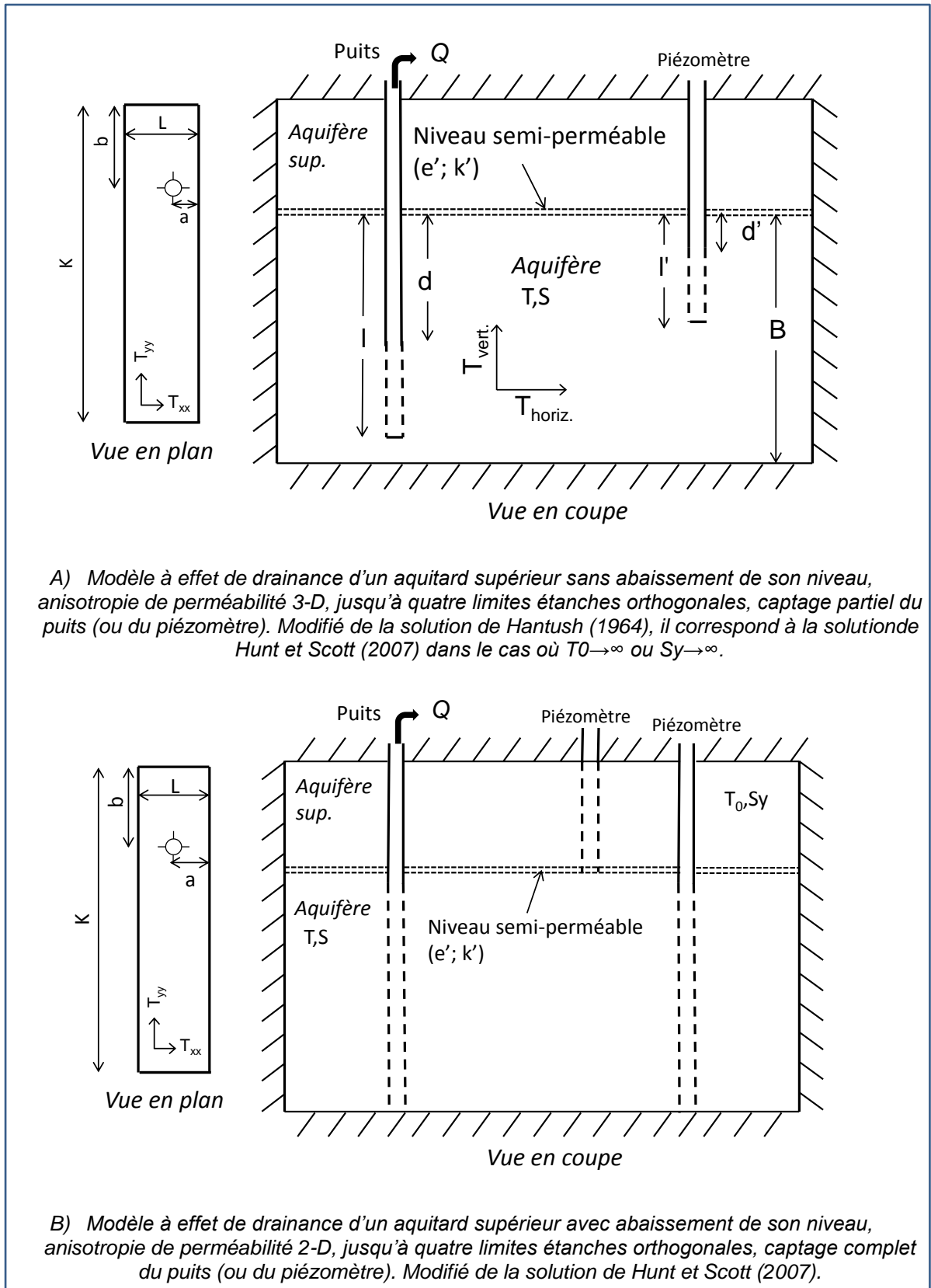


Illustration 64 - Les modèles multicouches applicables au site d'Entraigues.

Paramètres des modèles modifiés de Hantush, 1964 et Hunt et Scott, 2007	
distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Épaisseur de l'aquifère***	B (m)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Épaisseur de l'éponte	e' (m)
Transmissivité de l'aquitard*	T ₀ (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquitard*	Sy (-)
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)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)

* Les paramètres de l'aquitard ne sont valables que pour la solution de Hunt et Scott (2007).

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

*** uniquement pour la solution modifiée de Hantush (1964)

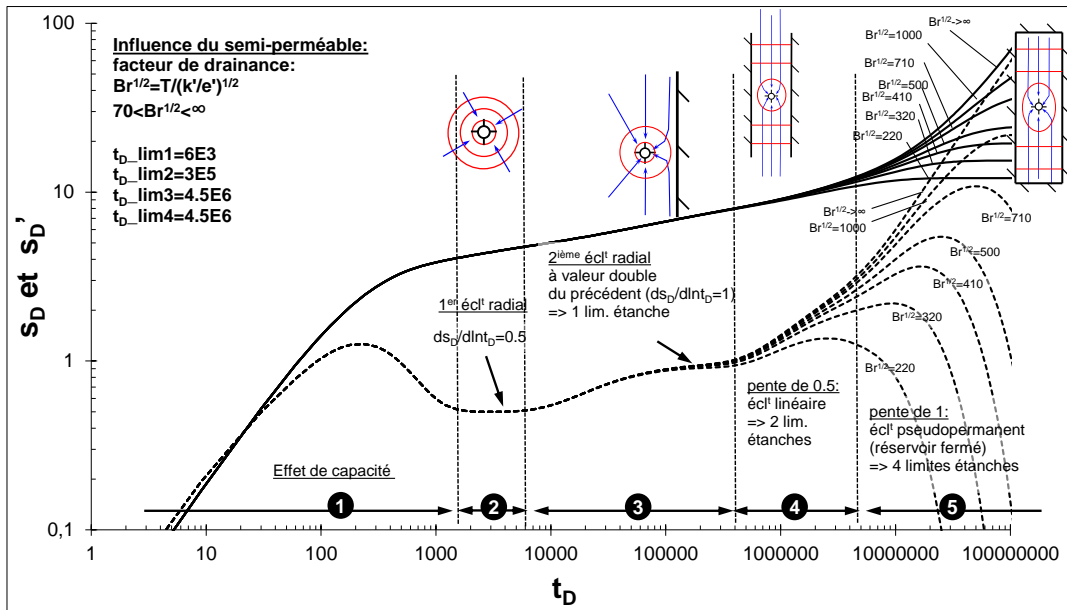
Illustration 65 - Paramètres des modèles à effet de drainance (modèles modifiés de Hantush, 1964 et Hunt et Scott, 2007).

Les figures de l'illustration 66 et de l'illustration 67 présentent des courbes types de ces deux modèles. 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} : 6 000, 300 000, 4 500 000 et 4 500 000). Dans ces modèles, la drainance de l'aquitard n'intervient qu'après l'atteinte de la première limite.

L'illustration 66 présente l'effet du facteur de drainance ($Br^{1/2}=T/[k'/e']^{1/2}$), soit la capacité du semi-perméable à laisser passer l'eau. On notera que dans le modèle où l'aquitard de surface réagit au pompage, on a une reprise du rabattement une fois que l'aquitard a atteint ces limites (dans ce cas les deux limites sont à équidistance du puits de pompage), ce qui n'est pas le cas pour la solution modifiée de Hantush.

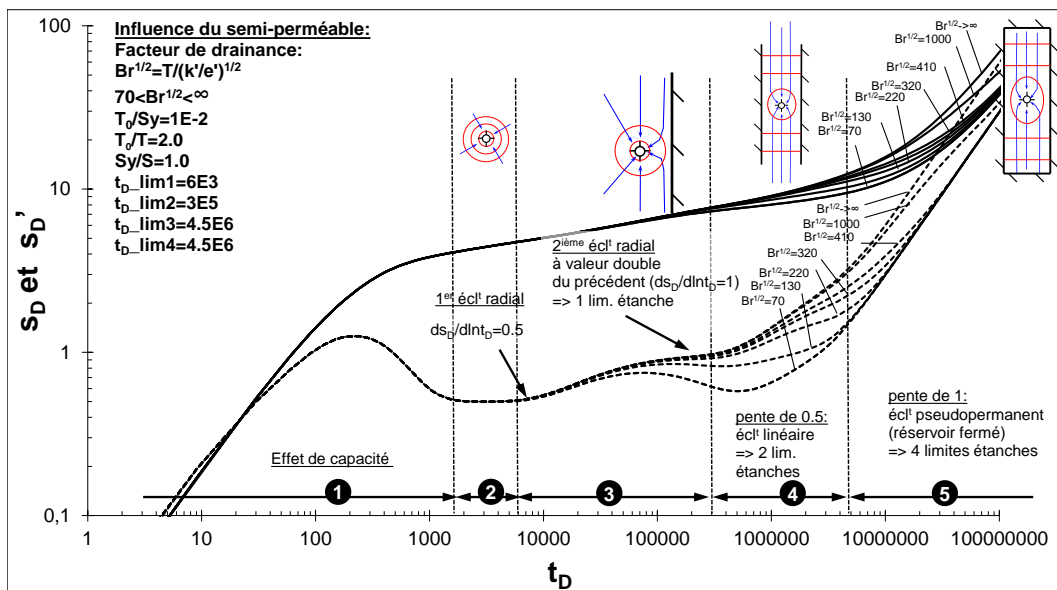
L'illustration 67 présente l'allure des courbes pour des variations des paramètres de l'aquitard (T₀ ; et Sy) pour le modèle modifié de la solution de Hunt et Scott (2007). On notera que Sy est un paramètre très sensible, plus que la transmissivité et qu'il a pour principal effet de décaler de façon apparente l'atteinte des limites du système, quand Sy 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).



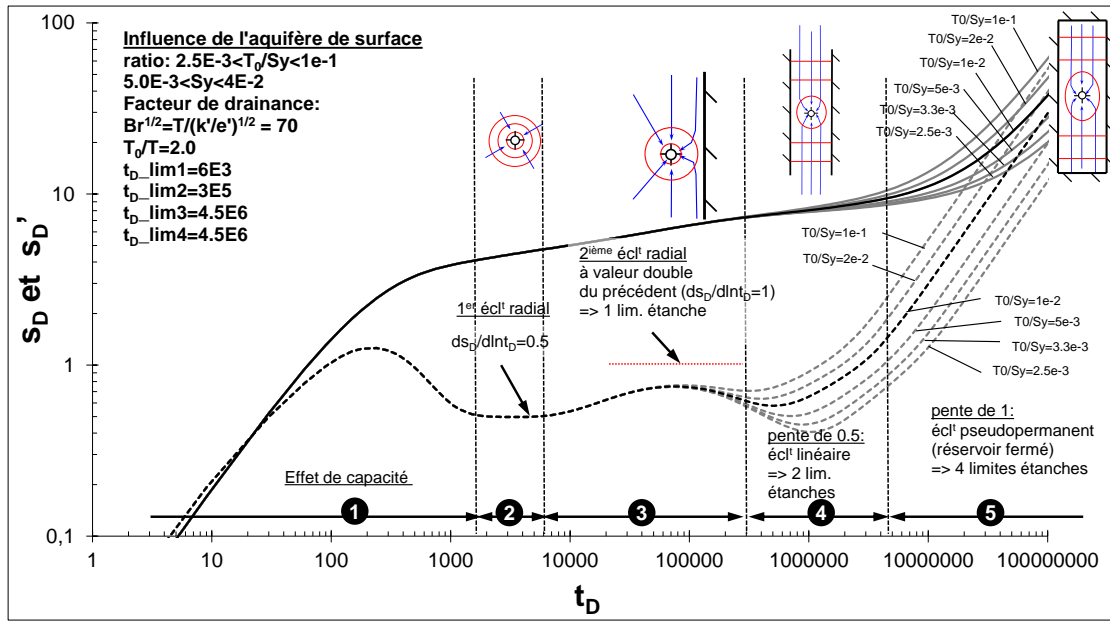
Courbes types de la solution modifiée de Hantush : influence du facteur de drainage du semi-perméable ($Br^{1/2}$).

s_D et s'_D : rabattement et dérivée sans dimension ; t_D : temps sans dimension.

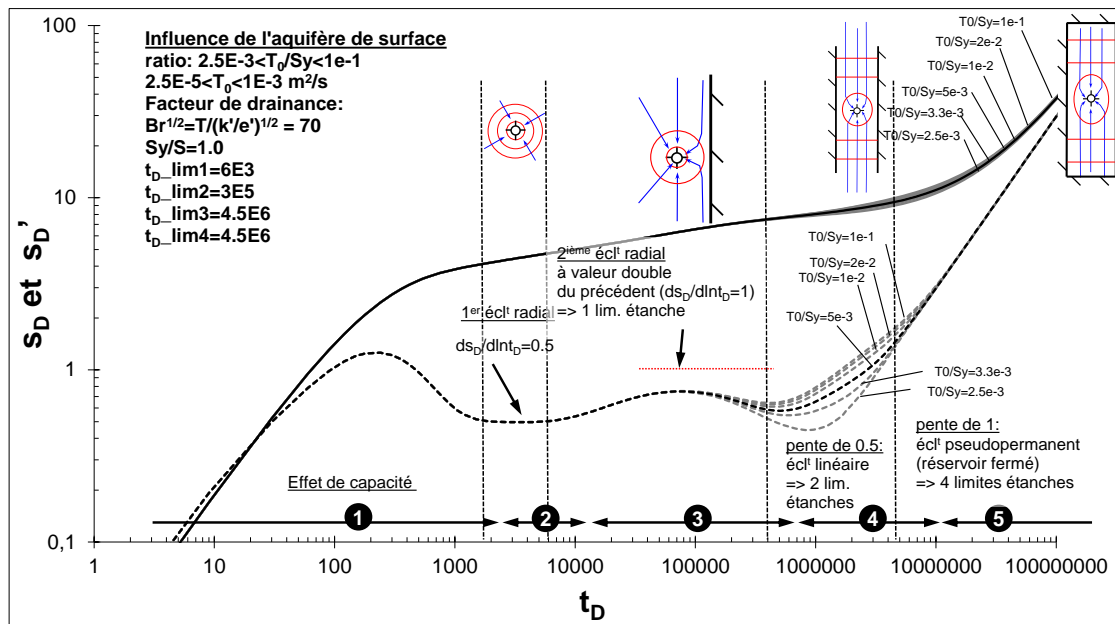


Courbes types de la solution modifiée de Hunt et Scott 2007 : influence du facteur de drainage du semi-perméable ($Br^{1/2}$).

Illustration 66 - Effet du facteur de drainage ($Br^{1/2} = T / [k'e]^{1/2}$) sur les deux modèles proposés



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



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

Illustration 67 - Courbes pour des variations des paramètres de l'aquitard (T_0 et Sy) pour le modèle modifié de la solution de Hunt et Scott (2007).

4.3.4. Modélisation des essais historiques et des essais par paliers de 2014

a) Tufs

Le seul essai disponible est l'essai par palier de débit réalisé à la source des Avens. Comme vu précédemment, le diagnostic de l'essai montre que la source est implantée dans un aquifère très transmissif et qu'il est situé à proximité d'une limite d'alimentation.

Le "rayon d'influence de la source" (dans la modélisation le prélèvement dans la source est assimilé à celui dans un forage) a été fixé arbitrairement à un mètre. Cette valeur paraît réaliste au vu du conduit d'exhaure de la source. Cette hypothèse n'altère en rien l'évaluation de la transmissivité des tufs. Par contre, son coefficient d'emmagasinement et l'évaluation de la distance à la limite alimentée en mètre sont soumis à caution. Le modèle (Theis + limite alimentée) reproduit bien l'ensemble des rabattements (Illustration 68). La transmissivité des tufs est évaluée à $5.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, son coefficient d'emmagasinement bien qu'estimé au puits de pompage (mais aussi du fait de l'hypothèse sur le rayon) apparaît réaliste de l'ordre $0,35^{11}$. Les valeurs des paramètres hydrodynamiques sont présentées dans le tableau de l'illustration 69. Cette valeur suggère un aquifère libre, ce qui est bien la réalité, les tufs affleurant en surface. La limite alimentée est proche de la source, à une distance de l'ordre de quelques dizaines de mètres, l'imprécision sur le coefficient d'emmagasinement ne permet pas d'évaluer la distance avec plus de précision.

b) Calcaires fracturés du Muschelkalk

Comme il l'a été précédemment discuté, les essais historiques et les essais par paliers de débit réalisés en 2014 dans cette formation, n'ont pas de suivis piézométriques dans l'aquifère superficiel (tufs). De plus, ils ne montrent pas de reprise du rabattement une fois que l'aquitard a atteint ces limites (Illustration 70, Illustration 71, Illustration 72 et Illustration 73), ce qui aurait justifié l'emploi du modèle de Hunt et Scott modifié. Cette absence apparente est probablement due à la qualité des données (numérisées, stabilisation rapide des niveaux) qui empêche un diagnostic fin de l'essai pour les temps les plus longs. Le modèle de Hantush a donc été utilisé.

Les graphiques des présentent les modélisations pour une partie des essais (sur F4, F5, F6 et sur V1), les autres sont disponibles en annexe 3. Le tableau de l'illustration 69 synthétise l'ensemble des paramètres hydrodynamiques déduits de ces essais.

L'ensemble des essais – excepté les observations sur V2 et V3 lors de l'essai sur V1 - ont été calés avec les mêmes paramètres hydrodynamiques : même transmissivité, même emmagasinement, géométrie d'aquifère identique, même perméabilité d'éponte, seuls différents les effets de puits (pertes de charge, effet de capacité de puits), paramètres intrinsèques à chaque puits. Par ailleurs, aucune anisotropie horizontale ou verticale n'a été nécessaire pour modéliser les essais ($T_h/T_v = T_{yy}/T_{xx} = 1$), exceptée pour V2 et V3 (voir paragraphe ci-dessous).

La transmissivité de l'aquifère du Muschelkalk est estimée à $1,5.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, soit environ 3 fois moins que celle des tufs. Son coefficient d'emmagasinement, évalué à $5,5.10^{-3}$, est typique d'un aquifère fracturé captif. L'ensemble des essais a permis d'estimer l'épaisseur moyenne de l'aquifère (épaisseur perméable moyenne des calcaires du Muschelkalk), elle est estimée à 70 m. Cette valeur a permis la modélisation de tous les essais. Les distances aux limites étanches (distances entre le puits et les limites) sont différentes d'un puits à l'autre car dans la

¹¹ : le coefficient d'emmagasinement n'a pas d'unité.

modélisation le puits pompé a toujours pour coordonnées $x=y=0$. Cependant, elles correspondent toutes à une même géométrie d'aquifère, d'une surface l'ordre de $7,4 \text{ km}^2$.

Le diagnostic des essais montre en effet qu'au bout de quelques centaines de minutes, le rabattement atteint les limites du système (type aquifère fermé). La distance de ces limites au puits de pompage est donnée par la relation suivante :

$$\text{Dist} = 2 \cdot \sqrt{T \cdot t / S}$$

[T : transmissivité, t : temps, S : coefficient d'emmagasinement]. Les calculs sont reportés dans les tableaux qui suivent et repris dans le tableau de l'illustration 80, page 120.

La surface est déduite de L (largeur) x K (longueur). Par ex. dans le tableau de l'illustration 80 :

Dist.lim. 1 (m) / V1	1674.5
Dist.lim. 2 (m) / V1	1561.7
Dist.lim. 3 (m) / V1	1104.5
Dist.lim. 4 (m) / V1	1183.8

$L = 1674,5 + 1561,7 \text{ m}$

$K = 1104,5 + 1183,8 \text{ m}$

Donc $S = 7,4 \text{ km}^2$

Cette surface aquifère correspond à la zone où l'effet du pompage se fait ressentir théoriquement, elle est différente de sa zone de recharge qui est probablement bien plus importante. Pour permettre un bon calage de l'ensemble des essais, il a été nécessaire de prendre en compte une drainance, la perméabilité de l'éponte du semi-perméable est faible et estimée à $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, pour une épaisseur arbitraire unitaire (c.à.d. 1 m). Cet effet de drainance est attribuable aux argiles-sableuses peu perméables et aux tufs sus-jacents et/ou à une alimentation profonde (flux profond de la source par exemple).

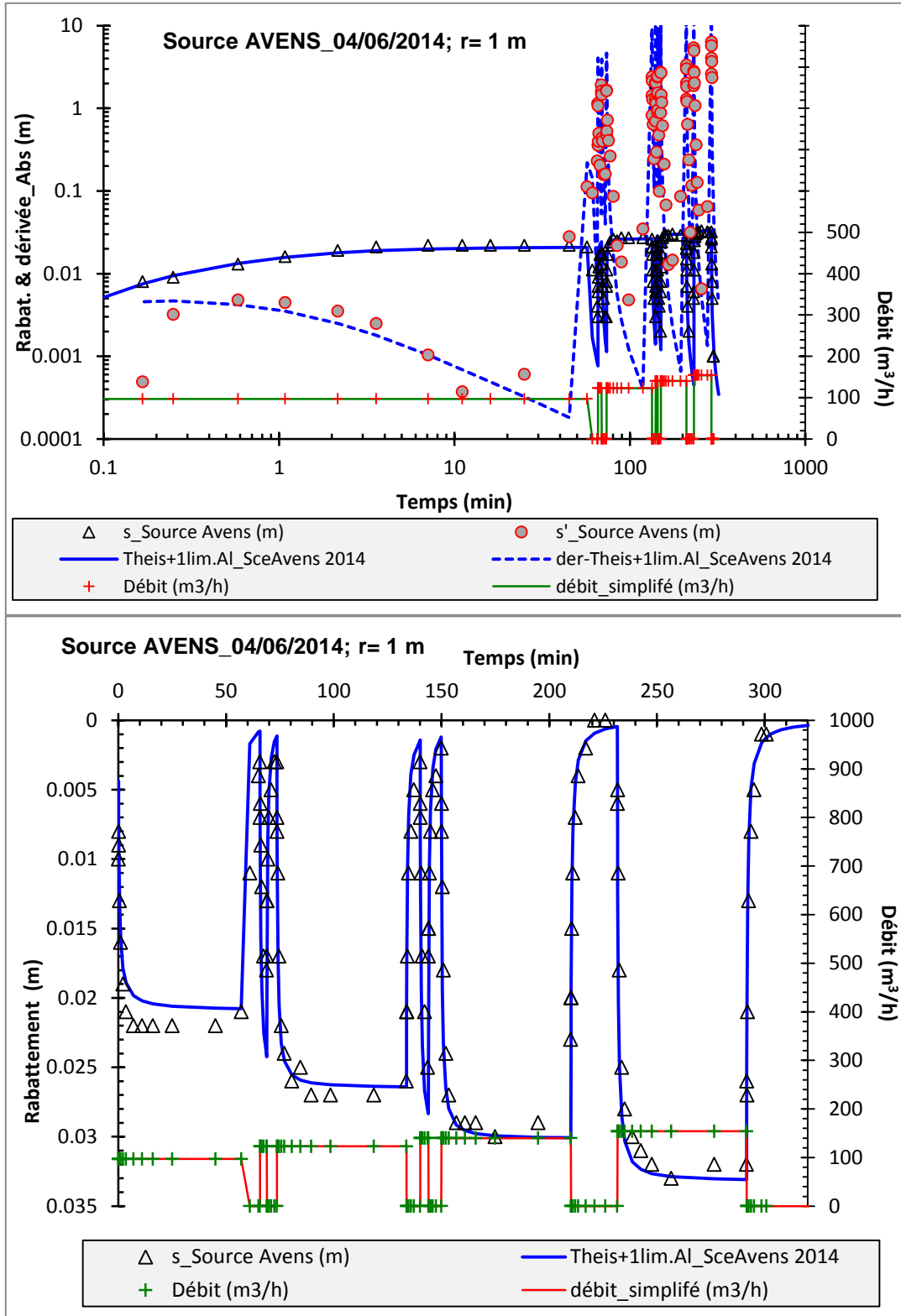


Illustration 68 - Modélisation de l'essai sur la source des Avens (paliers 04/06/2014).

Modèle : Theis + limite alimentée.

Graphe du haut : représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.

Graphe du bas : représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés

Forage	r (m)	x (m)	y (m)	T (m ² /s)	S (-)	T _{yy} /T _{xx}	Th/Tv	k' (m/s)	e' (m)	B (m)	l (m)	d (m)	Dist.lim. 1 (min)	Dist.lim. 2 (min)	Dist.lim. 3 (min)	Dist.lim. 4 (min)	Dist.lim. 1 (m)	Dist.lim. 2 (m)	Dist.lim. 3 (m)	Dist.lim. 4 (m)	Sk (-)	C (m-5s ²)	Rc (m)
<i>Essai dans les tufs</i>																							
Source AVENS_04/06/2014	1.0	0.7	0.7	5.0E-01	3.5E-01	1	1	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	14.1	-	-	-	-0.8	0.0	2.0
<i>Essais dans les calcaires fracturés du Muschelkalk</i>																							
F4_1983	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	200.0	200.0	400.0	400.0	1159.3	1159.3	1639.5	1639.5	0.0	791.0	0.3
F5_1983	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	205.1	195.0	390.3	408.9	1174.0	1144.7	1619.5	1657.7	0.0	135.0	5.0
Obs.F7	40.5	24.1	-32.5	1.5E-01	5.5E-03	1	1	5.0E-07	1	-	-	-	205.1	205.1	390.3	408.9	1174.0	1174.0	1619.5	1619.5	-	-	-
Test interf.F4/F5_1983	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	200.0	200.0	400.0	400.0	1159.3	1159.3	1639.5	1639.5	0.0	F4=770.0 & F5=100.0	0.3
Obs.F7	26.4	15.6	-21.3	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	200.0	200.0	400.0	400.0	1159.3	1159.3	1639.5	1639.5	-	-	-
Vidauban_V1_Avr.2000	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	70.0	62.0	38.0	173.6	228.2	456.5	347.2	1080.1	1238.5	1751.5	1527.5	0.0	127.0	0.2
Vidauban_V1_2014	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1.0	70.0	62.0	38.0	173.6	228.2	456.5	347.2	1080.1	1238.5	1751.5	1527.5	0.0	865.0	0.0
Obs.V2	13.5	0.0	13.5	1.5E-01	5.5E-03	2.E+10	1	-	1.0	70.0	60.0	30.0	173.6	228.2	456.5	347.0	400868.8	400868.8	4.6	4.6	-	-	-
Obs.V3	17.5	0.0	-17.5	1.5E-01	5.5E-03	5.E+06	1	-	1.0	70.0	60.0	30.0	173.6	228.2	456.5	347.0	50406.6	57792.3	36.6	31.9	-	-	-
Vidauban_V2_Avr.2000	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	70.0	60.0	38.0	176.9	224.6	445.6	356.9	1090.3	1228.4	1730.4	1548.6	0.0	7410.0	0.2
F6_Juil.2008	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	188.2	212.2	403.2	396.8	1124.6	1194.1	1646.1	1632.9	0.0	192.0	0.3
Obs.F4	20.5	-20.1	3.8	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	188.2	212.2	403.2	396.8	1124.6	1194.1	1646.1	1632.9	-	-	-
F6_paliers_2014	0.2	0.1	0.1	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.2E-07	1	-	-	-	188.2	212.2	403.2	396.8	1124.6	1194.1	1646.1	1632.9	4.0	162.0	0.3
Obs.F5	32.4	-28.6	15.3	1.5E-01	5.5E-03	1	1	1.0E-06	1	-	-	-	188.2	212.2	403.2	396.8	1124.6	1194.1	1646.1	1632.9	-	-	-

Illustration 69 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le site d'Entraigues (tufs et Muschelkalk). En gras : puits de pompage, en italique : piézomètre d'observation.

Modèles utilisés : tufs : Theis+ une limite alimentée ; calcaires du Muschelkalk : modifié de Hantush (1964).

L'identification des symboles et abréviations est donnée dans le tableau de l'illustration 65.

NB : pour le coefficient d'emmagasinement (S) à la source des Avens, il s'agit d'une estimation qui ne reflète pas forcément la réalité (sur- ou sous-estimation en raison des effets de puits et de l'hypothèse sur le rayon), seule une estimation sur un piézomètre d'observation permet une bonne estimation de ce coefficient. Par contre, les nombreux essais dans le Muschelkalk, dont certains en interférence (observation sur un piézomètre), ont permis de relativement bien contraindre ce coefficient : $5,5 \cdot 10^{-3}$.

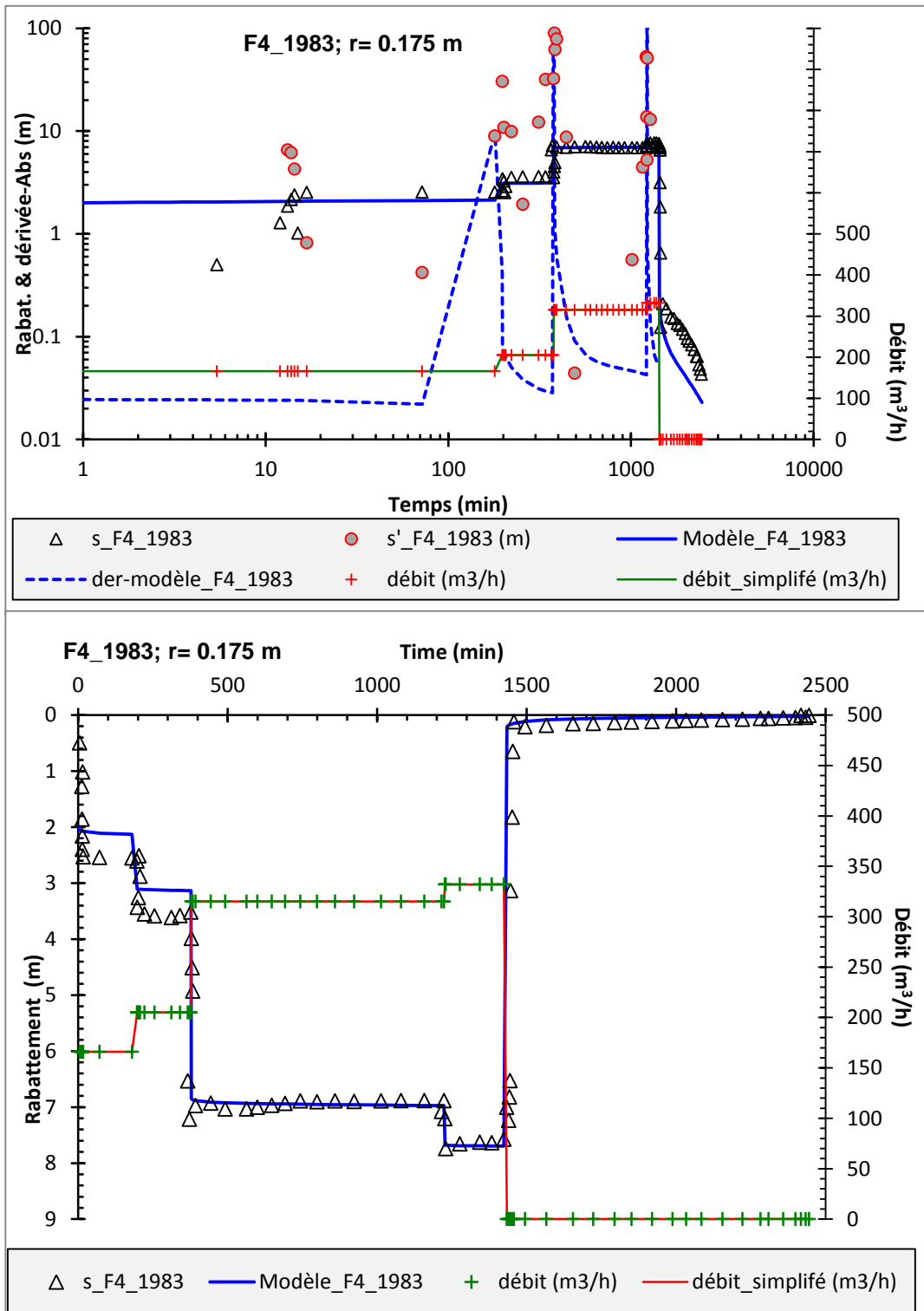


Illustration 70 - Modélisation de l'essai sur le forage F4 (SIAE) en 1983. Modèle : Hantush modifié.
 Graphe du haut : représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.
 Graphe du bas : représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.

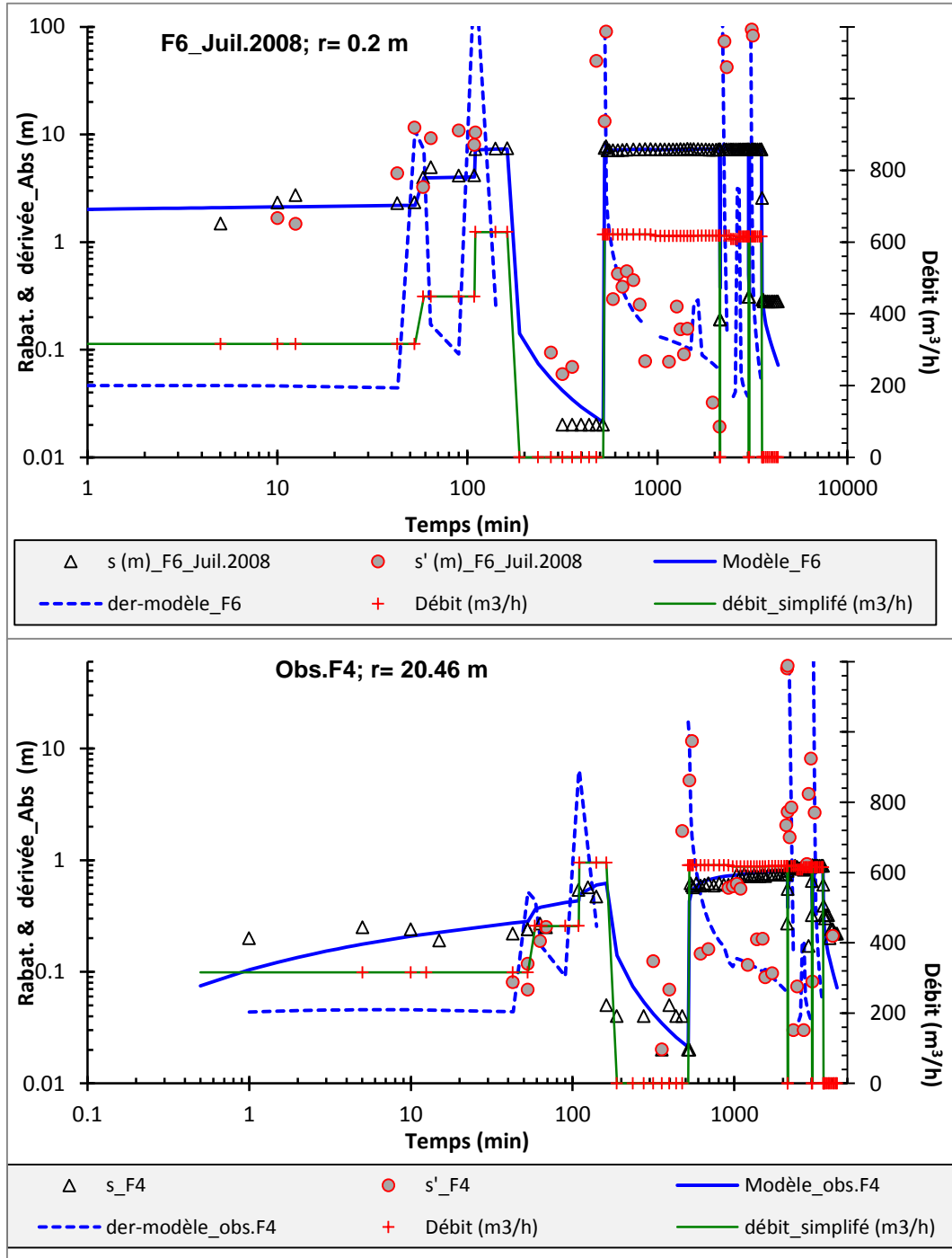


Illustration 71 - Modélisation de l'essai sur le forage F6 (SIAE) en 2008 ; observation au puits de pompage et au piézomètre F4. Modèle : Hantush modifié.
 Représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.

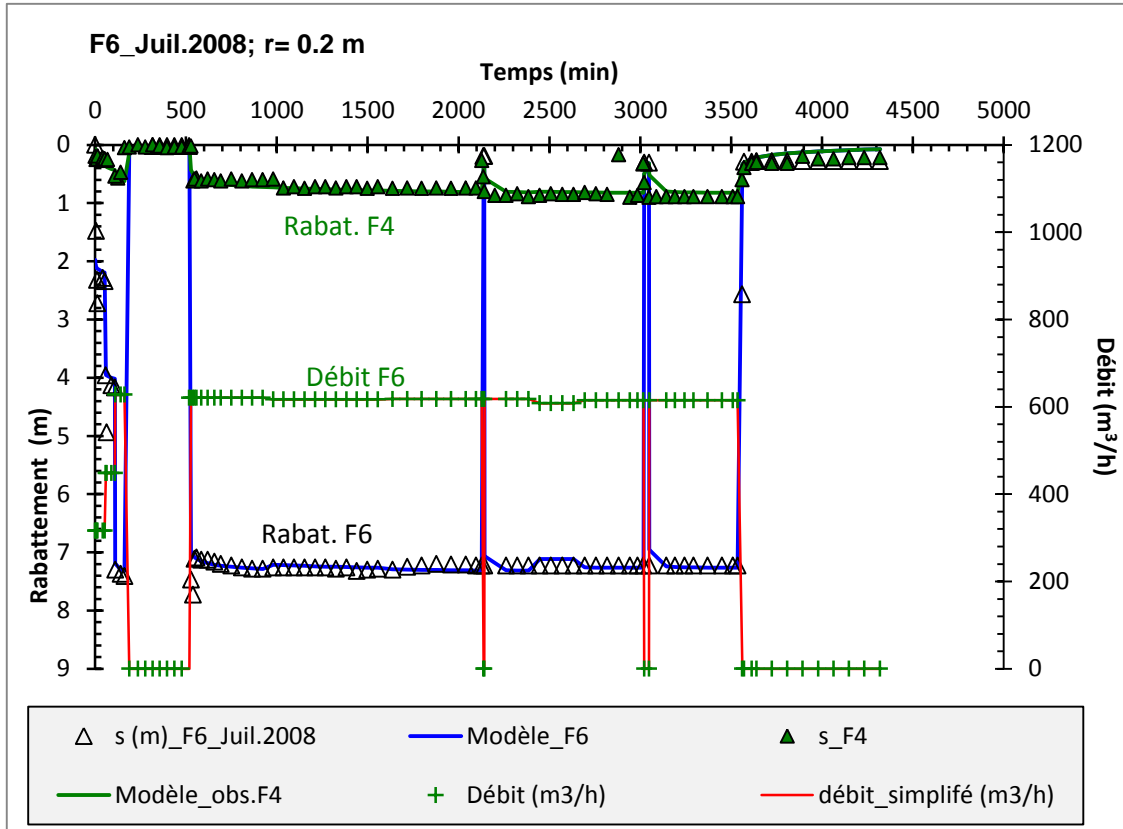


Illustration 72 - Modélisation de l'essai sur le forage F6 (SIAE) en 2008 ; observation au puits de pompage et au piézomètre F4. Modèle : Hantush modifié.
Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.

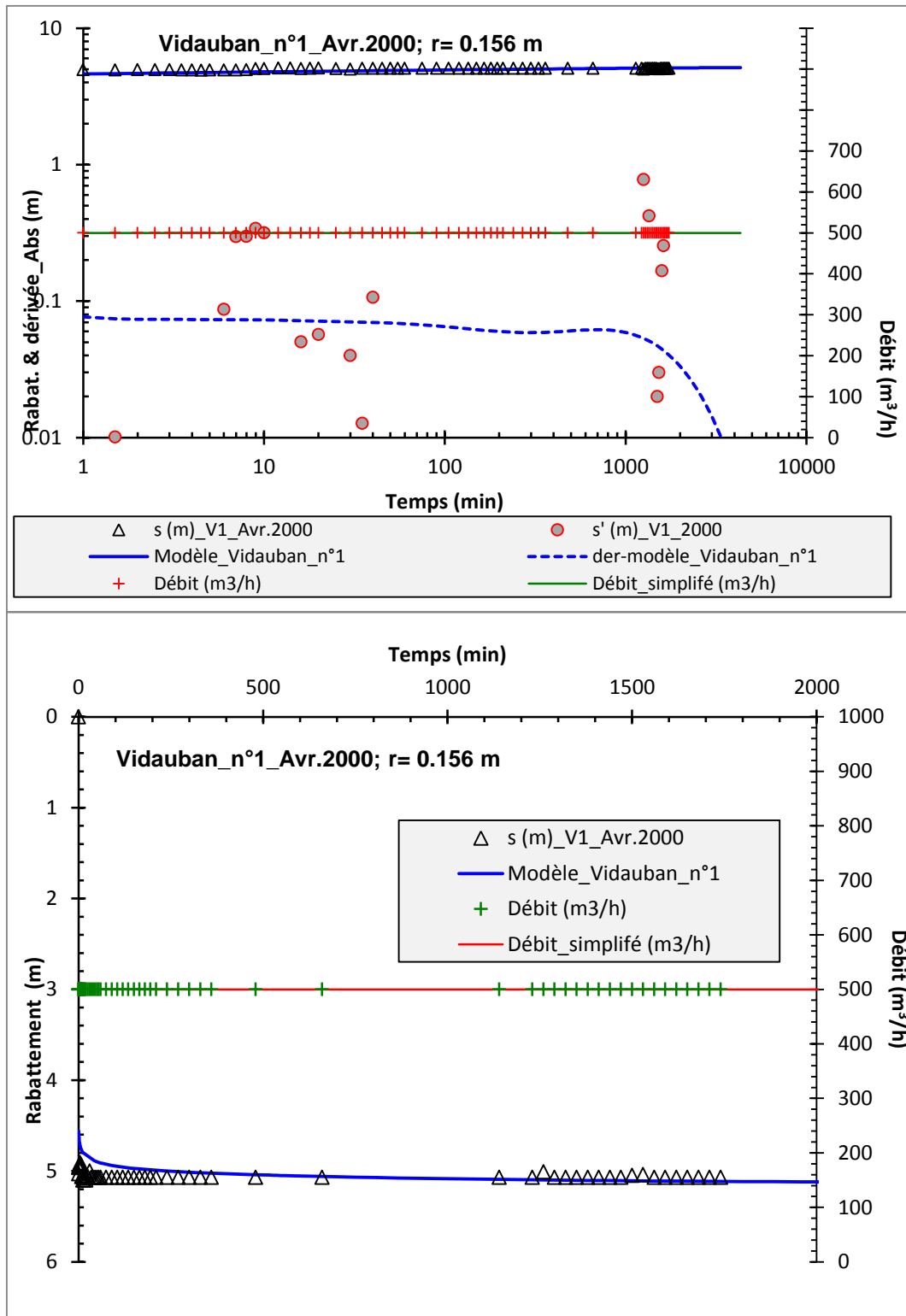


Illustration 73 - Modélisation de l'essai sur le forage V1 (Cne de Vidauban) en 2000. Modèle : Hantush modifié.

Grappe du haut : représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.
 Grappe du bas : représentation arithmétiques des rabattements observés et modélisés.

4.3.5. Essai multi-puits réalisé en 2014

a) Déroulement de l'essai et données disponibles

Le pompage s'est déroulé du 6 au 14 novembre 2014 conformément au protocole présenté au paragraphe 4.2.4 mis à part que, du fait de l'interruption prématurée des pompages, le forage F4 n'a pas été inclus à l'essai. Les figures des Illustration 74, Illustration 75 et Illustration 76 présentent l'évolution des débits, de la piézométrie et des rabattements durant cet essai. Dans les calcaires du Muschelkalk, les puits F5, F6, V1 et piézomètres F4, V2 et V3 ont été suivis, et dans les tufs la source des Avens, le puits F3 et le piézomètre P8.

F1 et F2 (tufs) n'ont pas été suivis car situés à proximité de F3 et P8 et captant les mêmes niveaux – des cavités – que ces deux ouvrages (cf. coupes techniques et géologiques en annexe 2). Concernant le suivi sur F3, les données ne sont pas très précises en raison d'un dysfonctionnement du capteur.

A partir d'environ 7 000 min de pompage (10 et 11 novembre) on constate une augmentation des niveaux, plus ou moins importante suivant les ouvrages, en raison de fortes pluies sur le secteur (Illustration 74, Illustration 75 et Illustration 76). Cette augmentation est concomitante d'une augmentation du niveau de l'Argens, suggérant très fortement que les tufs communiquent avec l'Argens, ce qui est finalement attendu puisque rien d'imperméable ne sépare le cours d'eau des tufs. Cette hypothèse est aussi confirmée par l'interprétation de l'essai par pompage sur la source (présence d'une limite alimentée).

L'évolution des rabattements sur l'ensemble des ouvrages met clairement en évidence les interférences entre les calcaires du Muschelkalk et les tufs (Illustration 76). En effet, on voit nettement l'influence des démarrages des pompes des ouvrages dans le Muschelkalk sur tous les ouvrages de cette formation (F4, F5, V1, V2 et V3), mais aussi sur tous les ouvrages situés dans les tufs (F3, F8, source des Avens). L'interférence des pompages sur les ouvrages de surface est cependant faible, de l'ordre de 15 à 20 centimètres, comparée à plusieurs mètres (2 à 7,6 m) sur les forages dans le Muschelkalk. Notons que la mise en route du pompage sur la source des Avens ne s'est pas fait ressentir au niveau du Muschelkalk. Plusieurs causes peuvent en expliquer la raison : la source est trop distante des forages du Muschelkalk (30 à 90 m suivant les ouvrages), la diffusivité et le stock de l'aquifère de surface sont tels qu'il faudrait un débit de pompage beaucoup plus important sur la source pour provoquer une baisse significative de niveau dans l'aquifère inférieur, le niveau marneux peu perméable limite fortement les flux verticaux, la présence d'une limite alimentée en surface réduit la différence de pression entre les deux aquifères et donc une éventuelle réaction de l'aquifère inférieur... Les piézomètres dans les tufs (F3 et F8) ont à peine réagi à cette mise en route (< 0,01 m).

La faible interférence des pompages entre les deux aquifères, non disponible lors des précédents essais, justifie l'emploi de la solution de Hantush modifiée pour les essais suffisamment courts (de moins de 1 jour jusqu'à 2-3 jours), car sur ce laps de temps l'influence sur l'aquifère de surface, les tufs, peut être considérée comme négligeable. Par contre, pour des temps plus longs, comme celui de cet essai multi-puits (un peu plus de 8 jours) mais aussi pour pouvoir faire des simulations de débit d'exploitation sur des périodes beaucoup plus longues, il est souhaitable d'utiliser un modèle considérant l'abaissement de l'aquifère de surface. La solution de Hunt et Scott modifiée a donc été utilisée.

Ainsi, cet essai montre (a) une connexion hydraulique entre les tufs et le cours d'eau, l'Argens, du moins au niveau du barrage (l'aval du barrage étant en net contrebas du niveau piézométrique dans les tufs) et (b) une connexion hydraulique entre les tufs et les calcaires fracturés du Muschelkalk.

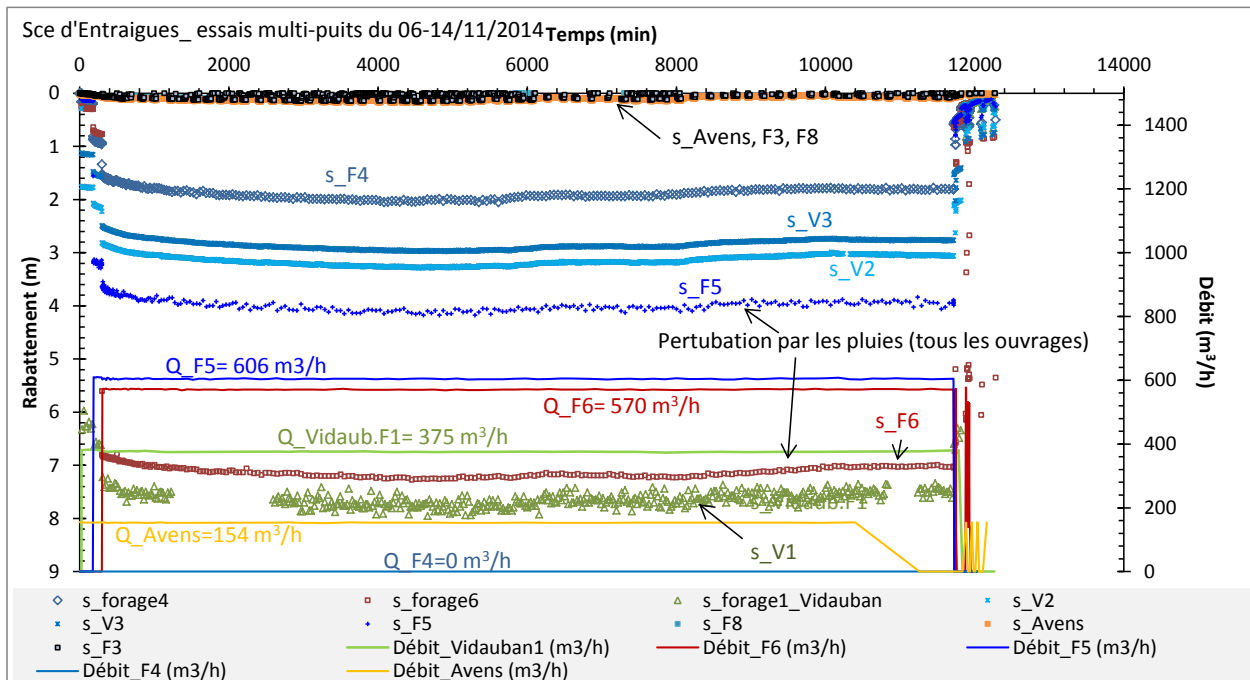


Illustration 74 - Evolution des débits et des rabattements dans les calcaires du Muschelkalk (F4, F5, F6, V1, V2 et V3) et dans les tufs (source des Avens, F3 et F8), au cours de l'essai multi-puits réalisé en 2014, pompage sur F4, F6, V1 et Sce des Avens.

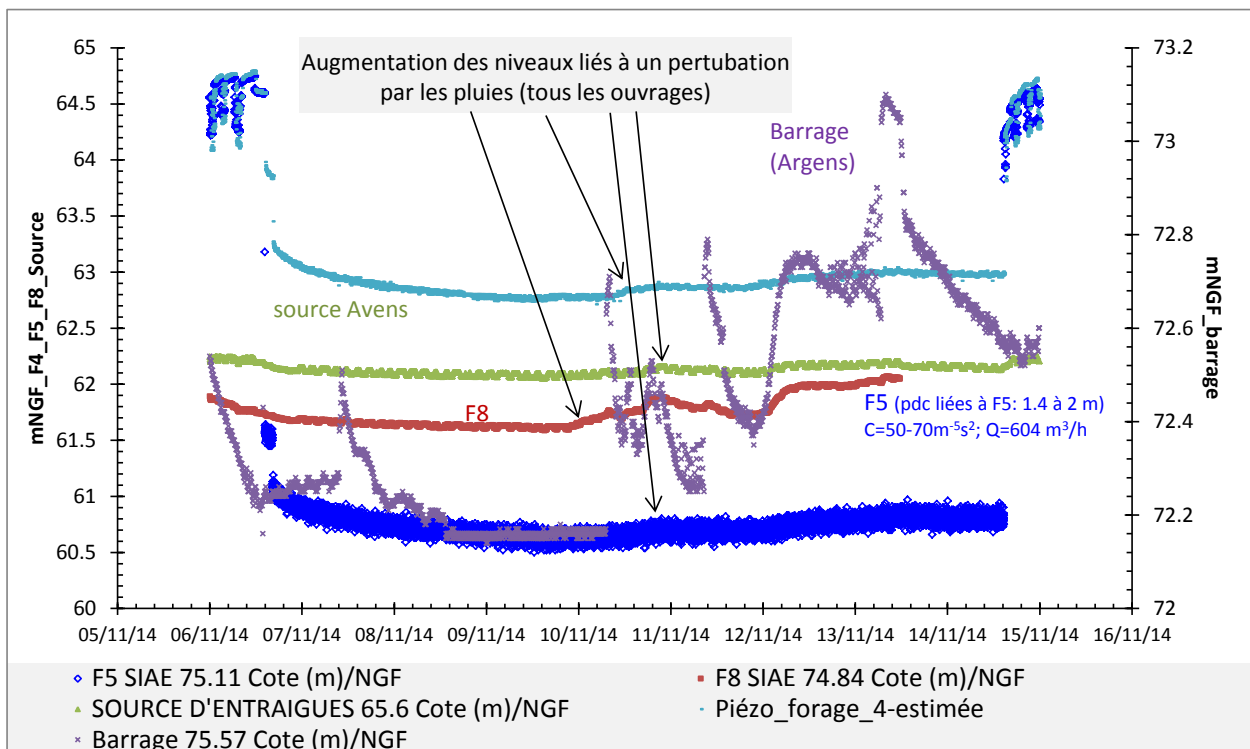


Illustration 75 - Mise en évidence des relations Argens / tufs lors d'un événement pluvieux durant l'essai de pompage multi-puits.

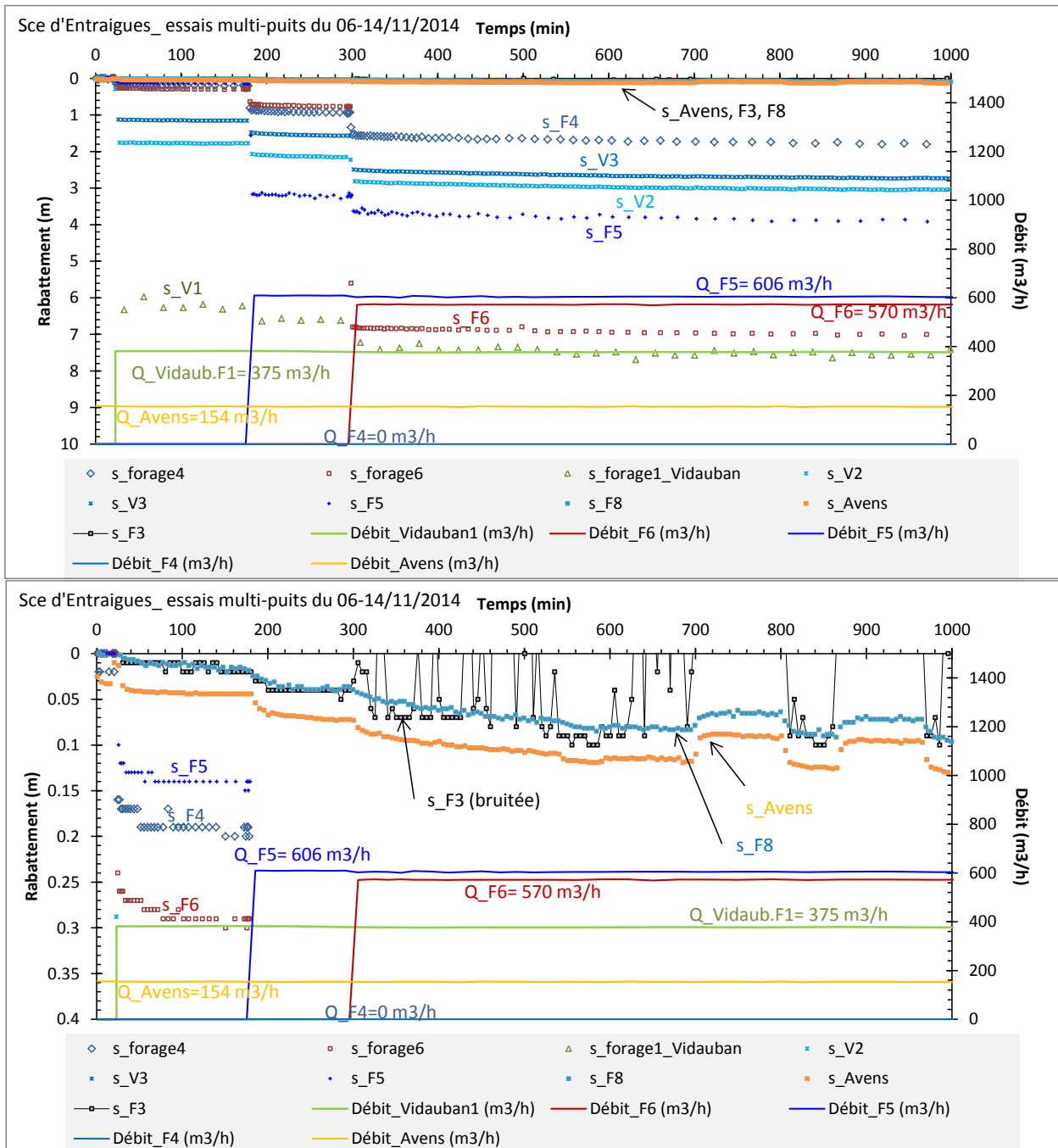


Illustration 76 - Evolution des débits et des rabattements dans les calcaires du Muschelkalk et les tufs-zoom sur la première journée de pompage.

Grappe du haut : mise en évidence des interférences dans le Muschelkalk.

Grappe du bas : mise en évidence des interférences entre les calcaires du Muschelkalk et les tufs.

b) Description du modèle mathématique utilisé pour modéliser les niveaux dans le Muschelkalk et les tufs

Le modèle mathématique utilisé est celui de la figure B) de l'illustration 64 (modèle de Hunt et Scott modifié), où les pompages dans l'aquifère sous-jacent (Muschelkalk : F5, F6 et V1) et dans l'aquifère de surface (source des Avens) ont été intégrés. La figure de l'illustration 77

schématise le modèle ; les paramètres du modèle sont consignés dans le tableau de l'illustration 80.

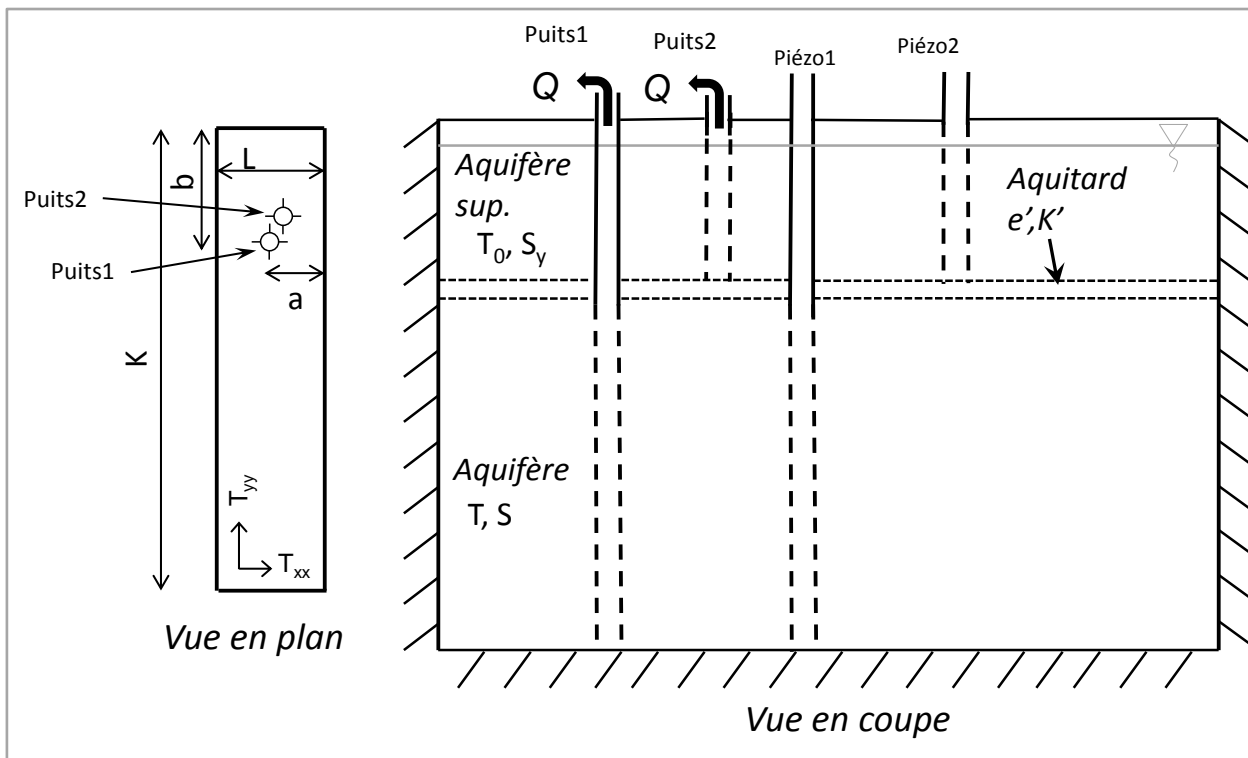


Illustration 77 - Modèle modifié de la solution de Hunt et Scott (2007) - effet de drainance d'un aquitard supérieur, abaissement de son niveau, anisotropie de perméabilité 2-D, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales. Version multi-puits avec pompage dans les aquifères supérieur et inférieur.

c) Modélisation de l'essai multi-puits

Comme vu dans les paragraphes précédents on ne s'attachera pas à modéliser les rabattements sur V2 et V3 (Muschelkalk) - comportement atypique de ces ouvrages à cause *a priori* d'une structure très drainante entre ces deux ouvrages, ni sur F3 en raison de la mauvaise qualité de la mesure des niveaux.

L'illustration 78 présente la modélisation des niveaux et l'illustration 79 la localisation des ouvrages et des limites de l'aquifère. Les paramètres hydrodynamiques du modèle sont consignés dans le tableau de l'illustration 80. Les modélisations sont de bonne qualité.

Pour le Muschelkalk, la transmissivité (T), $1,5 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ et son emmagasinement (S), $5,5 \cdot 10^{-3}$ sont les mêmes pour tous les forages de cette formation et sont aussi identiques à ceux déterminés auparavant (Illustration 69).

Il en est de même pour la géométrie de l'aquifère, long d'environ 3,2 km et large d'environ 2,3 km, (correspondant à la surface de $7,4 \text{ km}^2$ estimée au paragraphe 4.3.4. Les forages étant trop près les uns des autres par rapport à la dimension de l'aquifère, il n'a pas été possible de déterminer précisément l'orientation de l'aquifère. Il a été choisi, par simplicité, de l'orienter N-S (Illustration 79). Aucune anisotropie dans le plan (xy) n'a été nécessaire pour expliquer les rabattements ($T_{yy}/T_{xx}=1$). La transmissivité de l'aquifère de surface, T_0 , a été évaluée à $1 \text{ m}^2/\text{s}$, soit supérieure, mais toujours du même ordre de grandeur, que celle déduite lors de l'essai sur la source ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$; Illustration 69).

L'augmentation de cette valeur pourrait être la conséquence de l'alimentation par l'Argens, ce que ne prévoit pas ce modèle mais qui avait été identifiée lors du premier essai (Illustration 61).

L'emmagasinement de l'aquifère de surface, S_y , est estimé à 0,35, soit typique d'un aquifère libre. Pour les ouvrages dans le Muschelkalk, la perméabilité de l'éponte semi-perméable est estimée à $1,2 \times 10^{-7}$ m/s (valeur identique aux essais antérieurs, voir Illustration 69) et son épaisseur fixée arbitrairement à un mètre.

Ce niveau correspond aux marnes sableuses identifiées sur les logs géologiques des ouvrages. Par contre, cette perméabilité d'éponte a dû être augmentée pour reproduire les niveaux dans les tufs (4×10^{-6} m/s), sinon le modèle n'arrivait pas à faire rabattre suffisamment l'aquifère de surface (tufs). Cette valeur est probablement la conséquence d'un rabattement rapide et localisé dans les tufs à cause des fortes connexions hydrauliques – conduits et cavités – qu'il existe entre la source et les ouvrages dans les tufs (voir coupes géologiques F1, F2 et F3 en annexe 2). Cette forte connexion, à l'instar de ce qui a été observé sur les ouvrages V2 et V3, provoquerait une réaction beaucoup plus rapide au niveau des puits (F3, F8). De plus, il est fortement probable, même si cela n'est pas formellement démontré, que le conduit alimentant la source traverse le Muschelkalk au moins en partie. Ainsi une diminution de la pression dans le Muschelkalk, induite par les pompages sur F5, F6 et V1, fera rapidement diminuer le niveau sur la source de quelques dizaines de centimètres comme l'a montré cet essai. Du fait des conduits et cavités dans les tufs, une baisse sur la source sera rapidement ressentie sur les autres ouvrages dans les tufs (de quelques dizaines de centimètres aussi).

Les pertes de charge au puits C (Illustration 80), sont très proches de celles estimées précédemment pour les ouvrages F5 et F6 (Illustration 69).

Par contre, elles sont plus faibles pour le forage V1, évaluée ici à $510 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ ($870 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ par l'essai par paliers de 2014). Si la différence de coefficient entre l'essai par paliers et l'essai multi-puits peut s'expliquer par une imprécision sur la mesure du débit lors de l'essai par paliers de 2014 (une erreur sur sa mesure entraîne automatiquement une erreur sur l'estimation du coefficient C), ce coefficient reste néanmoins bien supérieur à celui estimé en 2000 ($130 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$). La baisse de la productivité de cet ouvrage est donc toujours forte (baisse de 75% avec ce nouveau chiffre).

Par ailleurs, le modèle de Hantush modifié en version multi-puits a été utilisé pour reproduire l'essai pour les puits dans le Muschelkalk. Les paramètres déduits pour cet aquifère - T, S, distance aux limites caractéristiques du semi-perméables, sont les mêmes. Cependant, ce modèle ne permet pas de prendre en compte le pompage de la source (tufs-aquifère supérieur), ni de modéliser les rabattements dans l'aquifère de supérieur. Ses résultats sont disponibles en annexe 4.

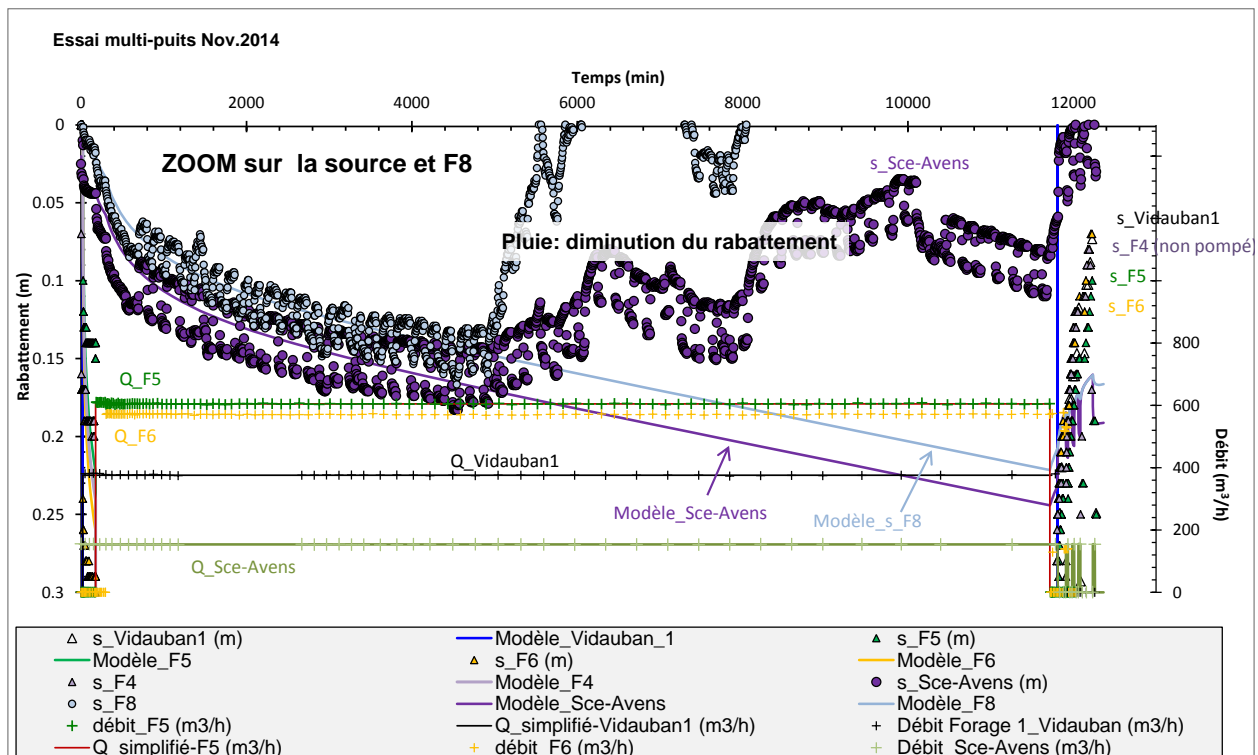
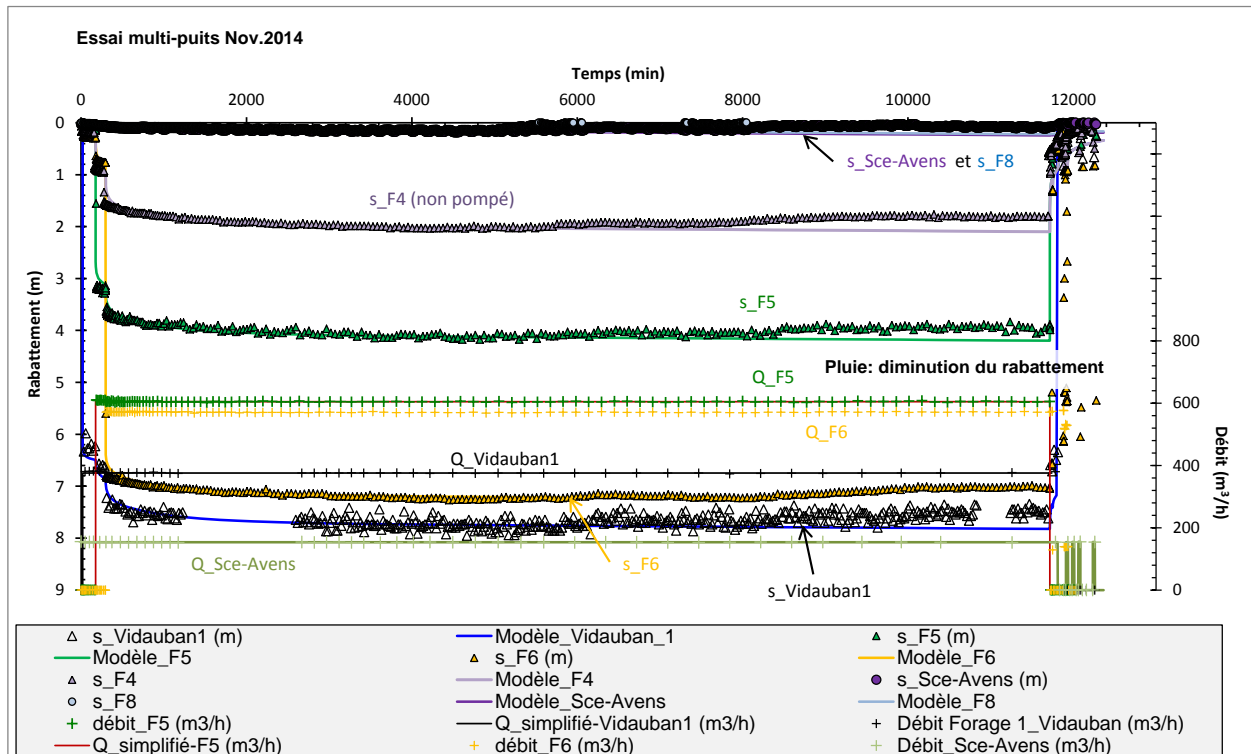


Illustration 78 - Modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle Hunt et Scott modifié version multi-puits avec pompages dans les aquifères supérieur (tufs) et inférieur (Muschelkalk).

Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.

Graphique du bas : zoom sur F8 et la source des Avens.

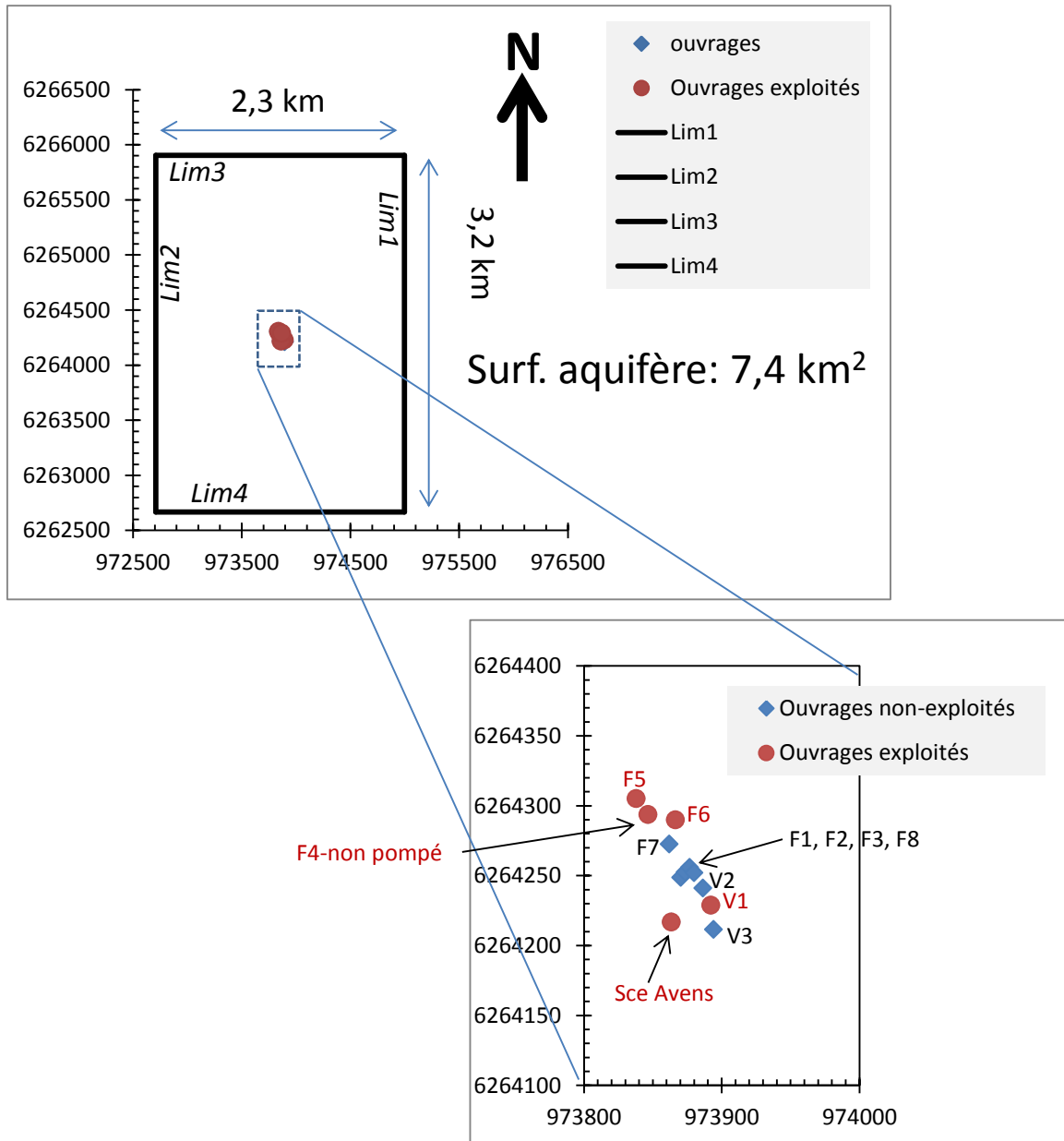


Illustration 79 - Positionnement des puits et des piézomètres et des limites de l'aquifère (Lambert 93) ; modèle Hunt et Scott modifié.

	Vidauban 1	F5	F4	F6	Source	F8
r (m) / V1	0,156	93.51	79.21	66,06	31,05	26,08
T (m ² /s)	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01
S (-)	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03
k' (m/s)	1.2E-07	1.2E-07	1.2E-07	1.2E-07	4,0E-06	4,0E-06
e' (m)	1,0	1	1	1	1	1
T ₀ (m ² /s)	1	1	1	1	1	1
Sy (-)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Dist.lim. 1 (min) / V1	186.4	-	-	-	-	-
Dist.lim. 2 (min) / V1	214.1	-	-	-	-	-
Dist.lim. 3 (min) / V1	428.4	-	-	-	-	-
Dist.lim. 4 (min) / V1	372.6	-	-	-	-	-
Dist.lim. 1 (m) / V1	1104.5	-	-	-	-	-
Dist.lim. 2 (m) / V1	1183.8	-	-	-	-	-
Dist.lim. 3 (m) / V1	1674.5	-	-	-	-	-
Dist.lim. 4 (m) / V1	1561.7	-	-	-	-	-
Surf. Aquifère (km ²)	7.4	-	-	-	-	-
C (m ⁻⁵ s ²)	510,0	50,0	-	180,0	0,0	-

Illustration 80 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014.

Modèle : Hunt et Scott modifié version multi-puits avec pompages dans les aquifères supérieur (tufs : Sce des Avens) et inférieur (Muschelkalk : F5, F6 et V1). Les distances au puits et piézomètres (r), ainsi que les distances aux limites (Lim 1 à 4) sont données par rapport au puits V1.

L'identification des symboles et abréviations est donnée dans le tableau de l'illustration 65.

4.3.6. Impact sur le débit du cours d'eau

Les campagnes hydrochimiques, associées aux mesures de débits de l'Argens ont montré les indices de connexions entre l'Argens et les tufs, et l'Argens et les calcaires des Muschelkalk (voir chapitre 3).

En outre, l'essai multi-puits a mis en évidence une connexion hydraulique avec les calcaires fracturés du Muschelkalk et les tufs, et une légère connexion entre les tufs et l'Argens. Cette section a pour but, via un modèle permettant de calculer la part d'eau pompée en provenance du cours d'eau d'évaluer l'impact sur l'Argens en terme débit. Dans cette partie, un autre modèle est utilisé, destiné à estimer la part d'eau du pompage issue du cours d'eau, il est donc complémentaire du précédent (Hunt et Scott modifié).

a) Description générale du modèle (Hunt 2003 modifié)

Le modèle utilisé est une modification du modèle de Hunt (2003). Il s'agit d'un modèle décrivant la superposition d'un aquifère profond et d'un aquitard de surface en lien avec le cours d'eau, auquel on adjoint quatre limites orthogonales étanches (Illustration 81). Cela permet de modéliser les caractéristiques hydrodynamiques déduites des diagnostics des essais. Le modèle prend aussi en compte les effets liés aux puits : pertes de charge, skin, effet de capacité de puits. Les paramètres des modèles sont définis au tableau de l'illustration 82. Dans ce modèle, l'aquifère de surface réagit au pompage dans l'aquifère sous-jacent, par contre il est supposé peu perméable donc moins perméable que l'aquifère sous-jacent.

L'illustration 83 présente des courbes-types de rabattement pour ce type d'aquifère. Elles correspondent aux rabattements au puits de pompage pour un puits complet situé dans un aquifère isotrope (c.à.d. $T_{yy}/T_{xx}=1$) et limité dans l'espace par quatre limites étanches orthogonales perçues successivement au cours du pompage (t_{D_lim} : 6 000, 300 000, 4 500 000 et 4 500 000). Le cours d'eau est à une distance, C_c , fixe du puits de pompage et a une largeur, W , fixe. Sur ce graphe, la drainance de l'aquitard est progressivement augmentée ($Br^{1/2}$: 17,3 $\rightarrow \infty$), et montre une diminution de la progression du rabattement à cause de l'effet de drainance et de la contribution du cours d'eau au pompage (facteur λ).

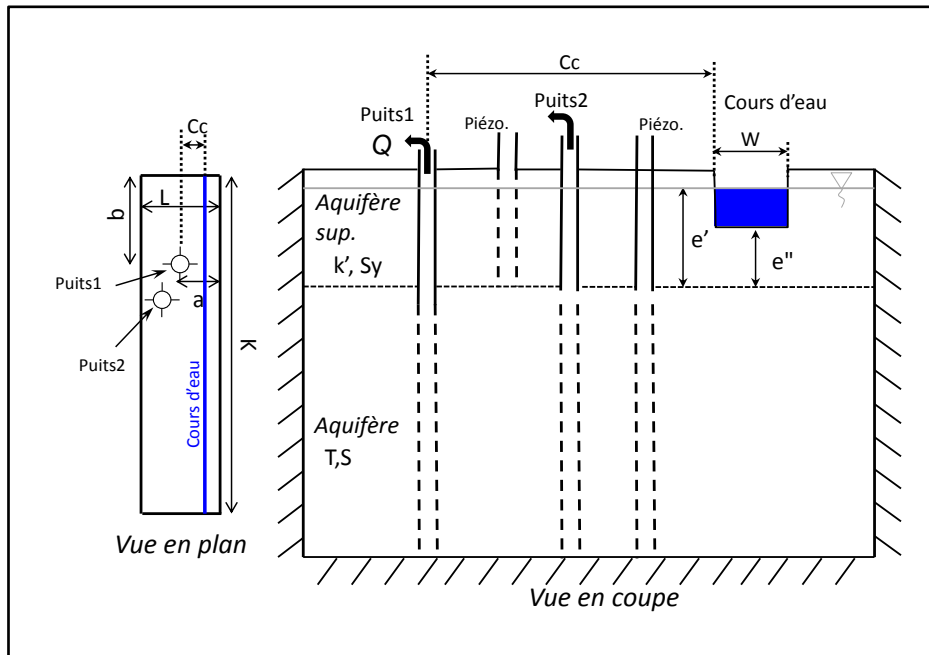


Illustration 81 - Modèle de Hunt (2003) modifié avec prise en compte de limites étanches ; version multi-puits.

Paramètres du modèle modifié de Hunt, 2003	
Distance puits / piézomètre ou rayon du puits	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'aquitard	e' (m)
Epaisseur de l'aquitard sous le cours d'eau	e'' (m)
Emmagasinement de l'aquitard	Sy (-)
Distance cours d'eau / puits	Cc (m)
Largeur du cours d'eau	W (m)
Dist. à la 1 ^{ère} limite (a)	Dist.lim. 1 (min et m)
Dist. à la 2 ^{ième} limite (L-a)	Dist.lim. 2 (min et m)
Dist. à la 3 ^{ième} limite (b)	Dist.lim. 3 (min et m)
Dist. à la 4 ^{ième} limite (K-b)	Dist.lim. 4 (min et m)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)
Capacité du puits	Rc (m)

Illustration 82 - Modèle avec prise en compte d'un cours d'eau : modèles de Hunt (2003), et modèle modifié de Hunt. Seul le deuxième modèle prend en compte les effets de limites.

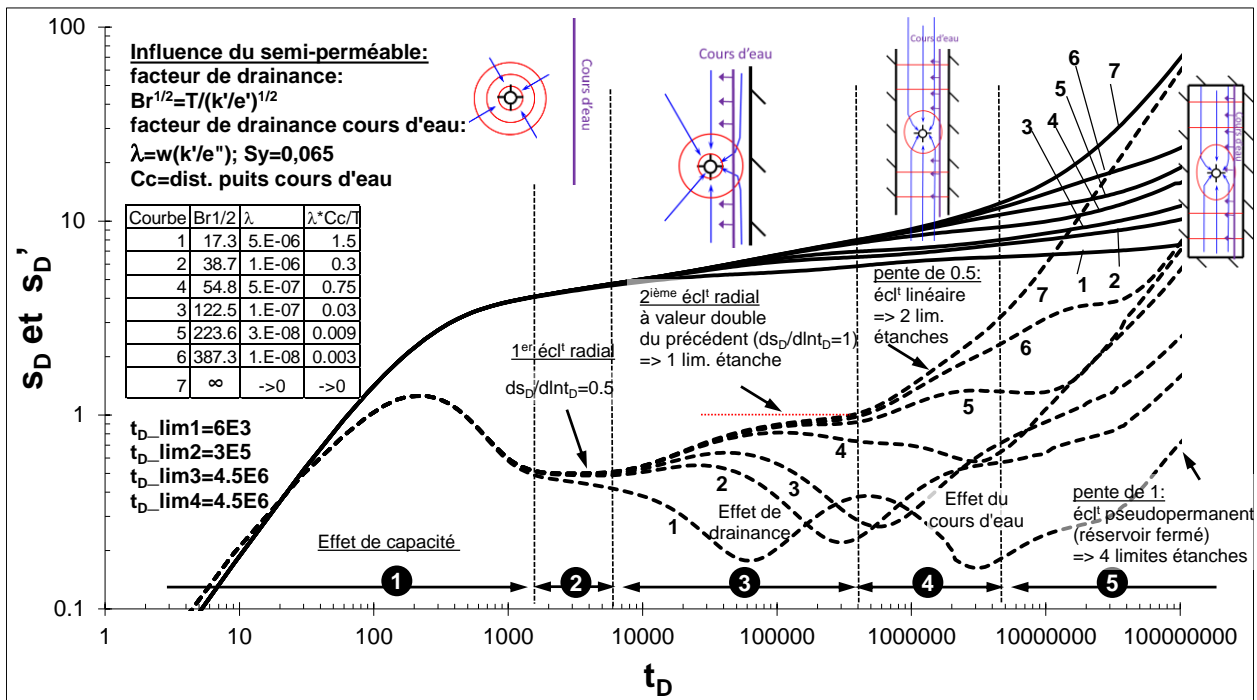


Illustration 83 - Courbes types de la solution modifiée de Hunt 2003 : influence du facteur de drainance du semi-perméable ($Br^{1/2}$) et du cours d'eau.

s_D et s'_D : rabattement et dérivée sans dimension ; t_D : temps sans dimension.

b) Application à l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues

Comme expliqué au paragraphe 4.3.3, pour l'application à l'essai multi-puits de novembre 2014 et puisque le modèle qui a été adopté prévoit un aquifère de surface moins perméable que le sous-jacent, la perméabilité de l'aquitard devra correspondre à celle de l'éponte semi-perméable définie par les modélisations précédentes (modèle Hunt et Scott modifié). Cependant, l'aquifère de surface (tufs) étant en réalité plus perméable que l'aquifère du Muschelkalk, la modélisation des niveaux par ce modèle dans l'aquifère de surface ne sera donc que très approximative.

Par contre, celle dans les ouvrages du Muschelkalk devra être cohérente avec les modélisations précédentes. Ce modèle ne prend pas en compte de pompages dans l'aquifère de surface (source des Avens), l'impact sur le cours d'eau ne pourra donc être estimé qu'à partir des pompages dans le Muschelkalk. Ce modèle est donc complémentaire du modèle précédent (Hunt et Scott modifié) dans la mesure où le précédent permet une modélisation adéquate des niveaux dans les aquifères supérieurs et inférieurs en intégrant les pompages dans les deux niveaux. Ce dernier permet d'estimer la part d'eau du pompage issue du cours d'eau.

Dans le modèle, la position du cours d'eau, Cc, est définie à 30 m au nord du forage F5, conformément à l'information géographique, ce qui correspond à la position du barrage (Illustration 53). Sa largeur a été estimée à une quinzaine de mètres au niveau du barrage (W). L'épaisseur de semi-perméable, e', est estimée à 20 m, en adéquation avec l'épaisseur locale de tufs (elle correspond ici à l'épaisseur de semi-perméable). L'incision du cours d'eau dans les tufs n'est pas connue très précisément, elle est estimée aux alentours de 3 m ($e'-e''=3$). Néanmoins des tests de sensibilité sont réalisés pour voir l'impact de ce paramètre sur le débit du cours d'eau, la largeur du cours d'eau ayant comparativement très peu d'effet. L'illustration 84 présente le positionnement des ouvrages dans le modèle. **Notons que ce modèle simplifie la réalité : positionnement du cours d'eau rectiligne, aquifère de surface considéré comme peu perméable, non prise en compte du pompage de la source, néanmoins il permettra d'appréhender l'ordre de grandeur de l'impact sur l'Argens.**

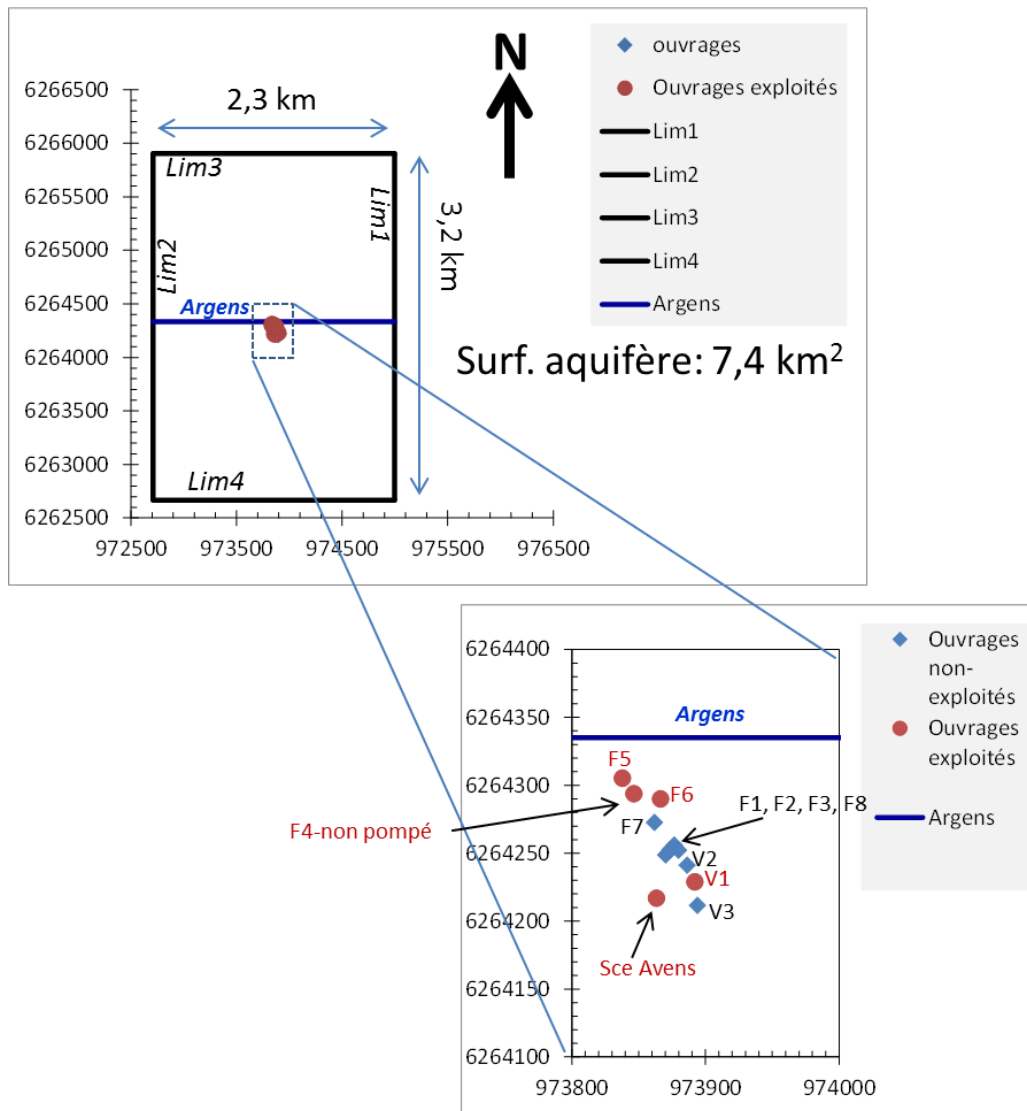


Illustration 84 - Positionnement des puits et des piézomètres et des limites de l'aquifère (Lambert 93) ; modèle Hunt (2003) modifié.

c) Modélisation des rabattements et estimation de l'impact sur le cours d'eau

Les résultats du modèle (calage des rabattements ; Illustration 85) sont de bonne qualité, excepté pour le suivi sur l'aquifère de surface (F8) où le modèle peine à modéliser le niveau observé (cf. point précédent). Les caractéristiques hydrodynamiques pour l'aquifère du Muschelkalk sont identiques à celles estimées par les modèles précédents : même transmissivité (T), $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, même emmagasinement (S), $5,5 \cdot 10^{-3}$ et même géométrie de l'aquifère ($3,2 \times 2,3 \text{ km}$), soit une surface estimée à $7,4 \text{ km}^2$. L'emmagasinement de l'aquifère de surface (semi-perméable), S_y , est estimé à 0,35, soit identique à celui du modèle précédent et typique d'un aquifère libre. La perméabilité de cet aquifère est estimée à $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ pour une épaisseur de 20 m. Le semi-perméable a ainsi les mêmes caractéristiques que celui du modèle précédent car il y a conservation de l'entité e'/k' et donc du facteur de drainage ($Br^{1/2} = T/[k'/e']^{1/2}$).

L'estimation de l'impact sur l'Argens au cours de cet essai multi-puits est donnée par l'illustration 88. Le modèle donne un impact sur le cours d'eau de l'ordre de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (4 l/s) en fin

d'essai ce qui, comparé au débit des prélèvements dans le Muschelkalk, 1550 m³/h (430 l/s) et à celui de l'Argens (de 1 000 à plus 2 000 l/s suivant les périodes de mesures en basses eaux) est négligeable. Selon ce modèle, le ratio impact sur le cours d'eau / débit prélevé dans le Muschelkalk serait inférieur à 1%.

L'impact sur le cours d'eau est, cependant, très lié à la valeur que l'on donne à l'incision du cours d'eau (c.à.d. la partie d'aquifère saturée incisée par le cours d'eau, e'-e", Illustration 88).

C'est effectivement ce que montre l'Illustration 88 pour l'essai multi-puits de novembre 2014, où le débit d'impact varie entre 28 et 168 m³/h (7,7 à 47 l/s) lorsque le cours d'eau incise la quasi-totalité de l'aquitard (cas l= 15 et 19 m) et entre à 13 et 17 m³/h (3,7 à 4,6 l/s) lorsque l'incision est faible, entre 1 et 5 m (cas l=1, 3 et 5 m). Néanmoins, sachant que la profondeur du cours d'eau incisée dans l'aquifère saturée est de l'ordre du mètre, quelques mètres tout au plus, l'impact sur le cours d'eau le plus réaliste se situe vraisemblablement entre 13 et 15 m³/h lors de cet essai (3 à 4 l/s ; cas l=1 et 3 m).

L'impact sur le cours de cet essai devrait donc être très faible, voire imperceptible, compte tenu du débit de l'Argens au moment de l'essai (de l'ordre de 2 m³/s en aval du barrage). Notons que durant les mesures de débit réalisées le long de l'Argens au niveau des captages, aucune perte de débit du cours d'eau ne fût identifiée. Au contraire, les sources d'Entraigues, y compris celle des Avens, contribuaient à augmenter le flux du cours d'eau vers l'aval des captages.

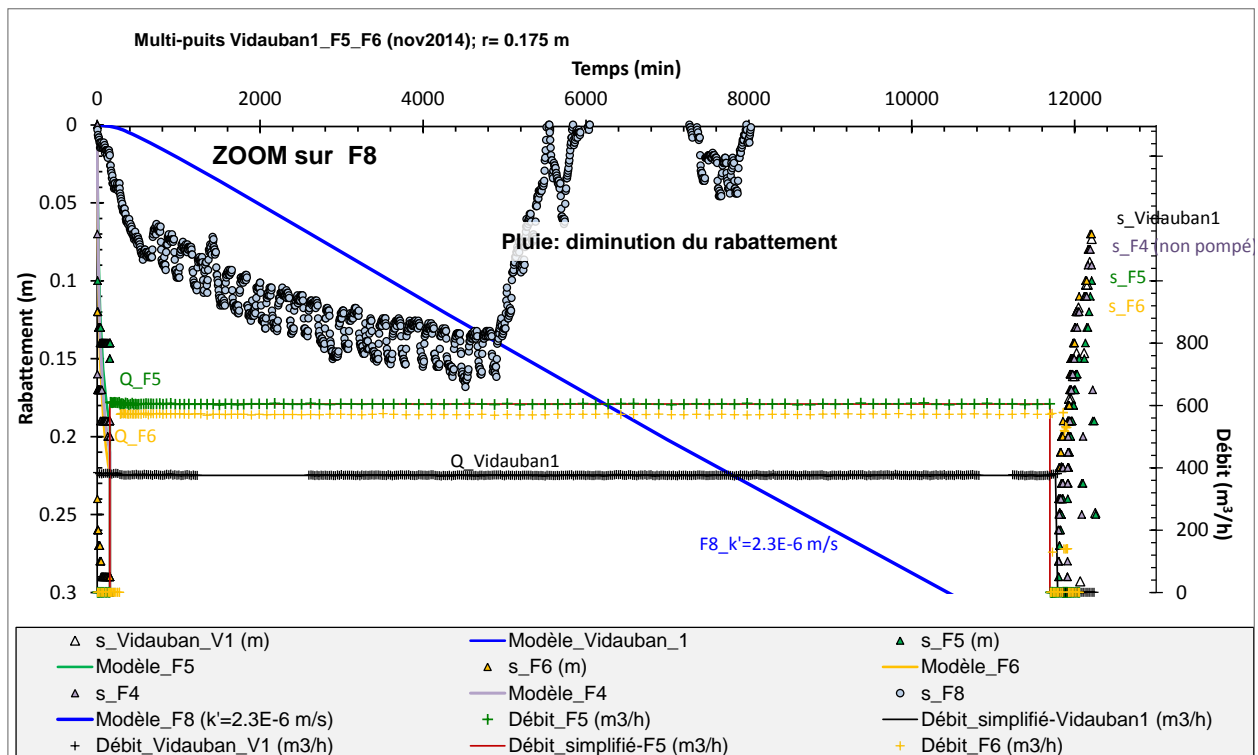
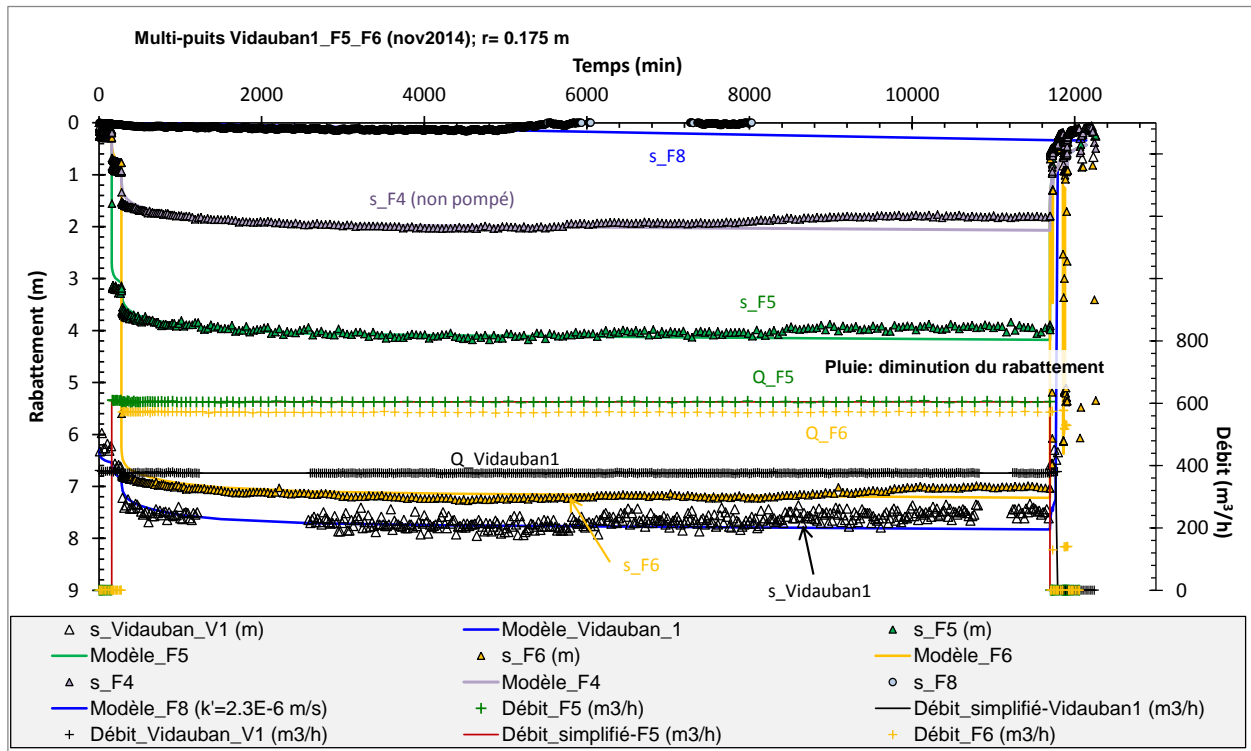


Illustration 85 - Modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014.
 Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk).
 Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.
 Graphe du bas : zoom sur F8.

	Vidauban 1	F6	F5	F4	F8
r (m) / V1	0,175	66,06	93,51	79,21	26,08
T (m ² /s)	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01
S (-)	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03	5.5E-03
k' (m/s)	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06
Sy (-)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
e' (m)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
e'' (m)	17,0	17,0	17,0	0,0	17,0
W (m)	15	15	15	15	15
Cc (m)	106.2	45.3	30	41.5	83.1
Dist.lim. 1 (min) / V1	423.28.4	-	-	-	-
Dist.lim. 2 (min) / V1	372.6	-	-	-	-
Dist.lim. 3 (min) / V1	186.4	-	-	-	-
Dist.lim. 4 (min) / V1	214.1	-	-	-	-
Dist.lim. 1 (m) / V1	1674.5	-	-	-	-
Dist.lim. 2 (m) / V1	1561.7	-	-	-	-
Dist.lim. 3 (m) / V1	1104.5	-	-	-	-
Dist.lim. 4 (m) / V1	1183.8	-	-	-	-
Surf. Aquifère (km ²)	7.4	-	-	-	-
Rc (m)	0,2	0,2	0,2	-	-
C (m ⁻⁵ s ²)	515,0	178,0	50,0	-	-

Illustration 86 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014.

Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk : F5, F6 et V1). Les distances au puits et piézomètres (r), ainsi que les distances aux limites (Lim 1 à 4) sont données par rapport au puits V1.

L'identification des symboles et abréviations est donnée dans l'illustration 82 page 122.

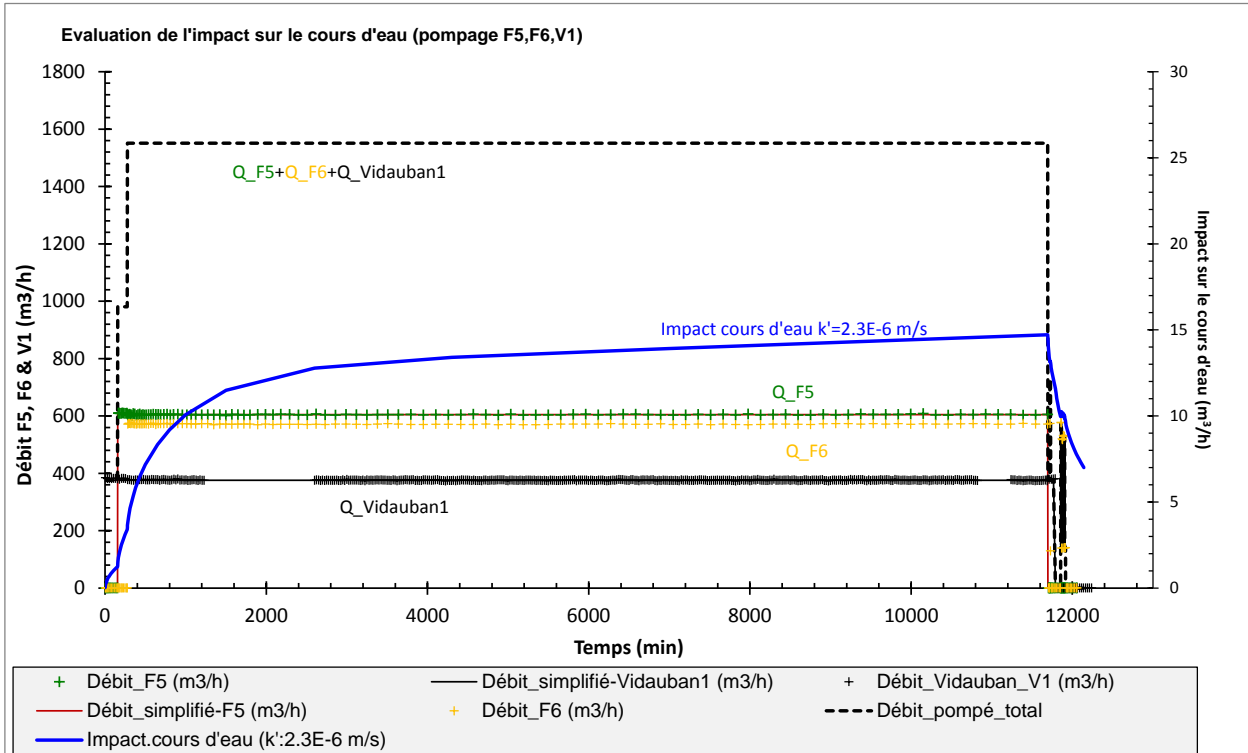


Illustration 87 - Evaluation de l'impact sur l'Argens modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk).

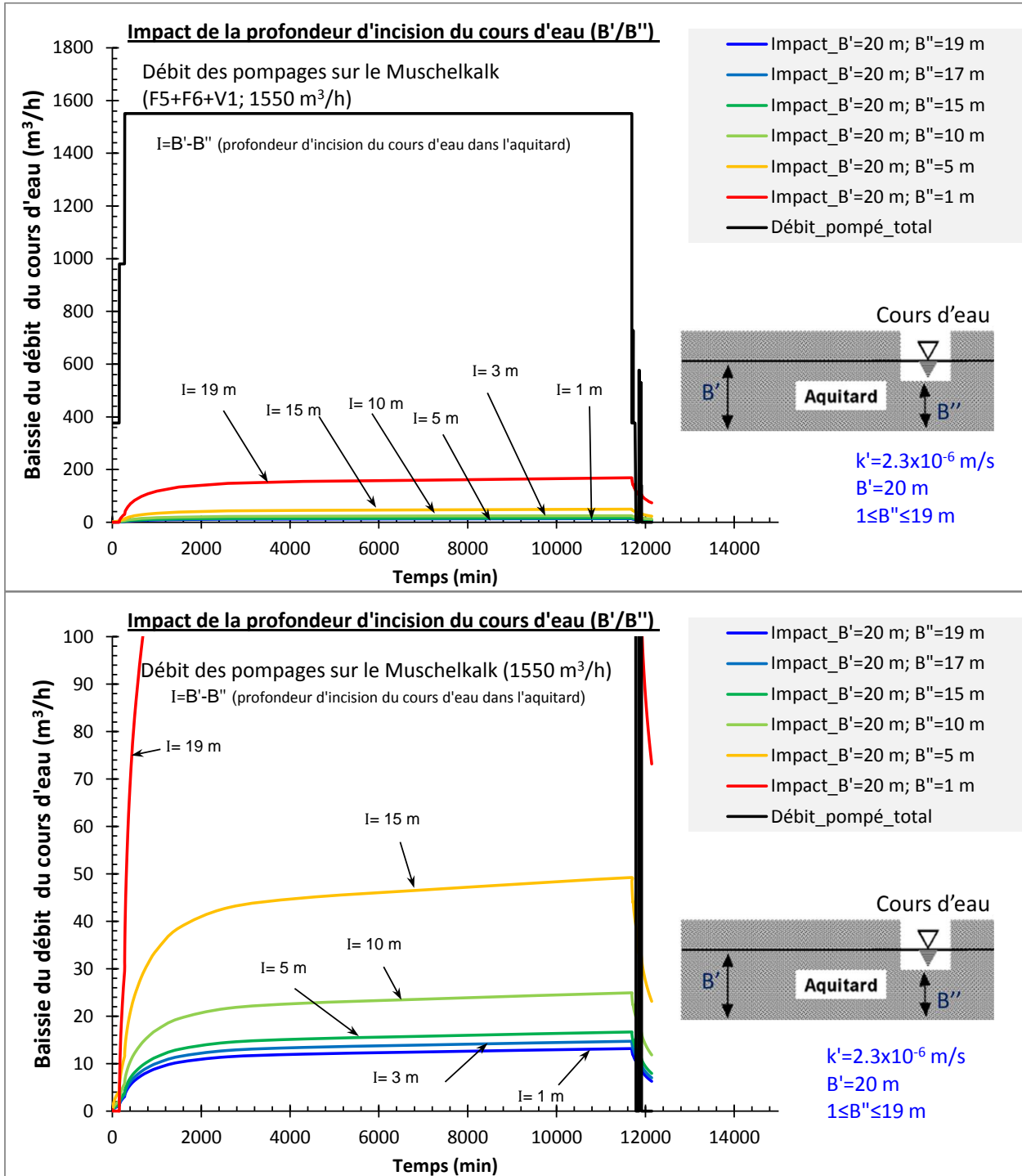


Illustration 88 - Effet de l'incision du cours d'eau sur la baisse de débit du cours d'eau (impact sur le cours d'eau). Essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (Muschelkalk). Graphe du bas : zoom sur le graphe du haut.

4.3.7. Simulation de débits d'exploitation

Les modèles préalablement établis et calés sur l'essai par pompage multi-puits réalisé en 2014, soit des modèles avec une structure géométrique de type aquifère fermé avec ou sans présence de cours d'eau (Illustration 77, Illustration 81) sont utilisés pour modéliser les rabattements aux différents puits au cours d'une année de pompage. Les modélisations ci-après ne prennent pas en compte la recharge des aquifères (Muschelkalk, tufs), les simulations sont donc réalisées en condition pessimiste, c'est-à-dire sans apport de recharge par les précipitations durant une année. Ceci implique que tous les ans la recharge soit suffisamment importante pour permettre un recouvrement des niveaux.

Dans les simulations, les débits des forages sont supposés 24h/24, 7j/7. Les simulations concernent les ouvrages qui ont été testés lors de l'essai de 2014, à savoir pour le SIAE Entraigues, les forages F4, F5 et F6, et pour Vidauban le forage V1 et la source des Avens.

a) Rabattements maximums admissibles

Le rabattement de niveau maximum admissible est le niveau d'eau dans l'ouvrage qui ne devra pas être atteint pendant l'exploitation. Pour l'ensemble des ouvrages, il a été défini en fonction de la position des pompes, des seuils d'alerte des pompes et des crépines des ouvrages. Son non dépassement assurera ainsi un fonctionnement correct des pompes.

Ces niveaux ont été définis en fonction des niveaux minimums enregistrés sur les suivis de niveaux d'eau disponibles (Illustration 95). Les profondeurs des enregistreurs des capteurs du SIAE et de Vidauban n'étant pas connus avec précision, environ 30 m de profondeur pour F4 et F5, environ 33 m pour F6 et environ 52,4 m pour V1, les piézométries minimales ont dû être estimées afin de permettre un calcul le plus précis possible des rabattements maximums admissibles. Ils sont évalués à 14,5 m pour F4 et F5, 16,8 m pour F6, 42,3 pour V1.

Concernant la source des Avens, le rabattement maximum admissible est difficile à contraindre faute d'information sur le niveau du capteur (on n'a pu travailler qu'en variations de hauteurs, sans se rapporter à une hauteur absolue). D'après les enregistrements, on sait que ce niveau est d'au moins 1,3 m.

Cependant, puisque les modèles présentés ne prennent pas en compte le débit d'exhaure naturel de la source, nous avons pu recalculer un niveau piézométrique théorique au niveau de la source, basé sur l'équivalence de pression entre la source et l'aquifère du Muschelkalk. Ceci revient à supposer que la source ne déborde pas ce qui permet de juger des résultats de la modélisation en termes de rabattement maximum admissible. Basé sur cette hypothèse, le rabattement maximum admissible est évalué à 3,8 m. Notons tout de même que cette valeur reste très incertaine.

	F4	F5	F6	V1	Source	remarque
haut. min au-dessus des capteurs (période 2010-2012_sep2014 janv.-2015)	19.5	No data	21.8	47.3	1.3	pour F4 et F6 en sept2012 pourV1 et Sce en sept2008 (période 2005-2014)
Seuil d'alerte (m dessus capteur)	5	5	5	5	0	
Rabattement max (m) - haut. min-Seuil d'alerte	14.5	14.5	16.8	42.3	1.3 ; 3.83*	Source: seuil de pompe/niv. Inconnue
Piézométrie minimale estimée (mNGF)	61.96	61.96	64.16	61.75	62.21 ; 64.74*	F6 : valeur suspecte
prof pompe / surface	30	33	33		N.A.	
Crépine (prof. en m)	40,5 - 100,5	52.5 - 100,5	43.45 - 100.45	69 - 93	N.A.	

* la valeur du rabattement maximum théorique à la source n'est pas connue, la première valeur indique le niveau le plus bas enregistré, et la deuxième une estimation théorique basée sur l'équivalence de pression entre la source et l'aquifère du Muschelkalk, ramener dans ce cas à 64,74 m NGF, soit donnant lieu à un rabattement théorique de 3,83 m.

Illustration 89 - Evaluation des rabattements maximums admissibles aux forages F4, F5, F6 (SIAE), et V1 et la source des Avens (Cne de Vidauban).

b) Débits de pompage maximum

Le tableau de l'illustration 90 présente les débits maximum testés. Par conséquent, ils constituent les débits à ne pas dépasser dans le cadre des simulations. En effet, la prise en compte de débits de pompage plus importants peut engendrer des pertes de charge beaucoup plus importantes, notamment au niveau des échanges puits-aquifères (pertes de charge liées au puits), inconnues à ce jour pour ce type de débits, et donc non considérées dans les modèles. Si tel était le cas d'autres tests par pompage devraient être réalisés et les résultats intégrés aux modèles.

Débits maximums testés et à ne pas dépasser dans les simulations
F4 : 478 m3/h
F5 : 615 m3/h
F6 : 578 m3/h
Vidauban 1 : 375 m3/h
Source des Avens : 154 m3/h

Illustration 90 - Débits maximum testés et à ne pas dépasser dans les simulations pour le SIAE et la commune de Vidauban.

c) Scénarios d'exploitation

Deux scénarios d'exploitation ont été testés. Le premier considère un débit constant des ouvrages 24h/24, 7j/7 durant 1 an. Le deuxième considère aussi une exploitation toute l'année (24h/24, 7j/7) mais avec un débit plus important en période estivale (juin à août) qu'en période hivernale (septembre-mai) afin de prendre en compte des besoins plus importants en été. Pour ce deuxième cas, il a été supposé que les prélèvements étaient environ 30% supplémentaires en été.

Par ailleurs, ces simulations doivent aussi respecter les stratégies d'exploitation et les besoins futurs du SIAE et de la Commune de Vidauban. Pour le SIAE, un débit maximal total de 250 l/s (900 m³/h) est souhaité avec F6 exploité en priorité et les deux autres forages (F4 et F5) en soutien. Pour Vidauban, 110 l/s est souhaité en débit maximal total (400 m³/h) avec 125 m³/h de prélèvement sur la source (35 l/s).

Le tableau de l'illustration 91 présente les débits d'exploitation qui ont été estimés. Ils tiennent compte des conditions de rabattements maximum admissibles, des débits possibles sur les ouvrages (Illustration 90) et des conditions d'exploitation souhaitées par le SIAE et la commune de Vidauban (cf. § précédent). Le premier scénario affiche un débit moyen annuel (24h/24 ; 7j/7) de 250 l/s pour le SIAE et de 111 l/s pour Vidauban et le deuxième un débit moyen de 208 l/s pour le SIAE et de 90 l/s pour Vidauban. Dans les deux cas, F6 est exploité en priorité à son débit maximum (153 l/s, 24h/24, 7j/7), et la source des Avens exploitée en continu (34,5 l/s, 24h/24, 7j/7).

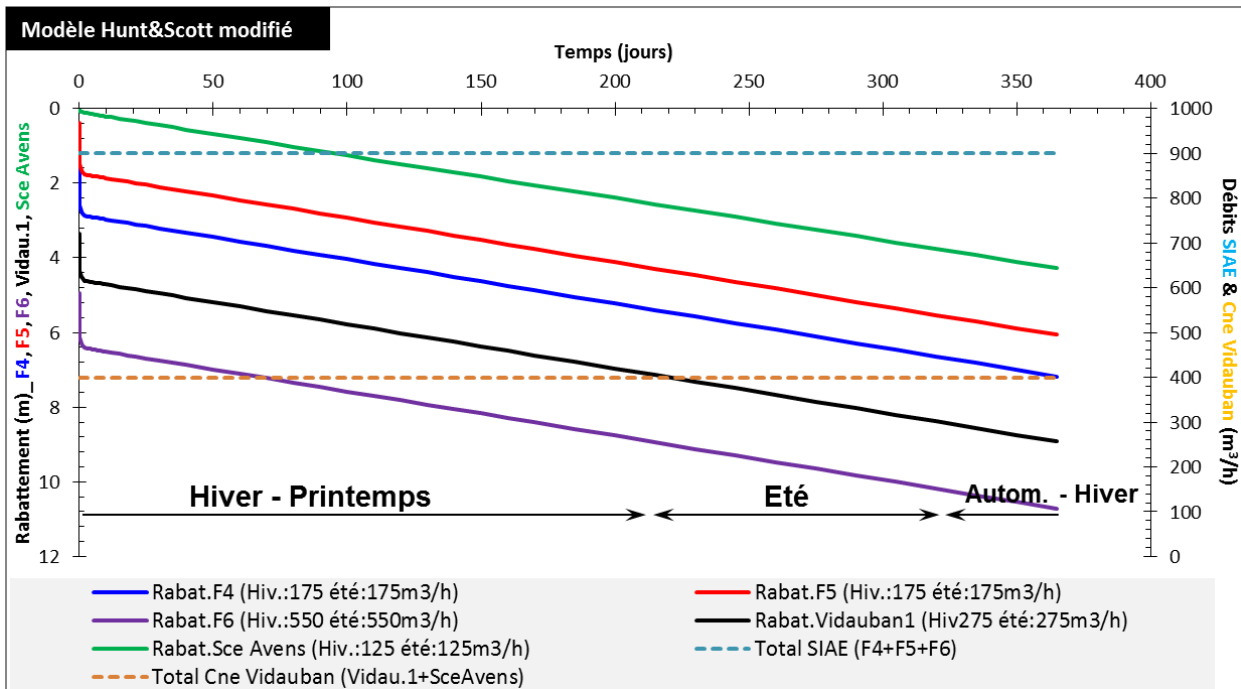
Les rabattements calculés par les deux modèles sont présentés sur les figures de l'illustration 92 et de l'illustration 93. Les rabattements calculés par les modèles sur les forages sont d'ampleurs similaires, cependant les rabattements issus du modèle Hunt & Scott modifié (figures du haut de l'illustration 92 et de l'illustration 93) sont plus fiables car intégrant le pompage au niveau de la source des Avens. Les résultats des deux modèles montrent une évolution linéaire du rabattement qui est dû au caractère fermé de l'aquifère du Muschelkalk (voir les chapitres portant sur la modélisation des essais). Cependant, cette tendance linéaire est de faible pente puisqu' au bout d'un an de pompage, sans recharge, le rabattement calculé n'excède pas 10 m (forage F6, Illustration 94 et Illustration 95). Dans les conditions de pompage proposées, les rabattements maximums ne sont jamais atteints, suggérant que ces débits d'exploitation sont envisageables. Toutefois, notons que les modèles ont du mal à évaluer avec certitude l'impact en termes de niveaux sur la source de l'Argens : modèle Hunt & Scott modifié sans prise en compte des relations aquifères cours d'eau, et modèle modifié de Hunt 2003, sans prise en compte du pompage sur la source. Même si les rabattements estimés sur la source sont acceptables, il est conseillé d'assurer le suivi continu à la source.

Le modèle modifié de Hunt 2003 permet d'avoir une estimation de l'impact des pompes dans le Muschelkalk sur le cours d'eau (figures du bas de l'illustration 92 et de l'illustration 93). D'après le modèle, il est faible de 60 à 70 m³/h (15 à 20 l/s), soit 6 à 7% du débit total pompé quel que soit le scénario considéré. L'impact attendu sur l'Argens sera donc *a priori* faible et inférieur aux prélèvements sur la source.

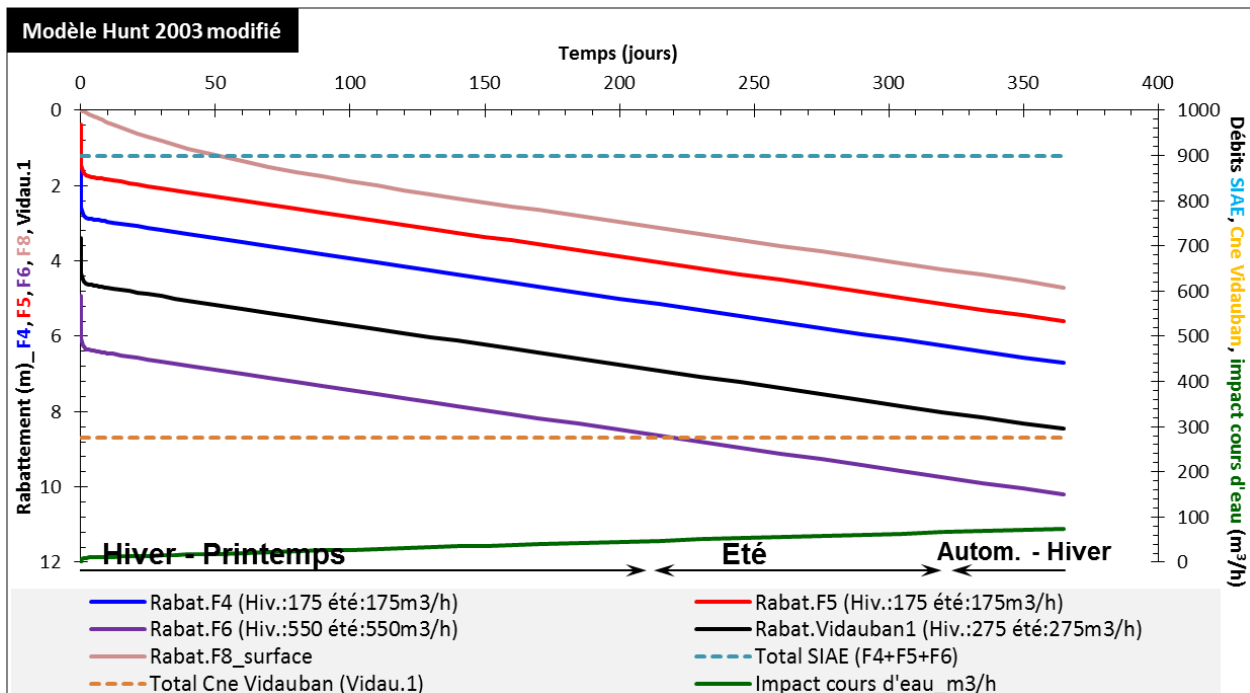
Des calculs ont été faits pour juger de l'impact de chacun des forages du Muschelkalk sur la source et sur le cours d'eau (graphiques en annexe 4 de ce rapport). Pour les débits de pompes considérés les résultats montrent que c'est le forage F6 qui a le plus d'impact sur le niveau de la source. Dans les deux scénarios il est responsable d'environ 50% du rabattement à la source (rabattement maximal à la source estimé : 3,5 à 4,3 m). Pour l'impact sur le cours d'eau en terme de débit, c'est aussi le forage F6 qui d'après les calculs est le plus impactant (plus soit 47 à 60% de l'impact global suivant les scénarios 1 et 2 respectivement).

Scénario1	F4	F5	F6	Vidauban1	Source des Avens										
débit m3/h	175.0	175.0	550.0	275.0	125.0										
débit l/s	48.6	48.6	152.8	76.4	34.7										
	m3/h	l/s													
Total SIAE	900	250													
Total Vidauban	400	111													
TOTAL	1300	361													
						Débit période Nov.mai et sept.oct. (9 mois)					Débit période Juin-Juill.-Août (3 mois)				
Scénario2	F4	F5	F6	Vidauban1	Source des Avens	F4	F5	F6	Vidauban1	Source des Avens					
débit m3/h	75.0	75.0	550.0	175.0	125.0	175.0	175.0	550.0	275.0	125.0					
débit l/s	20.8	20.8	152.8	48.6	34.7	48.6	48.6	152.8	76.4	34.7					
	m3/h	l/s													
Total SIAE	750	208													
Total Vidauban	325	90.3													
TOTAL	1075	299													

Illustration 91 - Débits utilisés dans les simulations de débits d'exploitations. SIAE et Cne de Vidauban.

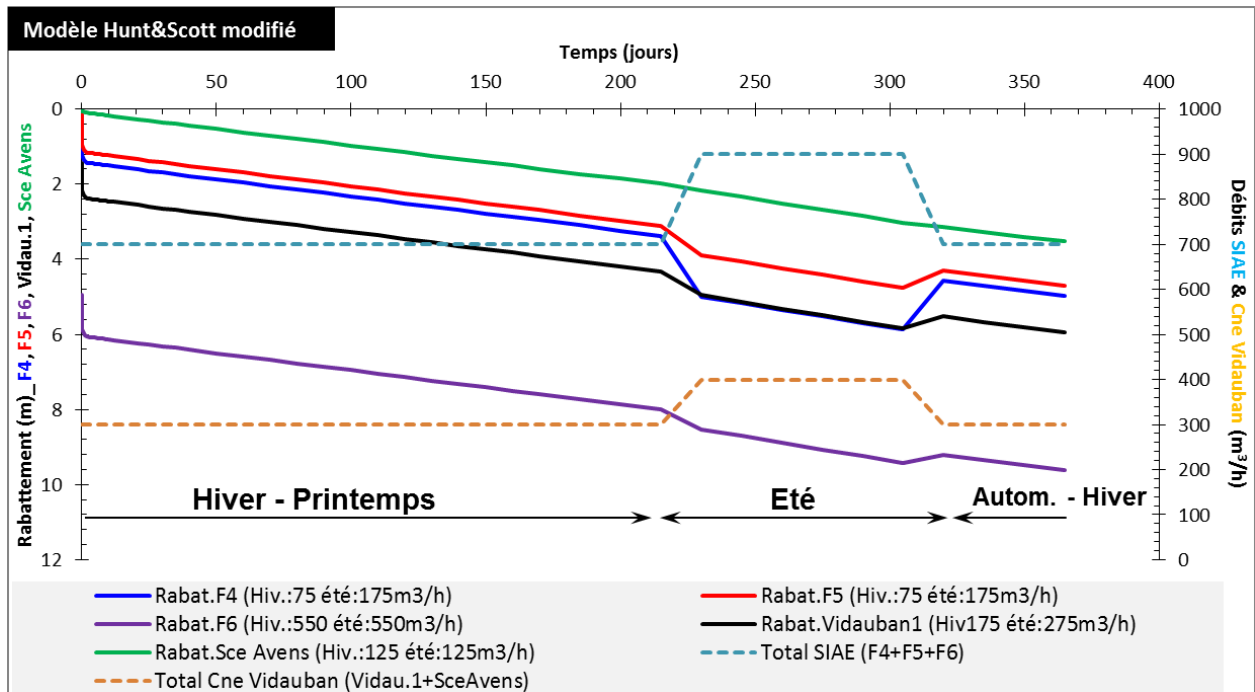


Modèle : Hunt et Scott modifié version multi-puits avec pompages dans les aquifères supérieur (tufs) et inférieur (Muschelkalk).

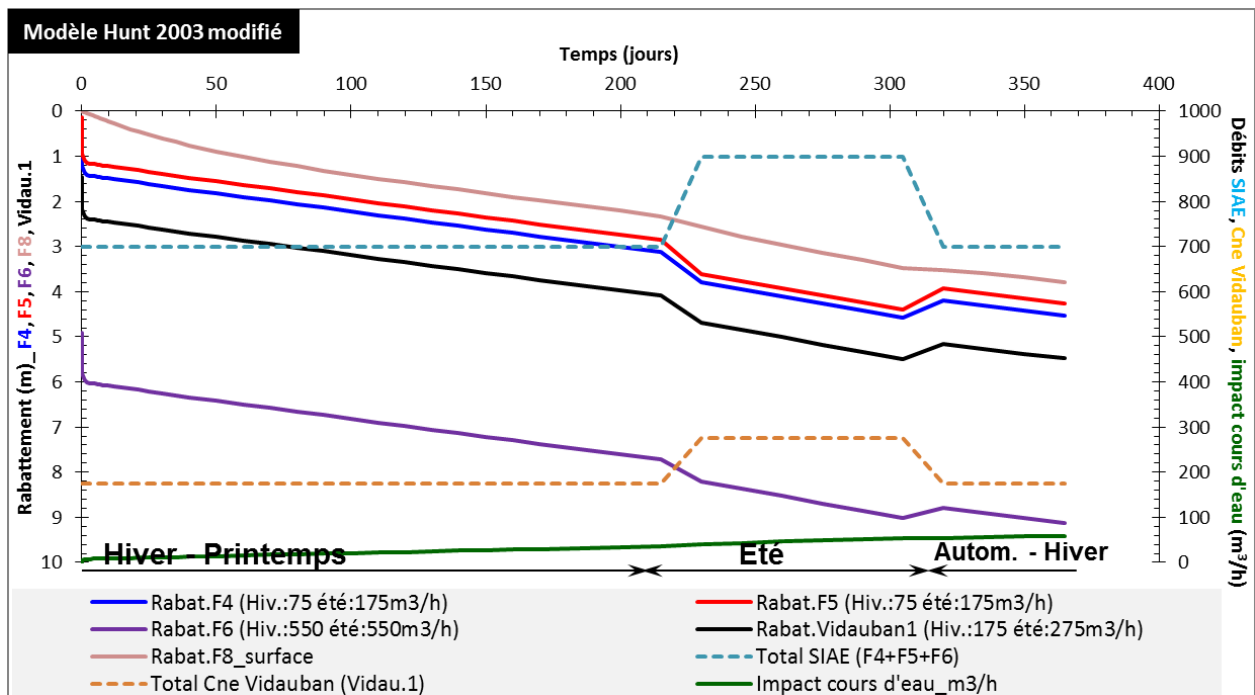


Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur uniquement (Muschelkalk) et impact sur le cours d'eau.

Illustration 92 - Modélisation de débit d'exploitation, scénario 1, pompage constant toute l'année 24h/24, 7j/7



Modèle : Hunt et Scott modifié version multi-puits avec pompages dans les aquifères supérieur (tufs) et inférieur (Muschelkalk).



Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur uniquement (Muschelkalk) et impact sur le cours d'eau.

Illustration 93 - Modélisation de débit d'exploitation, scénario 2, pompage plus important en été.

Synthèse Scénario 1 : pompage constant toute l'année (24h/24, 7j/7)	
Modèle: Hunt & Scott modifié	Rabat.max (m)
Rabat.F4 (Hiv.:175 été:175m3/h)	7.2
Rabat.F5 (Hiv.:175 été:175m3/h)	6.1
Rabat.F6 (Hiv.:550 été:550m3/h)	10,7
Rabat.Vidauban1 (Hiv275 été:275m3/h)	8.9
Rabat.Sce Avens (Hiv.:125 été:125m3/h)	4.3
	m3/h-moy.
Total SIAE (F4+F5+F6)	900
Total Cne Vidauban (Vidau.1+SceAvens)	400
Débit total	1300
Modèle: Hunt 2003 modifié; Sce Avens non pompée	Rabat.max (m)
Rabat.F4 (Hiv.:175 été:175m3/h)	6.7
Rabat.F5 (Hiv.:175 été:175m3/h)	5.6
Rabat.F6 (Hiv.:550 été:550m3/h)	10,2
Rabat.Vidauban1 (Hiv.:275 été:275m3/h)	8.4
Rabat.F8_surface	4.7
	m3/h
Total SIAE (F4+F5+F6)_moy.ann.	900
Total Cne Vidauban (Vidau.1)_moy.ann.	
! Sce non pris en compte dans modèle	275
Débit total_moy.ann.	1175
Impact sur le cours d'eau	m3/h
Impact cours d'eau_m3/h_max	73.6
Impact cours d'eau_m3/h_moy.	42.1

Illustration 94 - Synthèse des résultats du scénario 1, pompage constant toute l'année (24h/24, 7j/7).
Modèle de Hunt & Scott modifié et de Hunt 2003 modifié.

Synthèse Scénario 2 : pompage plus important en été (24h/24, 7j/7)	
Modèle: Hunt & Scott modifié	Rabat.max (m)
Rabat.F4 (Hiv.:75 été:175m ³ /h)	5.9
Rabat.F5 (Hiv.:75 été:175m ³ /h)	4.8
Rabat.F6 (Hiv.:550 été:550m ³ /h)	9.6
Rabat.Vidauban1 (Hiv.:175 été:275m ³ /h)	5.9
Rabat.Sce Avens (Hiv.:125 été:125m ³ /h)	3.5
	m3/h-moy.
Total SIAE (F4+F5+F6)	750
Total Cne Vidauban (Vidau.1+SceAvens)	325
Débit total	1075
Modèle: Hunt 2003 modifié ; Sce Avens non pompée	Rabat.max (m)
Rabat.F4 (Hiv.:75 été:175m ³ /h)	4.6
Rabat.F5 (Hiv.:75 été:175m ³ /h)	4.4
Rabat.F6 (Hiv.:550 été:550m ³ /h)	9.1
Rabat.Vidauban1 (Hiv.:175 été:275m ³ /h)	5.5
Rabat.F8_surface	3.8
	m3/h
Total SIAE (F4+F5+F6)_moy.ann.	750
Total Cne Vidauban (Vidau.1)_moy.ann.	
! Sce non pris en compte dans modèle	200
Débit total_moy.ann.	950
Impact sur le cours d'eau	m3/h
Impact cours d'eau_m3/h_maximum	58.9
Impact cours d'eau_m3/h_moyen	33.2

Illustration 95 - Synthèse des résultats du scénario 2, pompage toute l'année mais plus important en été (24h/24, 7j/7). Modèle de Hunt & Scott modifié et de Hunt 2003 modifié.

4.4. SYNTHÈSE SUR LES POMPAGES D'ESSAI

La réinterprétation des pompages d'essai historiques, les essais par paliers de débits réalisés en 2014 et l'essai et le pompage de longue durée en multi-pompage du 06 au 14/11/2014 (8,1 jours), ont permis de caractériser l'aquifère des calcaires fracturés du Muschelkalk ainsi que l'aquifère sus-jacent des tufs.

L'essai de longue durée a consisté en un pompage multi-puits où les pompes ont été mises en route les unes après les autres :

- pour le Muschelkalk : F5 (débit : 606 m³/h), F6 (570 m³/h) et V1 (375 m³/h). F4 bien qu'exploité n'a pas été pompé lors de cet essai ;
- pour les tufs : la source des Avens (154 m³/h).

Cela représente un total d'environ 1700 m³/h (474 l/s).

L'observation des niveaux a été conduite sur ces ouvrages, V2 et V3 (Muschelkalk) et, F3 et F8 (tufs). Cet essai a permis de montrer :

(a) une connexion hydraulique entre les tufs et l'Argens, du moins au niveau du barrage (l'aval du barrage étant en net contrebas du niveau piézométrique dans les tufs). Cette information est apportée par l'essai de puits sur la source des Avens,

(b) une connexion hydraulique entre les tufs et les calcaires fracturés du Muschelkalk, ce qui jusqu'à présent n'avait pas été montré. Il est à noter que la modélisation de l'ensemble des essais dans le Muschelkalk (9 essais, dont plusieurs en interférence), ont permis de trouver des caractéristiques hydrodynamiques similaires. Un seul essai est par contre disponible dans les tufs (réalisé en 2014).

Plusieurs modèles mathématiques de type multicouche, prenant donc en compte des pompages dans un milieu d'aquifères stratifiés, limité dans l'espace (Hantush modifié ; Hunt et Scott modifié) et prenant aussi en compte la présence d'un cours d'eau incisant partiellement l'aquifère de surface, les tufs (Hunt 2003 modifié) ont été utilisés pour modéliser les essais.

Concernant l'essai multi-puits de novembre 2014, c'est le modèle de Hunt et Scott modifié (multicouche limité dans l'espace avec variation du niveau dans l'aquifère surface perméable et pompages dans les deux niveaux aquifères) qui a donné les meilleurs résultats en termes de modélisation des niveaux. Par contre, le modèle Hunt 2003 modifié (multicouche limité dans l'espace avec variation du niveau dans l'aquifère de surface incisé par un cours d'eau et pompages uniquement dans l'aquifère inférieur) qui a pu donner un ordre de grandeur de l'impact des pompages dans le Muschelkalk (forages F5, F6, V1) sur l'Argens. Ces deux modèles ont donc été utilisés de façons complémentaires.

Les paramètres hydrodynamiques issus des modélisations montrent que l'aquifère du Muschelkalk est caractérisé par une forte transmissivité évaluée à $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ et un emmagasinement (S) égal à $5,5 \cdot 10^{-3}$, indiquant le caractère captif de la nappe.

Cet aquifère est limité latéralement : sa géométrie de forme supposée rectangulaire (longueur d'environ 3,2 km et largeur d'environ 2,3 km) couvre une surface de l'ordre de 7,4 km². Cependant, il n'a pas été possible de déterminer précisément l'orientation de l'aquifère faute d'ouvrages suffisamment éloignés répondant au pompage. De façon arbitraire, il a été choisi de l'orienter N-S dans les modèles.

Au niveau du forage de Vidauban (V1), l'essai de 2014 a montré un comportement atypique des suivis sur les ouvrages V2 et V3 distants de 30 m, suggérant qu'une structure très diffusive, probablement une fracture très perméable ou un petit conduit karstique, connecte ces trois forages. Cependant, cette structure locale dans le Muschelkalk n'est pas généralisable à l'ensemble de l'aquifère du Muschelkalk du moins au niveau du site d'Entraigues.

La transmissivité de l'aquifère de surface, les tufs, a été évaluée à $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, et son emmagasinement à 0,35, typique d'un aquifère libre. Dans le modèle multi-puits Hunt et Scott modifié, la transmissivité a cependant dû être augmentée, mais toujours dans le même ordre de grandeur ($T_0=1 \text{ m}^2/\text{s}$) en conséquence de l'alimentation par l'Argens. L'emmagasinement est par contre resté identique.

L'impact sur le cours d'eau (modèle Hunt 2003 modifié) est estimé entre 13 et 15 m³/h (3 à 4 l/s) avec l'hypothèse d'un faible degré d'incision du cours d'eau dans les tufs (1 à 3 m). Notons que ce modèle ne permet pas de prendre en compte toutes les caractéristiques de l'essai (pompage dans la source par exemple) ou toutes les caractéristiques hydrodynamiques du site (dans le modèle les tufs sont supposés peu perméables). Néanmoins, le modèle a

permis d'appréhender l'ordre de grandeur de l'impact sur le cours d'eau. Selon ce modèle, le ratio impact sur le cours d'eau / débit prélevé dans le Muschelkalk ($1550 \text{ m}^3/\text{h}$ ou 430 l/s) serait inférieur à 1%. Concernant l'Argens, l'impact est négligeable, voire imperceptible puisqu'on moment des essais son débit dépassait les $2\,000 \text{ l/s}$.

Entre ces deux aquifères réside un niveau marno-sableux de quelques mètres d'épaisseur, dont la perméabilité est estimée à $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (pour une épaisseur fixée arbitrairement à un mètre). Par contre, cette perméabilité a dû être augmentée (modèle Hunt et Scott modifié) pour reproduire les niveaux dans les tufs lors de l'essai multi-puits ($4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), probablement à cause des fortes connexions hydrauliques (conduits et cavités) qui existent entre la source et les ouvrages dans les tufs. En effet, les observations des niveaux dans les tufs lors de l'essai de longue durée suite à l'enclenchement des pompes dans le Muschelkalk ont occasionné un rabattement rapide.

Cette forte connexion semble provoquer une réaction beaucoup plus rapide au niveau des puits, de seulement une dizaine de centimètres cependant (F3, F8). De plus, il est fortement probable, même si cela n'est pas formellement démontré, que le conduit alimentant la source traverse le Muschelkalk au moins en partie. Ainsi une diminution de la pression dans le Muschelkalk, induite par les pompes sur F5, F6 et V1, fera rapidement diminuer le niveau sur la source de quelques dizaines de centimètres comme l'a montré cet essai. Du fait des conduits et cavités dans les tufs, une baisse sur la source sera rapidement ressentie sur les autres ouvrages dans les tufs (de quelques dizaines de centimètres aussi).

Du point de vue de la qualité des échanges entre les forages et l'aquifère (marqués par les pertes de charge quadratiques, liées à l'équipement des puits) :

- pour F4 et F5, on note une amélioration des puits depuis leur mise en service, en particulier pour F4 ; ceux-ci se seraient vraisemblablement développés depuis les années 80 ;
- pour F6, en 2014 le coefficient de pertes de charge quadratiques est légèrement inférieur à celui de 2008 suggérant une légère amélioration de l'ouvrage ;
- pour le forage exploité de Vidauban (V1) les pertes de charge au puits sont en revanche beaucoup plus élevées en 2014 qu'en 2000, ce qui indique une forte baisse de la productivité de l'ouvrage (estimée à 75%). Cette baisse est probablement liée à un colmatage partiel de l'ouvrage et/ou des fractures l'alimentant. Pour ce forage, des investigations complémentaires (nouvel essai par paliers pour confirmation, caméra...) seraient nécessaires avant d'engager et d'adapter une procédure de nettoyage/développement de l'ouvrage (air-lift/acidification par exemple).

Les modèles préalablement établis et calés sur l'essai par pompage multi-puits réalisés en 2014, ont été utilisés pour modéliser les rabattements aux différents puits au cours d'une année de pompage. Les modélisations ne prennent pas en compte la recharge des aquifères (Muschelkalk, tufs), les simulations ont donc été réalisées en condition pessimiste, c'est-à-dire sans apport de recharge par les précipitations durant une année.

Les simulations concernent les ouvrages qui ont été testés lors de l'essai de 2014, soit pour le SIAE Entraigues les forages F4, F5 et F6, et pour Vidauban le forage V1 et la source des Avens (pompage 24h/24, 7j/7). Deux scénarios d'exploitation ont été testés. Le premier considère un débit constant des ouvrages et le deuxième considère un débit de 30% plus important en

période estivale (juin à août) qu'en période hivernale (septembre-mai) afin de prendre en compte des besoins plus importants en été.¹²

Les modélisations ont tenu compte des conditions de rabattements maximum admissibles, des débits possibles sur les ouvrages et des conditions d'exploitation souhaitées par le SIAE et la commune de Vidauban. Les résultats montrent que pour le premier scénario un débit moyen annuel (24h/24 ; 7j/7) de 250 l/s pour le SIAE et de 111 l/s pour Vidauban sont envisageables, et pour le deuxième un débit moyen de 208 l/s pour le SIAE et de 90 l/s pour Vidauban. Dans les deux cas, F6 est exploité en priorité à son débit maximum (153 l/s, 24h/24, 7j/7) et la source des Avens exploitée en continu (34,5 l/s, 24h/24, 7j/7). Dans les conditions de pompage proposées, les rabattements maximum ne sont jamais atteints.

Notons toutefois que les modèles ont du mal à évaluer avec certitude l'impact en termes de niveau sur la source. Même si les rabattements estimés sur la source sont acceptables, il est conseillé de continuer à suivre le niveau de la source en continu.

Le cas échéant, le débit des autres ouvrages pourra être révisé à la baisse. Le modèle modifié de Hunt (2003) a permis d'estimer l'impact des pompages dans le Muschelkalk sur le cours d'eau de l'Argens. D'après le modèle, il est faible : de 60 à 70 m³/h (15 à 20 l/s), soit 6 à 7% du débit total pompé quel que soit le scénario considéré. L'impact attendu sur l'Argens sera donc *a priori* faible et inférieur aux prélèvements sur la source. Les données historiques dont nous disposons sur l'Argens montrent une valeur minimale, au niveau de la source de l'ordre de 400 l/s.

Dans le cas où la source est en étiage sévère (débit de l'ordre de 0,15 m³/s), l'impact du pompage sur le cours d'eau atteindrait environ 11 % du débit. Si la source a un débit moyen de la période 1964 – 2014 (0,68 m³/s), l'impact des pompages n'est plus que de 3 %. Une valeur de débit de la source de 0,46 m³/s (débit moyen en période déficitaire 2003 - 2007) entrainerait un impact sur l'Argens de moins de 5 % de son débit.

En résumé, d'après la modélisation, l'impact maximal des pompages dans le Muschelkalk sur le débit de l'Argens serait de 11 % de son débit.

¹² L'application qui a permis d'établir les simulations sur le site d'Entraigues a été cédée au SIAE et à la Commune de Vidauban.

5. Etude de la vulnérabilité du bassin d'alimentation du site d'Entraigues et recommandations de préservation

5.1. NOTIONS DE POLLUTION ET DE VULNERABILITE A LA POLLUTION

Une pollution appliquée à la surface d'un impluvium se définit à la fois du point de vue spatial et temporel. D'un point de vue spatial, les pollutions peuvent être diffuses ou ponctuelles. D'un point de vue temporel, les pollutions peuvent être accidentelles ou chroniques. L'établissement d'une carte de vulnérabilité de la ressource en eau permet d'appréhender les conséquences de ces pollutions. Selon le type de pollution identifiée, des recommandations pourront être faites en vue de mettre en place ou de modifier les contours des périmètres de protection rapprochés (cas d'une pollution ponctuelle, qu'elle soit accidentelle ou chronique), des zones d'action prioritaire au sein d'une Aire d'Alimentation de Captage, AAC (pollution diffuse chronique), voire des zones de sauvegarde au sein des ressources stratégiques.

La notion de vulnérabilité d'une ressource en eau traduit son défaut de protection naturelle vis-à-vis d'une pollution qui serait appliquée en un point de son bassin d'alimentation – elle caractérise donc un transfert de polluant depuis la surface du sol jusqu'au toit de la nappe. La prise en compte de ce transfert jusqu'au point de captage permet de quantifier la vulnérabilité du captage d'eau. Sont distinguées la vulnérabilité intrinsèque, qui détermine la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques, de la vulnérabilité spécifique qui caractérise cette sensibilité pour un polluant donné ou un groupe de polluants, en tenant compte dans ce cas des propriétés de mobilité et de dégradation de ce polluant au sein de l'aquifère.

La notion de vulnérabilité est définie par rapport au point d'application d'un polluant à la surface du bassin d'alimentation. Elle s'exprime donc à travers des cartes qui traduisent par une échelle de couleur la sensibilité de la ressource ou du captage à la contamination par les activités anthropiques. Pour mieux cibler les zones d'actions prioritaires dans le cadre de la stratégie de protection des zones de captages, la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque doit permettre d'établir une hiérarchisation des zones très fortement à faiblement sensibles à l'infiltration des eaux rejoignant la ressource et donc in fine les sources captées. L'établissement de carte de vulnérabilité permet au gestionnaire de prioriser ses actions de protection de la ressource ou du captage d'eau en tenant compte des pressions anthropiques qui s'exercent sur le bassin.

Dans cette étude, la cartographie de la vulnérabilité concerne la vulnérabilité intrinsèque de la ressource en eau.

5.1.1. Délimitation de la zone d'étude

a) Identification des réservoirs aquifères

Selon la profondeur des ouvrages, le champ captant sollicite les eaux souterraines contenues dans les tufs et l'aquifère du Muschelkalk sous-jacent. Une couche marneuse de 2 à 3 m d'épaisseur s'intercale entre ces deux formations aquifères. Cependant, comme le montre l'interprétation des essais de pompage (chapitre 75), il existe des relations hydrauliques entre ces deux hydrosystèmes, notamment au niveau de la source des Avens qui draine l'aquifère du Muschelkalk localement en charge et émerge à travers le tuf calcaire.

Ainsi, l'étude de la vulnérabilité de la ressource en eau sollicitée par le champ captant du site d'Entraigues doit considérer les réservoirs hydrogéologiques des calcaires du Muschelkalk et du tuf calcaire présent localement comme une seule entité aquifère drainée par la source des Avens et les différents puits du site d'Entraigues.

Des études antérieures relatives à la réalisation de traçages en rive gauche de l'Argens au niveau du contact Keuper/Muschelkalk depuis la perte du Vallon de Saint Peyre (St-Jaume) et la perte de la STEU¹³ de Lorgues (aven des Pies) n'ont pas permis de déterminer avec certitude les liens entre ces points d'infiltration concentrée et une résurgence des eaux dans le lit de l'Argens ou au niveau du champ captant (utilisation de fluocapteurs non validés par spectrofluorimétrie).

b) Les débits dans l'Argens

La courbe de l'illustration 96 représente les débits de l'Argens en aval de Carcès, une trentaine de km en amont des sites d'Entraigues.

Comme cela a été explicité au chapitre 3 (paragraphe 3.1.3 page 48), des jaugeages du trop-plein de la source des Avens ont été effectués en 2014 et 2015. Le tableau des résultats est présenté en annexe 8 et remis ci-dessous :

Date	Site de jaugeage	m(g)	Q (l/s)	Incertitude type	Int. de conf. à 95%
17/07/2014	Source des Avens	2.36	523	35	147
		1.59	481	36	
		1.46	627	49	
			544		
	Source en aval du barrage	5.17	492	28	
		1.95	503	35	
		1.83	463	33	
		486		41	
	Total source d'Entraigues		1030		188
18/06/2015	Source des Avens	1.33	510	41	
	Source en aval du barrage	1.54	466	35	
	Total source d'Entraigues		976		76

Résultats des jaugeages des sources d'Entraigues.

¹³ Station de Traitement des Eaux Usées

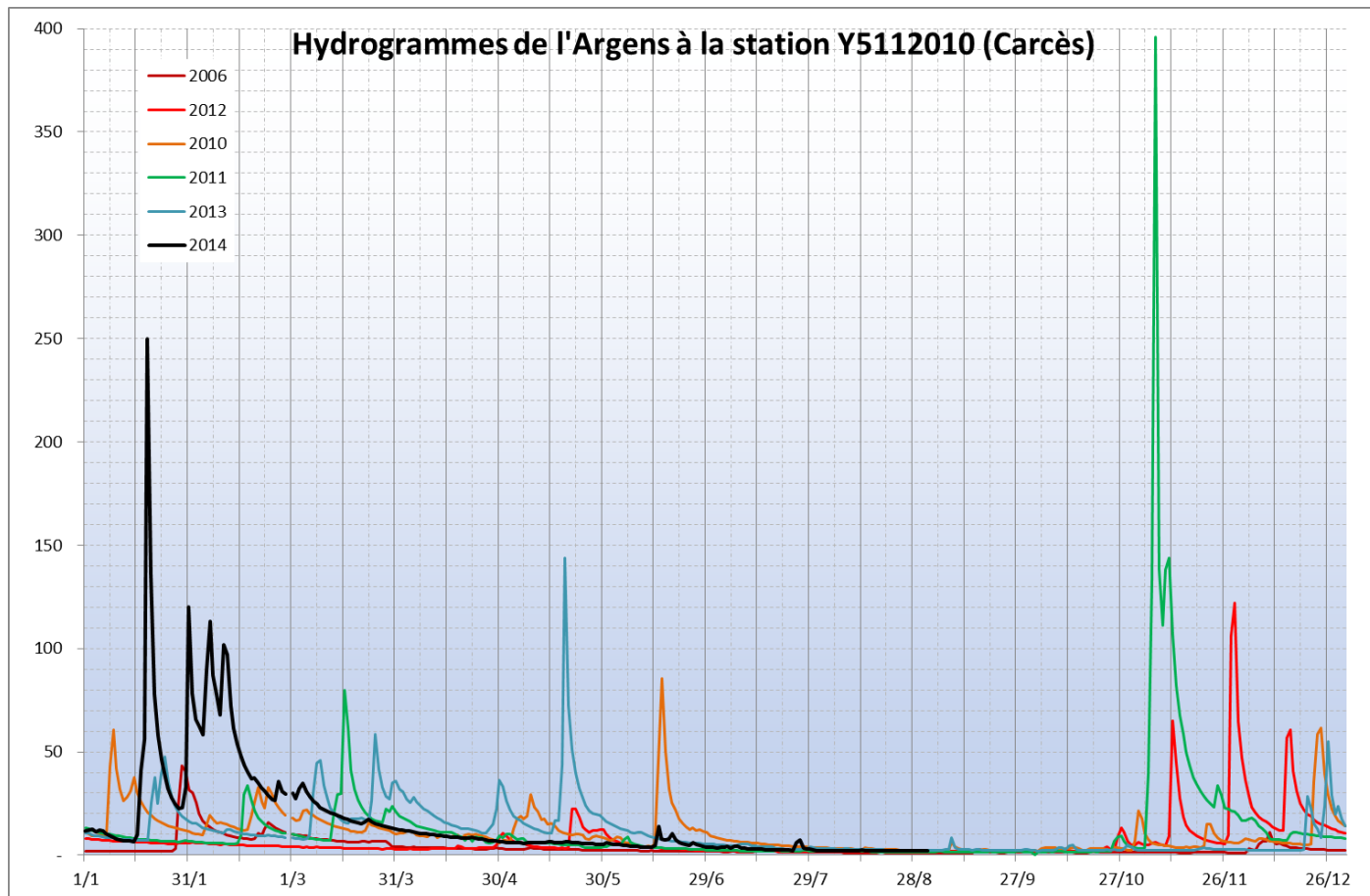


Illustration 96 - Les débits de l'Argens en aval de Carcès (données HYDRO, DREAL PACA).

Ces résultats sont comparés aux suivis piézométriques mis en place dans la vasque en amont de la cascade de la source des Avens (Illustration 97).

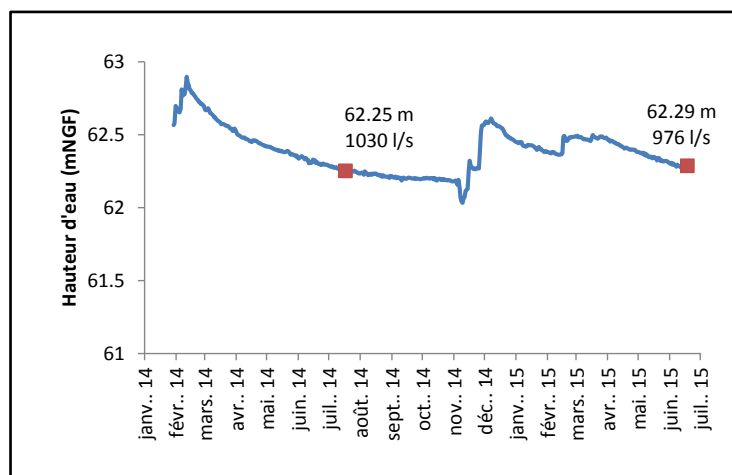


Illustration 97 - Comparaison des suivis piézométriques sur la source des Avens (moyennes journalières) et des résultats cumulés des jaugeages des venues d'eau sous le barrage et de la source des Avens

Les débits jaugés correspondent au débit d'étiage des exutoires souterrains, de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en cumul. La précision obtenue par la méthode de jaugeage par dilution ne permet pas de discuter de la différence observée pour des niveaux d'eau qui ne diffèrent que de 4 cm dans

la vasque entre ces deux dates. Il n'est donc pas possible d'extrapoler ces données pour évaluer le débit des émergences souterraines lorsque le niveau d'eau dans la vasque s'approche de 63 m NGF.

Le suivi piézométrique permet néanmoins, hors pompage, de mettre en évidence un débit d'étiage (relatif, car limité à la période d'observation 2014 - 2015) très soutenu et stabilisé, ce qui peut traduire une alimentation par l'Argens. Cette alimentation, si elle est vérifiée, a nécessairement lieu à une distance suffisante pour ne pas influencer la conductivité de la source des Avens, qui présente également une très grande stabilité (Illustration 98).

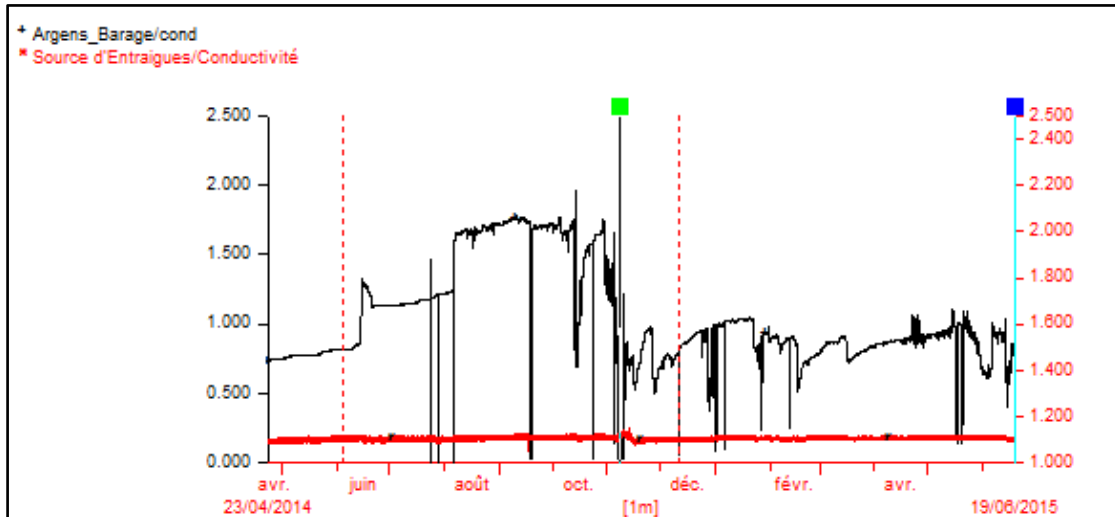


Illustration 98 - Comparaison des valeurs de conductivité des eaux de l'Argens et de la source des Avens.

c) Tracé de la portion de nappe alimentant le captage et des bassins-versants connexes

A l'affleurement, il est possible de délimiter la *Portion de Nappe qui Alimente les Captages* (PNAC, rapport BRGM RP-55332-FR) en reprenant les contours des réservoirs du Muschelkalk calcaire ou dolomitique et en se limitant au nord aux derniers affleurements en amont de Carcès (Illustration 99).

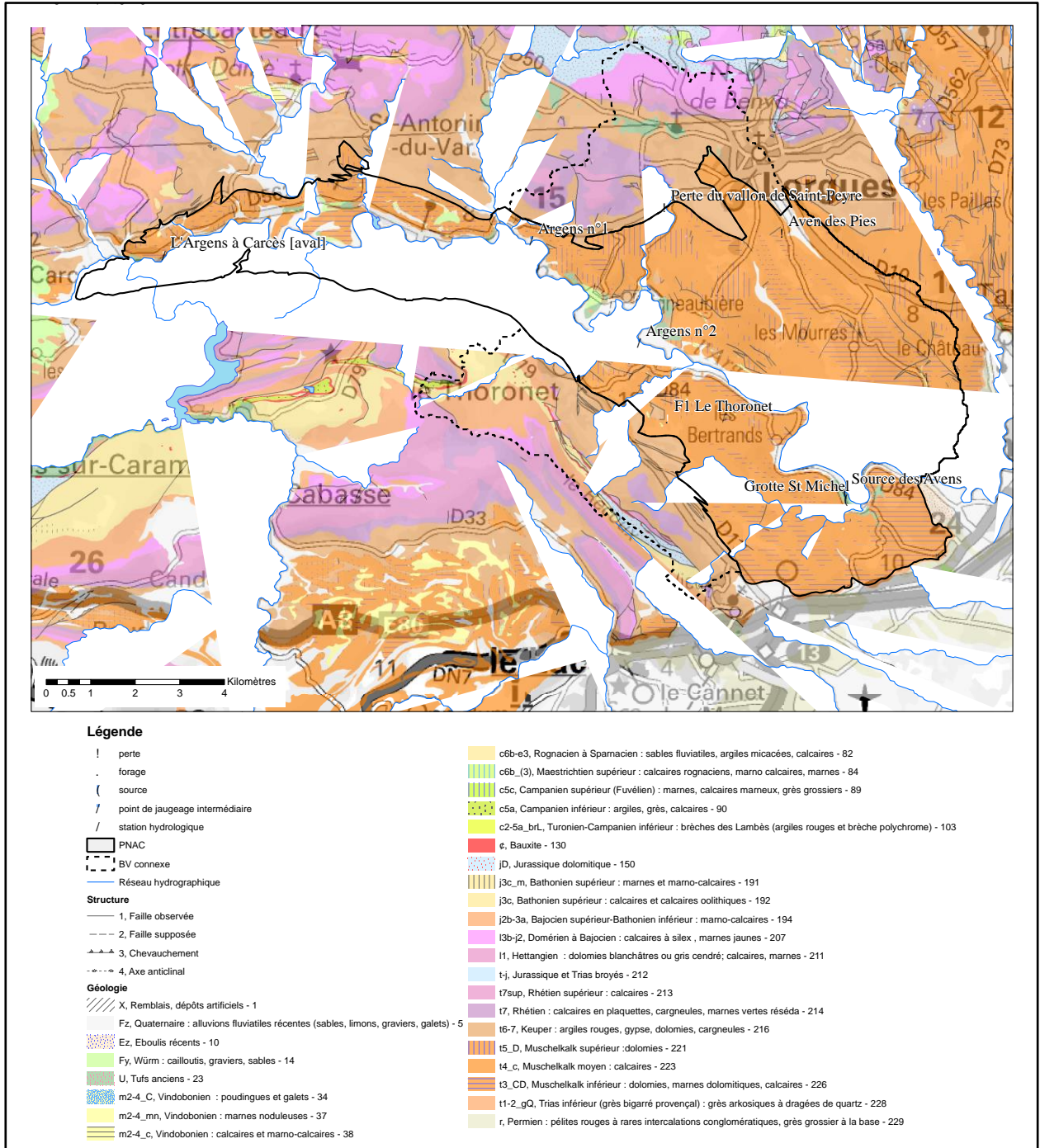


Illustration 99 - Tracé de la PNAc et contour des bassins-versants connexes du système karstique des sources d'Entraigues sur le fond géologique vectoriel 1/50 000 du BRGM et le fond IGN 1/250 000.

Selon la carte hydrogéologique du Var de 1980, cette zone d'environ 76 km² pourrait être drainée par l'Argens ou la source des Avens (Illustration 100).

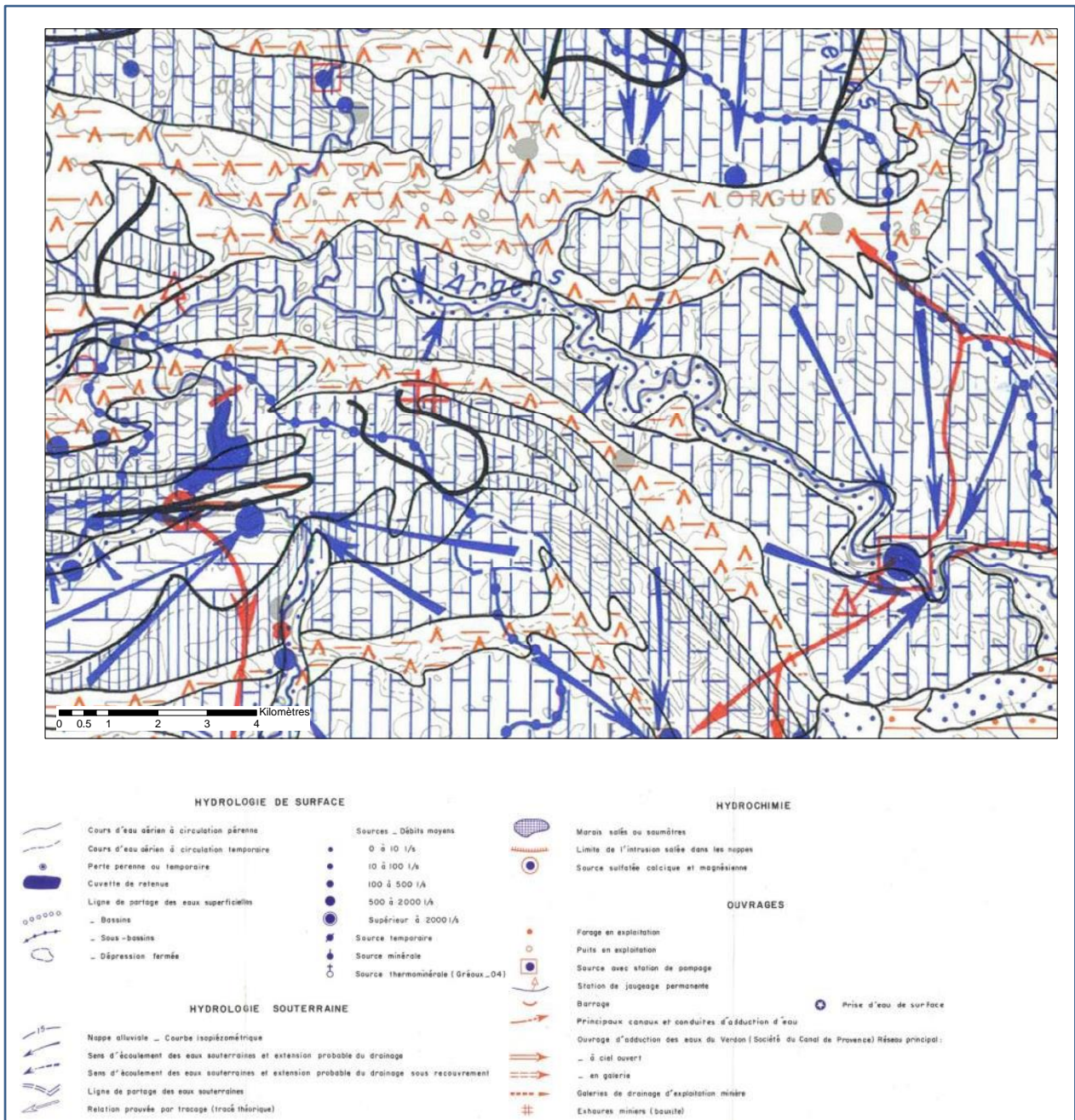


Illustration 100 - Extrait de la carte hydrogéologique du Var au 1/200 000 (1980)

En complément de la PNAC, il existe des cours d'eau qui drainent des bassins-versants connexes en rives droite et gauche de l'Argens. Les contours de ces bassins versants connexes sont également reportés sur l'illustration 99.

- En rive gauche, deux de ces bassins versants donnent naissance à des écoulements temporaires qui alimentent des pertes : perte du vallon de Saint-Peyre (reconnaissance terrain du 02/10/2014, ayant fait l'objet d'un traçage en 1986) et perte de l'aven des Pies (perte ayant fait l'objet d'un traçage en 1987).
- En rive droite, le réseau hydrographique est plus organisé, mais il existe néanmoins des thalwegs temporairement à sec, notamment dans le secteur du Thoronet, qui prennent naissance plus en amont par ruissellement sur des terrains liasiques et jurassiques.

Les bassins-versants associés à ces cours d'eau en amont de la PNAC constituent des bassins-versants connexes qui s'ajoutent à la PNAC pour constituer la zone d'étude où sera évaluée la vulnérabilité. Ils totalisent 39 km², portant la superficie de la zone d'étude à 115 km².

Il existe d'autres affluents de l'Argens plus en amont en rive gauche (vallon de Sargues, vallon de Saint-Jean, Ru de la Bresque) et en rive droite (le Bouillidoux, vallon Sainte Marguerite, le Caramy). Tout comme le bassin-versant de l'Argens en amont de la PNAC, les bassins-versants de ces cours d'eau n'ont pas été pris en compte dans la zone d'étude comme bassins connexes du fait de leur plus grand éloignement et du manque d'information relative à la présence de pertes au contact du Muschelkalk.

d) Bilan hydrogéologique de la ressource captée

La recharge annuelle de l'aquifère du Muschelkalk a été calculée à l'aide de l'outil ESPERE du BRGM. Les données journalières d'évapotranspiration potentielle, de température et de précipitations sont issues d'une pondération des données SAFRAN sur les mailles 8969 à 8972 et 9055 à 9058.

Les modèles utilisés à l'échelle annuelle (Guttman, Turc et Kessler) donnent une estimation de la pluie efficace moyenne sur la période 1959-2013 de 376 mm. En termes de bilan annuel, en considérant un débit naturel d'au moins 1 m³/s, soit 33,5 Mm³/an et des prélèvements de l'ordre de 3,5 Mm³/an (Rivages, 2013) et en supposant une absence de ruissellement à la surface de l'impluvium, il faut considérer un impluvium d'au moins 93 km².

Le fait qu'il existe une composante de ruissellement à la surface des calcaires du Muschelkalk, comme le démontre l'existence de cours d'eau et que le débit des sorties d'eau souterraine est sous-estimé (calcul s'appuyant sur le débit d'étiage des sources d'Entraigues sans prendre en compte d'autres sorties dans l'Argens) permet d'envisager une surface d'impluvium beaucoup plus grande, soit de plusieurs centaines de km².

La superficie de l'impluvium ayant été évaluée à l'aide de la géologie à l'affleurement à 115 km², ce résultat de bilan simplifié renforce l'idée qu'il existe une autre composante de recharge depuis des pertes de l'Argens, l'infiltration efficace des précipitations n'étant pas suffisante pour expliquer un tel débit à l'exutoire.

5.1.2. Analyse des relations surface/souterrain entre l'Argens et le Muschelkalk dans la zone d'étude

Une question essentielle pour mieux évaluer la vulnérabilité du champ captant à la pollution concerne la résurgence éventuelle d'eau issue de l'Argens à la source des Avens.

Sur la base d'arguments géochimiques et notamment la comparaison des suivis des chlorures en différents points du bassin et dans l'Argens pour différentes conditions de recharge (paragraphe 3.3), la partie amont de l'Argens pourrait contribuer à l'alimentation des aquifères du Muschelkalk. Cette hypothèse est renforcée par les calculs de bilans hydrogéologiques compte tenu des surfaces d'affleurement du réservoir du Muschelkalk. La comparaison des suivis de conductivité électrique ne permet pas d'identifier des transferts de masse rapide depuis l'Argens, aucune corrélation ne pouvant être établie. La zone d'alimentation de l'hydrosystème d'Entraigues par l'Argens est donc nécessairement relativement éloignée.

Au sein de la PNAC, la présence de tufs dans la vallée de l'Argens est également un indice permettant de supposer qu'il existe une connexion hydraulique entre le cours d'eau et l'aquifère. Ces tufs mettent en évidence des zones d'exhaure actuelles (site d'Entraigues) ou

anciennes d'eau souterraine. En complément, l'analyse du profil en long de la rivière, des faciès et des structures géologiques affleurantes a permis d'encadrer au niveau des méandres de la Vignaubière un secteur où des échanges surface/souterrain pourraient préférentiellement avoir lieu.

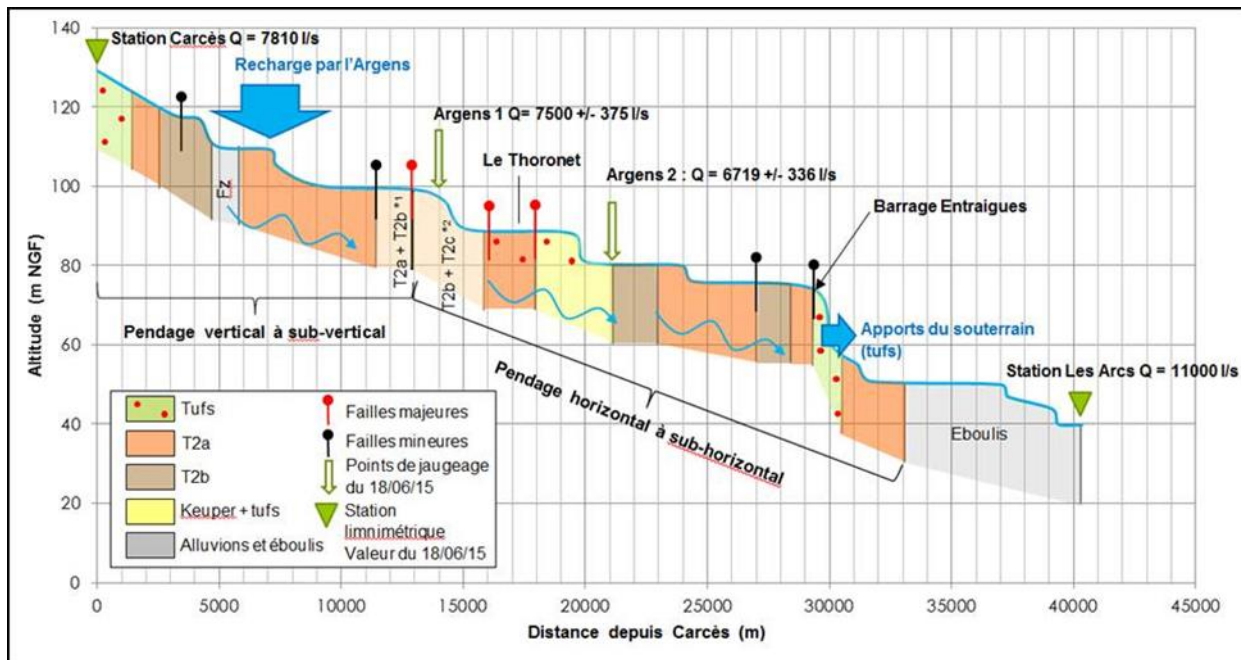


Illustration 101 - Profil en long de l'Argens en aval de Carcès mettant en évidence les échanges surface/souterrain supposés avec le Muschelkalk et la géologie à l'affleurement.

Le 18/06/2015, un jaugeage différentiel encadrant ce secteur entre les points Argens 1 et 2 a mis en évidence un débit de perte de l'ordre de 800 l/s, pour un débit journalier de 7810 l/s mesuré à la station de Carcès. Si la valeur du débit de perte est discutable compte tenu de l'incertitude d'un jaugeage différentiel, celle-ci est suffisamment élevée pour attester de la présence de pertes de plusieurs dizaines à centaines de litres par seconde. Ainsi, dans les conditions de l'expérience (période de niveaux piézométriques relativement bas), l'Argens contribue à l'alimentation de l'aquifère du Muschelkalk par le biais de pertes localisées dans les méandres de la Vignaubière.

Cette alimentation est mise en évidence bien en amont du site, à environ 6 km du champ captant par le biais d'infiltration à travers les alluvions ou des dépôts de tuf reposant sur les calcaires. Ce lien avec l'Argens pourrait expliquer la stabilité de l'hydrodynamisme de ce système karstique.

5.1.3. Analyse des gaz anthropiques dissous (CFC/SF6)

a) Justification et présentation de la méthode

La notion de vulnérabilité d'une eau souterraine à la pollution est liée à la notion de temps de séjour de l'eau depuis son infiltration : une circulation rapide pourra véhiculer rapidement une pollution accidentelle avec peu de dilution.

Un essai de datation des eaux souterraines issue du champ captant d'Entraigues et du forage AEP du Thoronet a ainsi été mené pour appréhender leur circulation. Les traceurs du temps de séjour choisis sont les CFC12, 113 et 11 ainsi que le SF6. Ces gaz ont été introduits dans

l'atmosphère depuis les années 1950 et la comparaison des teneurs en gaz dissous dans l'eau par rapport aux teneurs atmosphériques connues permet de dater l'eau, d'identifier des mélanges et de mieux comprendre le transfert de l'eau depuis le toit de la nappe. Ceci suppose qu'il n'existe aucun apport (aucune contamination locale en CFC/SF6 sur le bassin d'alimentation), ni aucune dégradation de ces composés lors du transfert, ces gaz étant utilisés comme traceur parfait du temps de séjour. Comme les eaux souterraines résultent d'un mélange d'eau suivant un ensemble de lignes de courant, il est le plus souvent nécessaire de raisonner en distribution des temps de séjour pour caractériser le temps moyen de séjour de l'eau.

Le croisement des résultats issus de plusieurs gaz permet de décrire ces distributions en s'appuyant sur des modèles empiriques relativement simples, dont le modèle piston, le modèle exponentiel et le mélange binaire (Maloszewski et Zuber, 1982).

b) Prélèvements

Les prélèvements ont été réalisés le 19/06/2015 sur 6 points d'eau souterraine répartis sur le bassin :

- Captage AEP du Thoronet
- Les forages F1, F5 et F6 du SIAE
- Le forage V1 de Vidauban
- La source des Avens

Les analyses ont été confiées au laboratoire GéoSciences Rennes.

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux analysées permettent d'écartier l'hypothèse d'un milieu réducteur qui dégraderait les CFC. D'autre part, l'analyse des gaz rares (Ne et Ar) a également été réalisée pour mieux contraindre l'équilibre eau/gaz et ainsi :

- prendre en compte l'excès de pression (« excès d'air ») lors de la mise en solution du gaz, et ainsi corriger cet effet dans le calcul d'équilibre avec l'atmosphère (AIEA, 2006).
- calculer la température de mise en équilibre air/eau, soit la température de recharge.

L'excès d'air obtenu pour ces eaux varie de 0 à 2 mL/L, ce qui est cohérent avec la littérature pour ce type d'aquifère (Wilson et Mc Neill, 1997). Les températures de recharge calculées fluctuent autour de 11 °C, ce qui est cohérent avec les données climatiques de ce secteur. Les résultats détaillés sont donnés en annexe 9 de ce rapport.

c) Résultats et interprétations

L'interprétation des résultats est réalisée graphiquement en reportant les valeurs obtenues dans une atmosphère en équilibre avec l'eau échantillonnée sur des graphiques binaires. Ces graphiques représentent les évolutions atmosphériques conjointes des deux gaz sélectionnés, ainsi que les évolutions attendues dans le cas d'un transfert exponentiel de ces gaz dans l'aquifère. La position du point obtenu par rapport à ces courbes permet d'identifier le modèle le plus adapté (piston, mélange binaire ou exponentiel) ainsi que le temps moyen de séjour associé.

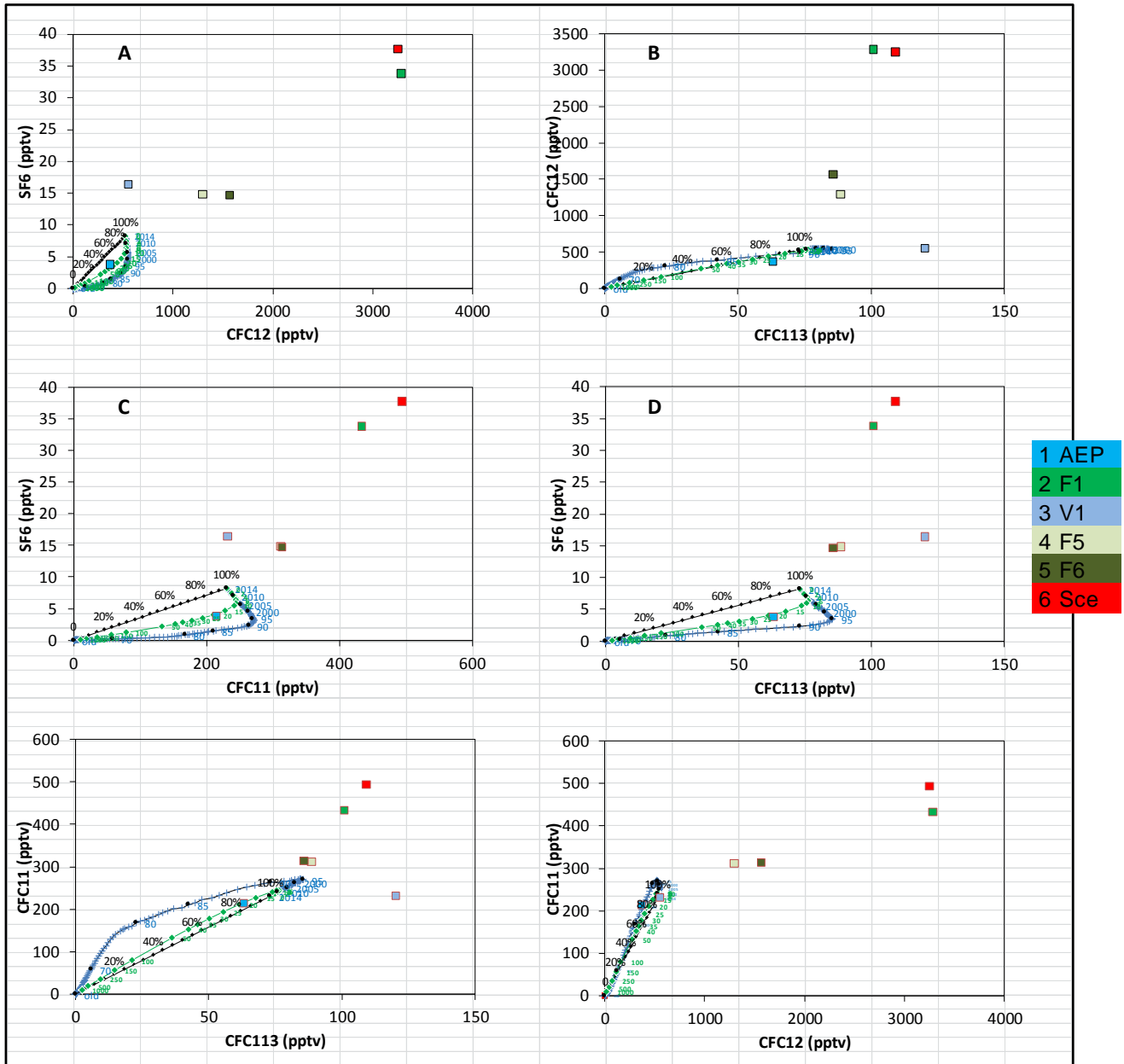


Illustration 102 – Graphiques SF6 = f(CFC) et CFCXXX = f(CFCYYY) concernant les point prélevés en 2015.

Les résultats au captage AEP du Thoronet (point 1 en bleu dans l'illustration 102) sont cohérents pour tous les gaz analysés et permettent de proposer une circulation des eaux jusqu'au captage selon un modèle exponentiel, avec un temps moyen de séjour des eaux de l'ordre de 25 ans +/- 5 ans, soit un renouvellement d'environ 5% de l'eau souterraine tous les ans. Une pollution locale des eaux auraient ici tendance à rajeunir artificiellement ce temps moyen de séjour. Cet âge relativement élevé n'exclut pas des arrivées plus rapides d'eau selon des lignes de courant préférentiel, notamment depuis l'Argens pour des conditions hydrogéologiques de basses eaux, afin d'expliquer les évolutions en chlorures (paragraphe 3.3).

En revanche, les valeurs obtenues sur le site d'Entraigues (forages et source des Avens) ne peuvent être expliquées par un équilibre avec l'atmosphère. En effet, quel que soit le gaz

analysé, la composition calculée du gaz en équilibre avec l'eau prélevée présente des valeurs qui n'ont jamais été atteintes dans l'atmosphère. Toutes les eaux issues du champ captant d'Entraigues présentent donc une contamination en CFC et en SF6.

Il est intéressant de noter que cette contamination concerne la source des Avens et les eaux du forage F1 en premier lieu, et dans une moindre mesure les ouvrages F5/F6 qui présentent une signature identique, puis l'ouvrage V1 qui se distingue des autres points par une contamination qui concerne relativement plus le SF6 et le CFC113.

La contamination semble plus élevée en surface (F1, source des Avens) par rapport aux eaux des captages plus profonds. Cependant, le fait que l'anomalie soit plus forte à la source des Avens qu'au forage F1 captant le tuf permet de penser qu'une contamination des tufs n'est pas à l'origine de ces anomalies, et qu'il faut rechercher l'origine de cette contamination au niveau du réseau karstique développé dans le Muschelkalk. Ces eaux karstiques envahissent le tuf très transmissif (paragraphe 4.3.5) et permettent ainsi d'expliquer les valeurs observées en F1. Les valeurs observées dans les autres ouvrages qui captent le Muschelkalk (F5, F6 et V1) montrent une influence des eaux issues du drain (il s'agit de l'eau de la source des Avens), influence qui s'atténue à mesure que l'on s'écarte du drain principal, la transmissivité des calcaires du Muschelkalk étant plus faible (paragraphe 4.3.5).

Le fait que les échanges soient relativement faibles entre le drain karstique du Muschelkalk qui alimente la source des Avens et le réservoir calcaire capté par les forages profonds est cohérent avec l'absence d'interférence entre ces deux milieux lors du pompage dans la source des Avens en 2014. Il n'y a pas de connexion hydraulique préférentielle entre les points de prélèvements des ouvrages profonds et la source des Avens.

Il existe donc une contamination en CFC 11, 12 113 et en SF6, probablement liée à un site de dépôt de déchets contenant des liquides réfrigérants, des isolants, des aérosols, etc. sur l'impluvium, entraînant une contamination dans le réseau de conduits karstiques alimentant la source des Avens. Il serait intéressant de préciser l'origine de cette contamination en réalisant une nouvelle campagne incluant des points de prélèvements dans l'Argens, dans les forages privés recoupant le Muschelkalk et au niveau des pertes identifiées en rive gauche de l'Argens (Vallon de Saint-Peyre et Aven des Pies).

Cette contamination ne permet pas de déterminer le temps moyen de séjour des eaux captées sur le site d'Entraigues, qui apparaissent suffisamment jeunes pour être influencées par une contamination en CFC et SF6 d'origine anthropique sur l'impluvium.

L'analyse de la vulnérabilité de la ressource en eau couplée à la connaissance des pressions anthropiques sur la zone d'étude va permettre de mieux cibler les secteurs à examiner plus en détail pour comprendre l'origine de cette pollution.

5.1.4. Présentation de la méthode PaPRIKa

La méthode PaPRIKa est décrite dans le rapport BRGM-ONEMA de 2009 (Dörfliger et Plagnes, 2009). Cette méthode a été spécifiquement développée pour l'établissement de cartes de vulnérabilité intrinsèque d'aquifères karstiques à partir de la géologie, de la géomorphologie et du fonctionnement hydrogéologique. Cette méthode constitue la dernière mise à jour des méthodes multicritères à index avec système de pondération dédiée au système karstique. Elle se distingue des méthodes précédentes notamment par la possibilité de décliner la carte de vulnérabilité de la ressource en carte de vulnérabilité du captage à partir des données de vitesses de circulations souterraines issues de l'interprétation des traçages, lorsque leur nombre est suffisant pour proposer des isochrones.

L'acronyme PaPRIKa signifie « Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification ». Les termes Protection, Réservoir, Infiltration et Karstification correspondent à 4 critères P, R, I et Ka qui doivent être combinés par une équation de pondération pour obtenir la carte de Vulnérabilité globale. Ces critères décrivent la structure et le fonctionnement du système karstique ; ils sont définis comme suit (Dorfliger et Plagnes, 2009) :

- *P pour couverture Protectrice : Correspond à la structure la plus protectrice résultant de la combinaison du critère Sol, des caractéristiques de la zone non saturée (lithologie, épaisseur, fracturation) et le fonctionnement épikarstique. C'est sur ce critère que l'analyse géomorphologique doit guider l'interprétation de l'hydrogéologue ;*
- *R pour nature du réservoir souterrain : Caractérise la potentialité de la roche à être karstifiée ;*
- *I pour la nature de l'infiltration : caractérise les conditions d'infiltration diffuse et ponctuelle à partir des pentes et de la cartographie des pertes, dolines et avens, ainsi que la distance aux cours d'eau alimentant la perte. C'est une modification de ce critère à partir de la connaissance des données de traçages qui permet de passer de la carte de vulnérabilité de la ressource à la carte de la vulnérabilité du captage ;*
- *Ka pour degré de karstification et de fonctionnement du système karstique : tient compte du degré d'organisation des écoulements et souligne la position des axes de drainage connus à partir des études hydrogéologiques et/ ou reconnus par exploration directe.*

La vulnérabilité intrinsèque globale Vg de la ressource est alors définie par un système de pondération de ces cartes, qui distingue les secteurs non-karstiques qui participent à l'alimentation du système.

La méthode PaPRIKa nécessite de réaliser successivement les six étapes suivantes :

1. la séparation du bassin d'alimentation en zones karstiques et non-karstiques, dans le cas de systèmes binaires et des secteurs alimentant les pertes au sein de la partie karstique ;
2. la cartographie de chaque critère et sous critère à l'aide d'un logiciel SIG ;
3. la discrétisation des cartes en fonction de la taille des objets à cartographier ;
4. le calcul de l'indice de vulnérabilité global (Vg) en chaque maille ;
5. la reclassification de Vg en cinq classes équidistantes de vulnérabilité ;
6. la vérification de la carte de vulnérabilité afin de déterminer s'il n'y a pas d'incohérence entre les données de terrain et les cartes de chaque critère.

5.2. DEFINITION DE LA VULNERABILITE INTRINSEQUE : APPLICATION DE LA METHODE PAPRIKA

5.2.1. Données sources

Les sources de données suivantes ont été utilisées :

- *versions numériques vectorielles des cartes géologiques ;*
- *le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN à la résolution de 25m ;*
- *la cartographie numérique selon une résolution de 25m de l'Indice de Développement des Réseaux (IDPR, Illustration 103)*
- *les données hydrologiques de la BDCarthage.*

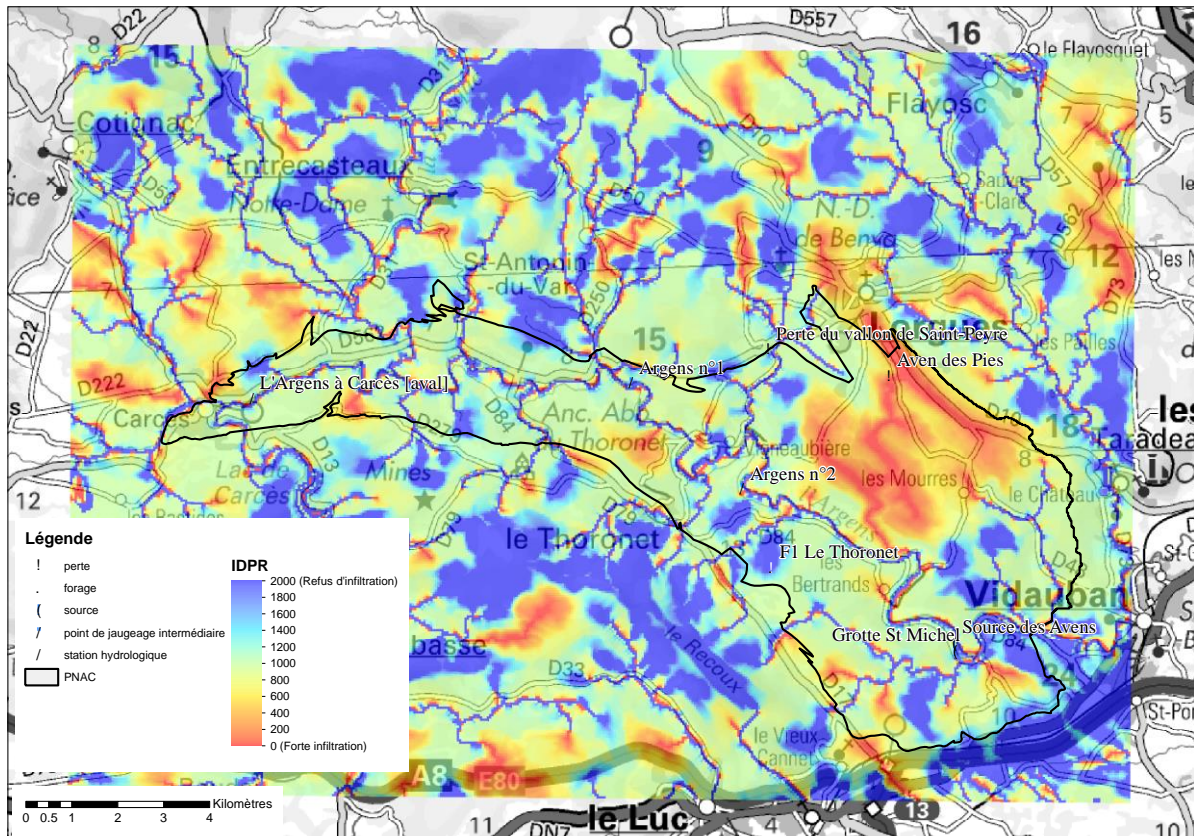


Illustration 103 - Carte de l'IDPR sur la zone d'étude

Il n'existe pas à l'échelle de la zone d'étude de cartographie des sols. Les propriétés physiques des sols ont donc été déduites de la carte géologique, par interprétation des affleurements de formations superficielles et de la lithologie des roches.

5.2.2. Critère P

Le critère P donne des informations sur la protection apportée par la couverture. Ce critère résulte de la combinaison la plus protectrice des quatre sous-critères relatifs à l'état de surface, l'épikarst, la nature du sol et la zone non-saturée.

a) Sous-critère état de surface (ES)

Le sous-critère état de surface (ES) doit être renseigné sur les secteurs drainés par des pertes d'écoulement de surface, que celles-ci drainent des eaux ayant ruisselées sur le réservoir karstique ou en amont de celui-ci (cas des bassins-versants connexes).

La présence de dépôts d'alluvions récentes (Fz) dans les dépressions et les fonds de vallées détermine un secteur combinant plusieurs vallées sèches en rive gauche de l'Argens, notamment au niveau du lieu-dit « Le Plan », drainé par l'aven des Pies. Cette surface de 10,2 km² déterminée par le MNT de l'IGN à 25 m est considérée comme un bassin-versant de perte pour la cartographie du sous-critère état de surface, même si la localisation de ces pertes probablement réparties reste inconnue. Ce caractère infiltrant se retrouve sur les faibles valeurs d'indice IDPR attribuées à ce secteur (Illustration 103)

L'indice attribué pour le sous-critère ES est directement issu de l'interprétation en termes de perméabilité des faciès géologiques donnés par la carte géologique à l'affleurement : La correspondance entre la formation géologique et le sous-critère ES est donnée dans le tableau de l'illustration 104. La méthode retenue est identique pour les bassins-versants connexes situés en rive gauche et droite de l'Argens.

La méthode PaPRIKa recommande également d'attribuer un indice de 4 le long des cours d'eau situés en amont de ces pertes, ainsi que sur une zone tampon de 50 m de part et d'autre du lit de ces cours d'eau. Le tracé retenu pour les cours d'eau alimentant les pertes provient de la BD Carthage.

La surface cartographiée pour le sous-critère ES totalise 39 km² (Illustration 104 et Illustration 105). Sur ces surfaces, le sous-critère ES est le seul sous-critère à renseigner pour la cartographie du critère P.

DESCRIPTION GEOLOGIQUE	km ²	%/BV	NOTATION	ES
Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies, cargneules	13.5	35%	t6-7	2
Muschelkalk moyen : calcaires	8.2	21%	t4_c	2
Rhétien : calcaires en plaquettes, cargneules, marnes vertes réséda	3.4	9%	t7	3
Bajocien supérieur-Bathonien inférieur : marno-calcaires	2.9	8%	j2b-3a	4
Domérien à Bajocien : calcaires à silex , marnes jaunes	2.5	6%	l3b-j2	3
Hettangien : dolomies blanchâtres ou gris cendré; calcaires, marnes	2.1	5%	l1	2
Bathonien supérieur : calcaires et calcaires oolithiques	2.0	5%	j3c	1
Muschelkalk inférieur : dolomies, marnes dolomitiques, calcaires	1.2	3%	t3_CD	3
Muschelkalk supérieur :dolomies	0.8	2%	t5_D	2
Jurassique dolomitique	0.7	2%	jD	1
Quaternaire : alluvions fluviales récentes (sables, limons, graviers, galets)	0.6	1%	Fz	2
Tufs anciens	0.4	1%	U	1
Bauxite	0.2	1%	c	1
Rhétien supérieur : calcaires	0.13	0.3%	t7sup	2
Campanien inférieur : argiles, grès, calcaires	0.07	0.2%	c5a	2
Turonien-Campanien inférieur : brèches des Lambès (argiles rouges et brèche polychrome)	0.03	0.1%	c2-5a_brL	2
Campanien supérieur (Fuvélien) : marnes, calcaires marneux, grès grossiers	0.01	0.03%	c5c	3
Jurassique et Trias broyés	0.01	0.02%	t-j	1
Total	39	100%		

Illustration 104 - Tableau de correspondance pour la détermination du sous-critère ES (état de surface) à partir de la géologie pour les bassins-versants des pertes

b) Sous-critère épikarst (E)

Dans la méthode PaPRIKa, le sous-critère épikarst (E) permet de prendre en compte la protection supplémentaire apportée par un aquifère épikarstique vis-à-vis d'une pollution de l'aquifère karstique sous-jacent.

Concernant le bassin d'alimentation des sources d'Entraigues, il n'existe pas de niveau aquifère épikarstique reconnu au sein des calcaires du Muschelkalk et toute la zone peut donc se voir attribuer la valeur 4. Il existe cependant des formations parfois épaisses de tufs anciens, comme au niveau de la source des Avens ou de la source de la grotte Saint-Michel, qui constituent localement des aquifères perchés plus ou moins connectés à l'aquifère du Muschelkalk sous-jacent. Par analogie avec un fonctionnement épikarstique, ces secteurs ont été cartographiés avec un indice de 3 pour le sous-critère E (Illustration 104 et Illustration 105).

c) Sous-critère Nature du Sol (S)

Dans la méthode PaPRIKa, le pouvoir protecteur du sol est fonction de sa perméabilité et de sa capacité à stocker l'eau et les polluants. En l'absence de données pédologiques et de cartographies détaillées des formations superficielles et d'informations sur l'épaisseur des sols, ce critère a été renseigné par l'interprétation de la carte géologique selon la correspondance donnée dans le tableau de l'illustration 107. Les vulnérabilités les plus importantes (4) sont attribuées aux formations alluviales supposées riches en sables et galets, et une vulnérabilité forte (3) est attribuée aux sols développés sur les calcaires du Muschelkalk (50% de la superficie), compte tenu des faibles épaisseurs de sol observées (Illustration 105).

d) Sous-critère Zone Non-Saturée (ZNS)

Le sous-critère ZNS s'appuie sur la lithologie et la fracturation pour déterminer la protection exercée par la ZNS sur le transit de polluant jusqu'au toit de la nappe. De même, la lithologie de la ZNS (L_ZNS) est directement issue de l'interprétation de la carte géologique (Illustration 107).

La valeur retenue pour le sous-critère L_ZNS est éventuellement incrémentée pour définir le sous-critère ZNS : L'épaisseur de la zone non-saturée est supposée faible à proximité de l'Argens et au fond du vallon de Saint-Peyre, ce qui tend à incrémenter (+1) à ce niveau la valeur retenue par l'analyse de la lithologie. Une zone tampon de 100 m de part et d'autre de l'Argens et du vallon de St-Peyre a été considérée. Une valeur de 4 est également retenue au niveau des failles, avec une zone tampon de 50 m autour de celles-ci.

e) Cartographie du critère P

Les cartes obtenues pour chaque sous-critère sont combinées pour ne retenir que le sous-critère le plus protecteur.

Ainsi, sur la PNAC, les secteurs qui apparaissent très vulnérables selon le critère P le sont nécessairement pour chacun des 4 sous-critères. Ces secteurs sont assez peu nombreux et se retrouvent surtout dans le méandre de la Vignaubière.

Les secteurs les plus vulnérables des bassins-versants connexes correspondent au lit des cours d'eau qui alimentent les pertes.

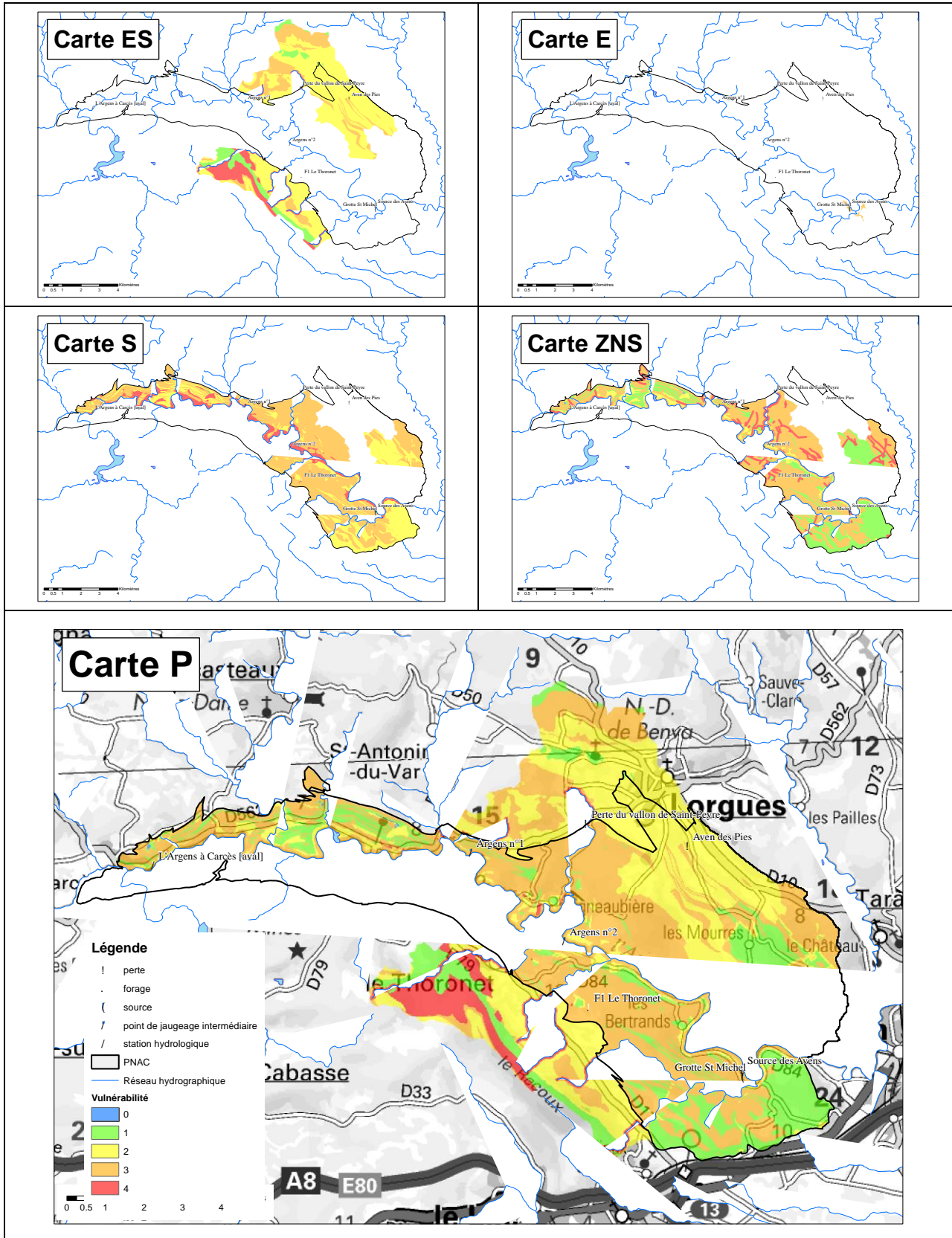


Illustration 105 - Carte du critère P à partir des facteurs ES, E, S et ZNS du système karstique des sources d'Entraigues.

5.2.3. Critère R

Ce critère caractérise la nature lithologique et la fracturation de la roche réservoir (Illustration 106).

Pour la nature lithologique, il s'agit ici non pas de caractériser la lithologie à l'affleurement mais celle qui constitue la zone noyée de l'aquifère. En l'absence de coupes géologiques détaillées, la lithologie de la roche réservoir est déduite de la géologie à l'affleurement, en attribuant aux formations superficielles et aux dépôts de tufs un indice de vulnérabilité qui est déduit des formations sous-jacentes, à choisir entre les calcaires (indice 3, Illustration 107) ou les dolomies (indice 2, Illustration 107) du Muschelkalk.

La correspondance avec la carte géologique n'est donc pas forcément unique, ce qui explique que deux valeurs différentes ont pu être retenues pour les tufs selon la lithologie des formations sous-jacentes.

La fracturation du réservoir doit être prise en compte en considérant son orientation par rapport au gradient hydraulique. Cette donnée reste inconnue et nécessiterait la réalisation d'une carte piézométrique à l'échelle de la PNAC. Les directions générales des axes de drainage sont néanmoins connues à grande échelle et correspondent à un drainage vers l'Argens et les sources d'Entraigues (Illustration 106). Conformément à la méthode PaPRIKa, un indice de vulnérabilité très fort (4) est attribué aux zones de failles affectant le réservoir lorsque la direction de l'accident est proche de celle du gradient hydraulique. Ce dernier est supposé à partir des axes d'écoulements probables vers les exutoires les plus proches (Argens ou sources d'Entraigues). Ces axes d'écoulements apparaissent notamment sur la carte hydrogéologique du Var (Illustration 106). Une zone tampon de 50 m de part et d'autres de chaque accident est utilisée pour affecter une valeur de vulnérabilité très forte autour des accidents sélectionnés (orientations SO-NE).

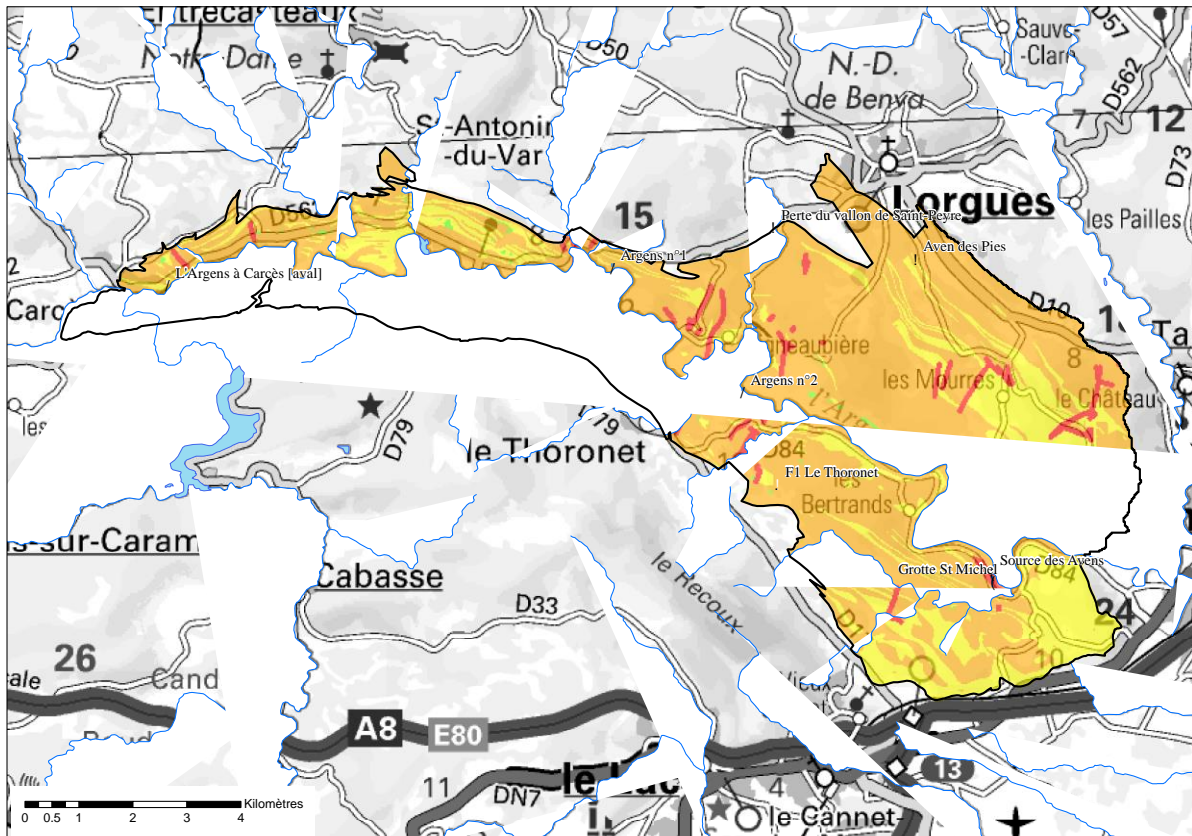


Illustration 106 - Carte du critère R du système karstique des sources d'Entraigues.

DESCRIPTION GEOLOGIQUE	km ²	%/PNAC	NOTATION	S	L_ZNS	E	R
Muschelkalk moyen : calcaires	37.9	50%	t4_c	3	3	4	3
Muschelkalk inférieur : dolomies, marnes dolomitiques, calcaires	19.0	25%	t3_CD	2	1	4	2
Quaternaire : alluvions fluviales récentes (sables, limons, graviers, galets)	8.1	11%	Fz	4	2	4	3
Muschelkalk supérieur : dolomies	6.5	9%	t5_D	3	3	4	3
Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies, cargneules	1.5	2%	t6-7	2	1	4	2
Tufs anciens	1.5	2%	U	3	3	3	3 ou 4
Würm : cailloutis, graviers, sables	0.6	0.7%	Fy	4	2	4	3
Vindobonien : poudingues et galets	0.4	0.5%	m2-4_C	4	3	4	1
Eboulis récents	0.1	0.2%	Ez	4	2	4	2
Vindobonien : marnes noduleuses	0.04	0.1%	m2-4_mn	1	0	4	1
Trias inférieur (grès bigarré provençal) : grès arkosiques à dragées de quartz	0.03	0.04%	t1-2_gQ	3	1	4	1
Jurassique dolomitique	0.002	0.003%	jD	4	3	4	3
Réseau hydrologique	0.86	1.1%	hydro	3	3	4	3
Total	76.5	100%					

Illustration 107 - Tableau de correspondance pour la détermination des sous-critères S (nature du Sol), E (Epikarst) et L_ZNS (Lithologie de la ZNS) du critère P, et du critère R (Réservoir) à partir de la géologie.

5.2.4. Critère I

Le critère I caractérise les conditions d'infiltration, en prenant en compte la dualité de l'infiltration à l'échelle du bassin d'alimentation via les pertes des cours d'eau des bassins versants connexes (Illustration 108).

Une première étape est directement issue d'un traitement du MNT pour obtenir une carte des pentes. La classification des pentes utilisée est celle proposée par le guide de la méthode PaPRIKa :

- $I=0$: pente >50%
- $I=1$: 15% < pente < 50%
- $I=2$: 5% < pente < 15%
- $I=3$: 0 < pente < 5%

En théorie, cette carte de pente est ensuite modifiée pour tenir compte des secteurs où le ruissellement est limité ($I=2$), voire presque inexistant au niveau de secteurs riches en dépressions karstiques ($I=3$) et des secteurs avec des manifestations de l'infiltration concentrée (pertes), en intégrant leur bassin d'alimentation ($I=4$).

Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de conserver les valeurs obtenues par les classes de pente dans les vallées sèches, car celles-ci étaient déjà au minimum classées en $I=2$ (Vallon de Saint-Peyre et Combe Rafine notamment).

La zone regroupant plusieurs dépressions karstiques, et qui englobe l'Aven des Pies correspond à l'ensemble des vallées sèches discutées pour le sous-critère ES du critère P et donnant lieu nécessairement à des pertes probablement diffuses à travers les dépôts alluviaux. Ce secteur a donc été cartographié avec un indice de vulnérabilité forte ($I=3$). Enfin, les bassins d'alimentation des pertes reconnues (perte du vallon de Saint-Peyre et perte de l'aven des Pies) ont été cartographiés en vulnérabilité très forte ($I=4$), ainsi que les secteurs correspondant à des cuvettes à partir du traitement MNT. Les autres bassins-versants connexes ont été cartographiés en vulnérabilité forte ($I=3$) en rive gauche de l'Argens, et en vulnérabilité moyenne ($I=2$) en rive droite de l'Argens.

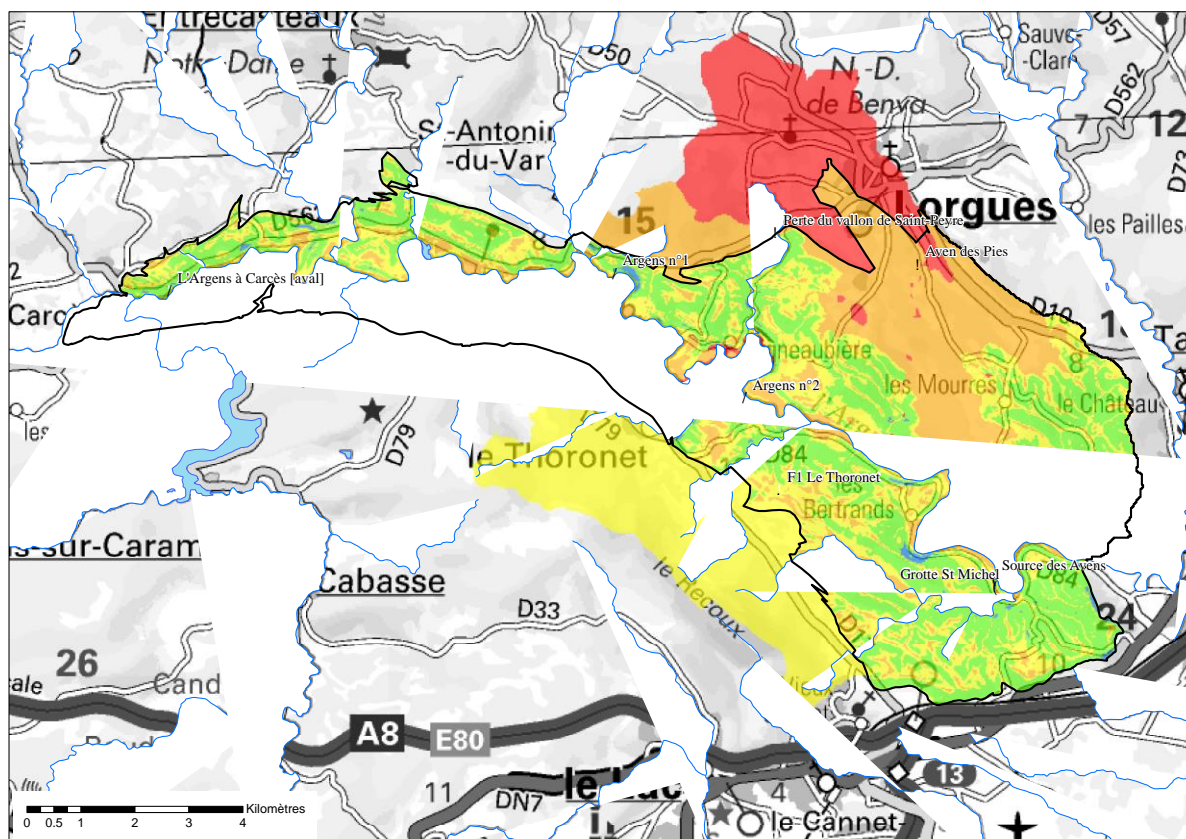


Illustration 108 - Carte du critère I du système karstique des sources d'Entraigues.

5.2.5. Critère Ka

Le critère Ka caractérise le degré de karstification du système karstique. Il est généralement globalisé à l'échelle du système, mais peut faire l'objet d'une spatialisation pour distinguer des secteurs ayant un fonctionnement karstique plus marqué.

Dans l'ensemble, malgré son caractère binaire, le degré de karstification du système karstique des sources d'Entraigues reste faible, ce qui se traduit également par un hydrodynamisme présentant aux exutoires un temps de régulation important (voir GARDENIA, paragraphe 3.2). Ceci permet de classer la majeure partie de la zone en vulnérabilité moyenne (3) vis-à-vis de ce critère.

Certains secteurs, notamment en rive gauche de l'Argens présentent des degrés de développement de la karstification plus importants. Ceci se traduit notamment par un abandon des circulations d'eau de surface au profit des circulations souterraines (pertes, vallées sèches etc.).

Il est donc proposé de s'appuyer sur l'Indice de Persistance des Réseaux (IDPR) pour mettre en valeur les secteurs de très forte infiltration, qui sont interprétés en terrain karstifiable comme un indicateur du degré de karstification. Une valeur seuil de 500, soit le quart de la valeur maximale de l'IDPR a été retenue pour identifier des secteurs de plus forte vulnérabilité (Ka=3) vis-à-vis du critère Ka. Ces secteurs de plus forte vulnérabilité se retrouvent principalement dans la zone des vallées sèches en rive gauche de l'Argens (Illustration 106 et Illustration 110), et représentent 13 km² sur la zone étudiée (Illustration 109).

	km ²	%	Ka
IDPR>500	13	16%	3
IDPR<500	64	84%	2
Total	76.5	100%	

Illustration 109 - Utilisation de l'IDPR pour la cartographie du critère Ka

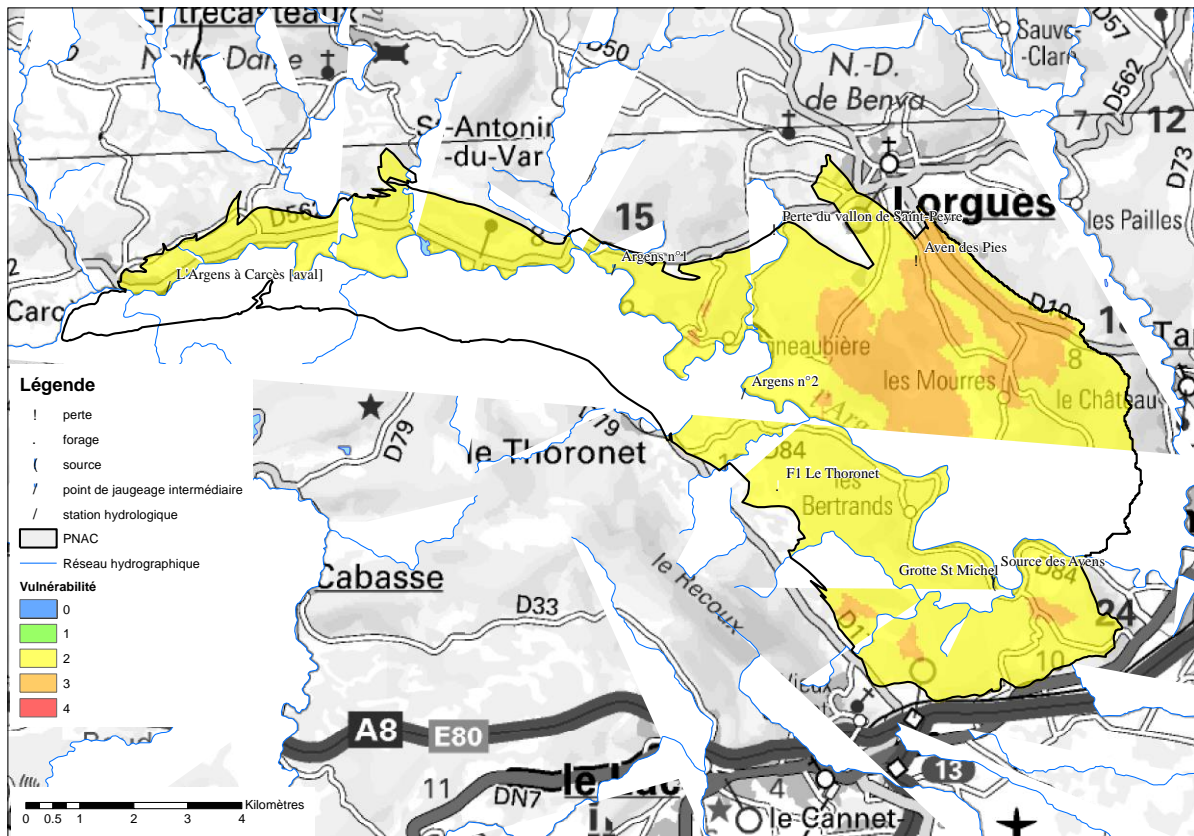


Illustration 110 - Carte du critère Ka du système karstique des sources d'Entraigues.

5.2.6. Vulnérabilité globale

Les cartes finales de vulnérabilité ont été réalisées à partir des six pondérations proposées par la méthode PaPRIKa. Pour les bassins d'alimentation des pertes, seuls les critères P et I sont utilisés à l'aide de l'équation suivante :

$$Vg = 0,5P + 0,5I$$

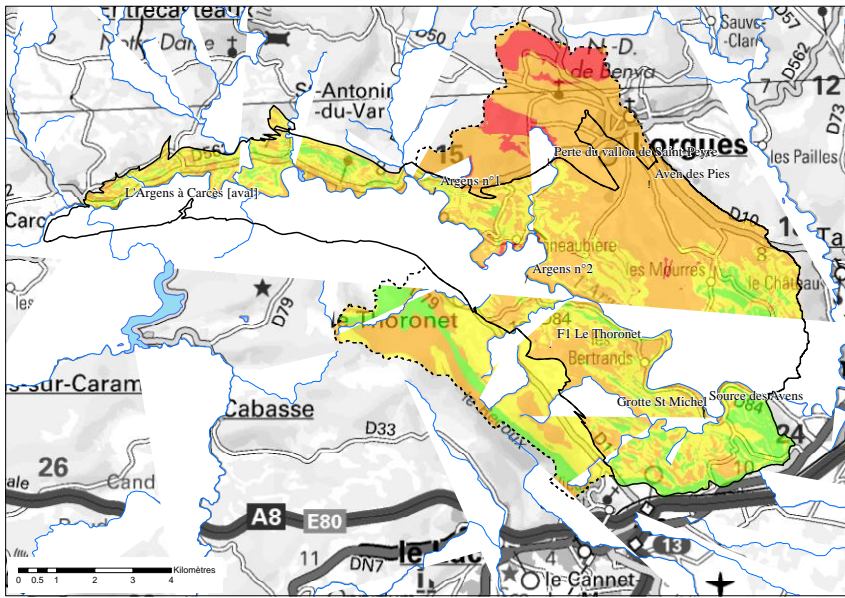
Les pondérations réalisées pour le reste de la zone d'étude sont les suivantes (Illustration 111).

Pondération	P	R	I	Ka
N°1	0,2	0,2	0,4	0,2
N°2	0,25	0,25	0,25	0,25
N°3	0,2	0,1	0,4	0,3
N°4	0,2	0,2	0,5	0,1
N°5	0,2	0,2	0,3	0,3
N°6	0,3	0,1	0,5	0,1

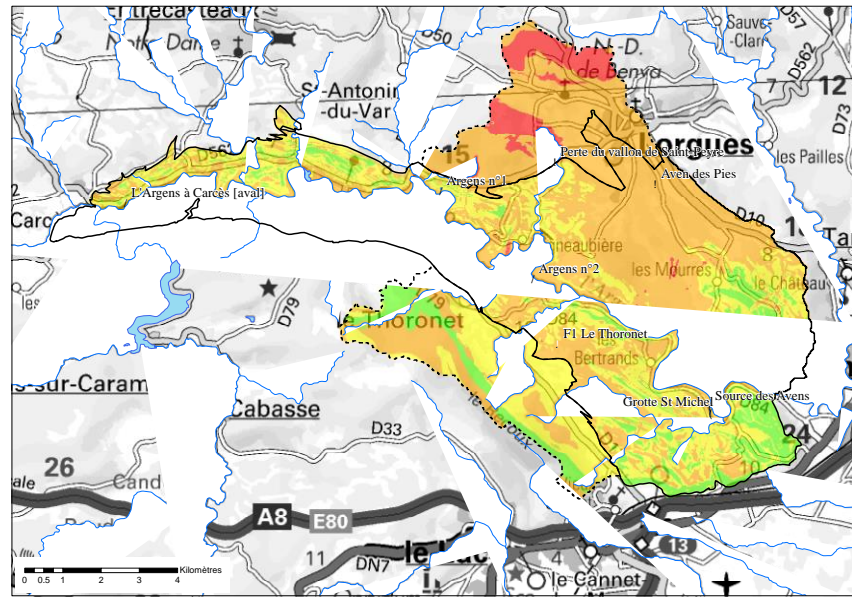
Illustration 111 - Différentes pondérations appliquées aux différents critères de la méthode PaPRIKa afin d'obtenir les cartes de vulnérabilité globale

Les résultats des 6 pondérations sont représentés sur la figure suivante (Illustration 112) afin de mettre en évidence leur variabilité. La carte de vulnérabilité qui a été retenue est la carte issue de la pondération n°4, car elle présente une meilleure hiérarchisation des secteurs vulnérables. Cette carte est représentée sur un support A3 en annexe 11 et permet de discuter de la vulnérabilité intrinsèque globale de la ressource en eau karstique à l'échelle de la zone d'étude.

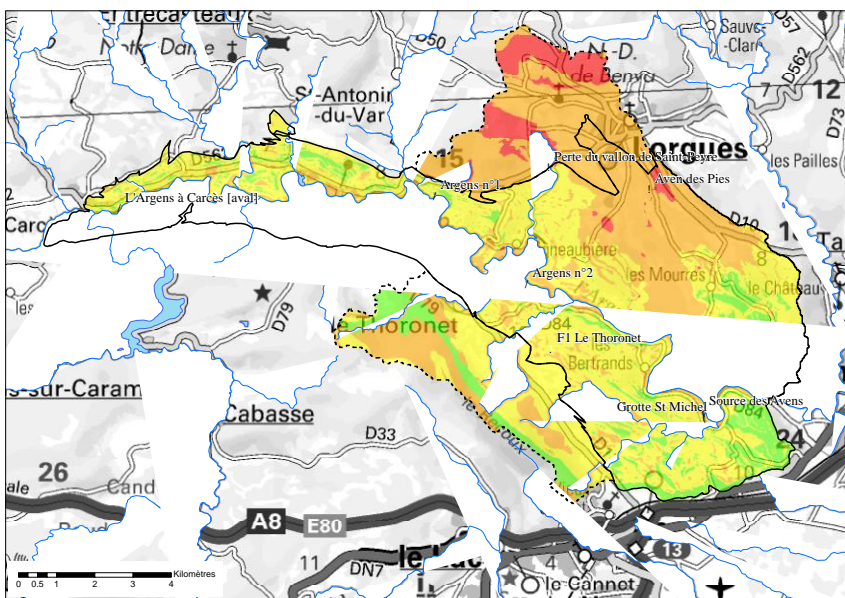
Pondération 1



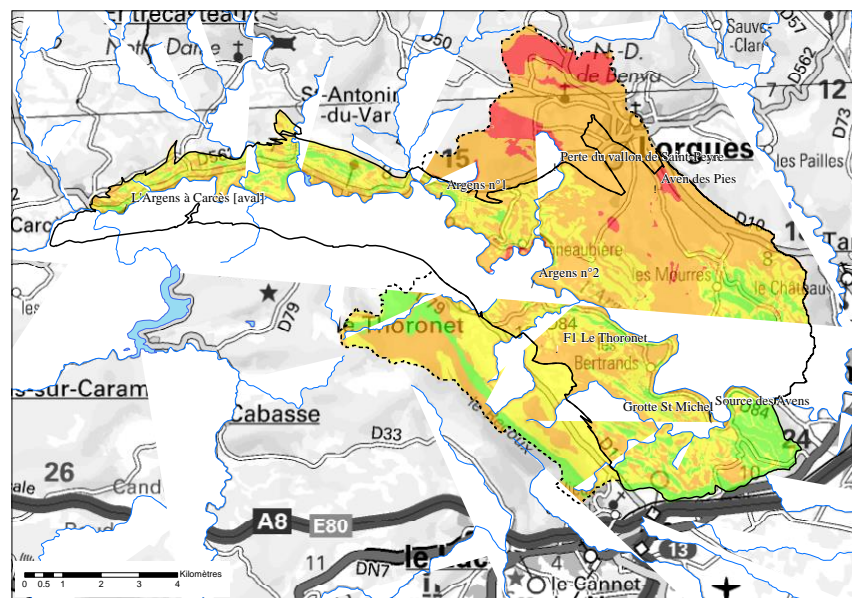
Pondération 2



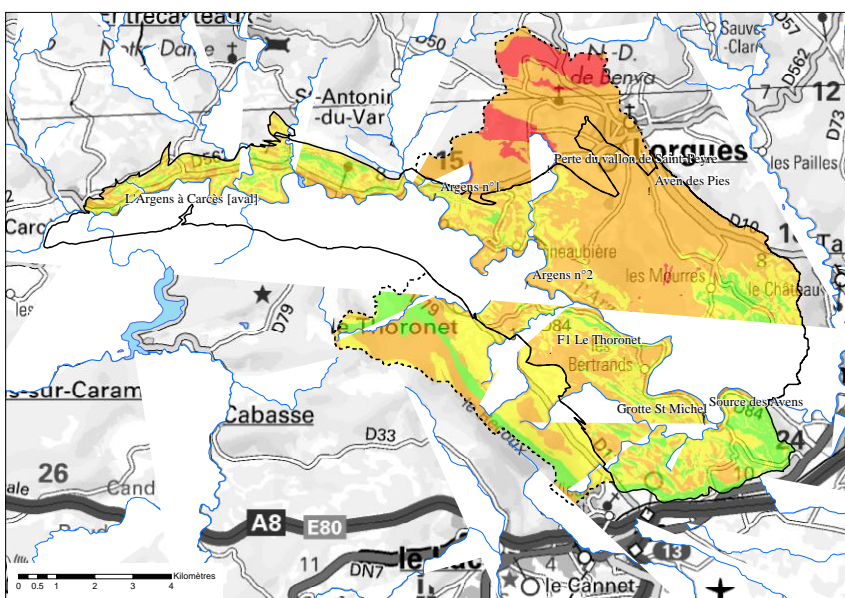
Pondération 3



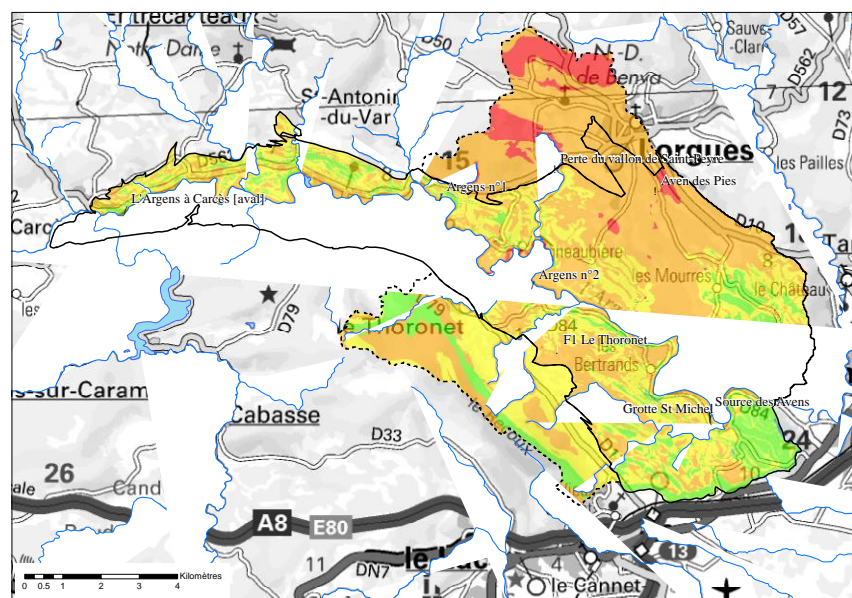
Pondération 4



Pondération 5



Pondération 6



Légende

- | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|-----------------------|--|---------------|---|
| ! | perte | ▭ | PNAC | | Vulnérabilité | 0 |
| . | forage | - - - | BV connexe | | 1 | |
| (| source | — | Réseau hydrographique | | 2 | |
| / | point de jaugeage intermédiaire | | | | 3 | |
| / | station hydrologique | | | | 4 | |

Illustration 112 - Influence du choix de la pondération sur la carte de vulnérabilité globale.

5.3. OCCUPATION DES SOLS ET PRESSIONS ANTHROPIQUES

A l'échelle de la zone d'étude (une carte au 1 / 50 000 tient sur un format A3), les données les plus pertinentes émanent de la base de données Corine Land Cover.

Sur la carte présentée en annexe 11 sont portées les données d'occupation du sol, avec un regroupement par typologie représentative (tableau de l'illustration 113).

code CLC niv 2	libellé	% surface	couleur
311- 312 - 313	Forêts	55,1	
231	Prairies	13,0	
242 - 243	Zones agricoles hétérogènes	10,7	
323 - 324	Milieus à végétation arbustive et/ou herbacée	9,7	
221 - 223	Cultures permanentes	6,2	
33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	2,5	
111 -112	Zones urbanisées et espaces verts non agricoles	1,5	
131	Mines, décharges et chantiers	1,0	
121	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	0,1	
211	Terres arables	0,1	
411	Zones humides intérieures	0,1	

Illustration 113 - Regroupement Corine Land Cover sur la zone d'étude.

La zone est en très grande majorité recouverte par de la forêt (domaine privé), la part de couverture végétale (forêt + prairie + zones peu ou pas cultivées) s'élève à près de 89 % de la surface totale. La forêt s'étend sur l'ensemble de la zone d'étude, les zones de prairies étant plutôt concentrées au nord de la zone d'étude (communes de Lorgues et de Taradeau), ainsi que dans la plaine où s'écoule l'Argens, en aval de Carcès.

Les zones agricoles (vignoble pour l'essentiel et un peu d'olivier) sont localisées pour l'essentiel sur les communes du Thoronet et du Cannet-des-Maures, au sud de la zone d'étude.

Les zones urbaines et industrielles sont concentrées autour des chefs lieu de commune (le Cannet, le Thoronet, Lorgues et surtout Carcès). Dans le lit de l'Argens, quelques carrières ont été ou sont encore exploitées.

A noter que la pointe nord de la zone d'étude est constituée d'espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation.

L'analyse de l'occupation du sol permet de dégager deux types de pressions (dans tous les cas, celles-ci sont modérées à l'heure actuelle) :

- des activités qui engendrent des risques de pollution diffuse si de bonnes pratiques ne sont pas appliquées. C'est le cas des activités agricoles, notamment quand celles-ci nécessitent l'emploi d'intrants azotés et phosphorés. Dans le cas d'étude la très grande majorité de l'activité agricole est liée au vignoble, qui ne nécessite qu'un faible emploi d'engrais. Il n'y a ni pratique de cultures intensives, ni d'élevage de grandes dimensions. Les risques d'exportations de matières azotées sont donc limités. En revanche, l'emploi de produits phytosanitaires (simazine notamment) est fréquent en viticulture, le risque d'exportation de ce type de produits existe donc. Les prairies, qui occupent la plaine de l'Argens en amont, si

elles ne sont pas occupées par des troupeaux ne constituent pas un secteur potentiellement polluant.

- Des activités qui engendrent des risques de pollution diffuse ou ponctuelle, mais chronique. C'est le cas des activités industrielles (ou artisanales, voire commerciales), en particulier dans les secteurs où sont rejetées des eaux pluviales ou usées, dans le milieu naturel. Les zones d'activités commerciales, artisanales ou industrielles devront donc faire l'objet d'une attention particulière, au moins pour ce qui concerne la nature et le devenir des rejets et effluents qu'elles émettent. Dans le secteur d'étude, une attention sera ainsi portée aux zones nord et sud-ouest (secteurs urbains de Lorgues, du Cagnet-des-Maures et du Thoronet) ainsi qu'à sa point occidentale (Carcès). Des anciens sites recensés dans la base nationale BASIAS ont été recensés et portés sur la carte de l'annexe 10, dans tous les secteurs urbanisés. Le cas de la station d'épuration de Lorgues, qui a rejeté ses eaux partiellement traitées à proximité immédiate de l'aven des Pies en est un exemple (la nouvelle station, mise en service en 2013, évacue les eaux traitées vers le Réal Calamar).
- Des activités, très diverses, susceptibles d'engendrer des pollutions ponctuelles mais pas forcément chroniques (trafic routier, activités ludiques ou touristiques, activités de gestion et d'entretien de la forêt)... pour ces activités, il ne peut être dressé de sectorisation géographique, mais une série de préconisations peut être proposée. Il faut que ces préconisations puissent être reprises dans les documents d'urbanisme pour qu'elles acquièrent une portée réglementaire.

En superposant les cartes de vulnérabilité intrinsèque et d'occupation des sols, on peut ainsi dégager les zones de risque *a priori* (approche qualitative) de l'illustration 114.

V \ P	très faible	faible	moyenne	forte	très forte
très faible	pas de risque	peu de risque	peu de risque	peu de risque	peu de risque
faible	pas de risque	peu de risque	peu de risque	peu de risque	risque moyen
moyenne	pas de risque	peu de risque	risque moyen	risque moyen	risque fort
forte	peu de risque	peu de risque	risque moyen	risque fort	risque très fort
très forte	peu de risque	peu de risque	risque fort	risque très fort	risque très fort

Illustration 114 - Tableau des risques fonction des valeurs de vulnérabilité (V) et de pressions (P).

Il s'agit avant tout de risque de contamination chronique de la ressource. A cela il faut ajouter les points d'entrée (pertes, cavités) de la zone d'étude, qui constituent des endroits où le risque de pollution ponctuelle est élevé.

Les cartes de l'illustration 115 et de l'illustration 116 montrent respectivement la comparaison des deux cartes (vulnérabilité et occupation du sol), et de la carte des risques de pollution qui découle de la superposition de ces deux cartes sur la base du tableau de l'illustration 114.

Cette dernière carte ne doit pas se lire comme le risque de pollution de la source des Avens, mais comme le risque de contamination des eaux souterraines en tout point du secteur d'étude, en fonction de la vulnérabilité des terrains sous-jacents d'une part et de la pression anthropique d'autre part. La contamination de la source dépendra de beaucoup de facteurs (la distance d'entrée de la contamination, de la nature et de la quantité de polluants introduits et de leur rémanence dans le milieu souterrain...).

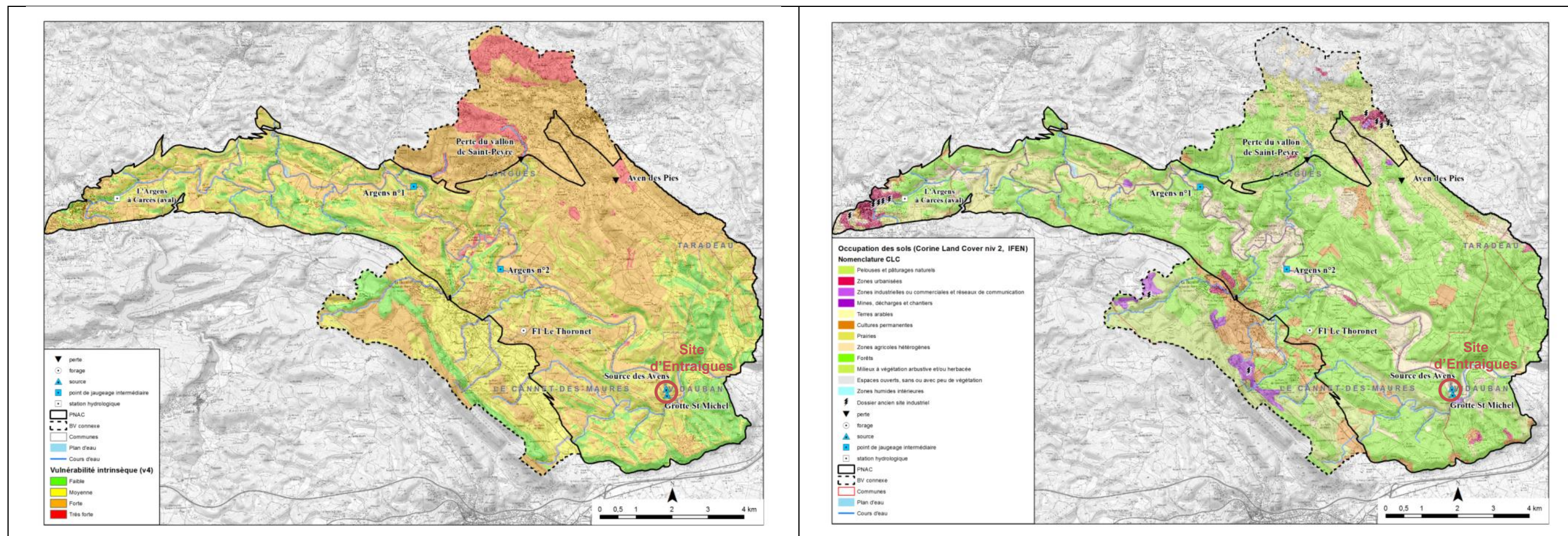


Illustration 115 - Comparaison entre les cartes de vulnérabilité intrinsèque (à gauche) et d'occupation du sol dans la zone d'étude.

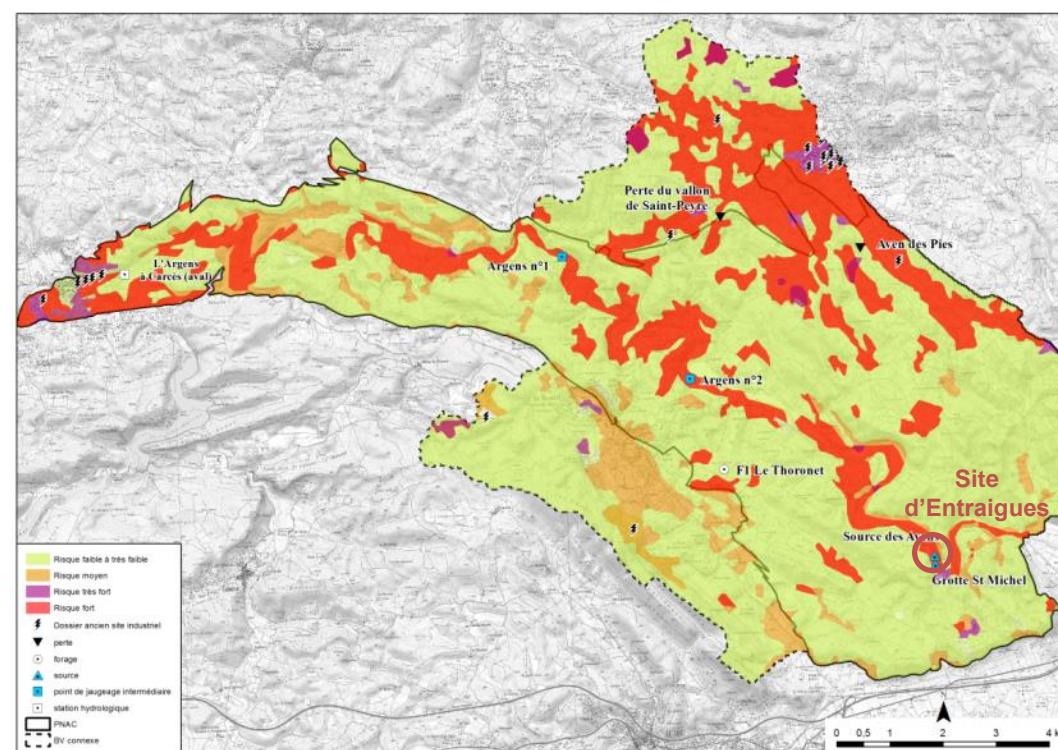


Illustration 116 - Carte des risques, évalués en comparant la vulnérabilité intrinsèque et les pressions anthropiques.

Il a été vu (paragraphe 4.3.5) que la fraction de bassin versant directement concernée par le pompage d'essai multi-puits n'excédait pas 10 km² en amont immédiat de la source.

La carte de l'illustration 117 représente le bassin versant équivalent à celui concerné directement par le pompage, mais dont la forme n'est qu'approximative.

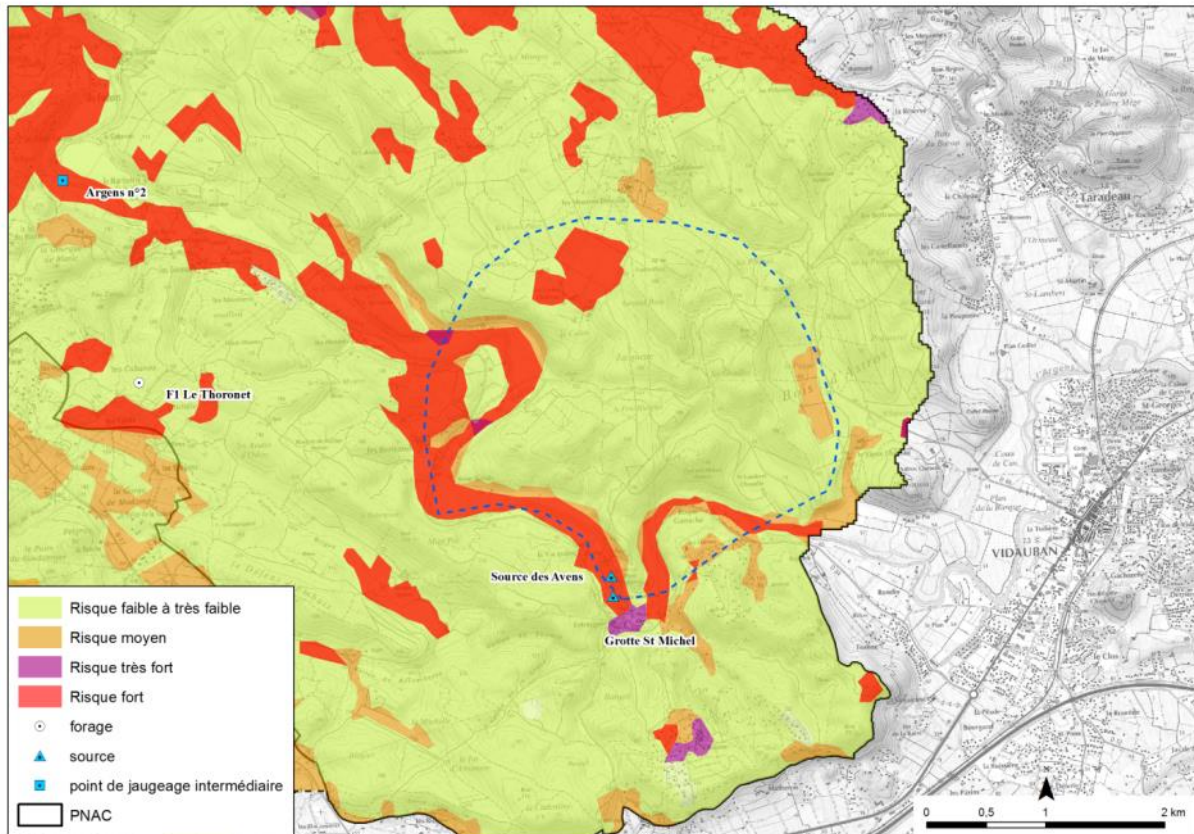


Illustration 117 - Bassin équivalent à l'aire sollicitée par les pompes multi-puits de novembre 2014 sur la source des Avens.

Cette zone englobe des secteurs à risque faible (en vert), mais aussi à risque modéré (en orange) voire à risque fort (en rouge). Ces derniers sont localisés dans le lit de l'Argens – en amont de l'affleurement des tufs, mais aussi au nord de la source où du vignoble est implanté sur un secteur de forte vulnérabilité.

Dans ces secteurs en particulier, une surveillance particulière devra être effectuée, avec une limitation au maximum de substances potentiellement polluantes sur les parcelles cultivées (apports d'engrais nitrés, mais c'est déjà le cas pour la vigne, mais aussi de produits phytosanitaires).

Dans l'Argens, dont le lit est parfois étroit et peu accessible, on veillera à ce que des décharges sauvages n'apparaissent pas et que des produits polluants ne soient pas déversés dans le cours d'eau, en particulier dans ces secteurs.

Pour ce qui est des zones de risque faible, essentiellement concernées par des forêts privées, on rappellera quelques règles d'exploitation, qui consistent à ne pas vidanger les véhicules et outils de type tronçonneuse sur place, à éviter de déverser sur le sol des produits réputés toxiques ou dangereux, en particulier en appliquant des traitements à des doses optimales, et pas en excès.

La seule existence réglementaire possible de ces préconisations réside dans leur inscription dans une DUP, au titre de la réglementation des périmètres de protection des champs captants du SIAE et de la commune de Vidauban.

Pour les secteurs en dehors de l'aire décrite à l'illustration 117, les zones à risque le plus élevée sont celles où des activités potentiellement polluantes se situent au droit de secteur à grande vulnérabilité. C'est en particulier le cas des zones urbaines, ou d'activité industrielle ou commerciales implantées à proximité des rares zones de pertes recensées sur le secteur d'étude. C'est le cas de l'implantation de la station d'épuration de Lorgues, qui rejette maintenant ses eaux traitées dans le Réal Calamar, qui rejoint le Ruisseau de Florièye qui ne conflue vers l'Argens qu'en aval du secteur étudié. Cela étant, rien n'est connu sur les pertes de ce ruisseau et sur le lien existant avec le site d'Entraigues, sinon que les cheminements des eaux souterraines, s'ils mènent à la source des Avens, le font de manière indirecte. Cela constitue, pour ce qui est de la pollution bactérienne tout au moins, plutôt un gage de sécurité. A noter que la station d'épuration recueille aussi les boues des assainissements non collectifs « officiels » de la commune de Lorgues, ce qui tendrait à limiter également l'impact de l'ANC sur le milieu.

D'une façon plus générale, les zones de risque le plus fort correspondent aux secteurs urbains concentrés (comme Carcès ou Lorgues ou aux zones d'activité du Cannet-des-Maures ou du Thoronet) où sont également recensés des sites d'anciennes activités industrielles ou d'activités de service (inventaire BASIAS).

5.4. RECOMMANDATIONS EN TERME DE PRESERVATION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN D'ALIMENTATION

La dernière partie de cette étude consiste en une série de recommandations énoncées dans le but de préserver une ressource, actuellement de bonne qualité, mais qui, de par le contexte énoncé précédemment, est sujette à une possible dégradation de sa qualité.

Le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021 préconise, au sein des ressources stratégiques du bassin (et la masse d'eau souterraine FRDG169 - Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal concernée par l'étude du site d'Entraigues en fait partie), la définition de Zones de Sauvegarde à l'intérieur desquelles des préconisations de préservation de la qualité et de la quantité des ressources doivent être formulées. Ces préconisations ont vocation à intégrer les documents réglementaires d'urbanisme tels que les SCOTs, voire les PLUs.

Le SDAGE incite en effet à travailler sur :

- La non-dégradation de l'état des eaux souterraines ;
- L'intégration des enjeux sur les eaux souterraines dans l'aménagement du territoire ;
- Les ressources stratégiques ;
- Les captages prioritaires et les pollutions ;
- L'équilibre quantitatif des ressources.

Sur la base de ce qui a été déterminé en termes de vulnérabilité et de risque de dégradation de la zone d'étude, et afin de répondre aux deux premiers points, qui concernent directement l'étude du site d'Entraigues, nous proposons la définition de zones de sauvegarde, correspondant aux deux types évoquées par le SDAGE :

- ZSE : Zone de Sauvegarde Exploitée
- ZSNEA : Zone de Sauvegarde Non Exploitée Aujourd'hui

Pour ce faire, nous nous appuyons sur la carte de l'illustration 116, comme le montre l'illustration 118.

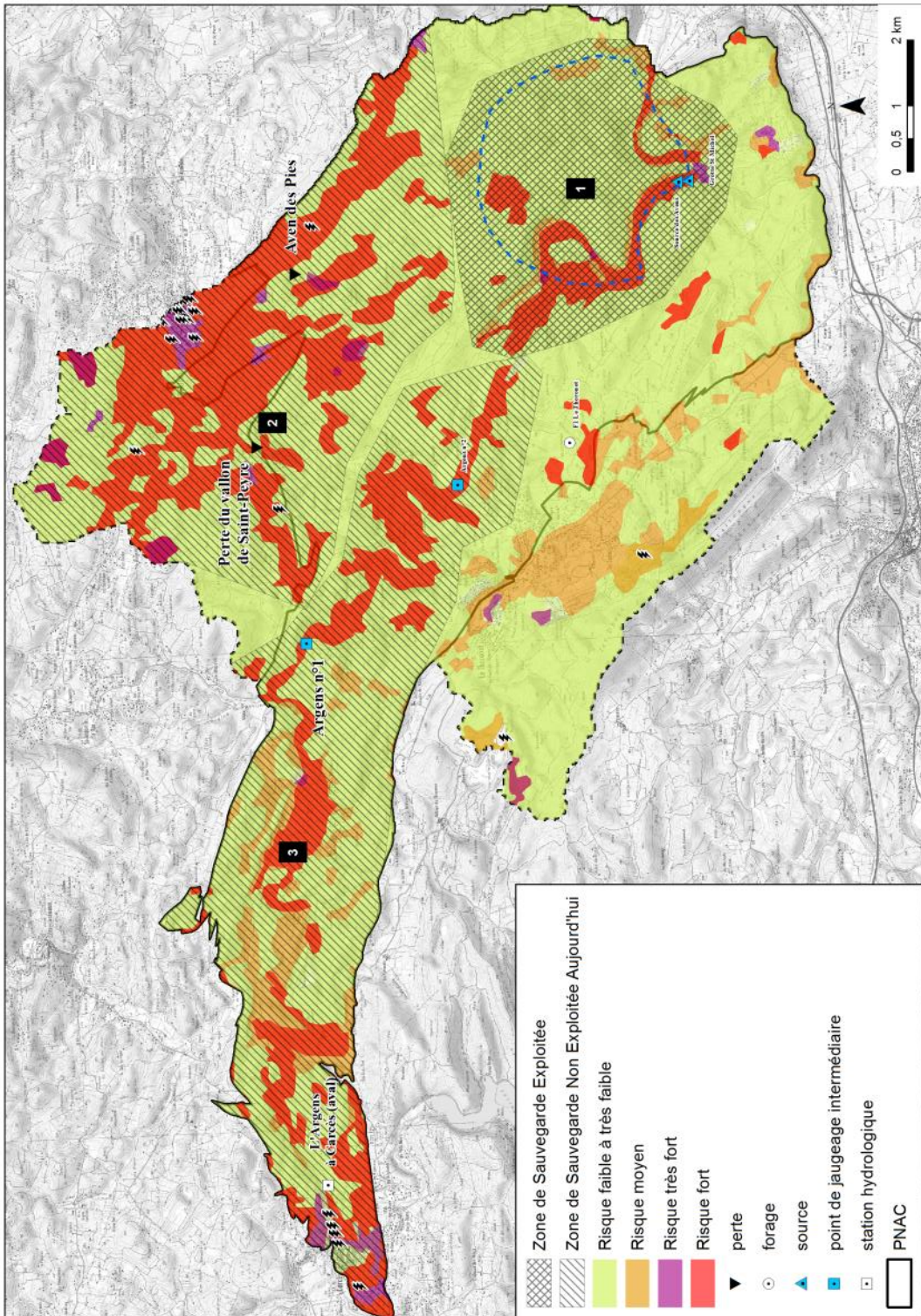


Illustration 118 - Emprise des Zones de Sauvegarde proposées dans le secteur d'étude du site d'Entraigues.

Une zone est classée ZSE :

- La zone 1 que nous proposons d'intituler "Secteur du bassin d'alimentation directement sollicité par les pompages d'essai de 2014".

Deux autres zones peuvent être tracées (elles s'appuient toutes deux pour partie sur la limite de l'entité BD LISA 571E "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan", englobée dans la masse d'eau stratégique FRDG169 décrite précédemment) :

- La zone 2 que nous proposons d'intituler "secteur nord du bassin d'alimentation"
- La zone 3 que nous proposons d'intituler "secteur amont du bassin d'alimentation et lit de l'Argens".

Dans la zone 1, il a été vu précédemment que les secteurs à risque de contamination élevé (de forte vulnérabilité) étaient liés pour partie au lit de l'Argens et aux zones de tufs en particulier, mais aussi à un secteur cultivé (vignes) au nord du site d'Entraigues.

Dans la zone 2, les zones de risque élevé, voire très élevé sont liés d'une part à l'urbanisation de la commune de Lorgues (activités industrielles ou commerciales comprises), mais aussi à des secteurs de pertes recensés dans les formations calcaires.

Dans la zone 3, ce sont la plupart du temps des secteurs soit urbanisés, soit dédiés à l'activité agricole, en particulier dans la plaine inondable de l'Argens, en aval de Carcès qui constituent les secteurs à risques élevé ou très élevé.

Dans les trois zones de sauvegarde, les secteurs à risque le plus faible sont ceux occupés par des forêts privées.

A partir de ces constats, il est possible d'énoncer des préconisations, reprises dans le tableau de l'illustration 119.

Zone de Sauvegarde	Type	Préconisations
1 Secteur du bassin d'alimentation directement sollicité par les pompages d'essai de 2014	Zone de Sauvegarde Exploitée (ZSE)	<p><u>Par rapport aux activités agricoles existantes (vigne) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Limitation des apports de traitement de la vigne aux stricts besoins des plantes (études agronomiques préalables pour déterminer les doses à l'hectare) - Pas d'apports d'engrais azoté <p><u>Par rapport à d'éventuelles activités agricoles futures :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de pratiques culturales engendrant une augmentation des entrants azotés ou issus de produits de traitements (agriculture biologique de type extensif préconisé) - Pas d'élevage intensif ou d'élevage avec zones de parcage (zones de pacquage extensif possible) <p><u>Par rapport au lit de l'Argens et aux secteurs de tufs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de dépôt sauvage (inspections régulières du lit de l'Argens)

Zone de Sauvegarde	Type	Préconisations
		<p><u>Par rapport aux secteurs de forêt :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pratiquer une gestion de la forêt "raisonnable", en particulier en s'abstenant d'utiliser des produits polluants risquant de pénétrer dans le sous-sol. L'entretien des véhicules doit être prohibé en dehors des zones dédiées à cette activité. <p><u>Par rapport au réseau routier :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Les zones en surplomb par rapport au lit de l'Argens, mais aussi celles situées à proximité immédiate de pertes reconnues devront faire l'objet de protections appropriées (barrières...) <p><u>Par rapport aux champs captants :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Mise à jour des DUP avec en particulier redéfinition des périmètres de protection
<p>· Secteur nord du bassin d'alimentation</p>	<p>Zone de Sauvegarde Non Exploitée Aujourd'hui (ZSNEA)</p>	<p><u>Par rapport aux secteurs urbanisés :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de dépôts sauvages - Récupération du réseau pluvial vers un cours d'eau - Pas d'assainissement individuel sauf à en démontrer l'innocuité par des études spécifiques (bon dimensionnement des épandages...) <p><u>Par rapport secteurs de pertes naturelles :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Inventorier exhaustivement les pertes dans la zone de sauvegarde et pratiquer des essais d'infiltration et de traçage, en surveillant spécifiquement les champs captants du site d'Entraigues, mais aussi les berges de l'Argens <p><u>Par rapport aux secteurs de forêt :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pratiquer une gestion de la forêt "raisonnable", en particulier en s'abstenant d'utiliser des produits polluants risquant de pénétrer dans le sous-sol. L'entretien des véhicules doit être prohibé en dehors des zones dédiées à cette activité. <p><u>Par rapport au réseau routier :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Les zones en surplomb par rapport au lit de l'Argens, mais aussi celles situées à proximité immédiate de pertes reconnues devront faire l'objet de protections appropriées (barrières...)
<p>Secteur amont du bassin d'alimentation et lit de l'Argens</p>		<p><u>Par rapport aux secteurs urbanisés :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de dépôts sauvages - Récupération du réseau pluvial vers un cours d'eau

Zone de Sauvegarde	Type	Préconisations
	<p style="text-align: center;">Zone de Sauvegarde Non Exploitée Aujourd'hui (ZSNEA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'assainissement individuel sauf à en démontrer l'innocuité par des études spécifiques (bon dimensionnement des épandages...) <p><u>Par rapport secteurs de pertes naturelles :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Inventorier exhaustivement les pertes dans la zone de sauvegarde et pratiquer des essais d'infiltration et de traçage, en surveillant spécifiquement les champs captants du site d'Entraigues, mais aussi les berges de l'Argens <p><u>Par rapport aux secteurs de forêt :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pratiquer une gestion de la forêt "raisonnable", en particulier en s'abstenant d'utiliser des produits polluants risquant de pénétrer dans le sous-sol. L'entretien des véhicules doit être prohibé en dehors des zones dédiées à cette activité. <p><u>Par rapport au réseau routier :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Les zones en surplomb par rapport au lit de l'Argens, mais aussi celles situées à proximité immédiate de pertes reconnues devront faire l'objet de protections appropriées (barrières...) <p><u>Par rapport aux activités agricoles existantes ou futures :</u> agriculture biologique de type extensif préconisée</p> <p>A défaut :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Limitation des apports de traitement de la plante à ses stricts besoins (études agronomiques préalables pour déterminer les doses à l'hectare) - Pas d'apports d'engrais azoté en excès par rapport aux besoins des plantes (études agronomiques préalables pour déterminer les doses à l'hectare) - Pas d'élevage intensif ou d'élevage avec zones de parcage (zones de pacquage extensif possible)

Illustration 119 – Préconisations en matière de préservation de la qualité de l'eau dans les zones de sauvegardes définies en amont du site d'Entraigues.

6. Conclusion générale

6.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Initiée par le SIAE de la source d'Entraigues et par la commune de Vidauban, qui souhaitent renouveler leurs dossiers d'autorisation de prélèvements dans les ouvrages du site d'Entraigues, l'étude d'acquisition de connaissances du site d'Entraigues, qui abrite les deux champs captants, du SIAE et de la commune de Vidauban a été réalisée entre 2013 et 2015 par le BRGM.

Le droit actuel de prélèvement du SIAE est de 9 000 m³/j (débit max : 125 l/s ; DUP du 15 juillet 1970). Etabli à l'époque où seuls 3 forages étaient exploités, il est aujourd'hui réalisé au moyen d'un champ captant de 6 forages (3 forages « superficiels » et 3 forages « profonds »). L'exploitation des ouvrages est réalisée par SVAG/VEOLIA depuis 1974 (contrat renouvelé en septembre 2015).

De plus, la commune de Vidauban exploite sur le site adjacent à celui du SIAE la source des Avens (ou source d'Entraigues) ainsi que deux forages de 93 m, le prélèvement autorisé étant de 4 320 m³/j (débit max : 60 l/s ; AP du 16 mai 1971).

Par ailleurs, l'Agence de l'Eau RM&C, souhaitant disposer d'informations sur les risques encourus par la ressource de voir une pollution l'atteindre, a décidé de financer le SIAE à hauteur de 80% du budget total. Ce financement est assujéti à la réalisation d'une étude de vulnérabilité qui s'étend au-delà du strict périmètre des champs captants, et qui a pour but de définir des zones à protéger contre tout risque de contamination et de surexploitation : c'est le sens de la mise en place des Zones de Sauvegardes préconisées par le SDAGE RM&C 2016-2021, au sein des « Ressources Stratégiques » (masses d'eau souterraine définies comme étant « stratégiques » du point de vue de la préservation des ressources pour l'eau potable. Ces masses d'eau doivent faire l'objet d'une ou de plusieurs études hydrogéologiques destinées à localiser, qualifier et surtout à proposer des mesures opérationnelles qui auront vocation à être intégrées aux documents d'urbanisme). La masse d'eau souterraine "FRDG169 - Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal", et plus particulièrement l'entité hydrogéologique BD LISA 571E "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan" ont été définies comme Ressources Stratégiques.

Il s'est donc agi d'élargir le champ d'investigations de l'étude, pour analyser, de manière sommaire, les risques de dégradation de la ressource majeure stockée dans les formations aquifères bien au-delà du site d'Entraigues proprement dit.

Après un cadrage du contexte hydrogéologique mettant en évidence deux niveaux aquifères au site d'Entraigues (les tufs en surface et les formations carbonatées du Muschelkalk en profondeur), l'étude, s'est articulée autour de 3 parties :

- Organisation et analyse des pompages d'essais sur les ouvrages du site d'Entraigues (champs captants du SIAE et de la commune de Vidauban). Ces essais, précédés d'une réinterprétation de données d'essais antérieurs, ont concernés chaque ouvrage (essais de puits) et les champs captants globalement (essais de nappe multi-puits). Ces essais se sont déroulés entre juin et novembre 2014.
- Analyse et réinterprétation des données hydrogéochimiques préexistantes et organisation / interprétation de campagnes de prélèvements dans les eaux souterraines et de surface (une campagne a été réalisée en 2014 et une autre en 2015). Les analyses portant sur les

éléments chimiques « classiques », mais aussi les éléments en trace et les isotopes de l'eau et de l'encaissant. Une datation des eaux a en outre été tentée *via* l'étude des CFC / SF6.

- Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines et, par le croisement avec les pressions anthropiques, une approche des risques encourus par elles à l'échelle de la zone d'étude et plus spécifiquement du site d'Entraigues.

6.1.1. Concernant le contexte hydrogéochimique et hydrologique

Outre les aspects purement hydrodynamiques développés dans un second temps, les **approches fonctionnelles et hydrogéochimiques** mises en œuvre dans cette étude permettent d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère fracturé - karstifié des calcaires du Muschelkalk qui alimentent la source d'Avens.

Des différentes observations et caractérisations réalisées, on peut conclure que **l'aquifère fracturé - karstifié des calcaires du Muschelkalk est à la fois alimenté par des pertes de l'Argens et par la recharge sur l'impluvium du Muschelkalk.**

Dans ce système karstique binaire¹⁴, **le flux d'alimentation par les pertes de l'Argens est supposé vraisemblablement assez constant d'un cycle hydrologique à l'autre**, contrairement au flux de recharge sur l'impluvium des calcaires qui est lié aux variations hydroclimatiques interannuelles. La confrontation des concentrations mesurées dans l'aquifère avec les valeurs de la recharge estimées à l'aide du modèle GARDENIA permet de montrer que **l'augmentation des teneurs en chlorures dans les eaux souterraines est bien corrélée à une période de recharge déficitaire par rapport à la moyenne (période 2004-2008)**. A l'inverse, **la diminution des teneurs en chlorures qui est observée à partir de 2008 est bien corrélée à une période de recharge excédentaire par rapport à la moyenne**. L'approche de modélisation GARDENIA permet d'estimer l'ordre de grandeur de la recharge (310 mm sur la période [1963-2014]).

Dans ce contexte, **l'augmentation graduelle de chlorures observée lors de la succession d'années déficitaires (entre 2004 et 2008) serait liée à la diminution de contribution relative de la recharge par la pluie** et corolairement à une augmentation de la contribution relative des eaux de l'Argens enrichies en chlorures par rapport au Muschelkalk. Les résultats hydrochimiques démontrent également que **la recharge par les pertes de l'Argens se produit en amont hydraulique du forage AEP du Thoronet (102370271/F1)**. Compte tenu du contexte géologique, **des pertes de l'Argens pourraient se produire dans le secteur de Vignaudière**. L'approche géochimique permet également de montrer que **les eaux pompées au forage AEP du Thoronet (102370271/F1) appartiennent au même réservoir que celles prélevées au site d'Entraigues**.

L'examen des chroniques de chlorures des ouvrages du Thoronet (10237X0271/F1) et du champ captant SIAE/Vidauban mettent en évidence que le pic de chlorures (205 mg/l) mesuré en septembre 2007 au Thoronet semble se produire près d'un an et demi plus tôt que celui observé au champ captant (en février 2009, légèrement atténué, 200 mg/l). Le décalage temporel du signal entre le forage du Thoronet et le forage F5_{SIAE} laisse penser que **les circulations au sein de l'aquifère du Muschelkalk se font globalement du nord-ouest vers**

¹⁴ : dans un système karstique **binaire**, contrairement à ce qui se passe dans un système **unaire**, il existe des zones d'accumulation d'eau de surface en amont du bassin, qui s'infiltrent par exemple lorsqu'elles arrivent dans des zones de contact entre surfaces imperméables et zones de pertes.

le sud-est selon un transfert faiblement dispersif puisque ces pics sont comparables. Le décalage dans le pic de réponse en chlorures de l'aquifère permet d'illustrer que **la dynamique du transfert de masse est lente en comparaison du transfert de pression au sein de l'aquifère.** En effet, l'approche de modélisation montre que la réponse de l'aquifère à un épisode de recharge est rapide (<1 jour) ce qui dénote un transfert de charges en nappe captive. L'inertie de la nappe est importante (le temps de demi tarissement ($T_{1/2_Tari}$) du réservoir est de plus de 6 mois), la réponse théorique de l'aquifère à 100 mm de recharge se fait sentir sur près de 1000 jours. **Le coefficient d'emmagasinement apparent global de l'aquifère est de $7,78 \cdot 10^{-2}$, ce qui est cohérent avec les résultats de la modélisation issue des pompages d'essai.**

Les débits de la source estimés par modélisation seraient compris entre $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit moyen serait de $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$, sur la période 1964-2014. Les résultats de la simulation indiquent qu'en période d'années déficitaires en précipitations (années 2003 à 2007), le débit de la source serait faible de l'ordre de $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne. En période d'années excédentaires en précipitations (années 2008 à 2014), le débit de la source serait de l'ordre de $0,86 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne.

6.1.2. Concernant les essais sur le site d'Entraigues

Pour ce qui est des pompages d'essai, la réinterprétation des pompages d'essai historiques, les essais par paliers de débit réalisés en 2014 et l'essai et le pompage de longue durée en multi-pompages du 06 au 14/11/2014 (8,1 jours), ont permis de caractériser l'aquifère des calcaires fracturés du Muschelkalk ainsi que l'aquifère sus-jacent des tufs.

L'observation des niveaux a été conduite sur ces ouvrages, V2 et V3 (Muschelkalk), ainsi que F3 et F8 (tufs). Cet essai a permis de montrer :

(a) **une connexion hydraulique entre les tufs et l'Argens, du moins au niveau du barrage** (l'aval du barrage étant en net contrebas du niveau piézométrique dans les tufs), cette information est supportée par l'essai de puits sur la source des Avens,

(b) **une connexion hydraulique entre les tufs et les calcaires fracturés du Muschelkalk, ce qui jusqu'à présent n'avait pas été montré.** Il est à noter que la modélisation de l'ensemble des essais dans le Muschelkalk (9 essais, dont plusieurs en interférence), ont permis de trouver des caractéristiques hydrodynamiques similaires. Un seul essai est par contre disponible dans les tufs (réalisé en 2014).

Plusieurs modèles mathématiques de type multicouche, prenant donc en compte des pompages dans un milieu d'aquifères stratifiés, limité dans l'espace et prenant aussi en compte la présence d'un cours d'eau incisant partiellement l'aquifère de surface (les tufs) ont été utilisés pour interpréter les essais.

Concernant l'essai multi-puits de novembre 2014, c'est un modèle multicouche limité dans l'espace avec variation du niveau dans l'aquifère (surface perméable et pompages dans les deux niveaux aquifères) qui a donné les meilleurs résultats en termes de modélisation des niveaux.

Un modèle utilisé dans un second temps (multicouche limité dans l'espace avec variation du niveau dans l'aquifère de surface incisé par un cours d'eau et pompages uniquement dans l'aquifère inférieur) a pu donner un ordre de grandeur de l'impact des pompages dans le Muschelkalk (forages F5, F6, V1) sur l'Argens. **Ces deux modèles ont donc été utilisés de façons complémentaires.**

Les paramètres hydrodynamiques issus des modélisations montrent que l'aquifère du Muschelkalk est caractérisé par une forte transmissivité évaluée à $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, et un emmagasinement plutôt captif (S) égal à $5,5 \cdot 10^{-3}$.

La partie de la nappe sollicitée par les essais est limitée latéralement, sa géométrie posée arbitrairement rectangulaire (longueur d'environ 3,2 km et largeur d'environ 2,3 km) couvre une surface de l'ordre de $7,4 \text{ km}^2$. Cependant, il n'a pas été possible de déterminer précisément l'orientation de l'aquifère faute d'ouvrages suffisamment éloignés répondant au pompage. De façon arbitraire, il a été choisi de l'orienter N-S dans les modèles.

Au niveau du forage de Vidauban (V1), l'essai de 2014 a montré un comportement atypique des suivis sur les ouvrages V2 et V3 distants de 30 m, suggérant qu'une structure très diffusive, probablement une fracture très perméable ou un petit conduit karstique, connecte ces trois forages. Cependant, cette structure locale dans le Muschelkalk n'est pas généralisable à l'ensemble de l'aquifère du Muschelkalk du moins au niveau du site d'Entraigues.

La transmissivité de l'aquifère de surface, les tufs, a été évaluée à $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, et son emmagasinement à 0,35, typique d'un aquifère libre. Dans le modèle multi-puits la transmissivité a cependant dû être augmentée, mais toujours dans le même ordre de grandeur ($T_0=1 \text{ m}^2/\text{s}$) en conséquence de l'alimentation par l'Argens. L'emmagasinement est par contre resté identique.

L'impact sur le cours d'eau est estimé entre 13 et $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (3 à 4 l/s) avec l'hypothèse d'un faible degré d'incision du cours d'eau dans les tufs (1 à 3 m).

Notons que ce modèle ne permet pas de prendre en compte toutes les caractéristiques de l'essai (pompage dans la source par exemple) ou toute les caractéristiques hydrodynamiques du site (dans le modèle les tufs sont supposés peu perméables).

Néanmoins, le modèle a permis d'appréhender **l'ordre de grandeur de l'impact sur le cours d'eau.** Selon ce modèle, **le ratio impact sur le cours d'eau / débit prélevé dans le Muschelkalk ($1550 \text{ m}^3/\text{h}$ ou 430 l/s) serait inférieur à 1%. Concernant l'Argens, l'impact est négligeable, voire imperceptible** puisqu'au moment des essais son débit dépassait 2 000 l/s.

Entre ces deux aquifères réside un niveau marno-sableux de quelques mètres d'épaisseur, dont la perméabilité est estimée à $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (pour une épaisseur fixée arbitrairement à un mètre). Par contre, cette perméabilité a dû être augmentée pour reproduire les niveaux dans les tufs lors de l'essai multi-puits ($4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$), probablement à cause des **fortes connexions hydrauliques (conduits et cavités) qui existent entre la source et les ouvrages dans les tufs.** En effet, les observations des niveaux dans les tufs lors de l'essai de longue durée suite à l'enclenchement des pompages dans le Muschelkalk ont occasionné un rabattement rapide.

Cette forte connexion semble provoquer une réaction beaucoup plus rapide au niveau des puits, de seulement une dizaine de centimètres cependant (F3, F8). De plus, **il est fortement probable, même si cela n'est pas formellement démontré, que le conduit alimentant la source traverse le Muschelkalk au moins en partie.** Ainsi une diminution de la pression dans le Muschelkalk, induite par les pompages sur F5, F6 et V1, fera rapidement diminuer le niveau sur la source de quelques dizaines de centimètres comme l'a montré cet essai. Du fait des conduits et cavités dans les tufs, une baisse sur la source sera rapidement ressentie sur les autres ouvrages dans les tufs (de quelques dizaines de centimètres aussi).

D'un point de vue de la qualité des échanges entre les forages et l'aquifère (pertes de charge quadratiques, liées à l'équipement des puits) : **pour F4 et F5, on note une amélioration des puits depuis leur mise en service, en particulier pour F4 ; ceux-ci se seraient vraisemblablement développés depuis les années 80. Pour F6, en 2014 le coefficient de pertes de charge quadratiques est légèrement inférieur à celui de 2008 suggérant une légère amélioration de l'ouvrage. Par contre, pour le forage exploité de Vidauban (V1) les pertes de charge au puits sont beaucoup plus élevées en 2014 qu'en 2000 indiquant une forte baisse de la productivité de l'ouvrage (baisse estimée : 75%).** Cette baisse est probablement liée à un **colmatage partiel** de l'ouvrage et/ou des fractures l'alimentant. **Pour ce forage, des investigations complémentaires (nouvel essai par paliers pour confirmation, caméra...) seraient nécessaires avant d'engager et d'adapter une procédure de nettoyage/développement de l'ouvrage (air-lift/acidification par exemple).**

Les modèles préalablement établis et calés sur l'essai par pompage multi-puits réalisés en 2014 ont été utilisés pour modéliser les rabattements aux différents puits au cours d'une année de pompage. Les modélisations ne prennent pas en compte la recharge des aquifères (Muschelkalk, tufs), **les simulations ont donc été réalisées en conditions hydroclimatiques pessimistes**, c'est-à-dire sans apport de recharge par les précipitations durant une année.

Les simulations concernent les ouvrages qui ont été testés lors de l'essai de 2014, soit pour le SIAE Entraigues les forages F4, F5 et F6, et pour Vidauban le forage V1 et la source des Avens (pompage 24h/24, 7j/7). Deux scénarios d'exploitation ont été testés :

- Le premier considérant un débit constant des ouvrages ;
- le deuxième considérant un débit de 30% plus important en période estivale (juin à août) qu'en période hivernale (septembre-mai) afin de prendre en compte des besoins plus importants en été.¹⁵

Les modélisations ont tenu compte des conditions de rabattements maximums admissibles, des débits possibles sur les ouvrages et des conditions d'exploitation souhaitées par le SIAE et la commune de Vidauban.

Les résultats montrent que :

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- pour le premier scénario (pompage à débit constant) un débit moyen annuel (24h/24 ; 7j/7) de 250 l/s pour le SIAE et de 111 l/s pour Vidauban sont envisageables,- pour le deuxième scénario (plus forts prélèvements en été) un débit moyen de 208 l/s pour le SIAE et de 90 l/s pour Vidauban. |
|--|

Dans les deux cas, F6 est exploité en priorité à son débit maximum (153 l/s, 24h/24, 7j/7) et la source des Avens exploitée en continu (34,5 l/s, 24h/24, 7j/7). **Dans les conditions de pompage proposées, les rabattements maximums ne sont jamais atteints.**

Notons toutefois que les modèles ont du mal à évaluer avec certitude l'impact en termes de niveau de l'Argens sur la source, **même si les rabattements estimés sur la source sont acceptables, il est conseillé de continuer à suivre le niveau de la source en continu.**

Le cas échéant, le débit des autres ouvrages pourra être révisé à la baisse.

¹⁵ L'application qui a permis d'établir les simulations sur le site d'Entraigues a été cédée au SIAE et à la Commune de Vidauban.

Un des modèles a permis d'estimer l'impact des pompages dans le Muschelkalk sur le cours d'eau de l'Argens : **il serait faible – de 60 à 70 m³/h (15 à 20 l/s), soit 6 à 7% du débit total pompé – quel que soit le scénario considéré.**

L'impact attendu sur l'Argens sera donc a priori faible et inférieur aux prélèvements sur la source. Les données historiques dont nous disposons sur l'Argens montrent une valeur minimale, au niveau de la source de l'ordre de 400 l/s.

Dans le cas où la source est en étiage sévère (débit de l'ordre de 0,15 m³/s), l'impact du pompage sur le cours d'eau atteindrait environ 11 % du débit. Si la source a un débit moyen de la période 1964 – 2014 (0,68 m³/s), l'impact des pompages n'est plus que de 3 %. Une valeur de débit de la source de 0,46 m³/s (débit moyen en période déficitaire 2003 - 2007) entraînerait un impact sur l'Argens de moins de 5 % de son débit.

En résumé, d'après la modélisation, **l'impact maximal des pompages dans le Muschelkalk sur le débit de l'Argens serait de 11 % de son débit.**

6.1.3. Concernant l'étude de vulnérabilité de la ressource

Pour mener à bien cette partie de l'étude, dans un premier temps, une **redéfinition de la zone d'étude** a été nécessaire (par rapport à l'entité hydrogéologique 571E "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan") notamment du fait de la nature binaire du système karstique considéré (ensemble tufs + calcaires du Muschelkalk).

La **vulnérabilité** d'une ressource en eau traduit son **défaut de protection naturelle vis-à-vis d'une pollution qu'elle peut subir** en un point de son bassin d'alimentation. Elle caractérise donc un transfert de polluant **depuis la surface du sol jusqu'au toit de la nappe**. La prise en compte de ce transfert jusqu'au point de captage permet de quantifier la vulnérabilité du captage d'eau. Deux concepts sont distingués :

- la **vulnérabilité intrinsèque**, qui détermine la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités anthropiques,
- la **vulnérabilité spécifique** qui caractérise cette sensibilité pour un polluant donné ou un groupe de polluants, en tenant compte dans ce cas des propriétés de mobilité et de dégradation de ce polluant au sein de l'aquifère.

*Dans cette étude, la cartographie de la vulnérabilité concerne la **vulnérabilité intrinsèque** de la ressource en eau.*

La notion de vulnérabilité est définie par rapport au point d'application d'un polluant à la surface du bassin d'alimentation. Elle s'exprime donc à travers des cartes qui traduisent par une échelle de couleurs la sensibilité de la ressource ou du captage à la contamination par les activités anthropiques.

Pour mieux cibler les zones d'actions prioritaires dans le cadre de la stratégie de protection des zones de captages, la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque doit permettre d'établir une hiérarchisation des zones très fortement à faiblement sensibles à l'infiltration des eaux rejoignant la ressource et donc *in fine* les sources captées. L'établissement de cartes de vulnérabilité permet au gestionnaire de prioriser ses actions de protection de la ressource ou du captage d'eau en tenant compte des pressions anthropiques qui s'exercent sur le bassin.

Enfin, la notion de vulnérabilité d'une eau souterraine à la pollution est liée à celle du temps de séjour de l'eau depuis son infiltration : une circulation rapide pourra véhiculer rapidement une

pollution accidentelle avec peu de dilution. Il est donc très utile de pouvoir estimer ce temps de résidence.

Les résultats de cette datation au captage AEP du Thoronet sont cohérents pour tous les gaz analysés et permettent de **proposer une circulation des eaux jusqu'au captage selon un modèle exponentiel, avec un temps moyen de séjour des eaux de l'ordre de 25 ans +/- 5 ans, soit un renouvellement d'environ 5% de l'eau souterraine tous les ans**. Une pollution locale des eaux en gaz CFC/SF6 (utilisés dans cette étude pour l'estimation des âges des eaux), aurait ici tendance à rajeunir artificiellement ce temps moyen de séjour. Cet âge relativement élevé n'exclut pas des arrivées plus rapides d'eau selon des lignes de courant préférentiel, notamment depuis l'Argens pour des conditions hydrogéologiques de basses eaux, permettant d'expliquer les évolutions en chlorures. En revanche, les valeurs de concentrations en gaz CFC/SF6 obtenues sur le site d'Entraigues (forages et source des Avens) ne peuvent être expliquées par un équilibre avec l'atmosphère : **les eaux prélevées dans le site d'Entraigues présentent donc une contamination en CFC et en SF6 qui ne permet pas de datation des eaux à partir de ces points. L'origine de la contamination serait à rechercher dans l'eau circulant au sein du réseau karstique** (en provenance probable de l'Argens). Les résultats de la campagne de 2015 ne permettent pas d'aller plus loin dans l'analyse de l'origine de cette contamination CFC 11, 12 113 et en SF6, probablement liée à un dépôt de déchets contenant des liquides réfrigérants, des isolants, des aérosols, etc. sur l'impluvium.

Pour en préciser l'origine de la contamination en gaz CFC/SF6, **il est proposé de réaliser une nouvelle campagne incluant des points de prélèvements dans l'Argens, dans les forages privés recoupant le Muschelkalk et au niveau des pertes identifiées en rive gauche de l'Argens** (Vallon de Saint-Peyre et Aven des Pies).

L'étude de la vulnérabilité de la ressource en eau sollicitée par le champ captant du site d'Entraigues considère les réservoirs hydrogéologiques des calcaires du Muschelkalk et du tuf calcaire présent localement comme une seule entité aquifère drainée par la source des Avens et les différents forages du site d'Entraigues.

La notion de **Portion de Nappe Alimentant les Captages** (PNAC), développée dans la méthodologie de délimitation des Aires d'Alimentation des Captages a par ailleurs été utilisée.

Elle correspond à la délimitation de **l'entité hydrogéologique BD LISA 571E** décrite précédemment (contours des réservoirs du Muschelkalk calcaire ou dolomitique, en se limitant au nord aux derniers affleurements en amont de Carcès).

En outre il s'avère nécessaire d'inclure les bassins-versants connexes en rives droite et gauche de l'Argens :

- En rive gauche, deux de ces bassins versants donnent naissance à des écoulements temporaires qui alimentent des pertes : perte du vallon de Saint-Peyre et perte de l'aven des Pies ;
- En rive droite, le réseau hydrographique est plus organisé, mais il existe néanmoins des thalwegs temporairement à sec, notamment dans le secteur du Thoronet, qui prennent naissance plus en amont par ruissellement sur des terrains liasiques et jurassiques.

La zone d'étude où a été évaluée la vulnérabilité représente ainsi une superficie à l'affleurement de 115 km².

L'outil ESPERE du BRGM permet d'estimer la recharge annuelle dans le Muschelkalk, à partir des données de précipitations, d'ETP et de températures, elles-mêmes issues du module d'analyse objective SAFRAN développé par le CNRM.

A partir des bilans annuels effectués sur l'Argens, **une estimation de l'impluvium montre que celui-ci est d'au moins 93 km²**. En fait, il est probablement beaucoup plus étendu, **de l'ordre de plusieurs centaines de km²**, et en tous cas très supérieur à la zone d'affleurement de 115 km² retenue comme zone d'étude. **Il est donc probable que l'Argens participe à la recharge de la nappe des calcaires du Muschelkalk.**

Une campagne de jaugeages différentiels entre deux points sur l'Argens a mis en évidence un **débit de perte depuis l'Argens de l'ordre de 800 l/s** (pour un débit journalier de 7810 l/s mesuré à la station de Carcès). Même si cette valeur est discutable compte-tenu de l'incertitude des mesures, de telles pertes sont quand même avérées.

Ainsi, **la partie amont de l'Argens pourrait contribuer à l'alimentation des aquifères du Muschelkalk** par pertes plus ou moins identifiées (arguments fondés sur les comparaisons des teneurs en chlorures en différents points du bassin et sous différentes conditions de recharge). De plus, la comparaison des suivis de conductivité électrique ne permet pas d'identifier des transferts de masse rapide depuis l'Argens, aucune corrélation ne pouvant être établie. **La zone d'alimentation de l'hydrosystème d'Entraigues par l'Argens est donc nécessairement relativement éloignée du site d'Entraigues.**

Dans un second temps, une analyse multicritères de la vulnérabilité a été menée grâce à la méthode PaPRIKa qui consiste à croiser les critères P (Protection), R (nature lithologique et fracturation du réservoir), I (conditions d'infiltration) et Ka (degré de karstification). Les cartes produites sont synthétisées en une série de cartes de la vulnérabilité globale, établies selon plusieurs jeux de pondération. Une de ces cartes est choisie pour représenter la vulnérabilité globale.

Cette carte indique que si globalement **la couleur orange est majoritaire dans la zone d'étude** (traduisant une vulnérabilité moyenne), **le nord (secteur de Lorgues) est le plus vulnérable, alors que celui de Vidauban apparaît comme le mieux protégé.**

Une fois dressée la carte de vulnérabilité globale, celle de l'occupation du sol, permettant d'accéder aux pressions anthropiques est établie à la même échelle (1/50 000). La très grande majorité de la zone d'étude (près de 90% de la surface totale) est occupée par de la forêt et du couvert végétal. Les secteurs urbanisés ou de zones d'activités ne représentent 2,5 % de la surface totale. L'essentiel des surfaces restantes sont occupées par des activités agricoles (oliveraies et surtout vignobles).

La superposition de cette carte avec la carte de vulnérabilité donne accès à une carte des risques encourus par les eaux souterraines dans la zone d'étude. Quatre classes sont distinguées : peu ou pas de risque (là où il n'y a que de très faibles ou de faibles pressions ou là où la pression est moyenne ou forte mais où la vulnérabilité est très faible ou faible – risque moyen ou un des deux paramètres peut être fort si l'autre est moyen – risque fort, si la pression et la vulnérabilité sont moyennes à très fortes – risque très fort, là où les deux paramètres sont forts ou très forts).

Dans les secteurs de la carte à risque fort à très fort (lit de l'Argens, partie nord de la zone d'étude et extrémité ouest, une attention tout particulière doit être portée aux activités potentiellement polluantes, notamment celles qui produisent des effluents liquides susceptibles d'entrer dans le milieu souterrain. On veillera notamment :

- dans les zones de forêts à ce que les activités de gestion et d'entretiens soient réalisées en prenant toutes les précautions pour éviter l'introduction d'huiles ou d'hydrocarbures dans le sous-sol ;
- dans les zones d'assainissement non collectif, à ce que les dispositifs fonctionnent correctement ;
- dans les zones urbaines, à ce que les réseaux pluviaux ou *a fortiori* d'eaux usées ne soient pas fuyards ;
- A faire en sorte que les cuves enterrées de produits polluants disposent d'une fosse de rétention étanche ;
- A effectuer une nouvelle expertise des pertes identifiées dans le nord de la zone, en particulier celle située à proximité de la station d'épuration de Lorgues (avec des Pies).

Trois zones de sauvegarde, telles que définies par le SDAGE Rhône – Méditerranée 2016, ont été définies dans la zone d'étude :

Une zone est classée ZSE (Zone de Sauvegarde déjà Exploitée) :

- La zone 1 que nous proposons d'intituler "Secteur du bassin d'alimentation directement sollicité par les pompages d'essai de 2014".

Deux autres zones classées ZSNEA (Zones de Sauvegarde Non Exploitées Aujourd'hui), qui s'appuient toutes deux pour partie sur la limite de l'entité BD LISA 571E "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan", englobée dans la masse d'eau stratégique FRDG169 décrite précédemment) :

- La zone 2 que nous proposons d'intituler "secteur nord du bassin d'alimentation"
- La zone 3 que nous proposons d'intituler "secteur amont du bassin d'alimentation et lit de l'Argens".

Dans chacune de ces zones, des préconisations sont énoncées, fonction des risques encourus par les eaux souterraines par rapport à la contamination anthropique.

6.2. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce travail, mené sur deux ans, et qui a porté non seulement sur le site d'Entraigues, mais aussi sur la partie de l'entité hydrogéologique des roches carbonatées du Muschelkalk dite "Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan" en amont, a permis de faire avancer la connaissance sur les potentialités de la ressource captée d'une part, sur la qualité des eaux souterraines, mais aussi sur la vulnérabilité de cette ressource et du site d'Entraigues à des contaminations anthropiques provenant de la surface. Les relations entre les eaux souterraines et l'Argens ont été étudiées par le biais notamment de l'analyse hydrochimique de ces deux compartiments, mettant en évidence une recharge des calcaires du Muschelkalk par les eaux de surface en amont du site d'Entraigues. Enfin, le temps de résidence de l'eau dans le milieu souterrain a pu être estimé à environ 25 ans dans le secteur étudié.

A l'issue des pompages d'essai menés dans les champs captants du site d'Entraigues, ***il s'avère que les gestionnaires (le SIAE et la commune de Vidauban) peuvent espérer doubler leurs prélèvements sans impact majeur et durable sur la ressource (calcaires du Muschelkalk).*** Les niveaux d'eau dans les tufs, s'ils seront impactés par une augmentation des prélèvements, ne devraient pas l'être dans des conditions inacceptables, tant pour ce qui est de

l'émergence de la source des Avens, que pour le manque à gagner concernant les débits de l'Argens, qui ne devraient pas excéder quelques pourcents du débit transitant au droit du site (en aval immédiat du barrage). Il conviendra toutefois de poursuivre dans le temps le suivi des variations de hauteurs dans le trop-plein de la source comme cela a été initié lors de ce travail.

De plus, lors des essais de 2014, un seul des forages de Vidauban était équipé de pompe. Le modèle de fonctionnement hydrodynamique ne prend donc pas en compte la mise en route d'une seconde pompe. Si l'exploitation future de ce champ captant impliquait la présence de cette seconde pompe, il faudrait refaire un essai avec au moins les deux pompes de Vidauban tournant simultanément pour quantifier les interférences entre les ouvrages en pompage.

Sur le plan du risque de pollution de la ressource, les cartographies de la vulnérabilité des eaux souterraines et de la pression anthropique s'exerçant en amont du site d'Entraigues permettent de dégager les enseignements suivants :

- de par la nature des formations géologiques, la géomorphologie du secteur et la présence de l'Argens, la vulnérabilité des eaux souterraines peut être forte à très fortes selon les secteurs : c'est le cas en particulier du nord de la zone étudiée (secteur de la commune de Lorgues) et dans une moindre mesure de sa partie occidentale. Elle est plus faible à l'est et au sud du site d'Entraigues ;
- Les pressions qui s'exercent sur la zone d'étude sont dans l'ensemble assez faibles, et les secteurs de pression élevée sont liés à la présence de zones urbanisées ou d'activités industrielles ou commerciales. A l'échelle du secteur d'étude, ces zones sont de petite taille et circonscrites (communes de Lorgues, de Carcès et du Thoronet ;
- le risque de pollution des eaux souterraines (pas seulement du site d'Entraigues), déduit de la superposition des deux cartes précédentes, varie de faible à très fort, les secteurs à risques les plus élevés étant situés dans le lit de l'Argens, et dans le nord du secteur d'étude (commune de Lorgues) et l'ouest (Carcès et plaine en aval immédiat). Dans ces secteurs une attention toute particulière devra être portée aux activités susceptibles d'introduire des effluents pollués dans le milieu souterrain.

Même si la pression anthropique est à l'heure actuelle assez réduite, il conviendra de rester vigilant sur les évolutions en termes d'occupation de l'espace. Actuellement, la forêt et la végétation non cultivée prédomine largement en amont du site d'Entraigues. Outre des règles de bonne gestion liées à la sylviculture (limiter au maximum les opérations d'entretien des engins, évacuer les huiles et les hydrocarbures...), il sera préférable de favoriser le développement de projets non (ou peu) impactants et extensifs notamment au nord et au nord-ouest immédiat du site d'Entraigues.

Les perspectives d'amélioration de la connaissance à l'issue de ce travail sont les suivantes :

- améliorer la définition de l'impluvium : Le bilan hydrologique mené à l'échelle des 150 km² de la zone d'étude a renforcé l'idée qu'il existe une autre composante de recharge depuis des pertes de l'Argens (l'infiltration efficace des précipitations ne peut expliquer à elle seule les débits transitant à la source). Il faudrait préciser les modalités de cette recharge, et vérifier que les zones soupçonnées d'entrée d'eaux de l'Argens dans les calcaires sont bien celles qui permettent une recharge en amont du site d'Entraigues ;
- mener un inventaire plus exhaustif des pertes et étudier plus précisément leur lien avec le site d'Entraigues (traçages spécifiques et bien contrôlés) ;
- rechercher plus précisément l'origine des chlorures dans l'Argens. On a vu que cet élément avait des teneurs croissantes d'amont en aval, mais comment l'eau de l'Argens (ou de ses

affluents amont) acquière-t-elle cette composition ? cela permettrait de mieux connaître les conditions de recharge des calcaires du Muschelkalk ;

- les datations de l'eau à partir des concentrations en CFC / SF6 ont montré une contamination générale des gaz au site d'Entraigues. Identifier les causes précises et l'extension de cette contamination est important pour la protection de l'eau souterraine prélevée sur le site. Une nouvelle campagne pourrait être organisée, pour prélever à la fois dans les points déjà prélevés en 2015 et dans l'Argens. Une inspection du lit de l'Argens pour retrouver les sources potentielles de contamination serait également la bienvenue.

7. Bibliographie

ANTEA Group et SEPIA Conseils (2014) – Identification et préservation des ressources majeures pour l'alimentation en eau potable. Etude de l'aquifère des calcaires jurassico-crétacés des Corbières Orientales. Rapport de phase 3. Document Agence de l'Eau RM&C.

G2C Environnement (2011) – SIAE de la Source d'Entraigues (Département du Var) - Schéma Directeur d'Alimentation en Eau Potable. Rapport EPS/E07089, juin 2011.

Lapparent A-F, Bordet P., Mennessier G. (1969) – Notice explicative et carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Draguignan (1023), Orléans. BRGM Editions, 11 p.

Cova R. et Durozoy G. (1980) – Carte hydrogéologique du département du Var, échelle 1/200 000 et sa notice explicative (38 p). Ministères de l'Agriculture et de l'Industrie.

Moulin M., avec la collaboration de Salquère D. et de Sany F. (2013) – Actualisation de la synthèse hydrogéologique dans la région Provence – Alpes – Côte d'Azur (bassin Rhône – Méditerranée). Rapport final. Rapport BRGM/RP-61846-FR, 129 p., 10 ill., 4 ann.

Nicod J. (2010) – Barrages de tufs calcaires et cascades dans le Centre-Var : rapport avec les eaux des sources karstiques, historique et déclin actuel, Physio-Géo [En ligne], Volume 4 | 2010, mis en ligne le 09 mars 2010, Consulté le 08 décembre 2015. URL : <http://physio-geo.revues.org/1100> ; DOI : 10.4000/physio-geo.1100.

Gouvernet C. (1969) - Enquête Hydrogéologique Faculté des Sciences de Marseille pour le Service du Génie Rural des Eaux et Forêts et le SIAE d'Entraigues, septembre 1969.

DDA du Var (1971) - Note hydrogéologique sur les travaux de reconnaissance et de captage (superficiel). Rapport pour le SIAE Entraigues. Sondages de reconnaissance et de captage, observation hydrologiques et essais de pompage, avril 1971.

DDAF du Var (1990) - Conclusion des essais de pompage de F5 et F6. Courrier Géologue Départemental du 24 avril 1990 au SIAE Entraigues.

DDAF du Var (1992) - Rapport du Géologue Départemental sur les potentialités des captages pour le SIAE Entraigues - Mars 1992, 10p.

X (1992) - Délimitation des périmètres de captage. Rapport Hydrogéologue agréé en matière d'eau d'hygiène publique, juin 1992

DDA du Var (1971) - Observations hydrogéologiques des variations des niveaux d'eau au captage de Vidauban et dans les sondages de reconnaissance. Rapport pour le SIAE Entraigues, février 1971.

DDA du Var (1971) - Analyses physico-chimique des eaux du captage de Vidauban, de l'Argens en amont de la source et du forage n°7 (gîte profond) réalisées pour le SIAE Entraigues, février 1971.

DDA du Var (1971) - Essais de pompage sur les forages d'exploitation (F6 et F9) réalisés pour le SIAE Entraigues, février 1971.

DDA du Var (1970) - Implantation des forages de reconnaissance (carte de localisation, coupes lithologiques (sondages 1 à 8), réalisée pour le SIAE Entraigues, octobre à décembre 1970.

DDAF du Var (1983) - Forages d'exploitation profonds – coupes, essais de pompage et analyses réalisés pour le SIAE Entraigues, 1983

DDAF du Var (1999) - Note de synthèse sur l'exploitation de la source d'Entraigues rédigée pour le SIAE Entraigues, octobre 1999

Gouvernet C. (1969) - Projet de captage – enquête hydrogéologique réalisée pour le SIAE Entraigues réalisée pour le SIAE Entraigues, août 1969, 12 p.

Gouvernet C. (1971) - Projet de captage – Rapport complémentaire concernant les modalités de captage des eaux souterraines et les mesures de protection à envisager, rédigé pour le SIAE Entraigues, mai 1971.

Boniface Frères Forages (2000) – Commune de Vidauban, réalisation de deux forages d'exploitation. SA Boniface Frères Forages, 17 p.

Bourdet D., 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.

Campredon, R. (1992) – Département du Var, commune de Vidauban. Délimitation des périmètres de protection des points d'eau destinés à l'alimentation en eau potable. Syndicat intercommunal des eaux de la source d'Entraigues (dans synthèse des documents concernant les captages et les forages profonds du SIAE de la source d'Entraigues). 3 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.

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

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

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

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

Riou Consultants SARL (2008) – Syndicat intercommunal d'adduction des eaux de la source d'Entraigues. Création d'un troisième forage profond de secours sur le site de l'usine d'Entraigues. Rapport de fin de travaux (forage F6). Dans synthèse des documents concernant les captages et les forages profonds du SIAE de la source d'Entraigues. Riou Consultants SARL. 12 p.

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

Shlumberger (2002) – Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

Thiéry D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA. Version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM BRGM/RP-62797-FR, 137 p., 35 fig., 2 ann.

Vernoux J.F., Wuillemier A., Seguin J.J., Dörfliger N. (2007) – Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées dans le Bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM RP-55332-FR, 128 p., 125 ill., 8 ann.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2006) - Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A Guidebook, STI/PUB/1238, 277 pp.

OFEV (2002) - Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie, guide pratique. Groupe de travail Traçage de la Société suisse d'hydrogéologie SSH, Office fédéral des eaux et de la géologie, OFEG, Berne, 2002, 53pp.

Wilson, G.B. et McNeill G.W. (1997) - Noble gas recharge temperatures and the excess air component, Applied Geochemistry, Volume 12, Issue 6, November 1997, Pages 747-762, ISSN 0883-2927, [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(97\)00035-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00035-8).

Annexe 1

Données hydroclimatiques issues du modèle SAFRAN

Cumul P (mm)												
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
1958								15.32	72.96	85.45	104.82	255.19
1959	3.26	43.87	77.12	82.20	97.54	39.85	2.78	36.29	84.40	180.79	205.62	265.94
1960	66.42	96.97	198.89	70.35	25.58	43.19	9.20	80.75	195.47	292.41	178.51	162.28
1961	55.10	17.86	0.10	121.00	95.92	61.62	17.10	1.88	107.13	190.69	270.35	39.96
1962	44.54	97.02	60.41	34.10	32.13	39.56	7.03	0.68	40.47	82.27	162.17	56.79
1963	80.25	84.26	41.21	138.13	23.18	90.10	17.96	49.67	160.30	80.40	174.66	87.65
1964	53.24	138.02	92.61	72.73	28.10	38.89	5.59	7.23	47.31	81.76	35.46	67.92
1965	66.89	24.97	105.05	16.90	17.39	42.45	41.53	93.76	131.39	59.98	73.30	85.54
1966	44.98	173.98	4.80	89.90	30.53	50.92	18.19	28.31	83.25	157.07	171.35	32.78
1967	15.88	44.45	19.97	19.06	27.23	25.23	1.59	14.21	52.28	18.46	103.99	18.63
1968	3.28	153.93	23.41	66.07	84.89	47.81	1.06	40.18	146.70	67.88	105.22	64.84
1969	115.79	106.05	129.06	24.09	71.89	34.81	34.01	46.80	97.81	7.22	122.38	98.00
1970	153.57	30.56	78.16	9.62	44.79	37.31	0.47	12.86	6.31	110.68	94.46	124.77
1971	96.80	24.29	94.84	160.72	140.82	28.20	4.88	18.44	29.12	3.29	178.50	76.38
1972	93.76	261.10	108.53	70.52	46.59	98.48	23.52	23.08	78.91	202.68	28.87	138.06
1973	85.67	51.31	33.59	39.31	16.36	31.55	63.95	44.93	54.16	123.89	18.19	209.02
1974	145.48	233.02	88.54	105.52	121.43	14.31	2.21	30.78	140.28	14.91	54.11	34.09
1975	62.23	137.03	160.46	50.30	84.02	45.80	7.78	56.54	102.94	43.34	146.54	75.82
1976	50.74	63.61	73.83	100.47	52.91	20.07	152.81	118.49	118.55	366.34	98.26	102.92
1977	178.98	86.25	67.09	33.70	154.70	38.25	49.31	134.48	2.78	58.93	71.18	164.07
1978	270.68	123.13	118.76	82.16	75.17	23.90	7.55	40.73	17.15	16.32	19.66	84.83
1979	141.66	98.09	105.07	58.59	13.79	19.07	9.47	4.93	57.70	387.40	60.36	114.19
1980	61.66	0.32	94.87	49.40	135.07	39.19	14.98	120.33	6.41	86.50	84.28	0.12
1981	24.52	30.46	84.37	122.07	46.45	40.38	32.42	11.10	68.79	47.23	0.00	234.56
1982	22.17	26.67	29.05	46.67	13.88	30.74	3.09	32.85	23.59	125.52	184.34	14.37
1983	0.00	87.13	92.70	59.79	25.50	67.92	5.48	122.91	2.10	125.90	8.80	176.80
1984	40.62	46.99	110.90	19.05	251.08	88.94	0.00	144.38	34.19	154.14	187.67	74.70
1985	92.45	44.63	115.22	12.64	175.87	14.10	5.71	7.69	1.32	21.86	53.85	99.12
1986	183.17	77.88	28.24	138.93	15.11	11.77	24.22	47.39	58.21	22.82	106.51	47.05
1987	106.00	78.44	18.55	70.49	31.98	19.87	83.21	85.68	38.07	263.07	83.46	79.92
1988	114.11	10.78	67.69	70.96	119.66	85.92	0.40	0.60	23.25	178.16	18.60	37.85
1989	11.74	60.11	6.83	132.58	32.61	10.93	16.97	7.36	55.26	29.57	120.04	26.49
1990	30.47	11.67	10.91	102.06	74.19	22.38	16.35	41.27	15.96	188.31	79.02	82.46
1991	16.22	52.24	104.30	74.80	49.17	29.85	2.10	9.56	188.46	112.01	58.57	0.00
1992	30.91	21.50	71.40	19.28	48.49	139.81	34.46	34.62	140.25	194.23	65.31	39.88
1993	2.07	26.85	38.34	229.58	55.67	21.34	31.32	25.13	202.34	237.31	80.20	12.99
1994	195.33	133.27	7.76	70.09	65.31	58.22	19.05	25.18	236.17	146.72	165.93	21.71
1995	50.38	54.67	34.68	163.51	69.33	16.18	29.80	75.31	94.65	36.07	118.70	125.58
1996	336.34	33.19	50.22	70.69	48.76	43.95	15.04	49.43	191.74	109.40	197.63	135.58
1997	176.65	2.38	6.11	21.02	13.16	94.95	10.78	103.01	8.45	22.19	161.23	123.40
1998	48.05	11.24	8.27	140.37	105.95	25.60	0.59	74.29	131.95	70.07	18.54	51.28
1999	103.45	0.93	94.42	75.95	66.46	10.29	35.12	23.98	135.58	230.04	96.46	18.70
2000	6.15	3.92	49.47	120.39	13.78	109.99	33.48	14.39	116.50	138.88	266.49	139.75
2001	94.64	90.26	75.95	44.55	115.43	8.05	20.99	3.00	37.08	44.02	43.46	2.37
2002	41.75	86.75	44.52	62.82	143.25	61.56	63.42	90.48	73.03	122.21	289.39	82.85
2003	65.65	18.81	10.55	104.29	33.79	6.76	2.53	5.84	49.48	128.29	83.21	124.73
2004	25.07	46.14	15.56	63.95	33.87	7.67	4.85	24.04	55.55	159.86	33.27	102.04
2005	7.99	2.40	50.40	59.54	51.23	28.12	3.37	56.04	181.56	90.40	62.72	69.11
2006	91.22	43.50	24.14	20.49	11.64	5.15	24.42	21.88	128.29	46.76	33.70	139.62
2007	21.39	26.98	28.27	18.07	115.74	61.46	1.78	17.58	5.75	29.55	84.72	25.94
2008	135.14	42.59	36.35	100.43	94.99	99.56	7.58	16.30	59.94	120.24	199.88	201.94
2009	82.97	81.46	83.95	117.04	63.94	17.76	8.37	19.44	94.68	86.20	61.46	130.80
2010	93.51	88.44	52.72	34.10	106.98	309.09	0.12	28.26	50.63	173.31	147.61	122.31
2011	32.42	88.21	124.58	50.52	10.28	79.60	49.39	27.03	25.71	85.63	354.77	14.67
2012	40.59	5.23	4.66	155.45	99.34	5.67	8.13	12.18	69.48	206.45	189.43	76.44
2013	105.73	46.92	159.13	88.45	153.37	15.94	49.36	9.33	70.18	51.64	61.28	194.58
2014	248.75	157.54	41.96	6.68	34.10	85.27	51.25					

Cumul ETP (mm)												
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
1958								162.28	93.28	73.24	27.85	31.12
1959	55.38	39.10	49.50	74.12	96.52	139.89	179.95	129.80	70.77	56.39	34.28	44.81
1960	33.99	40.19	63.74	73.30	117.01	139.68	165.62	154.38	91.14	61.02	44.11	33.23
1961	28.42	60.70	77.47	85.99	116.84	138.26	181.93	171.93	108.50	56.30	37.99	41.74
1962	44.48	51.01	67.84	96.74	122.57	133.58	195.38	178.25	113.61	60.13	36.80	51.07
1963	30.09	34.86	60.24	76.31	124.52	129.22	162.63	152.62	77.37	61.39	38.10	26.70
1964	25.82	32.40	59.51	91.40	130.90	136.67	176.45	158.35	104.42	60.94	44.98	29.55
1965	41.57	40.44	65.86	111.49	130.47	151.72	185.86	142.15	80.59	49.41	56.52	48.44
1966	39.07	39.38	85.02	74.64	120.14	151.82	178.46	143.49	98.13	52.02	45.85	57.76
1967	41.02	48.19	88.00	94.05	124.55	134.17	170.44	148.27	99.55	68.92	40.26	44.10
1968	68.78	22.92	70.64	85.04	101.95	117.39	176.21	132.45	90.05	52.26	31.98	40.52
1969	28.01	38.61	46.45	104.05	107.33	128.07	165.25	153.13	77.78	66.35	42.95	46.16
1970	24.67	72.34	67.33	117.88	118.29	140.62	195.63	147.11	111.54	79.28	45.67	32.99
1971	32.29	51.47	57.31	78.00	89.41	150.65	160.98	158.88	85.67	58.93	35.02	29.05
1972	26.18	39.27	57.46	79.07	111.18	109.30	145.86	127.00	63.73	50.10	41.32	20.11
1973	28.31	43.29	57.90	86.83	100.52	137.91	163.55	127.42	94.50	59.96	47.88	40.52
1974	24.84	32.37	53.86	65.72	116.18	142.87	157.94	161.52	97.77	71.66	41.35	48.48
1975	32.65	34.96	55.72	92.19	95.34	136.42	179.28	120.33	73.36	56.28	23.89	18.46
1976	50.31	36.70	49.00	59.73	116.07	127.20	138.56	111.54	74.59	42.29	32.18	30.51
1977	24.17	42.26	55.37	93.16	80.44	115.53	154.54	108.38	78.75	50.37	58.50	26.30
1978	31.26	33.35	64.53	56.15	94.75	123.16	159.80	135.66	111.84	56.85	34.98	28.42
1979	34.43	28.49	58.18	76.84	121.00	134.91	158.19	151.08	84.81	39.02	52.13	42.50
1980	30.54	49.68	63.66	88.26	75.64	140.36	161.85	144.14	97.03	63.54	31.46	50.36
1981	59.00	32.93	53.80	66.60	102.06	141.62	151.28	132.00	82.39	74.76	45.78	45.45
1982	41.60	31.34	68.76	77.70	109.13	142.44	168.18	140.35	94.47	54.07	34.14	33.57
1983	52.42	42.80	62.00	70.32	101.25	118.42	171.70	120.33	104.33	60.62	40.64	31.58
1984	46.14	39.14	56.66	90.76	76.71	129.79	179.56	116.73	96.33	47.49	40.86	22.85
1985	28.13	26.90	55.91	103.59	84.05	153.92	177.59	168.97	116.76	59.49	43.00	23.02
1986	62.79	40.45	71.58	71.55	120.55	146.10	158.60	163.20	88.13	77.76	40.00	49.43
1987	42.01	37.22	63.71	90.99	122.51	146.91	152.61	150.23	103.90	48.36	41.77	26.98
1988	38.35	56.12	97.41	59.28	82.44	109.43	179.05	154.62	105.24	52.10	38.37	42.02
1989	23.48	35.95	76.52	72.31	122.91	157.49	169.78	159.99	89.85	71.15	39.95	24.51
1990	24.52	56.42	70.58	86.55	107.48	148.57	178.83	145.60	112.52	50.02	39.75	28.37
1991	35.62	39.62	55.50	88.96	108.09	150.55	193.22	160.81	89.91	54.07	42.25	47.27
1992	26.76	46.29	73.80	84.67	108.38	104.04	154.53	167.54	111.08	50.06	47.04	26.30
1993	34.37	45.48	60.35	79.68	112.10	160.31	181.01	168.07	100.63	44.82	31.61	53.59
1994	47.92	37.98	85.94	89.03	122.23	151.82	184.17	181.51	87.56	54.38	34.01	30.37
1995	53.46	43.83	92.28	75.11	107.06	138.23	171.03	124.29	93.12	55.43	41.84	22.63
1996	17.64	42.85	54.81	65.62	118.25	137.22	157.64	129.20	82.73	61.30	42.03	27.87
1997	27.68	55.86	89.65	106.99	123.57	118.82	165.89	129.79	99.88	72.85	34.06	40.51
1998	41.31	49.53	84.24	79.90	115.42	146.68	200.66	155.87	105.49	72.98	44.63	35.64
1999	46.48	67.09	67.62	85.83	124.48	157.94	179.95	142.01	90.36	57.53	40.39	46.47
2000	40.56	61.48	73.29	83.23	143.95	158.08	188.60	141.96	112.49	55.47	34.57	35.24
2001	24.82	51.61	71.48	112.17	101.96	181.14	182.53	180.35	128.92	68.07	51.48	49.64
2002	35.78	55.92	83.43	92.36	118.76	161.98	165.20	138.89	83.28	63.75	41.41	29.18
2003	41.23	42.60	67.24	79.94	133.28	168.30	208.26	168.54	105.43	71.38	33.91	38.84
2004	45.20	43.47	70.50	85.80	105.88	162.44	188.11	159.75	113.48	47.28	37.82	34.75
2005	48.65	54.75	69.26	89.96	148.70	159.22	214.24	163.02	80.63	54.62	37.80	35.27
2006	30.74	38.98	81.01	105.80	155.47	160.38	187.45	192.97	94.30	68.33	46.98	27.26
2007	46.64	46.41	76.14	96.04	132.26	149.66	221.69	156.79	119.87	61.36	54.34	42.84
2008	37.12	42.29	94.83	96.36	100.76	141.71	182.44	168.55	96.41	63.03	32.59	30.46
2009	28.13	45.50	79.10	75.01	124.19	161.65	209.95	178.13	106.53	67.65	47.66	40.33
2010	30.67	42.23	67.56	85.33	120.57	142.34	197.62	174.61	103.06	64.45	40.12	30.37
2011	29.91	37.83	56.45	105.61	146.18	159.77	173.34	174.66	116.97	81.50	37.38	58.89
2012	54.97	44.54	90.81	86.66	126.71	179.02	214.48	180.41	99.87	69.27	32.94	54.17
2013	45.12	45.09	60.10	82.50	124.72	152.75	171.47	176.08	118.33	58.92	55.23	28.03
2014	32.62	35.66	72.43	96.49	140.60	139.12	169.61					

Annexe 2

Illustration de l'installation du matériel sur les ouvrages des champs captants du SIAE et de Vidauban

INSTALLATION DE MATERIEL SUR LES C.C. DU SIAE ET DE VIDAUBAN

Captages de Vidauban



Bras mort





F2 (V2)
N43,42421°
E006,38223°

Sonde Diver DI502- 50 m de câble 2 bars
SN P8285
Installé à 20 m de profondeur environ
NS : 4.19 m / Margelle le 29/1/14 17h00



F1 (V1)
N43,42435°
E006,38223°



Vue vers SIAE



F3 (V3)
N43,42447°
E006,38219°

Sonde Diver DI502-50 m de câble, 2bars
SN P8318
installé à 20 m de profondeur environ
Niveau piézo : 5.49 m / Margelle
(29/1/14 17h20)

b.ladouche@brgm.fr <http://www.brgm.fr/>

INSTALLATION DE MATERIEL SUR LES C.C. DU SIAE ET DE VIDAUBAN

Captage de la source (Vidauban)



Vues intérieure et extérieure de la source





Systèmes de pompage de la source







Source Entraigues
Ecolog 800 50 m de câble, 0.4bar
installé à 1.527 m sous le niveau d'eau, soit $1.527+2.93= 4,46$ m de profondeur par rapport au repère (barre métallique horizontale)
C= 1.077 mS/cm
T = 15.51 °C => contrôle WTW C=1074 µS/cm, T = 15.5 °C

b.ladouche@brgm.fr  <http://www.brgm.fr/>

Installation du matériel dans le champ captant de Vidauban le 28/01/2014

INSTALLATION DE MATERIEL SUR LES C.C. DU SIAE ET DE VIDAUBAN

Captages du SIAE



Piézo inconnu (F8)
 N43,42460°
 E006,38209°
 Fond à 18.70 m
 Niveau piézo : 12.72 m/So
 (29/01/14 15h30)

Forage secours
 F1
 N43,42453°
 E006,38202°
 Mesure piézo impossible

Forage secours
 F2
 N43,42458°
 E006,38205°
 Mesure piézo impossible

Forage secours
 F3
 N43,42462°
 E006,38203°
 Niveau piézo : 12.50 m / Margelle verte
 (29/01/14 15h30)


<http://www.brgm.fr/>

b.ladouche@brgm.fr

INSTALLATION DE MATERIEL SUR LES C.C. DU SIAE ET DE VIDAUBAN

Captages du SIAE



Piézo inconnu (nommé F8)
 Niveau piézo inconnu
 N43,42460°
 E006,38209°

**N43,42481°
 E006,38203°**

Piézo F7 bouché

**Vue vers l'amont
 (bras mort)**


<http://www.brgm.fr/>

b.ladouche@brgm.fr

Installation du matériel dans le champ captant du SIAE le 29/01/2014

INSTALLATION DE MATERIEL SUR LES C.C. DU SIAE ET DE VIDAUBAN

Captages du SIAE



Piézo inconnu (nommé F8)
Niveau piézo inconnu



F8
Niveau piézo : 12,72 m /repère tube le 29/01/14 (15h30)
Niveau piézo : 11,96 m /repère tube le 30/01/14 (15h30)

Installation sonde CTD Van Essen
5 bar, pas d'acquisition : 15 mn

Forage secours



F3
N43,42462°
E006,38203°

Niveau piézo : 12.50 m/Margelle verte (29/01/14 15h30)
Niveau piézo : 11,51 m /Margelle verte : 10,41 m / repère tube (30/01/14 (09h00)

F3 SIAE
Installation sonde Dipper 3 NS: C33004
2 bars, pas d'acquisition 15 mn

b.ladouche@brgm.fr


<http://www.brgm.fr/>

INSTALLATION DE MATERIEL SUR LES C.C. DU SIAE ET DE VIDAUBAN

Détail du barrage en amont des Captages du SIAE



Vue de la rive droite

Vues de la rive gauche



Détail du mur fissuré



Vues du bras mort



b.ladouche@brgm.fr

<http://www.brgm.fr/>

Installation du matériel dans le champ captant du SIAE et sur le barrage

Annexe 3

Coupes techniques et logs géologiques des ouvrages du site d'Entraigues

Coupes techniques et log géologiques :

Forage F1 (tufs) ; puits d'exploitation de secours ;

Forage F2 (tufs) ; puits d'exploitation de secours ;

Forage F3 (tufs) ; puits d'exploitation de secours ;

Forage F4 (Muschelkalk) ; puits d'exploitation ;

Forage F5 (Muschelkalk) ; puits d'exploitation ;

Forage F6 (Muschelkalk) ; puits d'exploitation ;

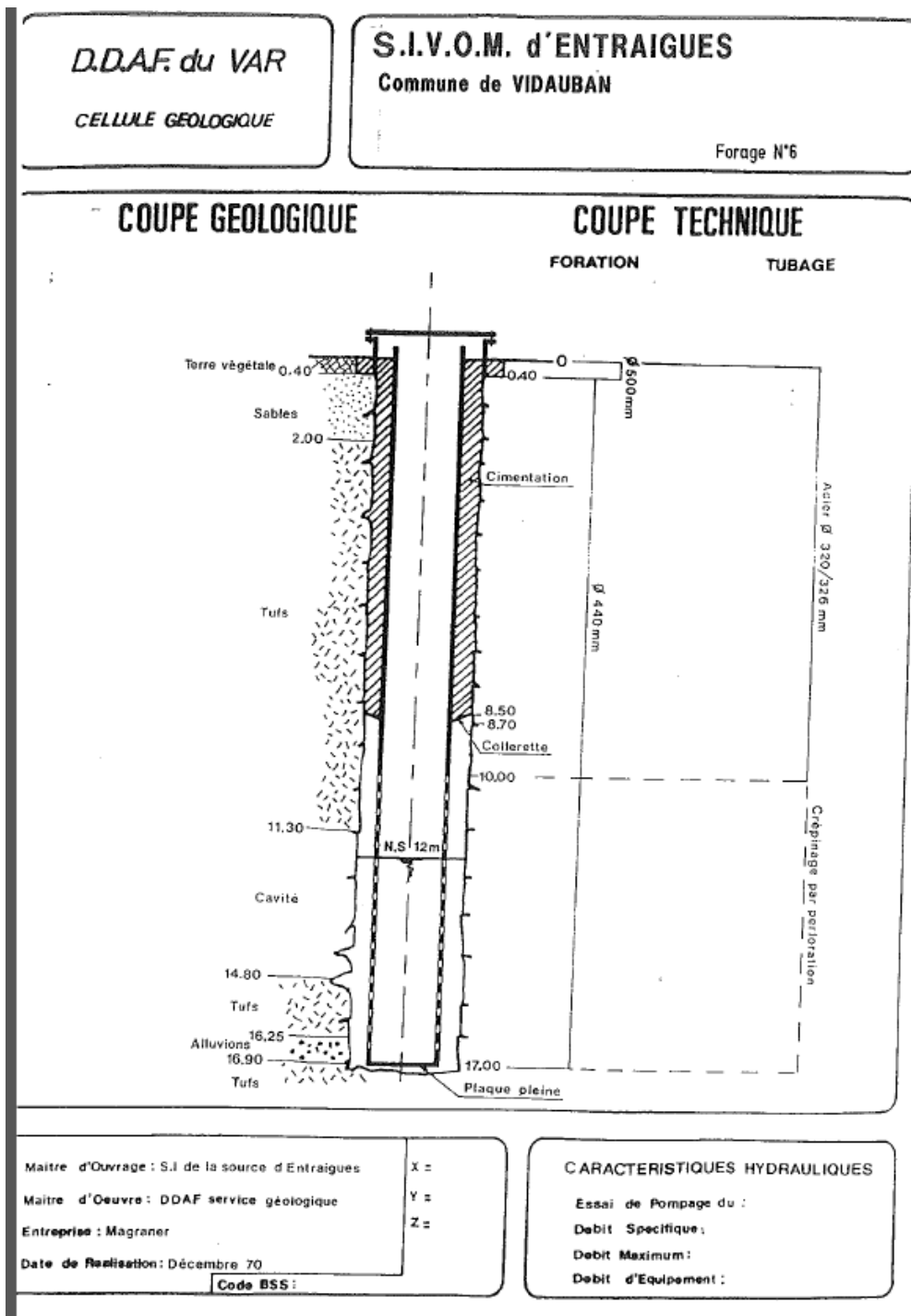
Forage F7 (Muschelkalk) ; piézomètres rebouchés ;

Forage Vidauban 1 [V1] (Muschelkalk) ; puits d'exploitation ;

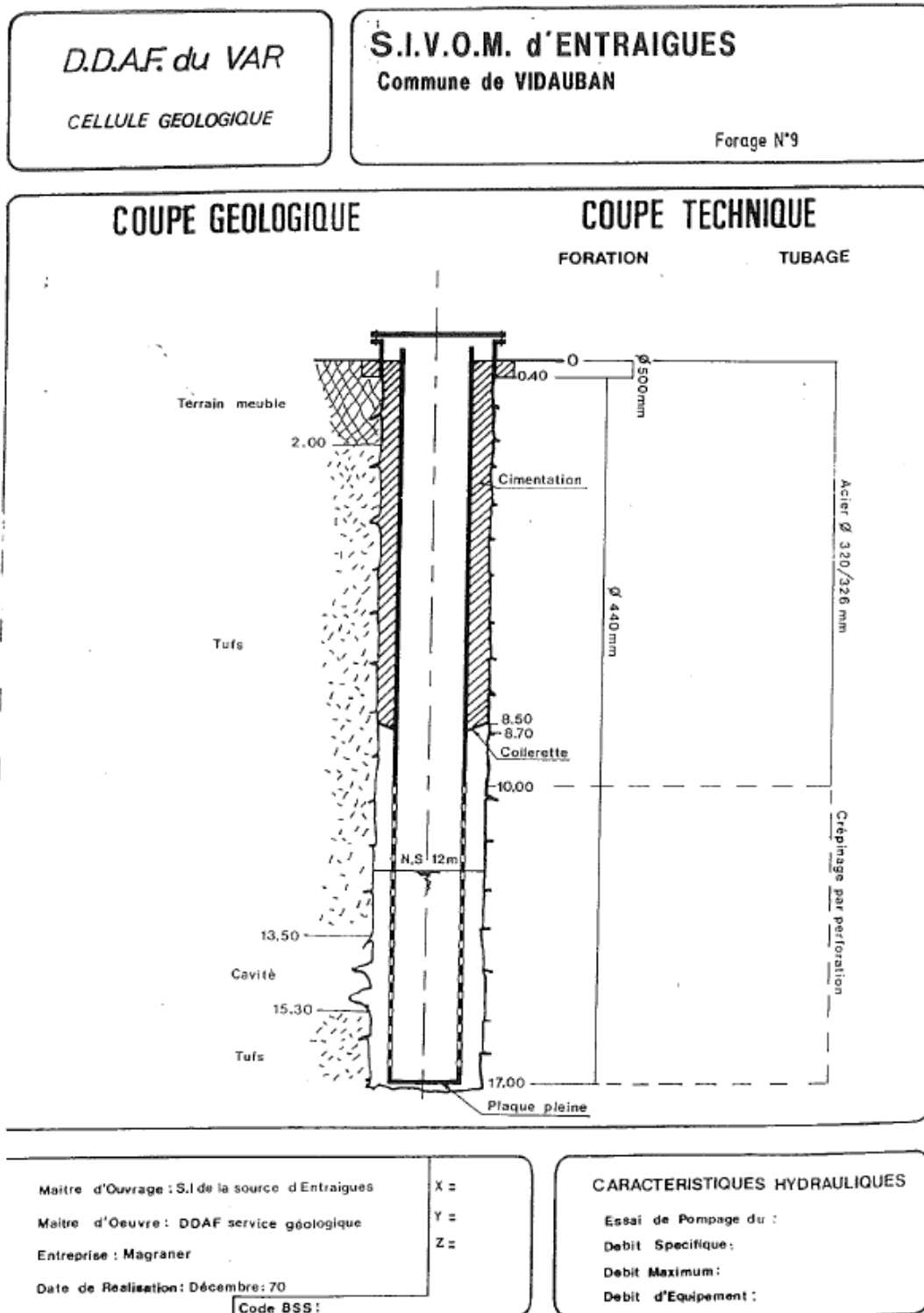
Forage Vidauban 2 [V2] (Muschelkalk) ; puits d'exploitation non-exploité à l'heure actuelle ;

Coupes techniques et log géologiques non communiquées :

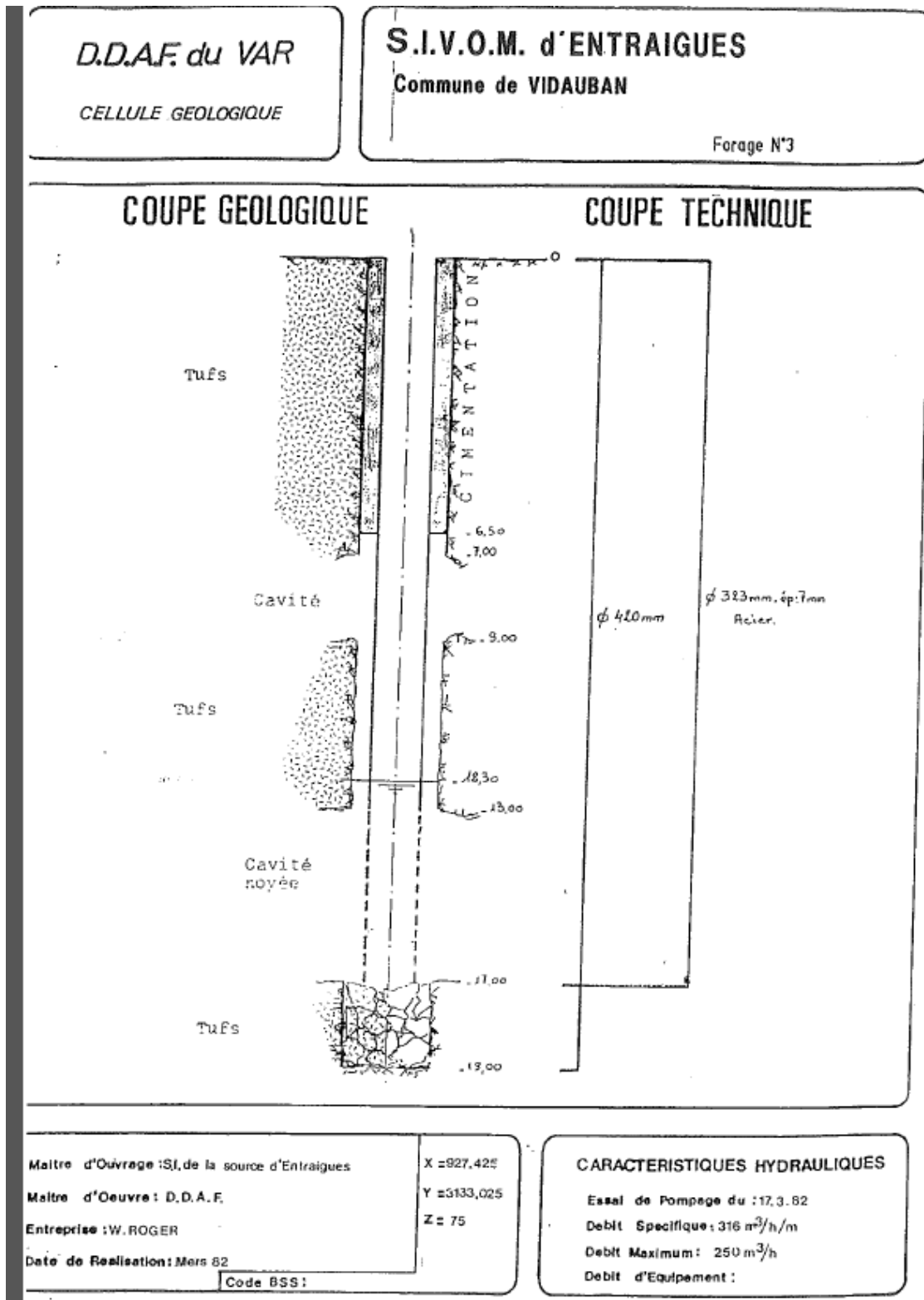
Forage F8 (piézomètre-tufs) et V3 (piézomètre-Muschelkalk)



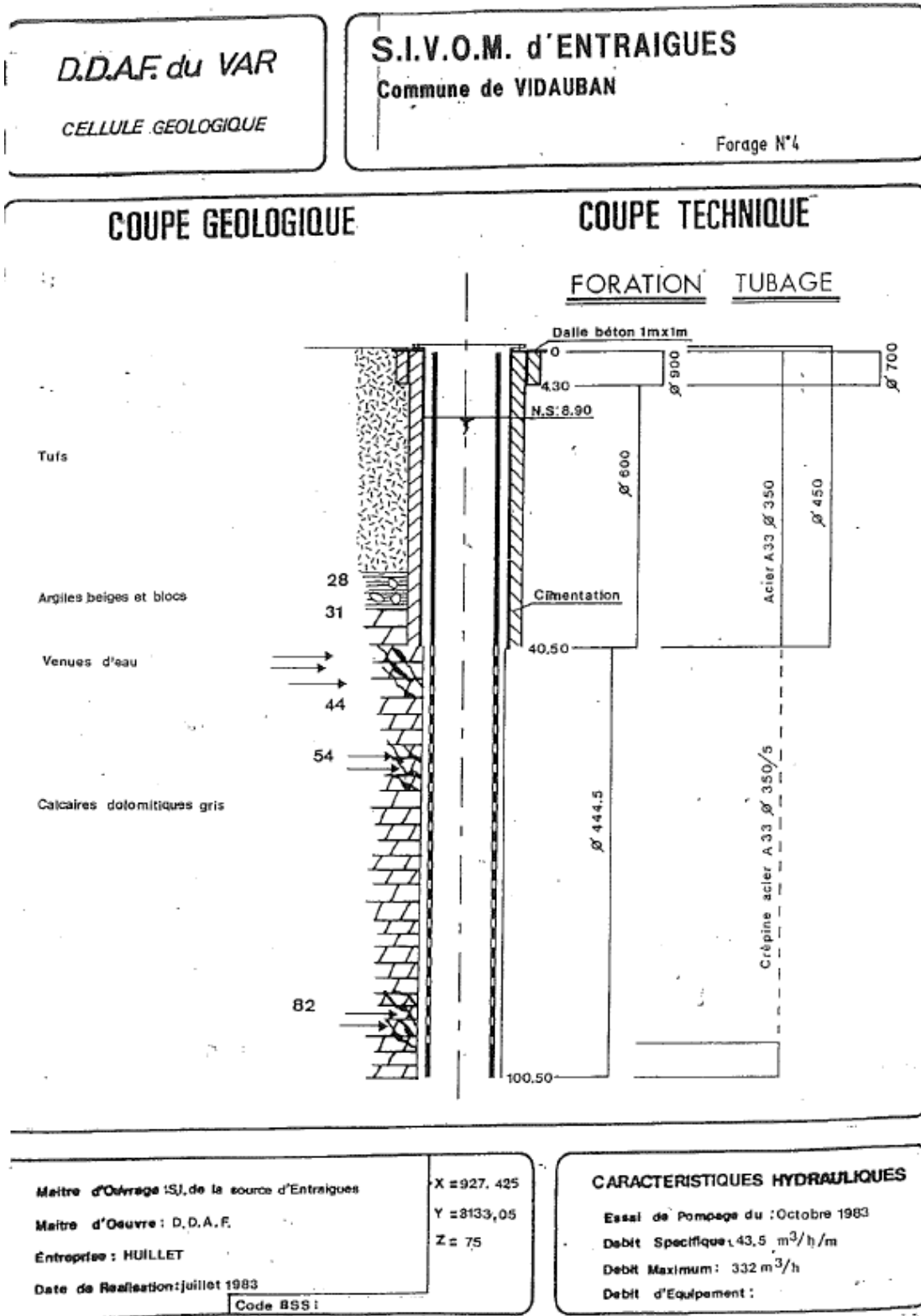
Coupe géologique et technique du forage F1 (Tufs).



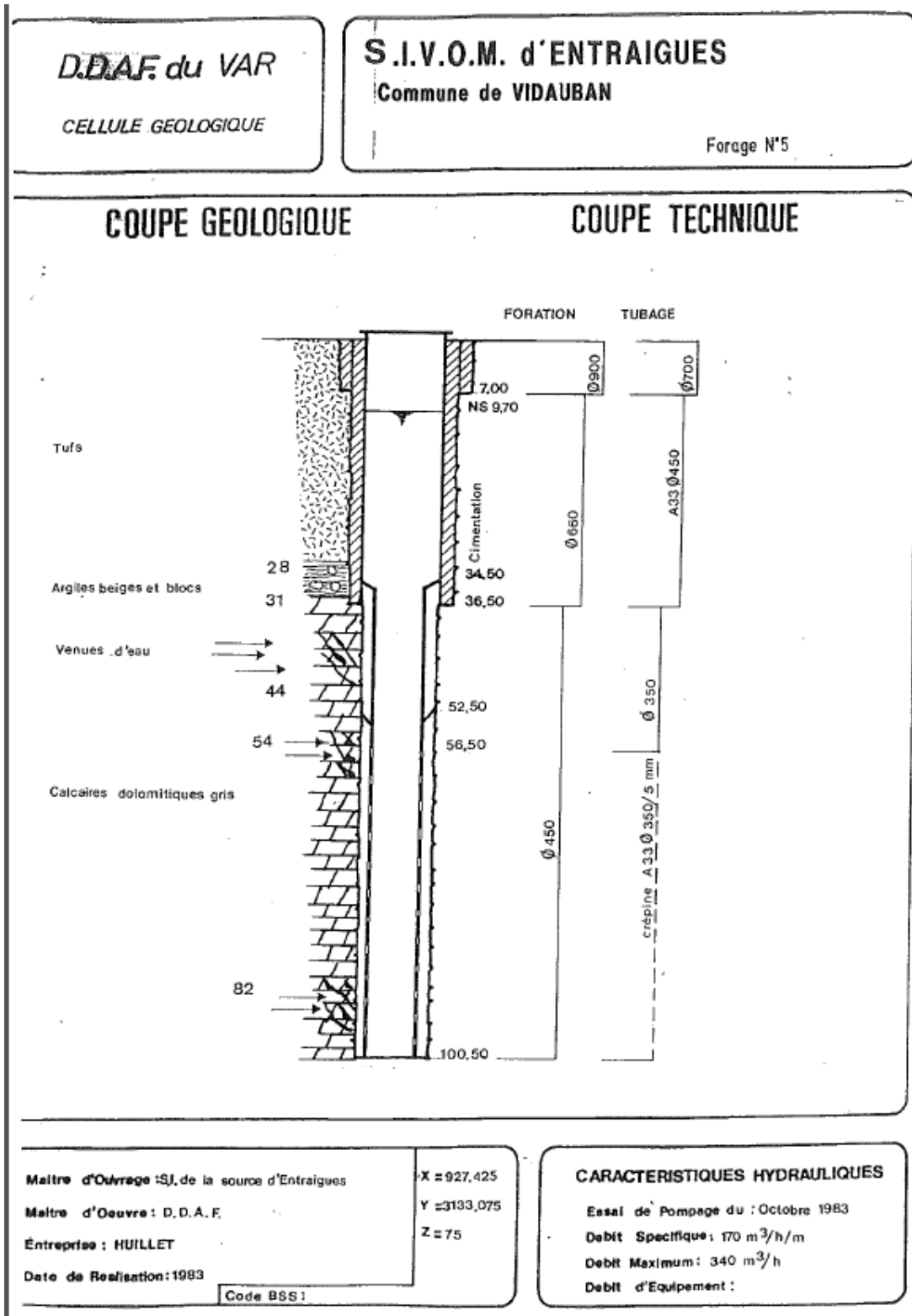
Coupe géologique et technique du forage F2 (Tufs).



Coupe géologique et technique du forage F3 (Tufts).



Coupe géologique et technique du forage F1 (Muschelkalk).



Coupe géologique et technique du forage F5 (Muschelkalk).

Figure 3 Coupe géologique et technique du forage

10237X0272/FS/RC-10



SADE
Centre de Travaux de Tours
BP 90134
37171 CHAMBRAY LES TOURS Cedex

DOSSIER N°10 800 730

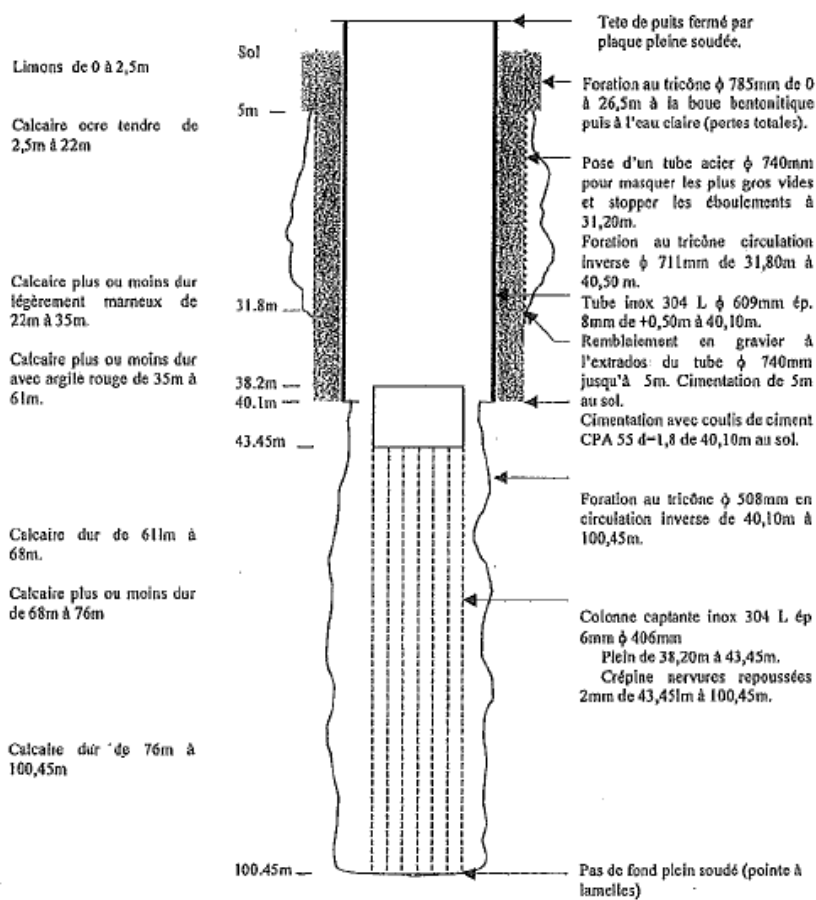
Saint-Avertin, le 16.09.08

Tél. : 02 47 28 25 24
Fax : 02 47 28 26 40

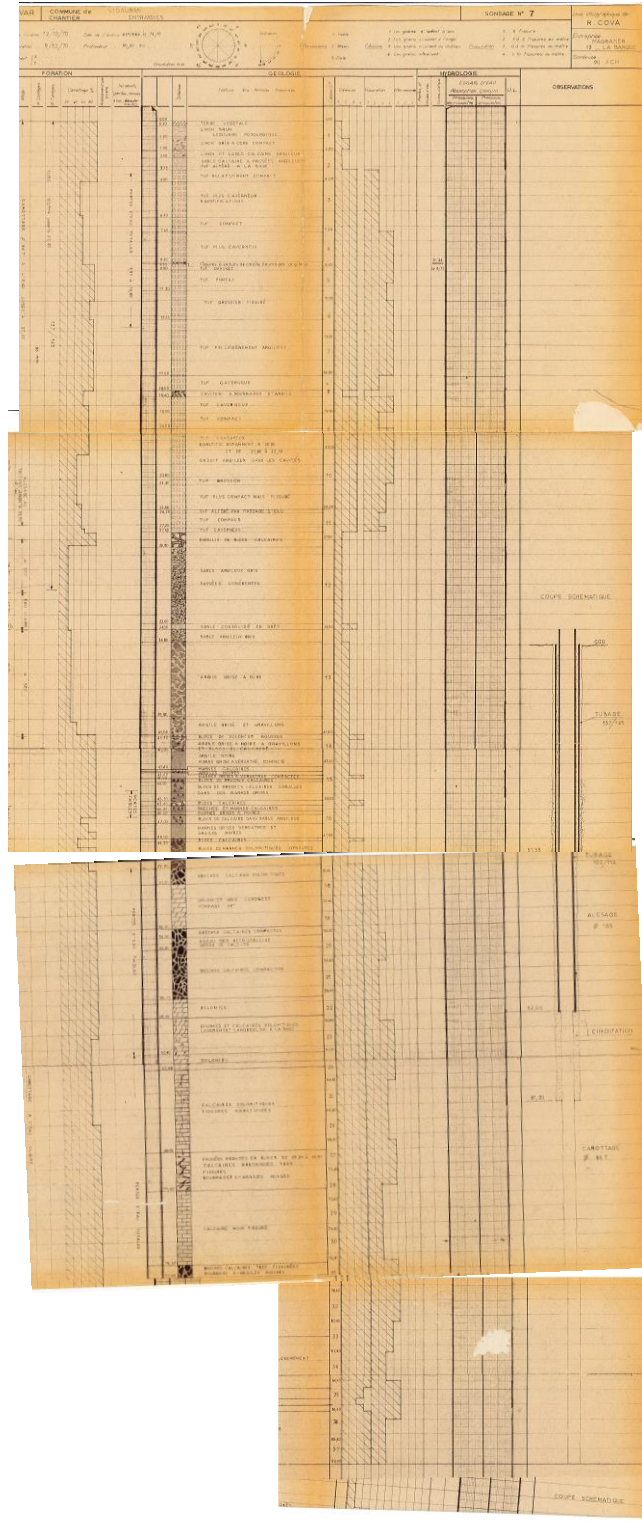
COMMUNE DE VIDAUBAN

SITE DE LA SOURCE D'ENTRAIGUES

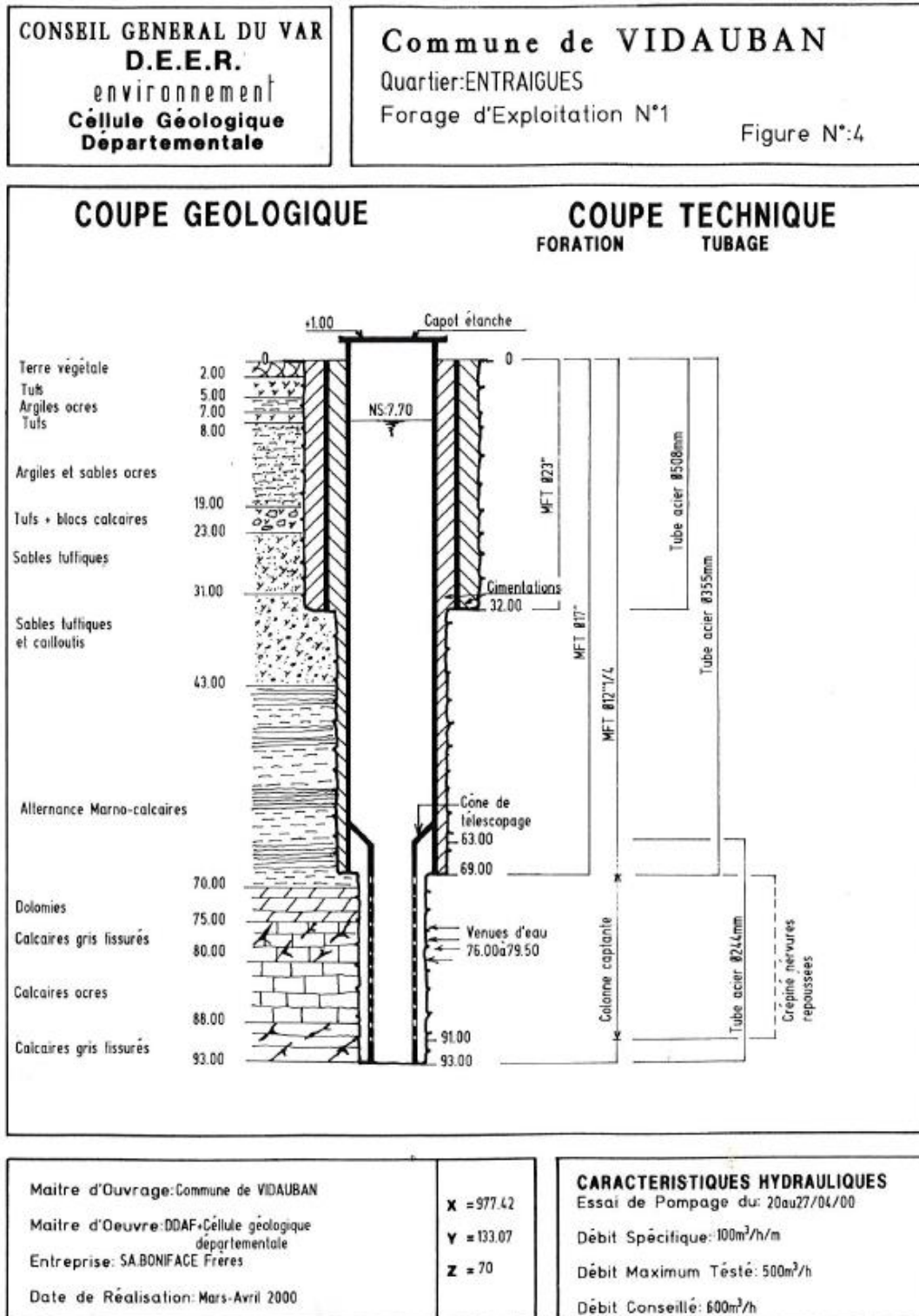
CREATION D'UN TROISIEME FORAGE PROFOND



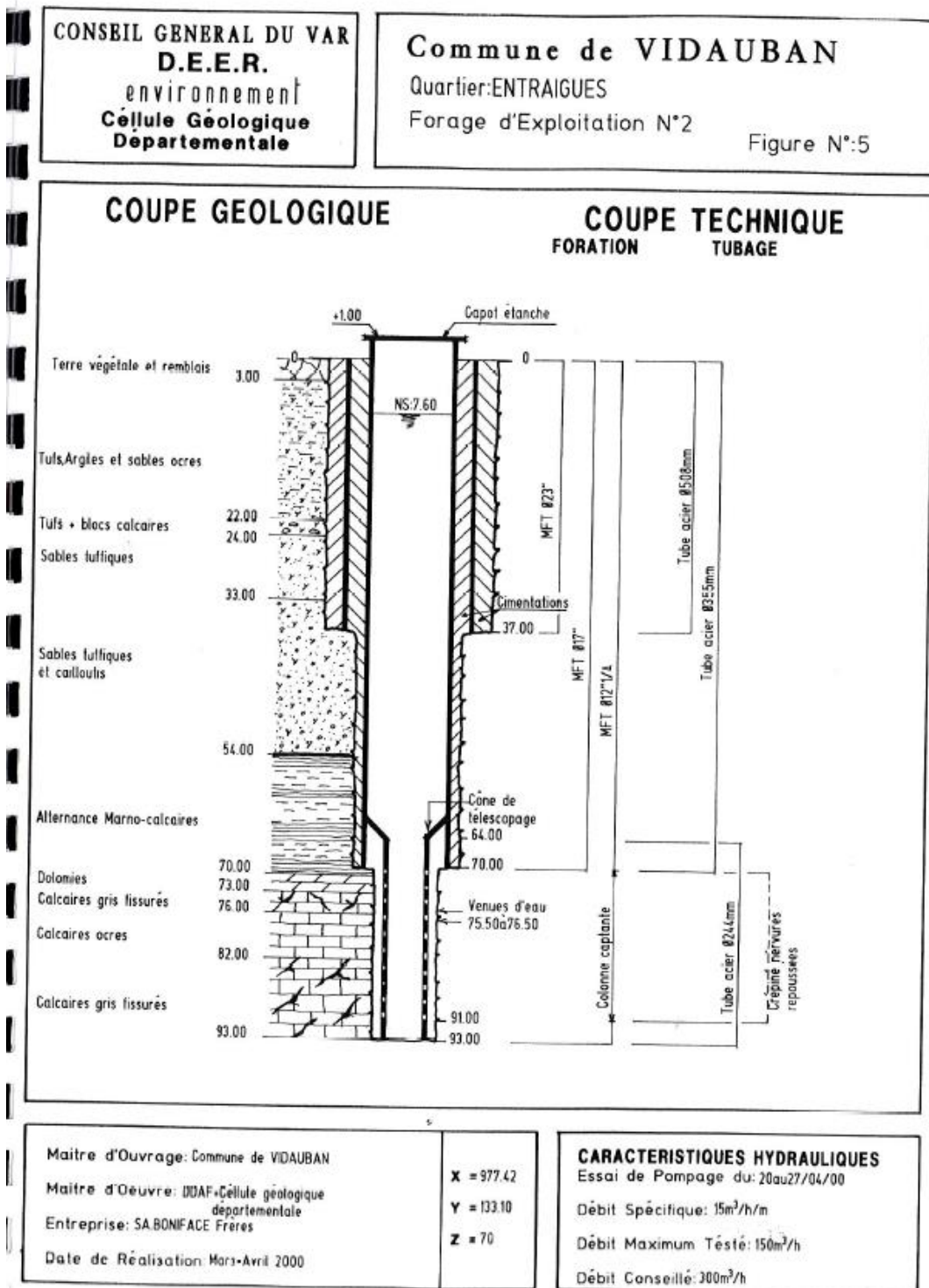
Coupe géologique et technique du forage F6 (Muschelkalk).



Coupe géologique et technique du forage F7 (Muschelkalk).



Coupe géologique et technique du forage Vidauban 1 (Muschelkalk).



Coupe géologique et technique du forage Viduban 2 (Muschelkalk).

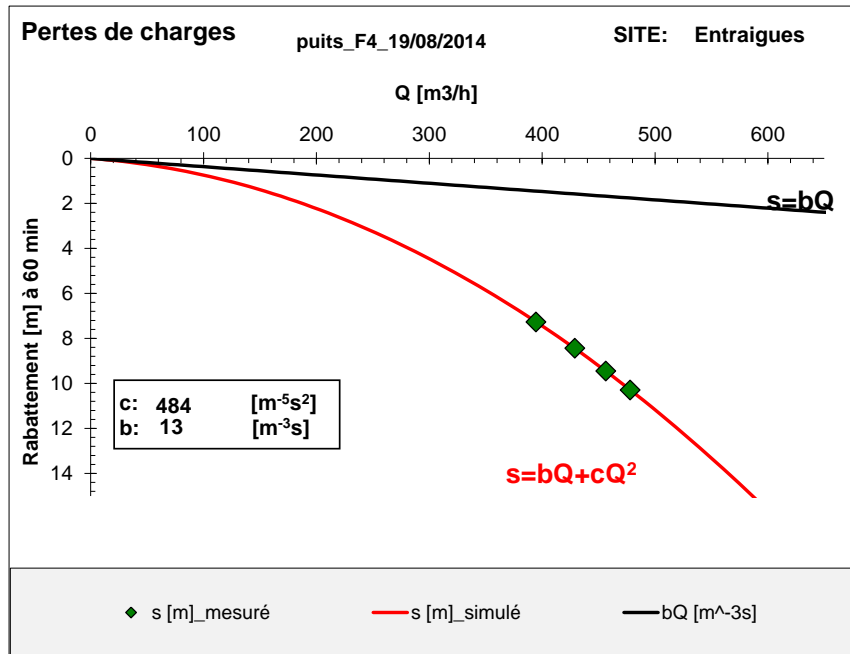
Annexe 4

Interprétation des essais par paliers

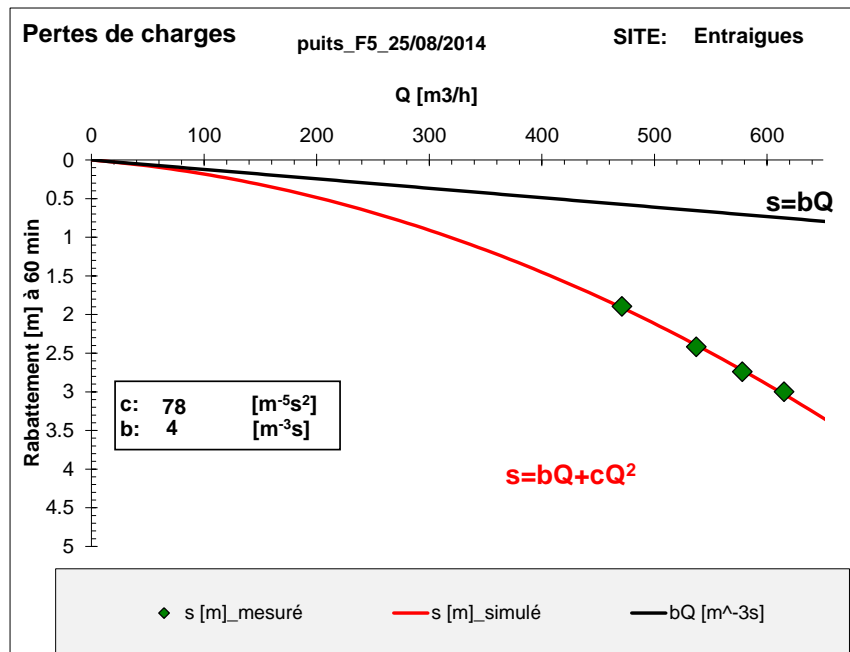
Interprétation de l'essai par paliers de débit sur F4, 19/08/2014 ;

Interprétation de l'essai par paliers de débit sur F5, 25/08/2014 ;

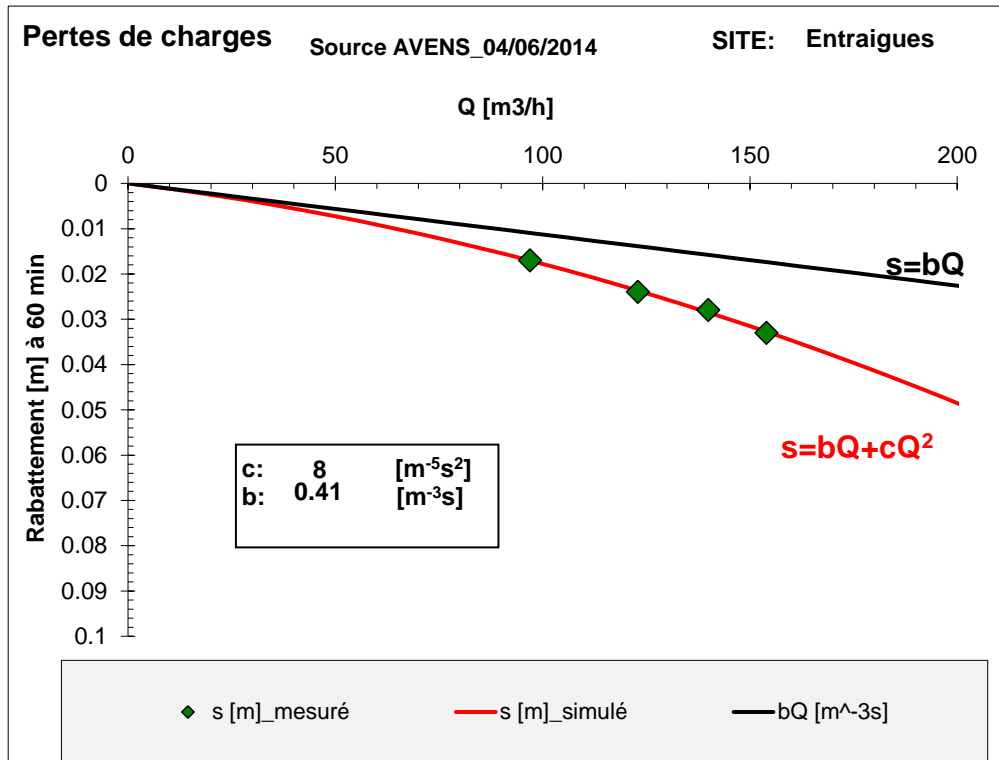
Interprétation de l'essai par paliers de débit sur la source des Avens (source d'Entraigues),
04/06/2014 ;



Interprétation de l'essai par paliers de débit sur F4, 19/08/2014



Interprétation de l'essai par paliers de débit sur F5, 25/08/2014



Interprétation de l'essai par paliers de débit sur la source des Avens (source d'Entraigues), 04/06/2014

Annexe 5

Interprétation des essais par pompage

Modélisation de l'essai sur le forage F5 (SIAE) avec observation sur le puits de pompage et le puits F4 en 1983 ;

Modélisation de l'essai en pompage simultané sur F4 et F5 (SIAE) en 1983 ; observation aux puits de pompage et au piézomètre F7 ;

Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage V1 (Cne de Vidauban) en 2014 ; observation au puits de pompage et aux piézomètres V2 et V3 ;

Modélisation de l'essai sur le forage V2 (Ce Vidauban) en 2000 ;

Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage F6 (SIAE) en 2014 ; observation au puits de pompage et au puits F5.

Modélisation de l'essai sur le forage V2 (Ce Vidauban) en 2000. Modèle : Hantush modifié. Graphe du haut : représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés. Graphe du bas : représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.

Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage F6 (SIAE) en 2014 ; observation au puits de pompage et au puits F5. Modèle : Hantush modifié. Représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.

Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage F6 (SIAE) en 2014 ; observation au puits de pompage et au puits F5. Modèle : Hantush modifié. Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.

Modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hantush modifié version multi-puits. Représentation arithmétiques des rabattements observés et modélisés.

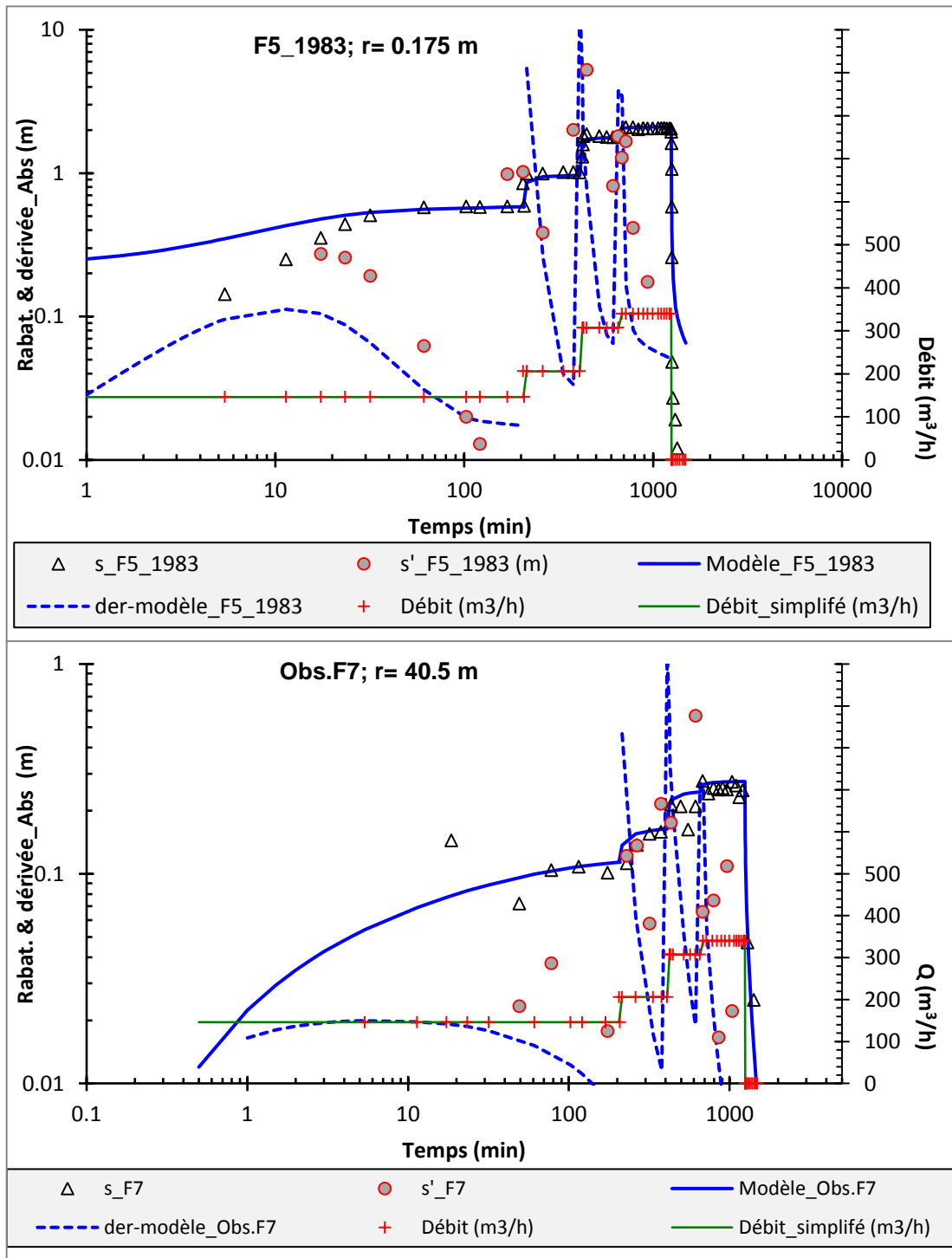
Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hantush modifié version multi-puits.. Les distances au puits et piézomètres (r), ainsi que les distances aux limites (Lim 1 à 4) sont données par rapport au puits V1.

Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hantush modifié version multi-puits.. Les distances au puits et piézomètres (r), ainsi que les distances aux limites (Lim 1 à 4) sont données par rapport au puits V1.

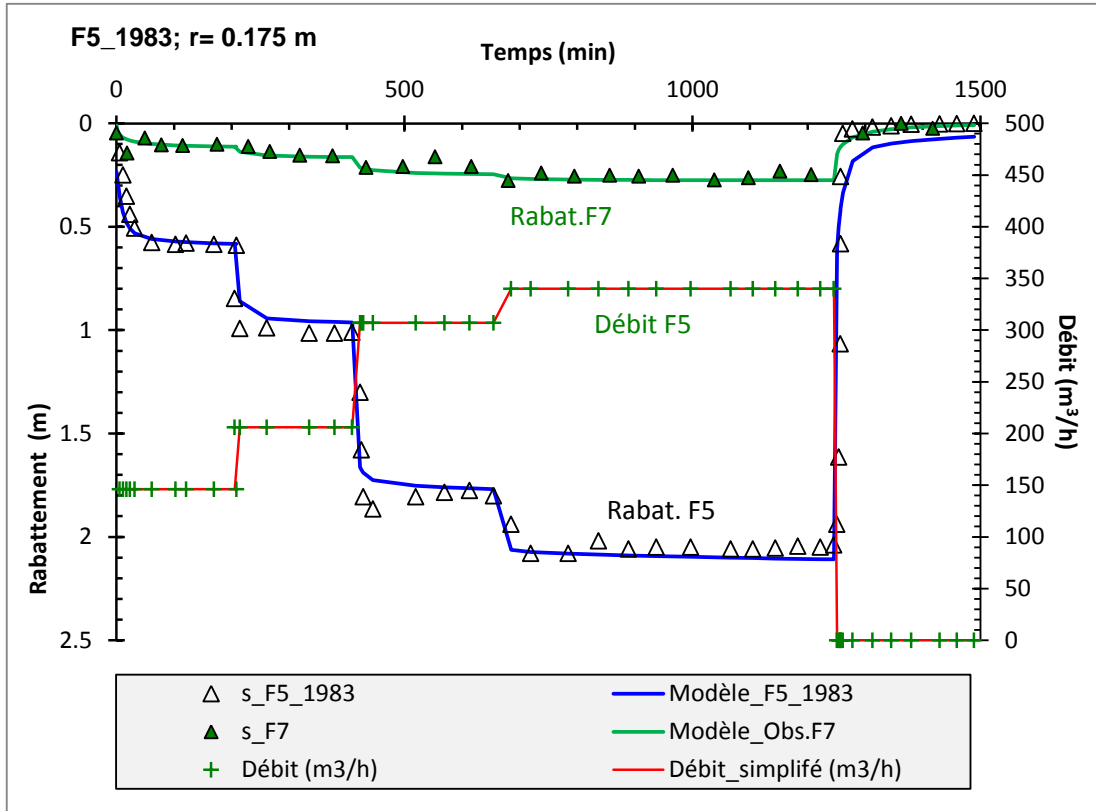
Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur la source. Modèles modifiés de Hunt & Scott (haut) et Hunt 2003 (bas). Dans le cas du modèle modifiés Hunt 2003, F8 dans les tufs est supposé représentatif de la source. – Scénario 2.

Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur l'Argens. Modèle modifié Hunt 2003. – Scénario 1.

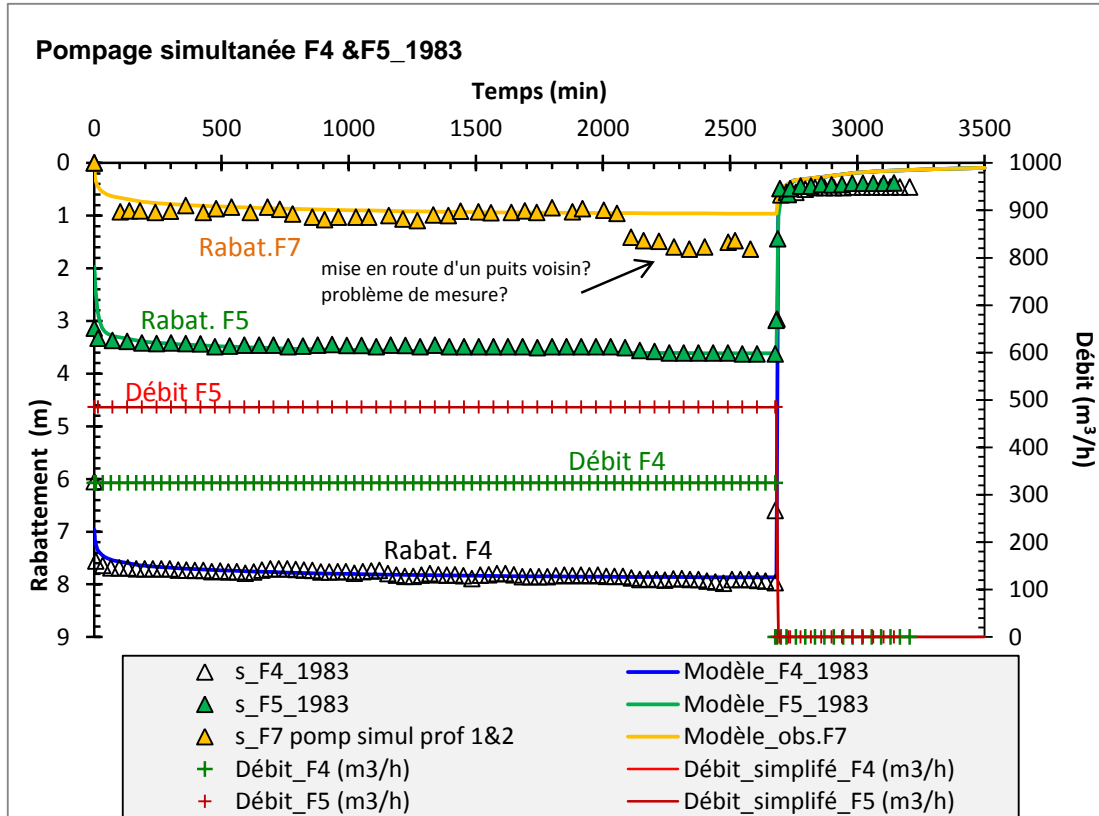
Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur l'Argens. Modèle modifié Hunt 2003. – Scénario 2.



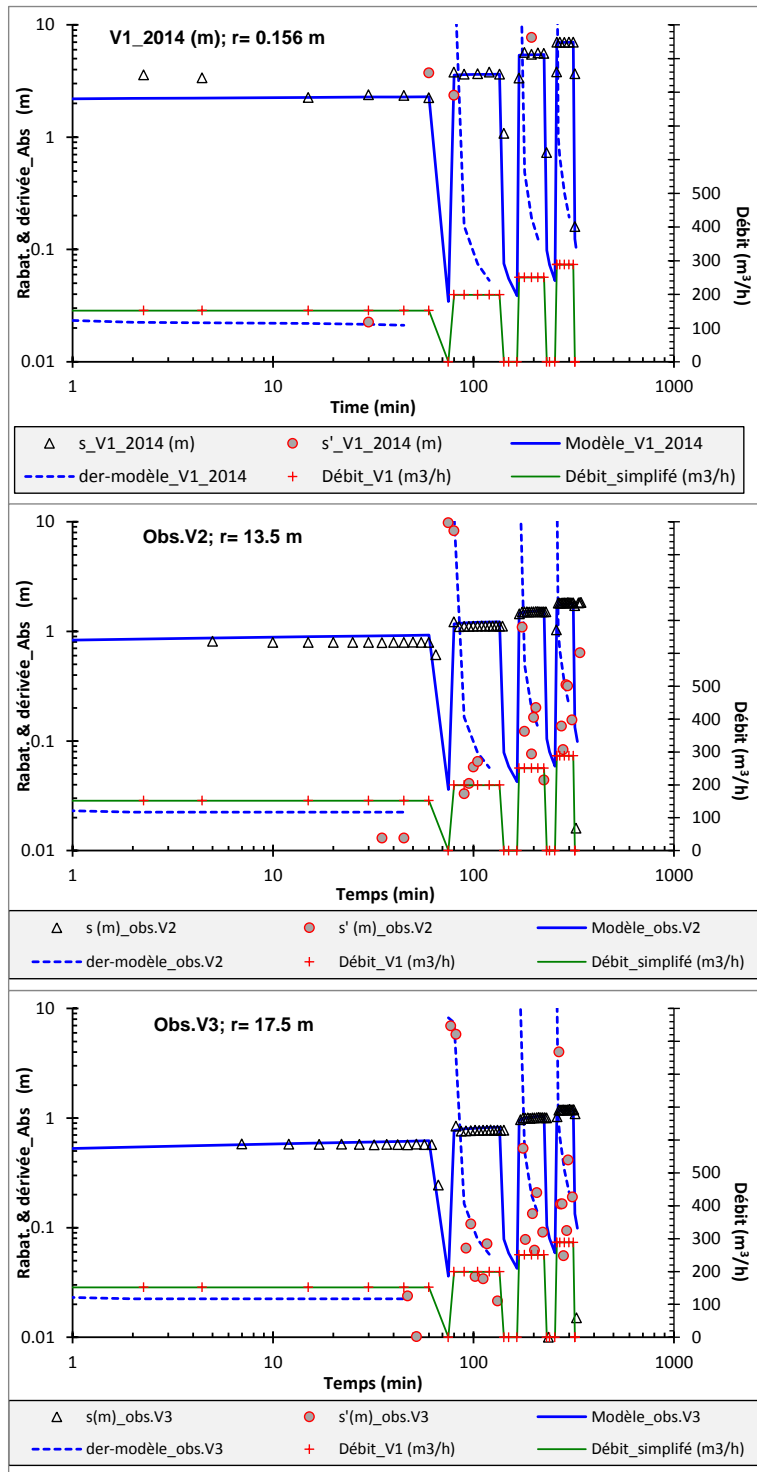
Modélisation de l'essai sur le forage F5 (SIAE) en 1983 ; observation au puits de pompage et au piézomètre F7. Modèle : Hantush modifié. Représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.



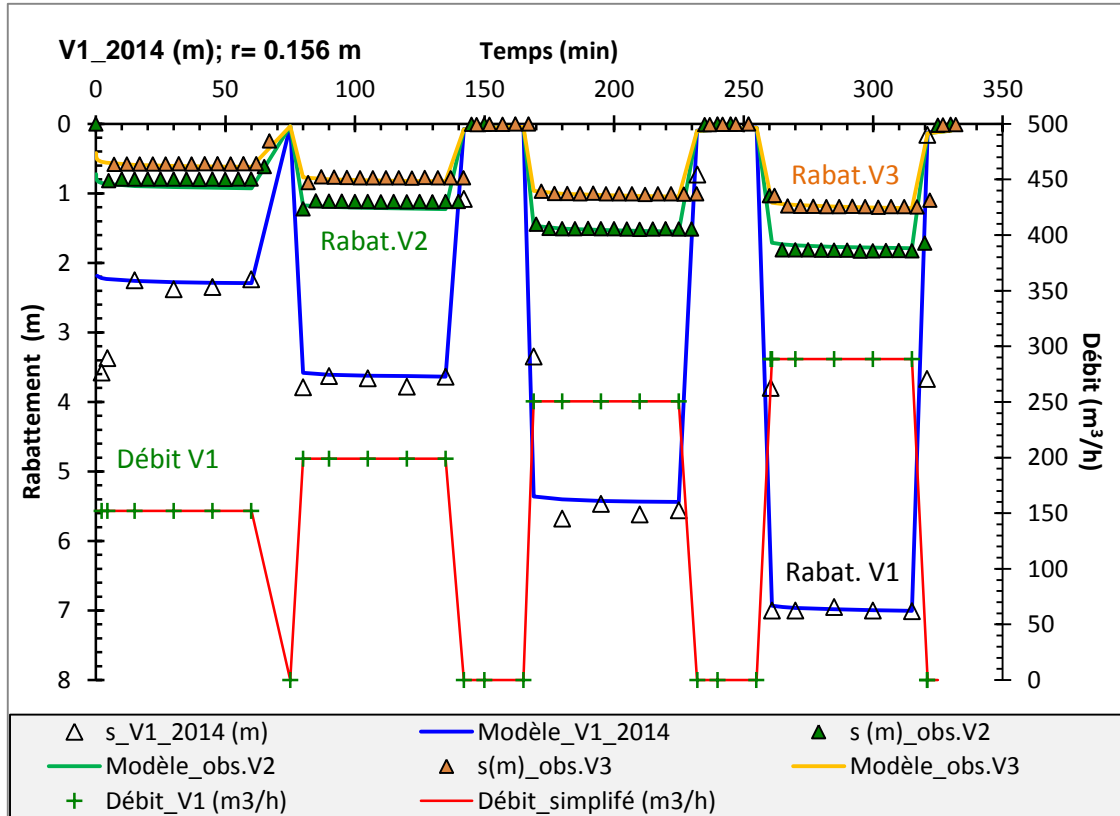
Modélisation de l'essai sur le forage F6 (SIAE) en 2008 ; observation au puits de pompage et au piézomètre F4. Modèle : Hantush modifié. Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.



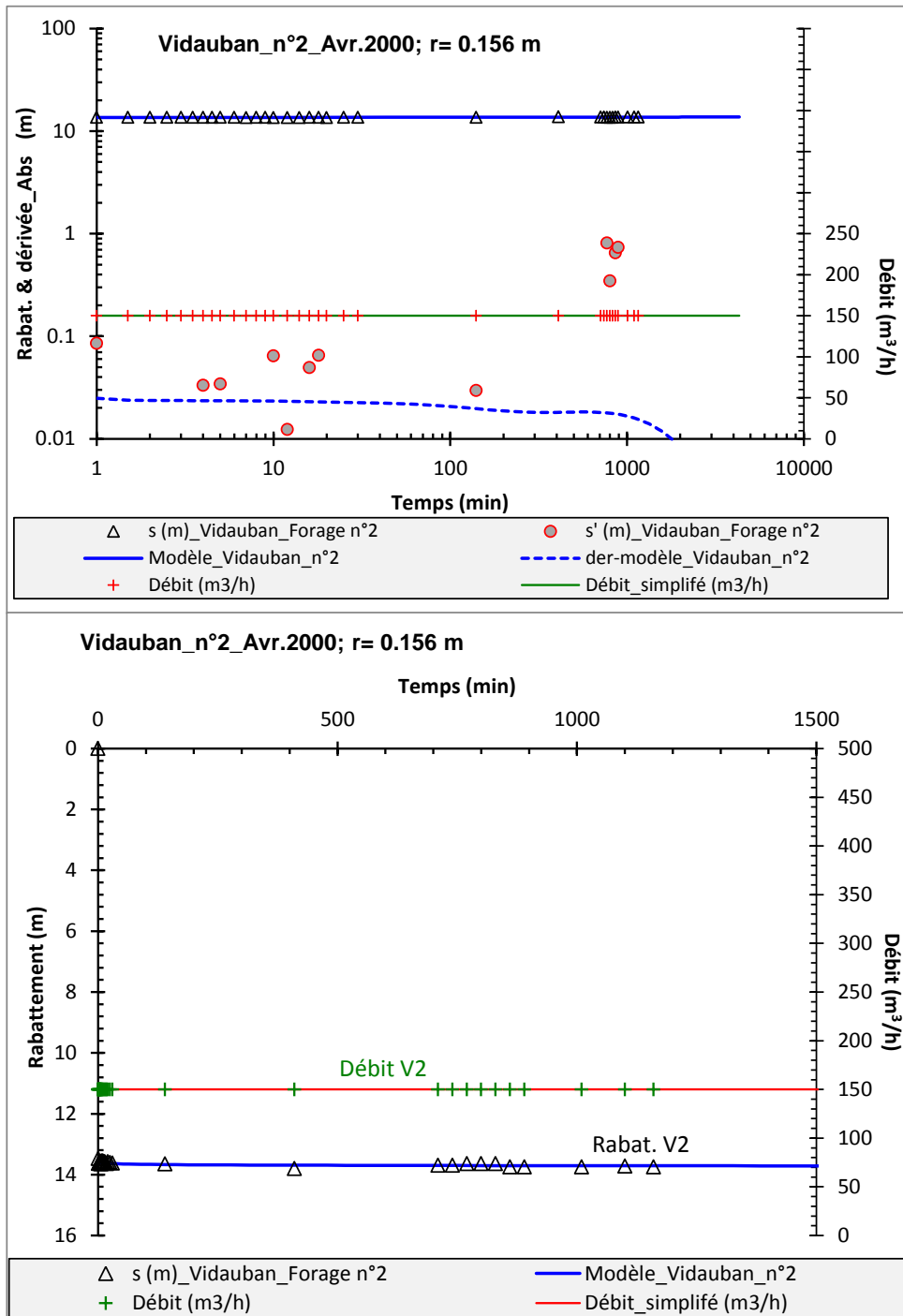
Modélisation de l'essai en pompage simultané sur F4 et F5 (SIAE) en 1983 ; observation aux puits de pompage et au piézomètre F7. Modèle : Hantush modifié multi-puits. Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.



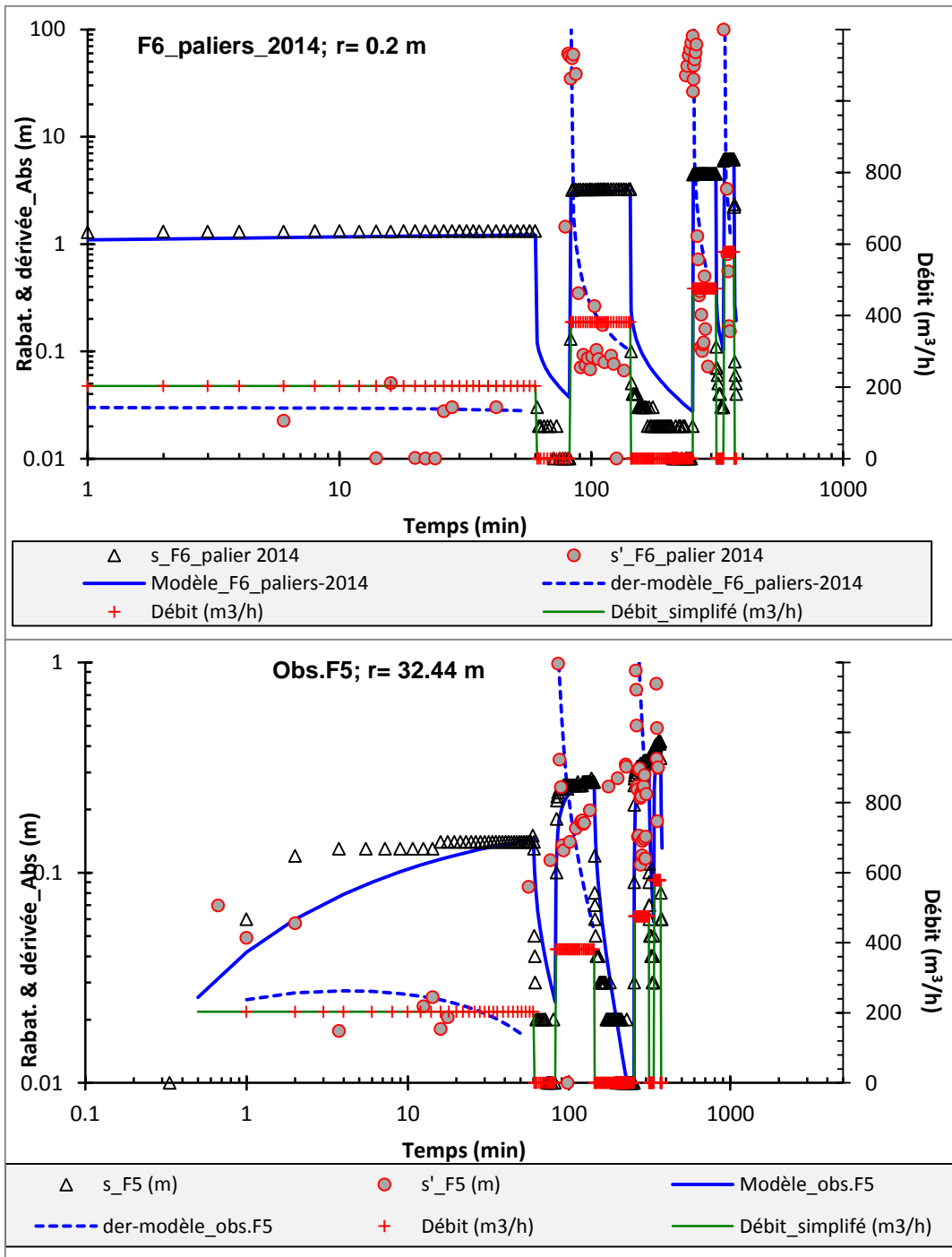
Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage V1 (Cne de Vidauban) en 2014 ; observation au puits de pompage et aux piézomètres V2 et V3. Modèle : Hantush modifié. Représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.



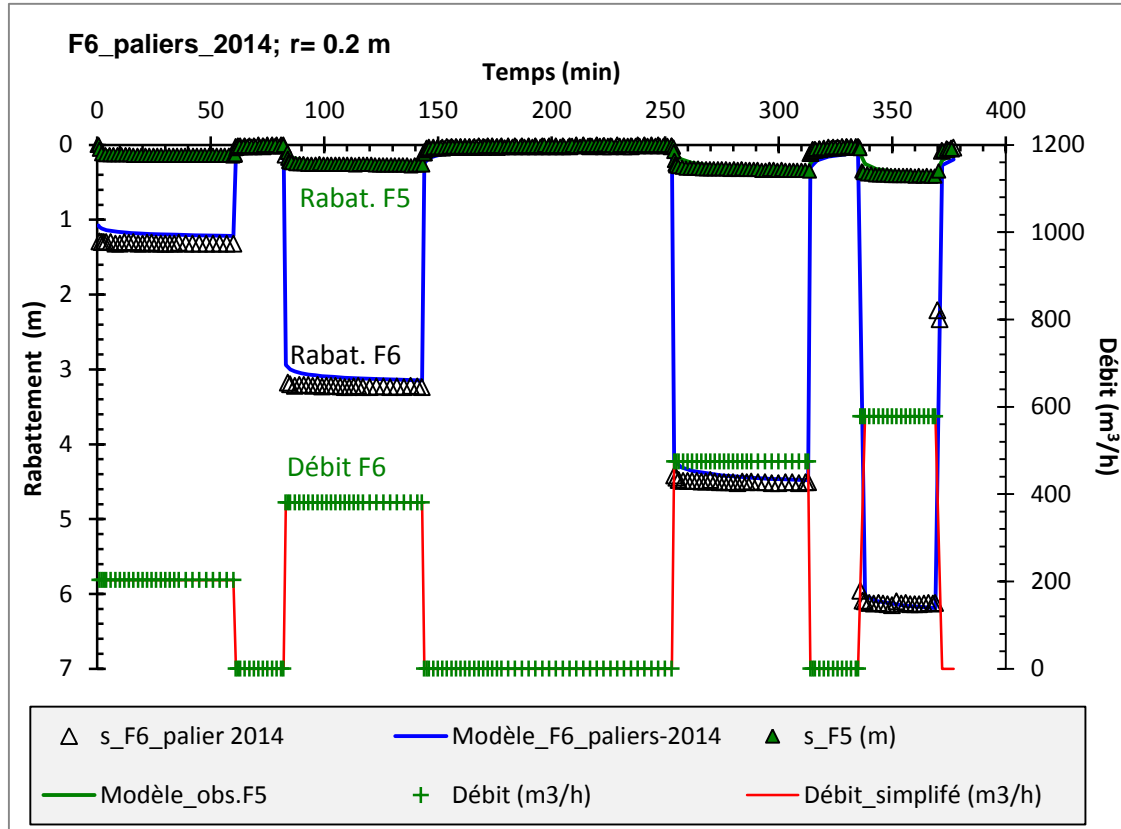
Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage V1 (Commune de Vidauban) en 2014 ; observation au puits de pompage et aux piézomètres V2 et V3. Modèle : Hantush modifié. Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.



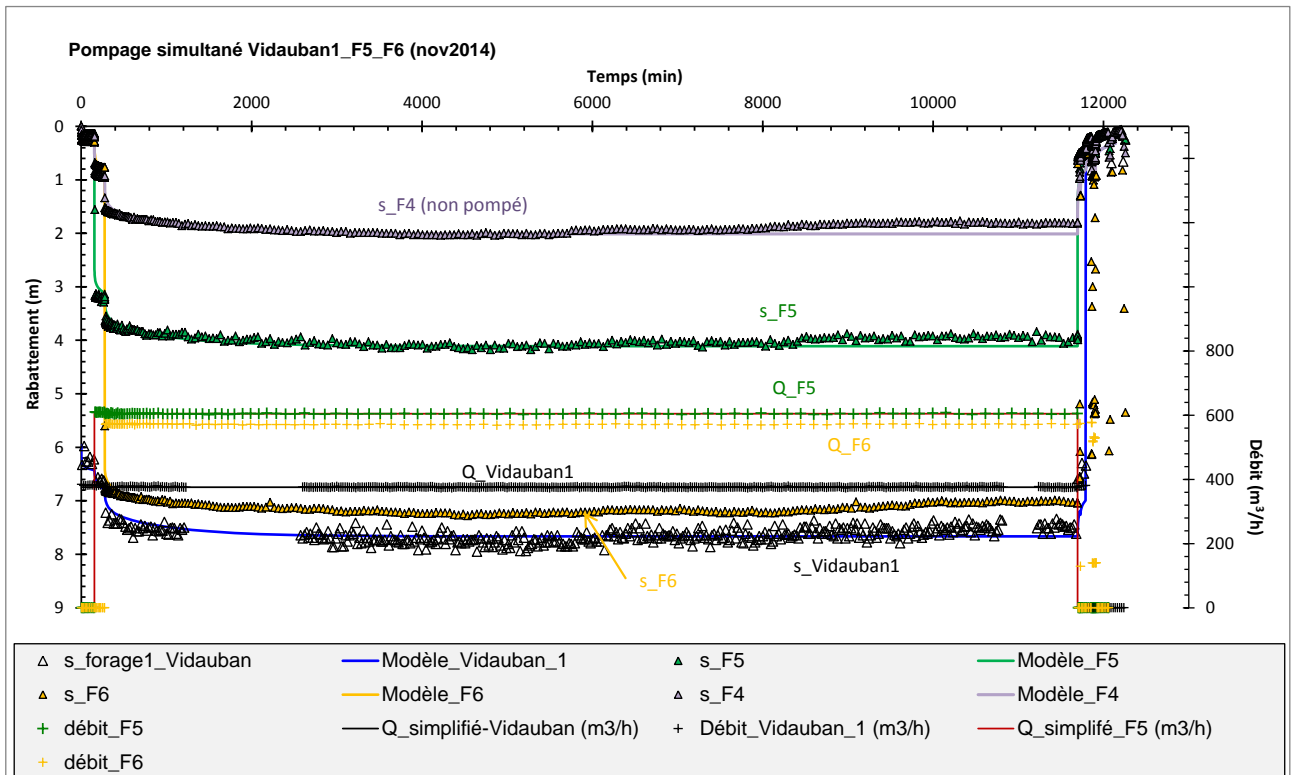
Modélisation de l'essai sur le forage V2 (Ce Vidauban) en 2000. Modèle : Hantush modifié.
 Graphes des rabattements et dérivées :
 Graphique du haut : représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.
 Graphique du bas : représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.



Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage F6 (SIAE) en 2014 ; observation au puits de pompage et au puits F5. Modèle : Hantush modifié. Représentation Log-Log des rabattements et dérivées observés et modélisés.



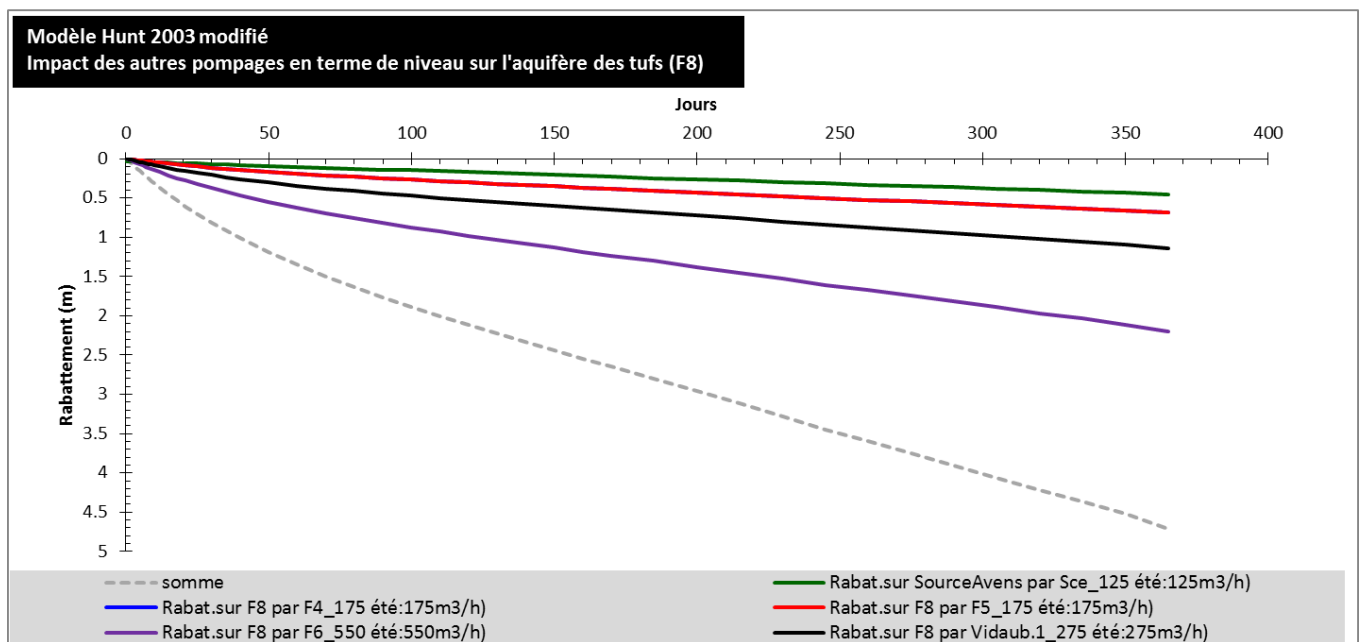
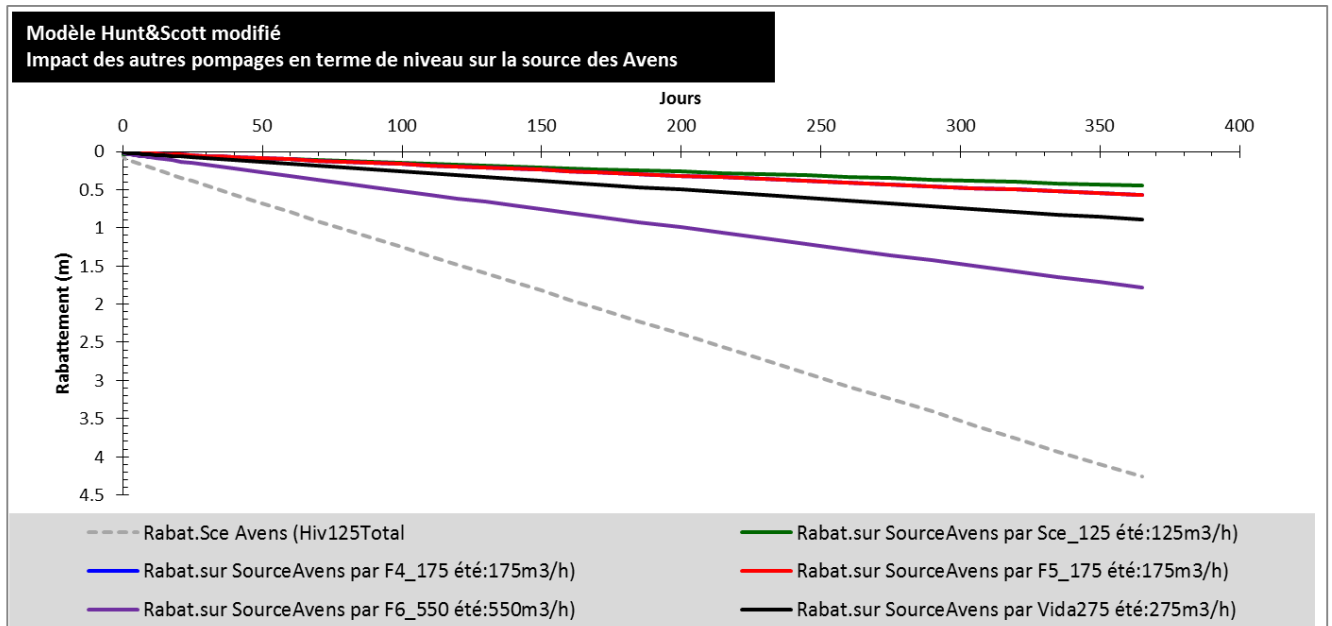
Modélisation de l'essai par paliers de débit sur le forage F6 (SIAE) en 2014 ; observation au puits de pompage et au puits F5. Modèle : Hantush modifié. Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.



Modélisation de l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hantush modifié version multi-puits. Représentation arithmétique des rabattements observés et modélisés.

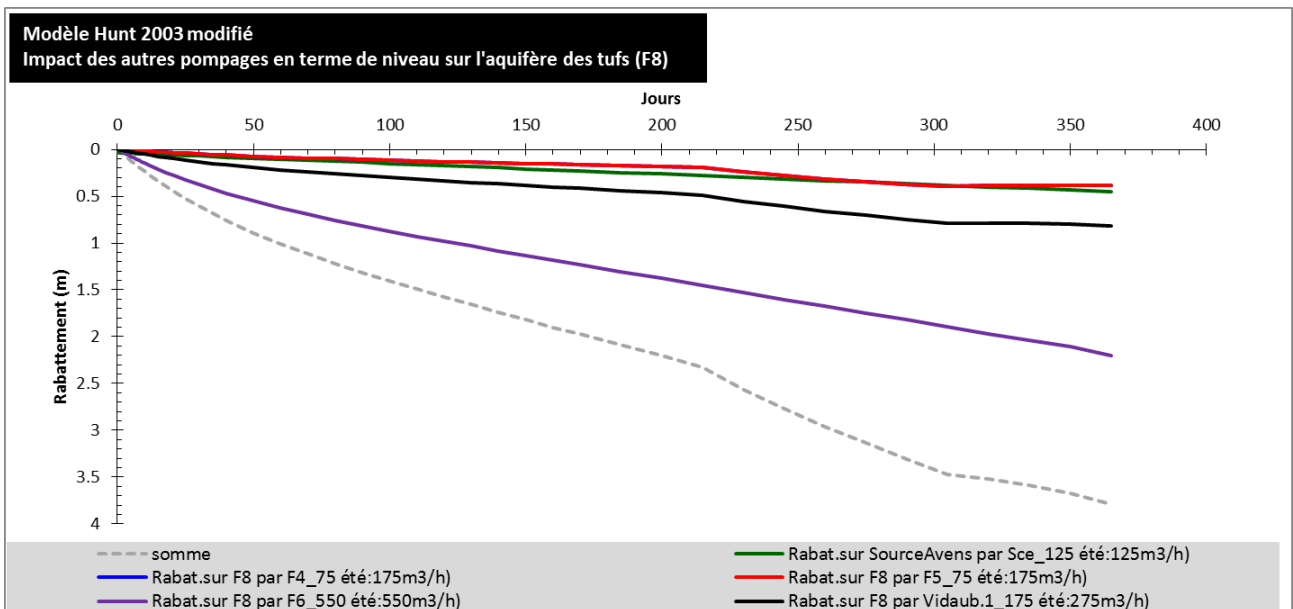
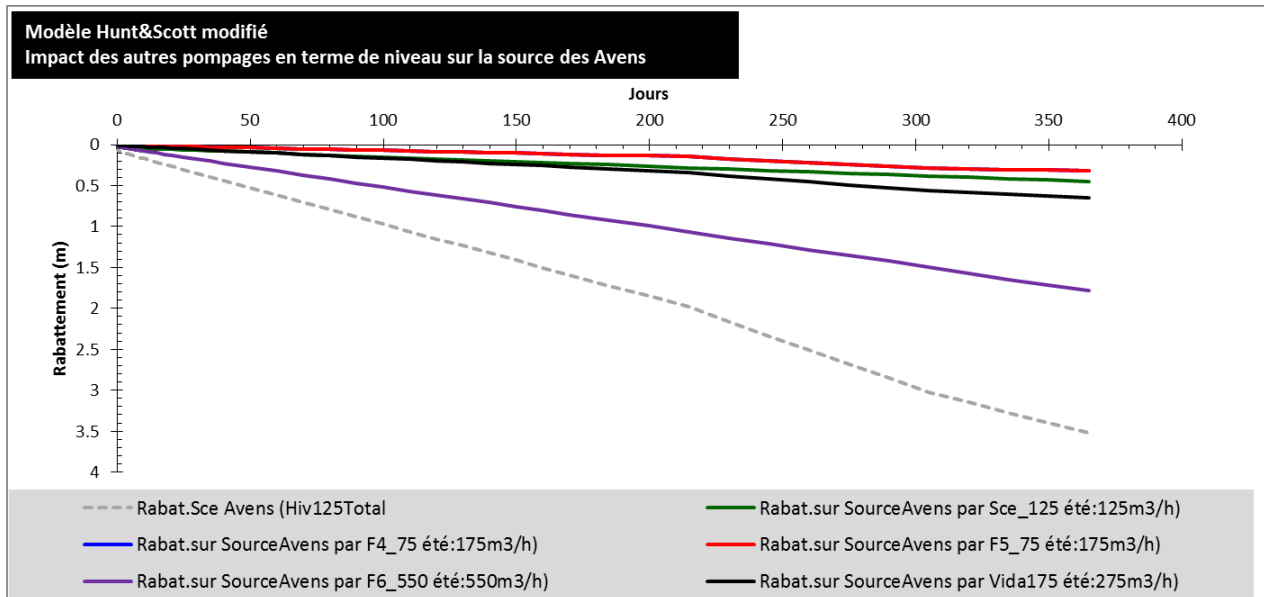
	Vidauban 1	F6	F4	F5
r (m)	0,156	66,06	79.21	94
T (m ² /s)	1.50E-01	-	-	-
S (-)	5.50E-03	-	-	-
k' (m/s)	1.2E-07	-	-	-
e' (m)	1,0	-	-	-
Epaisseur aquifère	70,0	70,0	70,0	70,0
Dist.crépine/toit aquifère	38,0	0,0	0,0	0,0
Long. puits	62,0	70,0	70,0	70,0
Dist.lim. 1 (min) / V1	173.6	-	-	-
Dist.lim. 2 (min) / V1	228.2	-	-	-
Dist.lim. 3 (min) / V1	456.5	-	-	-
Dist.lim. 4 (min) / V1	347.2	-	-	-
Dist.lim. 1 (m) / V1	1066,0	-	-	-
Dist.lim. 2 (m) / V1	1222.2	-	-	-
Dist.lim. 3 (m) / V1	1728.6	-	-	-
Dist.lim. 4 (m) / V1	1507.5	-	-	-
Surf. Aquifère (km2)	7.4	-	-	-
C (m ⁻⁵ s ⁻²)	415,0	175,0	-	50,0

Synthèse des paramètres hydrodynamiques utilisés pour modéliser l'essai multi-puits réalisé sur le site d'Entraigues en novembre 2014. Modèle : Hantush modifié version multi-puits.. Les distances au puits et piézomètres (r), ainsi que les distances aux limites (Lim 1 à 4) sont données par rapport au puits V1.



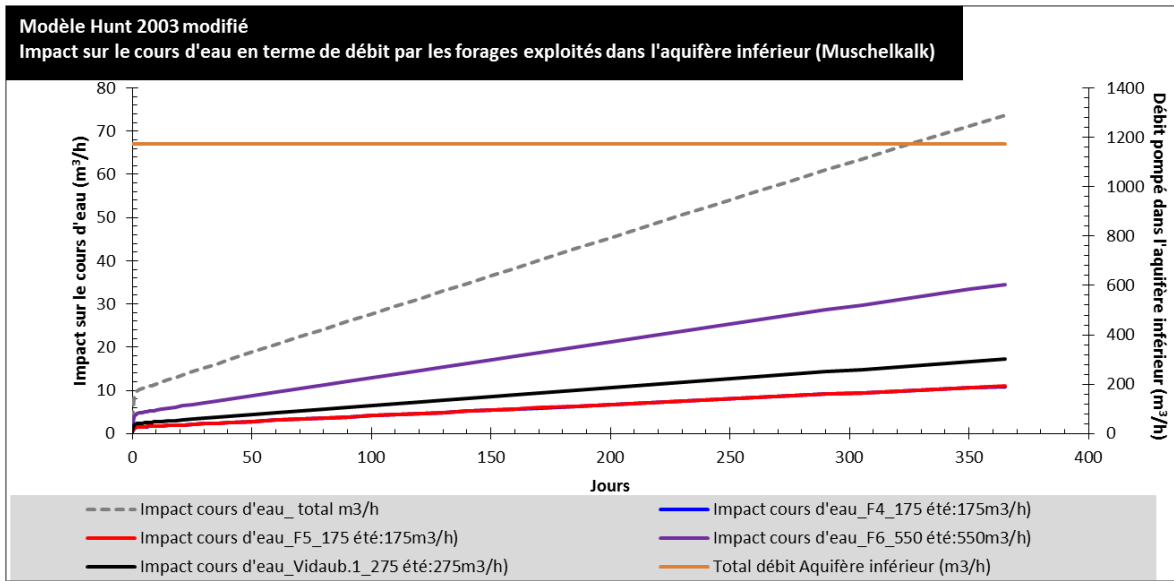
Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur la source. Modèles modifiés de Hunt & Scott (haut) et Hunt 2003 (bas).

Dans le cas du modèle modifiés Hunt 2003, F8 dans les tufs est supposé représentatif de la source. – Scénario 1.

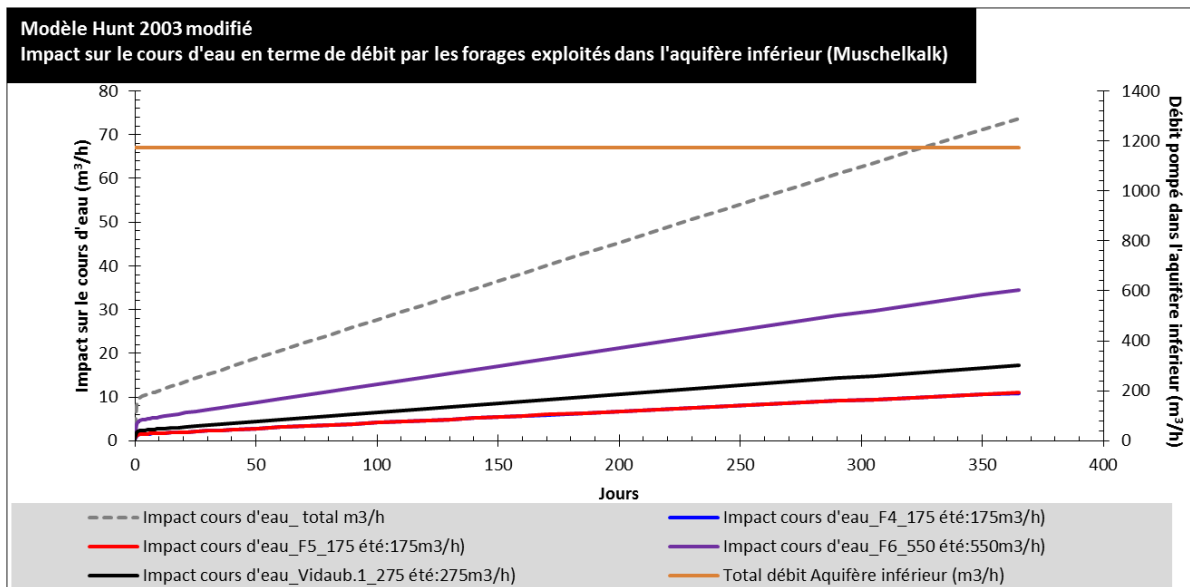


Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur la source. Modèles modifiés de Hunt & Scott (haut) et Hunt 2003 (bas).

Dans le cas du modèle modifiés Hunt 2003, F8 dans les tufs est supposé représentatif de la source. – Scénario 2.



Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur l'Argens. Modèle modifié Hunt 2003. – Scénario 1.



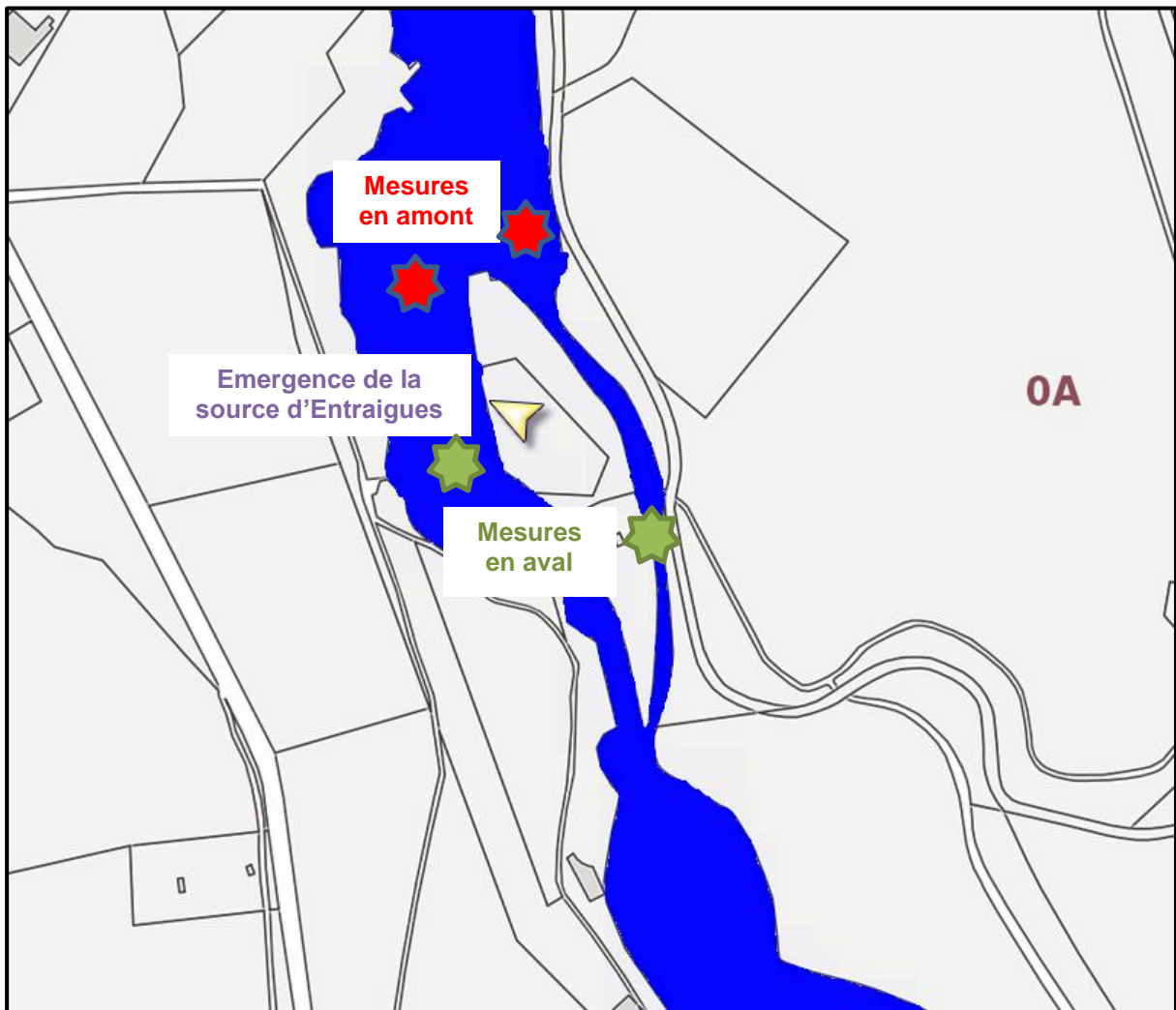
Complément de modélisation. Impact des pompages de chacun des forages du Muschelkalk sur l'Argens. Modèle modifié Hunt 2003. – Scénario 2.

Annexe 6

Note sur les campagnes de jaugeage par dilution dans l'Argens en 2014

Introduction

La présente note a pour objet d'expliquer le protocole de réalisation de la campagne de jaugeages de l'Argens au droit de l'émergence de la source d'Entraigues (commune de Vidauban). Cette campagne a pour but d'estimer le débit d'émergence de la source, en mesurant les débits en amont et en aval immédiats de l'émergence (voir figure ci-dessous).



Localisation de la source d'Entraigues (commune de Vidauban) et des points de jaugeage envisagés.

Principe de réalisation

Dans le contexte morphologique qui préside à la source d'Entraigues, la **méthode de jaugeage par dilution chimique** de traceur est particulièrement adaptée. En effet, l'utilisation d'un moulinet ou courantomètre se serait avérée extrêmement difficile pour caractériser chacun des écoulements du fait de l'absence de section de mesure adaptée.

Cette méthode de jaugeage chimique est fondée sur la conservation de la masse du traceur entre un point d'injection et un point de restitution le long d'un bief de cours d'eau.

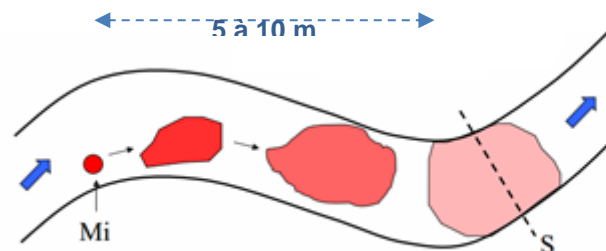
Connaissant la masse de traceur injectée, l'intégration de la courbe de restitution permet de calculer le débit du cours d'eau :

$$Q = \frac{M_i}{\int C(t) dt}$$

où Q est le débit du cours d'eau, M_i la masse initiale du traceur et $C(t)$ l'évolution temporelle de la concentration en traceur mesurée.

L'utilisation d'un traceur fluorescent (fluorescéine) sera privilégiée dès lors que le débit sera de quelques m^3/s . Une très faible quantité (quelques grammes) sera suffisante pour une lecture par un fluorimètre de terrain de type GGUN FL24, tout en limitant l'impact visuel du jaugeage (le panache sera rapidement suffisamment dilué pour ne plus être visible). La mesure par fluorimètre se fait quelques mètres en aval de l'injection pour chaque jaugeage.

De très faibles débits pourront être jaugés par dilution de sel en suivant l'évolution de la conductivité électrique de l'eau.



Principe du jaugeage chimique dans le cours d'eau.

La réalisation de jaugeages sur l'Argens en amont et en aval de la source d'Entraigues permettra d'estimer par différence le débit de la source (méthode de jaugeage différentiel). L'injection se fera au niveau du seuil du barrage pour s'assurer de la condition de « bon mélange ». Grâce à cette technique, il nous sera plus facile de jauger l'ensemble des ramifications de l'Argens (bras mort, sources etc...). La campagne est prévue le 17 juillet 2014.

Protocole de mesure :

- Injection de 5 à 10 grammes de fluorescéine dans le bassin entre les 2 seuils pour obtenir une condition de bon mélange.
- Suivi de la restitution sur le fluorimètre et calcul du débit aval
- Installation du matériel de mesure (fluorimètre en amont de la source) et étalonnage du dispositif avec l'eau de la rivière.
- Injection de 5 à 10 grammes de fluorescéine dans le bassin entre les 2 seuils pour obtenir une condition de bon mélange.
- Suivi de la restitution sur le fluorimètre et calcul du débit amont
- Installation du matériel de mesure (fluorimètre en aval de la source)
- Calcul du débit de la source par différence des débits amont-aval.
- La procédure sera renouvelée trois fois pour s'assurer de la répétabilité de la mesure.

Informations complémentaires :

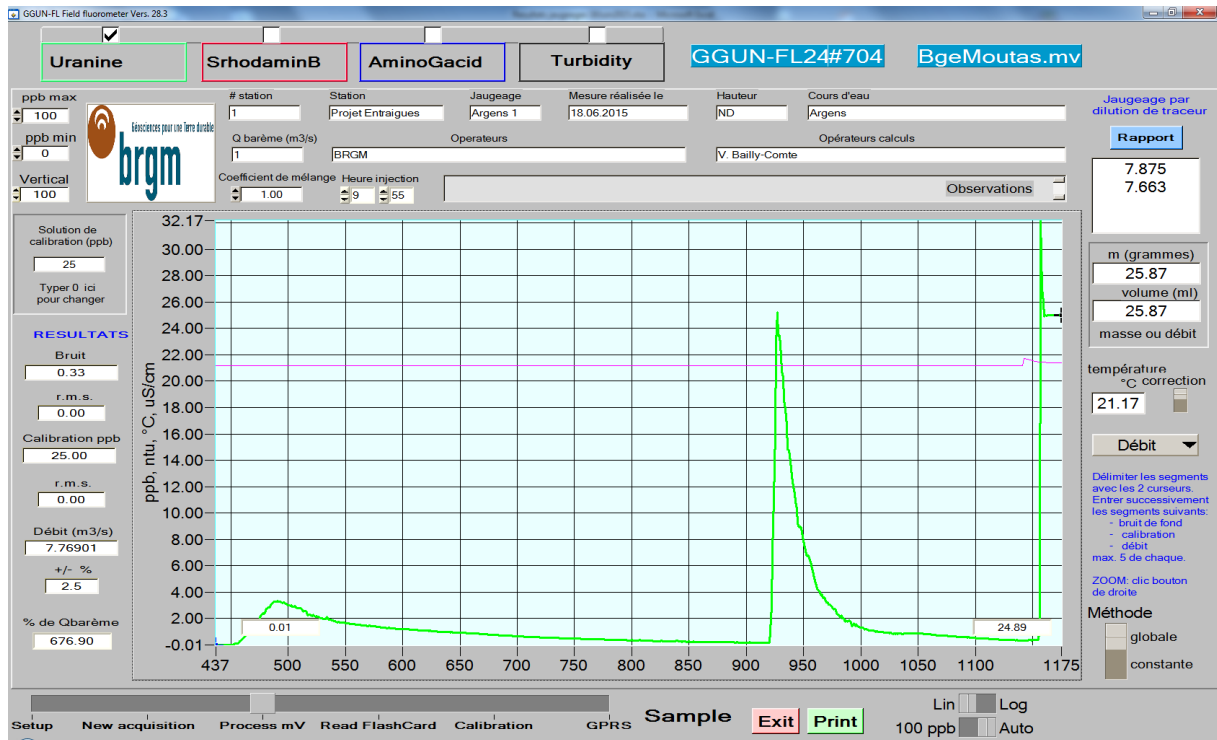
- Le 17 Juillet, une coloration de l'Argens à proximité de la source d'Entraigues pourra être ponctuellement observée. Cette coloration aura totalement disparue quelques centaines de mètres en aval de la source du fait de la dilution du traceur, puis de sa dégradation à la lumière.
- Le traceur utilisé (fluorescéine) ne présente pas de contre-indication concernant son utilisation dans les eaux de surface pour les concentrations d'utilisation que nous proposons. La qualité, et notamment le rendement de fluorescence de cette molécule permet de n'utiliser que de très faible quantité, plusieurs kg de sel seraient nécessaires pour une opération équivalente avec un suivi de la minéralisation de l'eau par une sonde de conductivité.

Pour plus d'information, vous pouvez consulter le guide pratique « Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie », rapports de l'OFEG, série géologie.

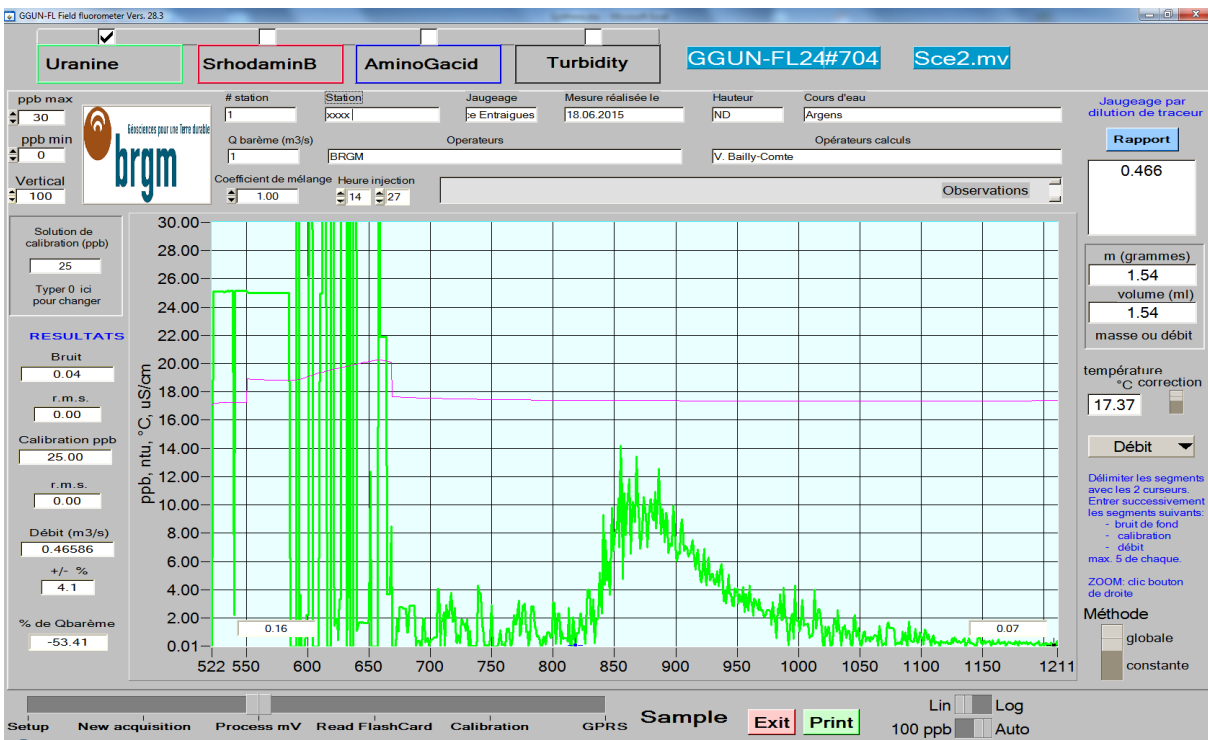
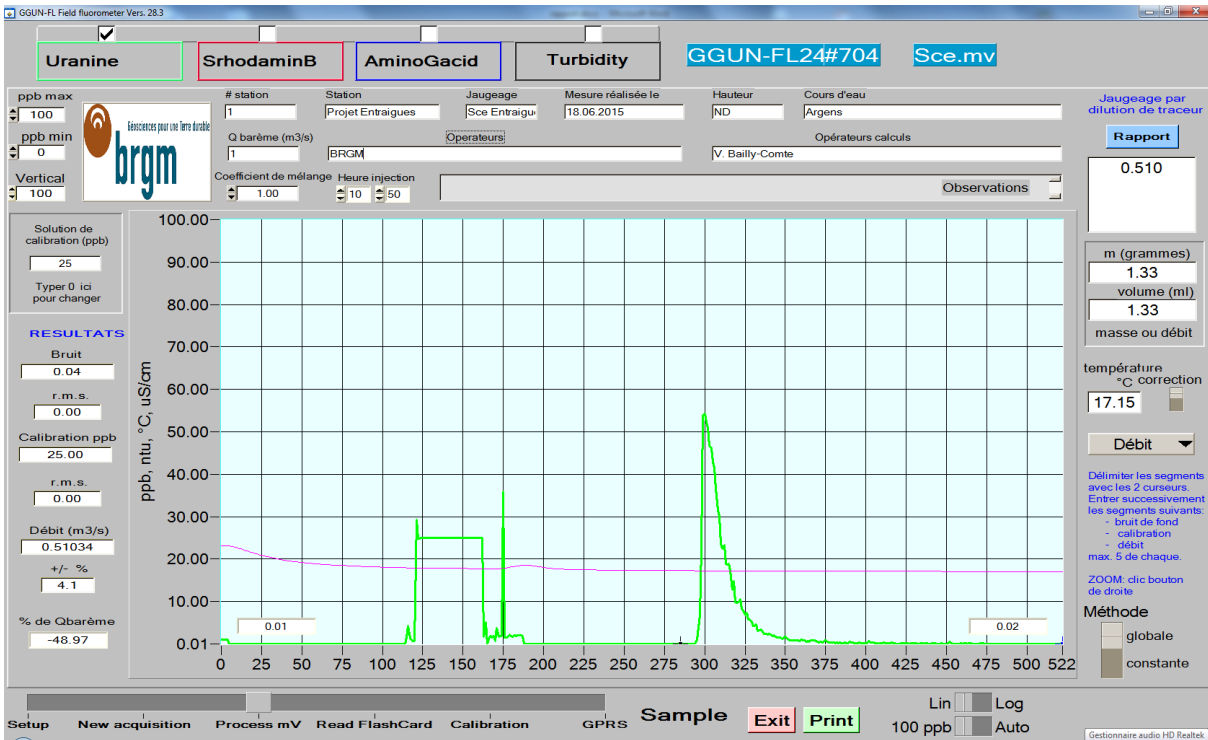
Annexe 7

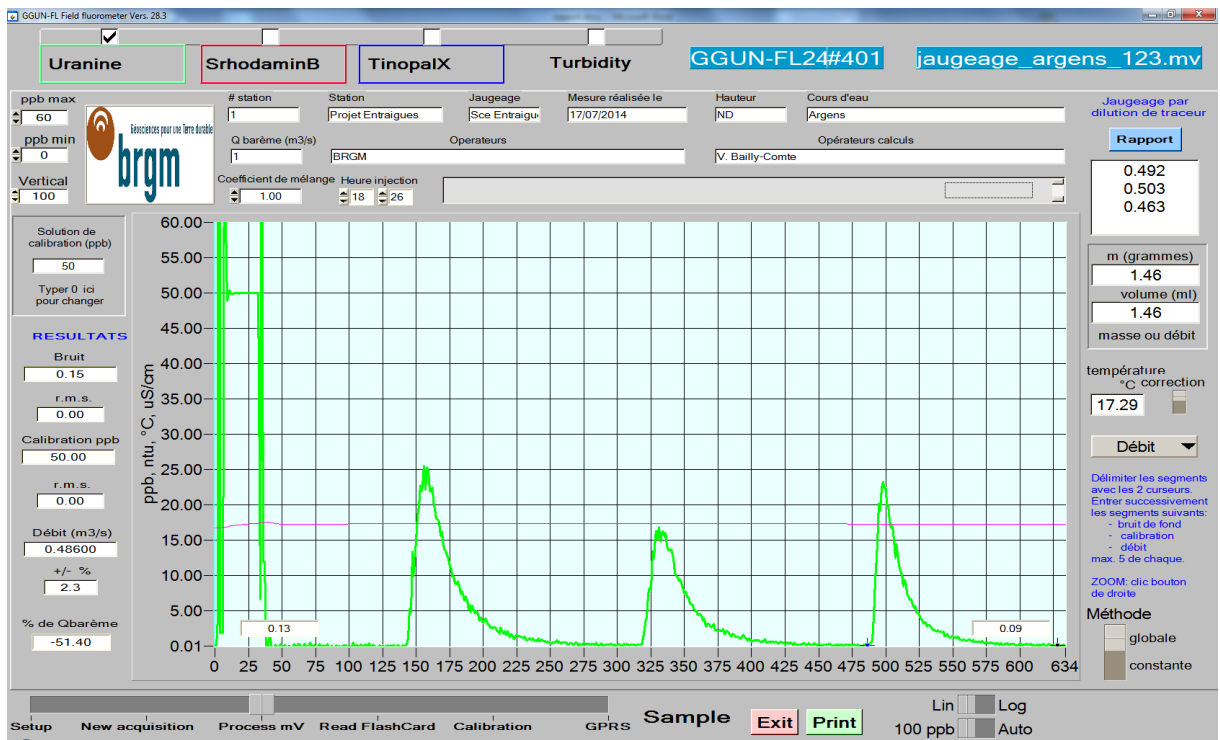
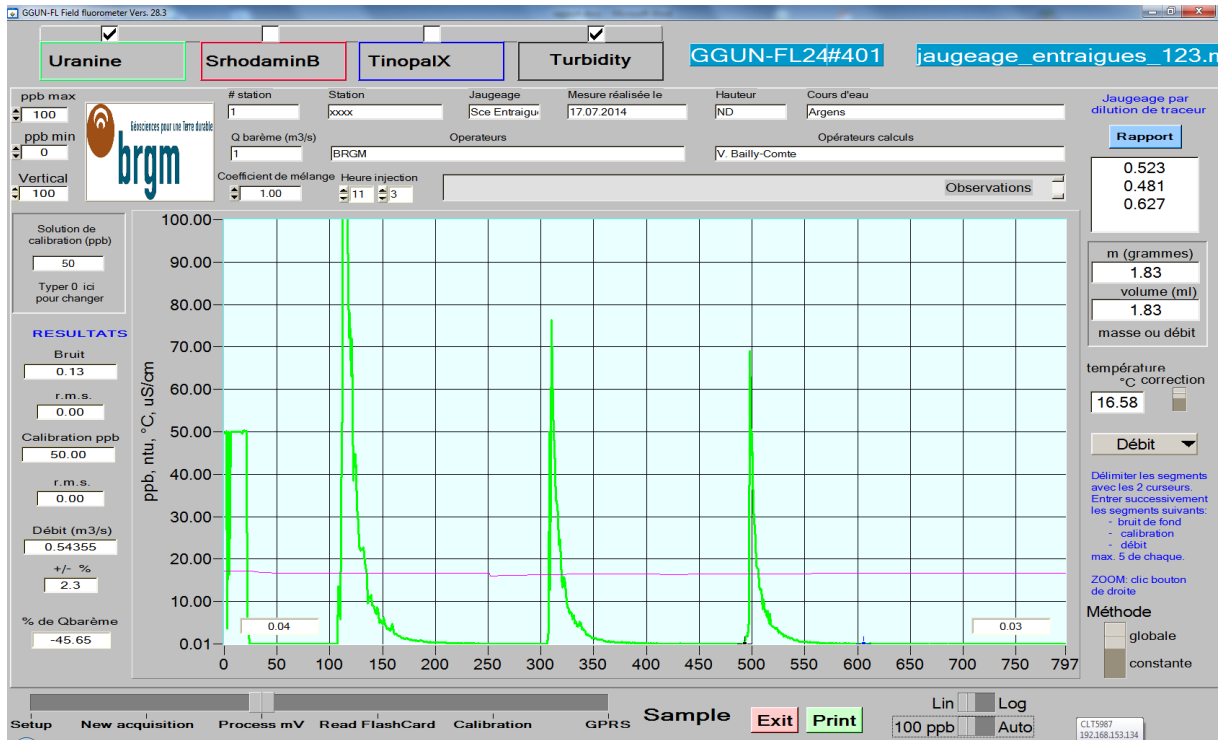
Campagnes de jaugeage par dilution dans l'Argens en 2014 : courbes de dilution

Courbes de dilution du jaugeage des émergences d'Entraigues, réalisé en 2014 :



Site d'Entraigues (83) : amélioration de la connaissance hydrogéologique






Annexe 8

Eléments de statistiques descriptives de la pluie et de la recharge sur la zone d'étude.

Site d'Entraigues (83) : amélioration de la connaissance hydrogéologique

Année\mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Cumul
1959	3	44	77	82	98	40	3	36	84	181	206	266	1119
1960	51	97	199	70	26	43	9	81	195	292	179	162	1404
1961	55	18	0	121	96	62	17	2	107	191	270	40	978
1962	43	97	56	34	32	40	7	1	40	82	162	50	645
1963	77	76	41	138	23	90	18	50	160	80	175	74	1002
1964	53	138	93	73	28	39	6	7	47	82	35	64	665
1965	66	22	97	17	17	42	42	94	131	60	73	86	747
1966	45	174	5	90	31	51	18	28	83	157	171	33	886
1967	16	44	20	19	27	25	2	14	52	18	104	16	358
1968	3	154	23	66	85	48	1	40	147	68	105	52	792
1969	116	102	129	24	72	35	34	47	98	7	122	98	884
1970	154	30	75	10	45	37	0	13	6	111	94	123	699
1971	95	24	92	161	141	28	5	18	29	3	177	76	851
1972	94	261	109	71	47	98	24	23	79	203	28	138	1173
1973	86	48	28	39	16	32	64	45	54	124	18	209	762
1974	145	233	88	103	121	14	2	31	140	14	54	34	982
1975	62	137	160	50	84	46	8	57	103	43	147	76	973
1976	51	64	74	100	53	20	153	118	119	366	98	103	1319
1977	179	86	67	34	155	38	49	134	3	59	71	164	1040
1978	269	121	119	82	75	24	8	41	17	16	9	85	865
1979	134	98	105	59	14	19	9	5	58	387	60	114	1062
1980	62	0	95	49	135	39	15	120	6	87	84	0	693
1981	24	27	84	122	46	40	32	11	69	47	0	235	739
1982	22	27	29	47	14	31	3	33	24	126	184	14	553
1983	0	74	93	60	25	68	5	123	2	126	9	177	762
1984	41	46	111	19	251	89	0	144	34	154	188	75	1152
1985	74	45	115	13	176	14	6	8	1	22	54	99	626
1986	183	78	28	139	15	12	24	47	58	23	107	46	761
1987	77	77	19	70	32	20	83	86	38	263	83	80	928
1988	114	11	68	71	120	86	0	1	23	178	18	38	727
1989	12	60	7	133	33	11	17	7	55	30	120	26	510
1990	30	12	11	102	74	22	16	41	16	188	79	81	673
1991	16	43	104	75	49	30	2	10	188	112	59	0	688
1992	31	21	71	19	48	140	34	35	140	194	65	40	840
1993	1	26	38	230	56	21	31	25	202	237	79	13	960
1994	192	133	8	70	65	58	19	25	236	147	166	22	1140
1995	50	54	35	164	69	16	30	75	95	36	119	119	861
1996	336	29	50	71	49	44	15	49	192	109	198	132	1274
1997	177	2	6	21	13	95	11	103	8	22	161	123	743
1998	48	11	8	140	106	26	1	74	132	70	18	51	686
1999	103	1	94	76	66	10	35	24	136	230	95	18	889
2000	6	4	49	120	14	110	33	14	116	139	266	140	1013
2001	95	81	76	45	115	8	21	3	37	44	43	2	569
2002	42	87	45	63	143	62	63	90	73	122	289	83	1162
2003	66	17	10	104	34	7	3	6	49	128	83	125	632
2004	25	45	15	64	34	8	5	24	56	160	33	102	570
2005	2	2	49	60	51	28	3	56	182	90	63	69	655
2006	89	43	24	20	12	5	24	22	128	47	34	139	588
2007	21	27	28	18	116	61	2	18	6	30	85	26	437
2008	135	43	36	100	95	100	8	16	60	120	200	202	1115
2009	83	81	84	117	64	18	8	19	95	86	61	131	848
2010	91	87	53	34	107	309	0	28	51	173	148	120	1200
2011	32	88	125	51	10	80	49	27	26	86	355	15	943
2012	28	3	5	155	99	6	8	12	69	206	189	76	858
2013	104	29	159	88	153	16	49	9	70	52	61	195	987
2014	249	158	42	7	34	85	51						626
Min	0	0	0	7	10	5	0	1	1	3	0	0	358
Max	336	261	199	230	251	309	153	144	236	387	355	266	1404
Moyenne	80	65	63	75	68	47	21	41	81	117	112	89	850
2s	71	57	45	47	50	47	26	38	60	87	78	63	229
médiane	62	45	54	70	52	38	13	28	69	109	94	80	849
Décile 0.1	9	7	8	19	14	11	1	6	7	22	22	15	579
Décile 0.9	178	138	117	139	138	93	49	99	173	221	199	172	1157

Précipitation calculée sur les 105 km² de la zone d'étude = pondération surfacique des données MétéoFrance des mailles SAFRAN n° 8969 à 8972 et 9055 à 9058 (cf. texte)

Somme de Alim_G1=Recharge (en mm)													
année\mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Cumul
1963	44.5	46.2	13.8	59.8	0.8	12.5	0.0	0.3	28.3	21.3	111.2	53.9	392.6
1964	35.2	84.7	50.1	45.0	1.0	0.6	0.0	0.0	0.6	7.0	5.6	14.3	244.2
1965	19.0	6.1	44.4	1.3	0.2	1.2	0.5	7.1	26.8	20.7	27.3	30.3	184.8
1966	17.0	99.6	0.0	21.5	2.4	2.4	0.0	0.1	5.5	55.9	114.7	12.1	331.2
1967	4.2	9.7	3.5	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.9	0.5	13.5	2.8	36.1
1968	0.1	42.8	7.6	14.7	8.4	4.8	0.0	0.3	25.7	13.7	44.4	29.5	192.0
1969	69.4	61.7	84.9	8.7	14.6	1.1	0.5	0.5	5.7	0.0	23.3	35.2	305.7
1970	109.7	12.3	22.4	0.6	1.2	0.5	0.0	0.0	0.0	11.5	21.1	58.2	237.6
1971	60.4	11.6	38.9	88.9	55.4	5.7	0.0	0.0	0.1	0.0	40.0	33.3	334.3
1972	62.3	204.0	85.0	20.0	9.2	16.6	0.1	0.0	3.5	79.7	11.0	79.6	570.9
1973	65.2	30.0	8.6	9.1	0.3	0.6	2.7	0.4	2.8	30.5	4.5	96.1	250.6
1974	112.7	198.7	57.8	48.4	42.4	0.6	0.0	0.1	18.1	2.9	7.7	5.2	494.6
1975	15.0	70.7	104.5	25.3	16.7	4.1	0.0	0.4	10.9	7.0	59.9	50.4	364.8
1976	21.8	35.4	36.7	34.3	18.5	0.7	20.9	17.0	42.8	269.2	84.1	68.7	650.0
1977	148.8	58.4	31.4	4.4	46.7	4.7	1.0	21.4	0.0	6.6	14.0	90.3	427.7
1978	217.1	91.7	77.2	34.3	25.3	1.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	8.4	456.2
1979	58.5	56.6	61.3	18.7	1.2	0.0	0.1	0.0	1.7	231.0	42.4	60.7	532.2
1980	34.6	0.0	30.5	10.1	33.6	9.2	0.4	14.5	0.3	10.5	26.3	0.0	170.0
1981	2.7	2.4	14.7	43.4	10.2	1.1	0.4	0.0	1.2	4.2	0.0	82.4	162.8
1982	9.9	9.9	6.1	6.1	0.3	0.3	0.0	0.2	0.2	15.7	95.4	7.1	151.2
1983	0.0	26.2	31.8	16.3	3.3	4.0	0.0	9.3	0.0	22.3	2.0	92.9	208.1
1984	16.4	16.3	50.1	7.0	109.6	54.5	0.0	16.7	2.6	48.6	115.8	54.2	491.7
1985	59.6	27.4	78.7	4.9	57.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	20.1	250.7
1986	85.8	54.8	15.2	49.1	3.2	0.0	0.0	0.8	2.4	1.4	21.2	16.8	250.8
1987	37.4	38.1	3.8	22.6	1.7	0.2	1.5	5.0	2.5	110.8	48.9	49.8	322.1
1988	73.1	2.7	11.9	17.4	34.2	14.4	0.0	0.0	0.0	37.2	4.1	12.3	207.3
1989	2.1	12.7	0.4	27.9	1.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	22.4	9.0	77.3
1990	8.3	2.3	0.6	10.5	4.8	1.0	0.1	0.2	0.1	42.1	33.8	49.6	153.1
1991	8.0	20.0	42.3	25.0	12.7	1.9	0.0	0.0	36.3	54.6	27.0	0.0	227.8
1992	6.2	3.4	9.8	3.8	1.7	15.7	4.1	0.4	21.0	99.8	49.0	15.6	230.5
1993	0.8	4.1	7.0	82.9	17.5	0.5	0.5	0.0	39.3	151.0	60.0	3.1	366.6
1994	126.7	89.7	4.1	8.2	7.3	2.2	0.1	0.1	62.7	85.9	138.0	11.1	536.0
1995	20.1	15.8	8.0	47.6	15.8	1.2	0.3	1.2	7.1	6.2	30.0	71.4	224.8
1996	298.9	26.9	20.6	20.7	10.6	1.5	0.2	0.3	42.7	47.4	119.8	92.9	682.4
1997	155.7	0.1	0.2	0.4	0.0	4.3	0.2	3.8	0.3	0.3	38.9	65.6	269.7
1998	24.4	2.3	0.9	21.9	19.6	5.5	0.0	2.3	13.9	15.0	1.8	6.3	113.9
1999	35.9	0.0	16.5	13.1	17.7	0.2	0.0	0.0	18.7	120.6	64.0	8.9	295.6
2000	1.5	0.2	2.6	21.0	0.6	12.9	0.4	0.0	13.5	57.5	200.5	108.4	419.1
2001	68.6	51.1	42.8	4.3	27.6	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	2.4	0.1	198.2
2002	2.7	17.8	10.9	9.3	33.5	10.0	2.1	5.4	15.9	38.3	186.5	62.8	395.4
2003	44.4	5.5	1.9	21.9	1.1	0.0	0.0	0.0	0.4	20.4	34.1	78.0	207.7
2004	8.4	13.8	1.0	5.4	5.7	0.0	0.0	0.0	1.1	35.6	11.9	49.0	131.9
2005	2.1	0.1	4.7	7.2	3.2	0.5	0.0	0.4	41.4	27.7	25.1	36.1	148.3
2006	41.2	19.6	3.6	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	13.1	8.0	4.2	59.7	150.4
2007	6.8	5.1	2.8	0.8	14.8	3.7	0.0	0.0	0.0	0.2	8.6	3.4	46.3
2008	55.3	21.1	5.5	15.1	13.8	24.9	0.0	0.0	0.6	18.7	117.4	168.3	440.8
2009	58.6	62.2	29.3	42.4	19.2	0.4	0.0	0.0	7.4	15.9	14.1	59.0	308.5
2010	60.9	46.3	18.9	4.0	28.1	150.6	0.0	0.3	1.1	35.9	86.5	84.6	517.2
2011	18.8	54.3	71.5	8.0	0.4	6.4	0.5	0.4	0.1	5.5	244.2	8.6	418.8
2012	7.4	0.1	0.2	19.9	16.2	0.0	0.0	0.0	0.8	65.9	133.6	53.6	297.6
2013	58.9	19.5	81.6	34.9	62.9	2.3	0.2	0.0	1.2	2.8	5.7	95.3	365.5
2014	202.5	127.3	25.2	0.0	0.3	2.4	1.0	0.5	0.2	0.3	292.3	27.6	679.6
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
Max	299	204	105	89	110	151	21	21	63	269	292	168	682
Moyenne	52	37	27	21	16	7	1	2	10	38	56	44	310
Ecart-type	61	45	28	20	21	22	3	5	15	55	66	37	160
Médiane	36	20	15	16	10	1	0	0	2	17	29	43	283
1 ^{er} décile	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	4	149
9 ^{ème} décile	125	89	77	47	42	14	1	7	35	98	132	93	531

Recharge de l'aquifère calculée par le modèle globale GARDENIA

Annexe 9

Tableaux de résultats et illustrations concernant les analyses chimiques.

Site d'Entraigues (83) : amélioration de la connaissance hydrogéologique

Point bss	Entité (BDLISA)	Date préltv	µS/cm		°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
			Cond	pH	Temp	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	Si	B
10237X0272/FS	571AE00	16/12/1998		7.3	14	333	140.9	25.3	59.9	1.8	98	137	4.4	7.8	
10237X0272/FS	571AE00	19/07/1999		7.3	15	356	134.1	25.8	58.6	2.2	102	141	5.3	9.1	
10237X0272/FS	571AE00	26/07/2000		7.3	15	341	114.2	24.9	55.7	2.6	101	141	4	7.8	
10237X0272/FS	571AE00	10/07/2001		7.1	16	352	114.8	25.3	52.8	2.5	92	148	5.7	8.2	
10237X0272/FS	571AE00	16/07/2002		7.1	15	341	117.2	25.4	62.7	3	104	137	5.1	7.6	
10237X0272/FS	571AE00	12/08/2003		7.2	16	341	135.7	26.7	59.2	3.3	97	142	7.2	8.2	
10237X0272/FS	571AE00	18/03/2004	1142	7.3	15	333	137	24.9	60.6	2.8	106	141	4.5	8.4	25
10237X0272/FS	571AE00	02/06/2005	1167	7.3		326	140.7	27.1	67.5	2.5	123	153	5.3	8.3	50
10237X0272/FS	571AE00	07/02/2006	1221			332	140.8	26.3	78.6	2.6	147	156	4.6	8	60
10237X0272/FS	571AE00	15/02/2007	1242	7.2		327	138	25.9	79.5	2.7	149	157	5.1	8.3	50
10237X0272/FS	571AE00	07/02/2008	1293	7.2	15.4	322	140.6	27.4	88.1	2.7	170	157	4.6	8	50
10237X0272/FS	571AE00	11/02/2009	1326	7.2	15	327	148	26.9	100	2.93	193	151	4.8	7.5	50
10237X0272/FS	571AE00	05/11/2009	1280	7.7	14.7	338	152	28.2	83.4	3.1	156	155	4.7	8.4	50
10237X0272/FS	571AE00	28/06/2010	1225	7.3	17.2	343	149	27.2	79.6	3.09	142	148	5.4	8.5	50
10237X0272/FS	571AE00	16/06/2011	1213	7.2	16.7	344	144	26.7	80	2.68	145	146	5.1	8.1	50
10237X0272/FS	571AE00	06/09/2012	1150	7.0	17.8	352	143	27.9	62.2	2.82	111	156	5.7	8.4	30
10237X0272/FS	571AE00	22/01/2013	1260	7.0	10.3	347	139.9	26.28	86.9	3.1	150	147	5	8.4	37
10237X0272/FS	571AE00	15/05/2013	1145	7.2	15.7	356	141.3	25.9	72	2.6	125	144	5.4	8.7	34
10237X0272/FS	571AE00	23/01/2014	1225	7.1	11.5	352	132	23.41	79.5	3	141	138	4.9	8.3	34
10237X0272/FS	571AE00	12/05/2014	1160	7.2	15.3	360	133.8	24.38	60.45	3.1	107	141	5.6	8.1	32
10237X0087/HY	571AE00	06/04/2006	1199	7.1	14.9	332	137.6	28	87	3	135	164	4.7	7.5	71
10237X0087/HY	571AE00	02/05/2007	1259	7.2		329	147.5	25.9	105	2.5	164	140	4.1	8.1	50
10237X0087/HY	571AE00	02/04/2008	1385			321	137.3	28.8	77.4	3.9	187	177	3.9	7.1	79
10237X0087/HY	571AE00	16/07/2012	1136	7.3	15.8	359	148	24	56.9	2.19	110	137	5.4		20
10237X0087/HY	571AE00	25/04/2013	1080	7.2	15.4	355	144.4	27.89	53	2.6	96	163	6.1	9.3	25
10237X0087/HY	571AE00	09/08/2013	1107	7.4	17	370	140.7	23.12	47.8	2.1	98	143	5.9	8.7	26
10237X0087/HY	571AE00	10/02/2014	1125	8.0	14.3	369	143.6	22.83	53.8	2.6	99	134	5.7	8.7	30
10237X0274/F1	571AE00	16/12/1998		7.3	14	335	143.2	27.1	47.9	2.6	83	149	4.3	7.9	
10237X0274/F1	571AE00	03/05/2000		7.2	15	341	138.2	27.2	49.2	2.8	84	154	5.6	8.6	
10237X0274/F1	571AE00	13/03/2001		7.0	15	341	132.6	26.6	48.7	3.8	83	146	4.6	9	
10237X0274/F1	571AE00	16/04/2002		7.7	16	365	134.4	27	48.4	4.4	83	153	6.1	7.3	
10237X0274/F1	571AE00	17/01/2003		7.2	12	340	129.4	23.5	68.9	2.8	131	142	4.7	1.8	
10237X0274/F1	571AE00	18/03/2004	1086	7.2	15	337	143.4	27.2	50.6	2	89	155	5.3	8.3	33
10237X0274/F1	571AE00	02/06/2005	1134	7.1		333	142.2	28.5	59.1	2.5	108	163	5.3	8.5	50
10237X0274/F1	571AE00	26/07/2006	1250	7.1	17.2	326	141.8	28.7	84.2	3.3	146	167	5.1	8.5	50
10237X0274/F1	571AE00	24/07/2007	1264	7.1	16.3	327	141	29.7	84	3.5	153	173	4.3	7.8	
10237X0274/F1	571AE00	22/07/2013	1114	6.6	17.5	357	147.4	26.41	52.2	2.3	93	164	6.3	8.7	44
10237X0274/F1	571AE00	11/09/2013	1102	7.1	16.1	362	138	26.85	46.8	2.3	87	157	6.3	8.8	40
10237X0274/F1	571AE00	15/07/2014	1066	7.2	16.1	362	139	27.39	45.9	2.6	80	153	6.4	8.9	37
10237X0274/F1	571AE00	10/09/2014	1115	7.2	16.8	371	135.8	26.3	44.52	2.4	81	155	6.3	8.9	34
10232X0047/F	571AE00	12/01/2005	716	7.3	9	302	119.2	22.4	5	1	10	122	3.7	7.2	26
10232X0047/F	571AE00	04/08/2011	687	7.4	16	293	117	22.3	4.7	1.17	11.2	117	3.1	9.2	20
10232X0047/F	571AE00	11/09/2013	684	7.5	16.3	300	112.9	21.7	3.8	0.9	11	111	2.8	9.1	28
10237X0271/F1	571AE00	21/10/2002		7.2	17	345	142.4	37.6	33.9	5.2	117	116	4.3	7.7	
10237X0271/F1	571AE00	17/03/2005	1190	7.3	15	330	146.4	21.5	74.7	1.8	151	124	4.5	7.8	50
10237X0271/F1	571AE00	19/09/2007	1350	7.3	15.5	308	152.9	22.8	97.7	2	205	133	5.3	7.2	
10237X0271/F1	571AE00	12/10/2009	1115	7.3	15.8	369	152	22.2	58.8	2.09	105	134	6.6	8.3	50
10237X0271/F1	571AE00	20/10/2011	1066	7.1	15.1	382	156	22.9	50.3	2.22	88.6	131	7.1	8.9	20
10237X0271/F1	571AE00	22/05/2013	971	7.0	15.5	420	136.2	16.66	34.6	1.6	62	79	4.6	9.1	27

Résultats d'analyses sur l'entité BD LISA 571AE (extraction ADES)

Point bss	Entité (BDLISA)	Date prélt	μS/cm		°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μg/l
			Cond	pH	Temp	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	Si	B	
10237X0275/HY	573AA00/571AE00	15/12/1998		7.2	13	326	262	33.5	6.4	0.1	19	427	4	8.1		
10237X0275/HY	573AA00/571AE00	07/02/2006	1307	7.2		353	250.3	34.8	7	1	15	466	4.8	8.5	67	
10237X0275/HY	573AA00/571AE00	09/03/2011	1411	7.2	12.9	354	283	37.3	7.2	1.42	18.4	533	4.7	9	50	
10238X0009/HY	571AE02	26/11/1999		7.1		397	127.7	17.5	4.3	1.7	10	69	4.9	7.5		
10238X0009/HY	571AE02	13/03/2001		7.0	12	408	113.3	15.2	5.2	2	9	42	6.6	8.4		
10238X0009/HY	571AE02	20/11/2003		7.2	14	398	129.5	16.9	3.9	0.5	9	54	6.2	7.3		
10238X0009/HY	571AE02	13/01/2005	696	7.0		397	126	16.4	5	1	9	42	6.3	8.4	25	
10238X0009/HY	571AE02	13/01/2010	736	7.2	12.1	391	129	18.3	4.5	0.99	11.3	65.9	6.5	8.1	50	
10238X0009/HY	571AE02	20/10/2010	818	7.2	14.2	365	121	15.4	4.2	0.9	10.6	40.4	7.7	8.3	50	
10238X0009/HY	571AE02	07/08/2012	738	6.9	18.1	387	127	17.4	4.6	1.38	11.3	58.1	6.9	7.9	20	
10238X0009/HY	571AE02	08/08/2013	727	7.0	15.3	412	127.1	16.27	4.1	0.7	11.3	41.2	8.4	8.6	16	
10241X0013/HY	571AE02	20/10/1998		7.3	14	335	209	21.4	85.2	0.5	153	229	6.9	7.8		
10241X0013/HY	571AE02	12/09/2002	1716	7.1	16	340	194.8	26.9	111.2	6.1	185	261	6.4	7.5		
10241X0013/HY	571AE02	26/07/2006	1743	7.1	15	328	214.5	26.9	122	3.3	238	293	8.1	8	63	
10241X0013/HY	571AE02	11/02/2008	1529	7.1		333	213.1	26.8	120	3.4	231	314	8.7	8.4	59	
10241X0013/HY	571AE02	13/01/2010		7.3	14.1	361	201	22.6	104	3.2	187	243	7.4	8.5	70	
10241X0013/HY	571AE02	10/01/2012	1347	7.2	14	373	169	19.3	89.9	3.31	148	183	5.8	8.1	60	
10241X0013/HY	571AE02	14/04/2014	1418	7.0	14.8	377	172.9	19.49	96.84	3.7	157	210	5.2	8.4	50	
10238X0010/HY	571AE02	20/10/1998		7.2	16	370	133.6	8.2	11.7	0.1	28	56	7.5	7.2		
10238X0010/HY	571AE02	30/05/2000		7.0	15	367	142.4	10	17.5	3	38	71	7.7	7.6		
10238X0010/HY	571AE02	12/09/2002		6.9	15	367	149.5	11.8	23.8	3.5	51	89	7.8	7.1		
10238X0010/HY	571AE02	19/06/2003		7.2	15	372	162.6	10.6	21	2.5	46	79	7.7	7.1		
10238X0010/HY	571AE02	27/07/2005	1114	7.2	15.4	351	173.8	16	44.2	2	99	147	7.8	8.6	66	
10238X0010/HY	571AE02	22/05/2007	916	7.2	12	380	161.1	10.4	22.1	1.3	59	85	12.3	8.1		
10238X0010/HY	571AE02	01/09/2009	822	7.4	16.1	388	155	9.2	13.6	1	43.7	67.9	11.3	8.1	50	
10238X0010/HY	571AE02	18/01/2011	700	7.0	13.9	399	141	4.7	6.6	0.61	20.4	24.4	7	7.2	50	
10238X0010/HY	571AE02	14/06/2013	718	7.0	16.7	386	141.9	4.91	6.6	0.3	20.3	27.9	6.3	7.6	17	
10241X0172/F	571AE02	12/08/2005	1372	7.0	15.5	319	171	25.2	70.1	1.7	166	204	10.5		54	
10241X0172/F	571AE02	17/01/2006	1404	7.1	15.7	346	190.1	22.4	85.9	2	175	214	9.8	8.1	64	
10241X0172/F	571AE02	15/05/2006	1299			359	177	20.2	75.3	2.2	140	185	10.7	8.8	62	
10241X0172/F	571AE02	16/09/2010	1034	7.1	16	399	163	19.1	48.7	2.54	60.9	134	12.3	9.2	60	
10241X0172/F	571AE02	07/06/2012	1011	6.9	18.7	388	161	18.1	38.1	2.04	70.1	115	8.8	9.4	30	
10241X0132/FEX2	571AE02	15/05/1997		6.9	16	346	178.4	23.9	74.3	3.1	133	196	6.2	9.1		
10241X0132/FEX2	571AE02	15/10/1998		7.5	15	334	204	25	101	2.4	183	267	7.9	7.5		
10241X0132/FEX2	571AE02	13/09/1999		7.1	15	335	182.2	26.2	105.7	3.4	193	283	8.3	9.5		
10241X0132/FEX2	571AE02	04/10/1999		7.3	16	332	217.3	28.2	106.8	3.8	208	307	9.2	9.1		
10241X0132/FEX2	571AE02	26/09/2000		7.0	15	338	212.4	26.9	106.7	3.6	210	290	9.3	7.8		
10241X0132/FEX2	571AE02	15/10/2002		7.0	15	330	228.7	33.4	157.5	4.7	285	363	6.7	10		
10241X0132/FEX2	571AE02	13/03/2003		7.2	15	339	243.1	33.2	149	5.6	275	358	6.8	8.2	33	
10241X0132/FEX2	571AE02	27/07/2005	2201	7.2	15.9	321	271.5	34.5	169.5	4.2	346	414	7.8	9.4	50	
10241X0132/FEX2	571AE02	13/09/2007	2197	7.0	15	327	259.5	33.9	164.9	4.6	339	392	10.5	8.7	50	
10241X0132/FEX2	571AE02	03/09/2009	2014	7.1	17.9	347	246	30.7	147	3.68	313	346	9.4	9.2		
10241X0132/FEX2	571AE02	08/08/2011	1870	7.0	16.8	365	226	28.9	145	4.04	266	306	9.8	9.4	40	
10241X0132/FEX2	571AE02	13/06/2013	1460	7.0	17	381	167.3	20.91	94.2	2.4	179	201	8.6	9.6	44	

Analyses chimiques disponibles sur les ouvrages du secteur d'étude (extraction ADES)

Point	Date prélevt	μS/cm	pH	°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
		Cond		Temp	Ca	Mg	Na	Cl	SO4	HCO3	NO3	K	Si	B	COD	
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	19/01/2010	287	6.62	4.17								4	7.747			1.1
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	17/03/2010	1167	8.45	9.83	108	22.4	77.3	125	96	320	4.3	3.7	6.096			0.8
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	18/05/2010	983	8.15	15.27							3.4		8.128			1.2
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	20/07/2010	1266	8.00	19.54							3.2		7.493			0.9
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	22/09/2010	1590	8.21	16.69	121	29.2	185	289	146	317	3.1	7.9	8.128			0.9
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	18/11/2010	1174	8.27	11.62							2.9		7.62			1.4
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	17/01/2011	1115	7.96	10.41							4.7		6.858			0.9
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	17/02/2011	509	8.33	9.32												
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	23/03/2011	891	8.21	11.93	93	20.9	53	85	72	326	3.5	2.8	7.366			1.3
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	20/04/2011	1049	8.18	14.32												
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	19/05/2011	1206	8.05	15.47							3.8		7.874			1.1
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	22/06/2011	1295	8.12	18.72												
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	18/07/2011	1964	8.02	18.64							3.7		8.89			0.9
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	16/08/2011	2125	8.10	19.73												
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	20/09/2011	2299	8.32	16.19	121	28.9	224	341	158	312	3.4	9.2	8.382			0.9
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	19/10/2011	1680	8.07	13.75												
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	17/11/2011	959	8.05	11.67							4.1		7.1			1.3
ARGENS A LE-THORONET 4_6300121	07/12/2011	1262	8.30	11.18												
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	10/08/2005	1849	8.2	20.5								0.1				1.1
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	27/09/2005	1978	8.1	16.6	125	32.7	241	380	168	306	2.3	8.9				0.9
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	08/12/2005	1160	8	7.8							4.6					2.1
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	21/03/2006	1312	8.4	11.8	105	25.1	125	201	120	297.1	3.5	5.5	2.5	50		1.3
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	16/05/2006	1690	8.15	17.2							2.9		4.4	50		1.3
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	18/07/2006	1871	8.15	23.1							3		6.8	50		1.4
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	21/09/2006	1632	8.35	19.6	194	37.6	184	293	147	293.4	3.7	8	4.3	50		1.6
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	14/11/2006	1942	8.3	11.3							2.4		4.2	50		1.1
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	21/02/2007			9.57												
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	21/03/2007	1674	8.3	9.9	114	29.4	181	292	149	298.3	1.7	7		50		1.3
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	15/05/2007	1577	8.1	16.9							2.7			100		1.7
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	18/07/2007	1868	8.1	21.54								1.1		50		1
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	19/09/2007	1856	8.1	18.31	129	31.8	254	370	185	284.9	0.6	8.4		50		1.4
ARGENS A LE-THORONET 3_6205090	21/11/2007	1831	8.15	8.98	127	31.1	202	330	168	316.6	2	7.9		50		1.6

Analyses chimiques disponibles sur les eaux de l'Argens (extraction ADES)

Date heure	Nom ouvrage	Cond (μS/cm à 25°C)	Temp (°C)	pH	Temp (°C)	piézo/repère	Remarque
07/08/2014 14:05	FP1	796	27.1	7.75	26.6	-	
07/08/2014 09:05	Sce Gayepan	716	15.3	7.09	15.1	-	
06/08/2014 12:55	Sce Entraigue	1059	16.2	7.21	15.4	3.245	
06/08/2014 10:50	F5 SIAE	1146	15.8	7.18	15.8	12.97	en pompage
06/08/2014 12:05	F3 SIAE	1054	16.6	7.29	16	10.91	en pompage
06/08/2014 11:30	F1 SIAE	1055	16.4	7.21	16	-	
07/08/2014 10:45	FP15	1706	15.9	6.87	15.4	environ 7 m	Pas de pompe, eau très turbide
06/08/2014 13:30	ArgensBarage	1585	22	8.19	21.7	-	
15/10/2014 12:00	AEP Thoronet						Pompe HS en aout, prélevt reprogrammé en octobre
02/10/2014 13:45	ArgensBarage	1669	19.5	-	-	Hmire =72.62	
02/10/2014 12:45	Sce Michel	1050	15.3	-	-		
02/10/2014 16:00	ArgensAmont	1708	17.8	-	-		

Paramètres physico-chimiques des eaux prélevées lors des campagnes spatiales d'échantillonnage de 2014.

Date heure	Nom ouvrage		pH	Eh (mV)	O2 (mg/l)	Cond (µS/cm à 25°C)	Temp (°C)	ref SF6	ref CFC	Ref gaz
19/06/2015 09:25	AEP Thoronet	ESO	7.07	342.2	6.95	931	15.6	104	507	A39-A36
19/06/2015 11:15	F5-SIAE	ESO	7.07	140	5.8	1158	15.6	33	513	A38-GN1002
19/06/2015 12:00	F6-SIAE	ESO	7.19	303	5.97	1130	15.5	AC20	503	GN722-GN748
19/06/2015 13:15	F1-SIAE	ESO	7.07	168	5.68	1055	16.3	42	403	GN707-A18
19/06/2015 14:00	Sce Entraigue	ESO	7.11	282	6	1060	16	105	44	A13-A25
19/06/2015 15:00	F1-V1(vidauban)	ESO	7.12	255	7.5	1054	16.2	509	401	GNV-GN1004
19/06/2015 15:45	Barrage Argens	ESU	8.13	210	8.42	1287	20.8			
19/06/2015 14:30	Sce Michel	ESO				1014	15.3			
19/06/2015 17:00	Argens Amont "barrage Moutas"	ESU	8.18	212.2	9.22	1204	20.3			
19/06/2015 17:42	Argens n°2 (intermédiaire)	ESU	8.22	210	9.17	1178	20.1			

Paramètres physico-chimiques des eaux de la campagne spatiale d'échantillonnage du mois de juin 2015.

Diagramme de Piper

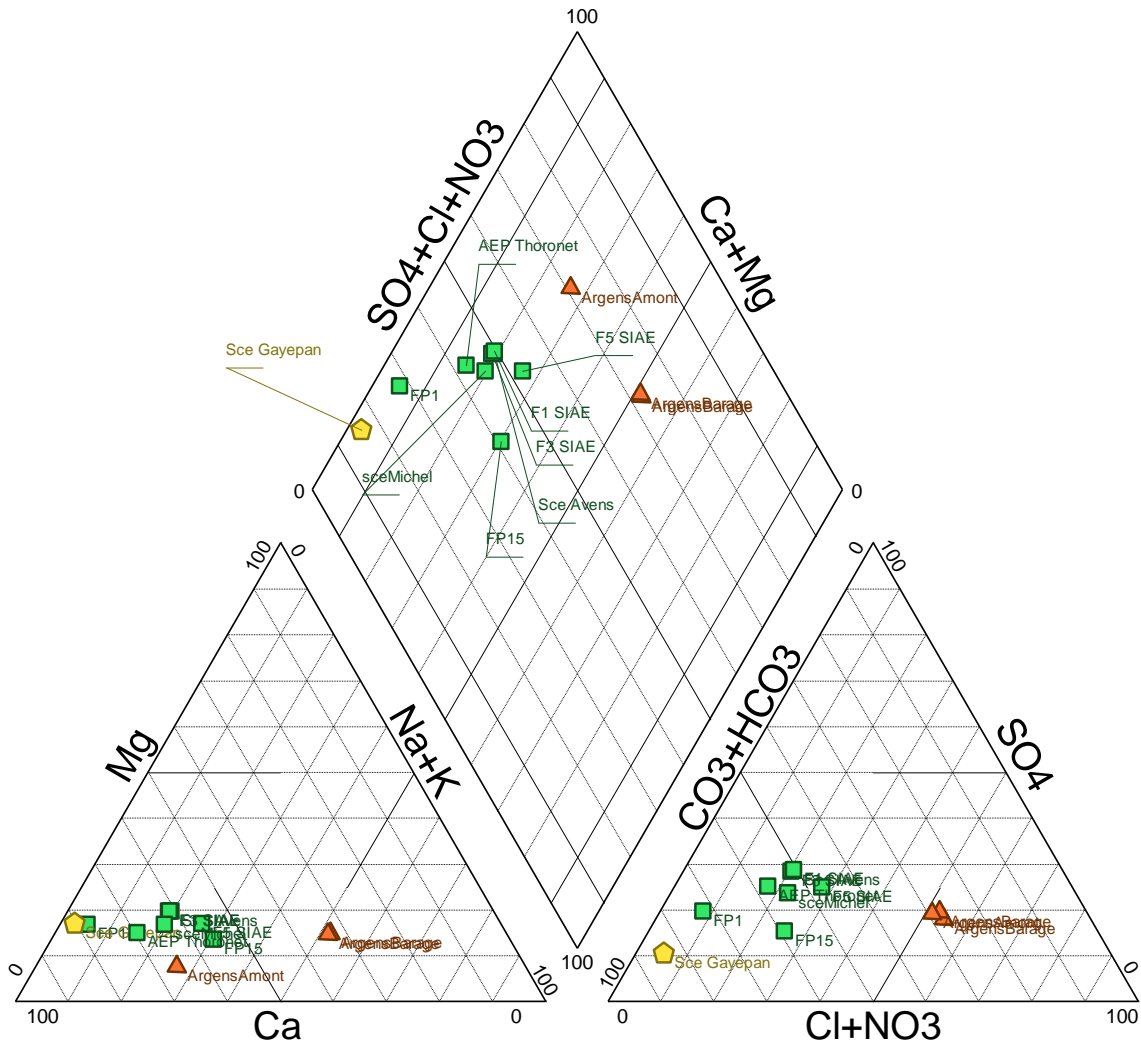
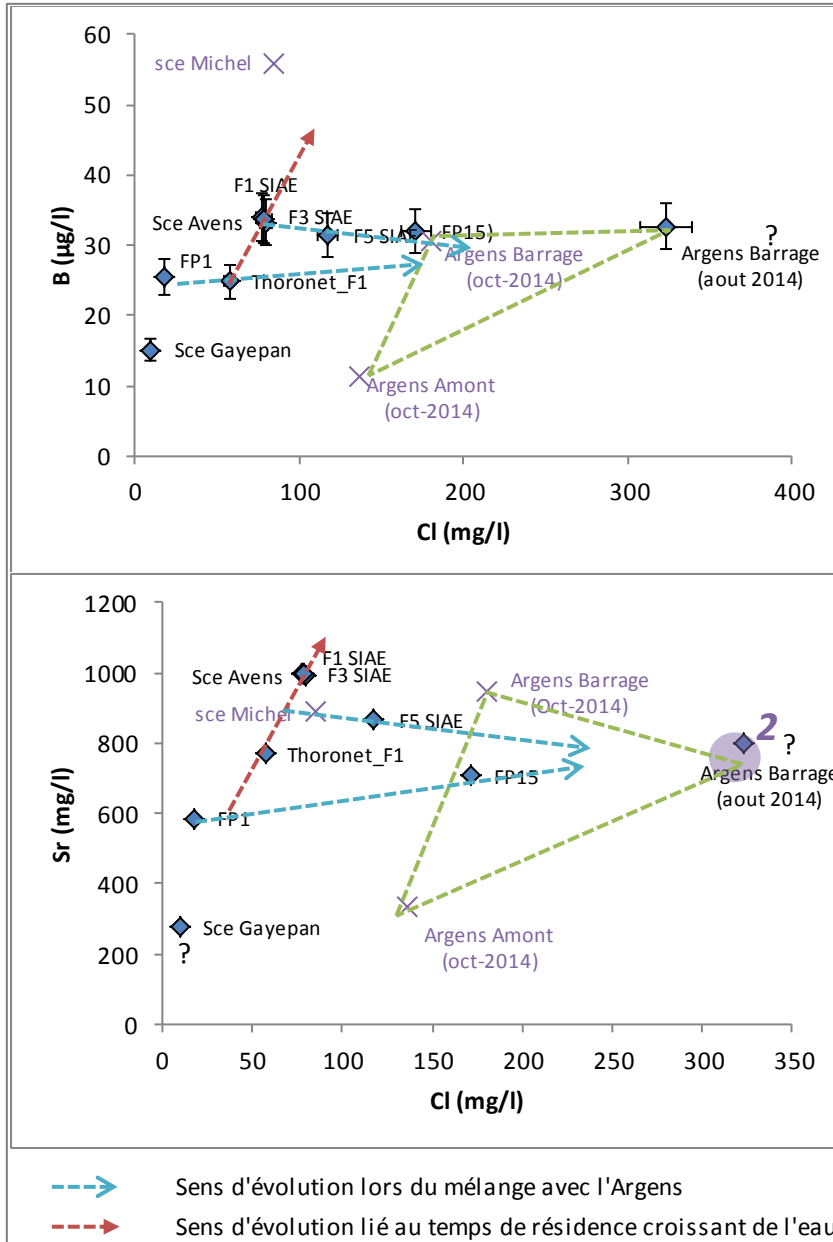
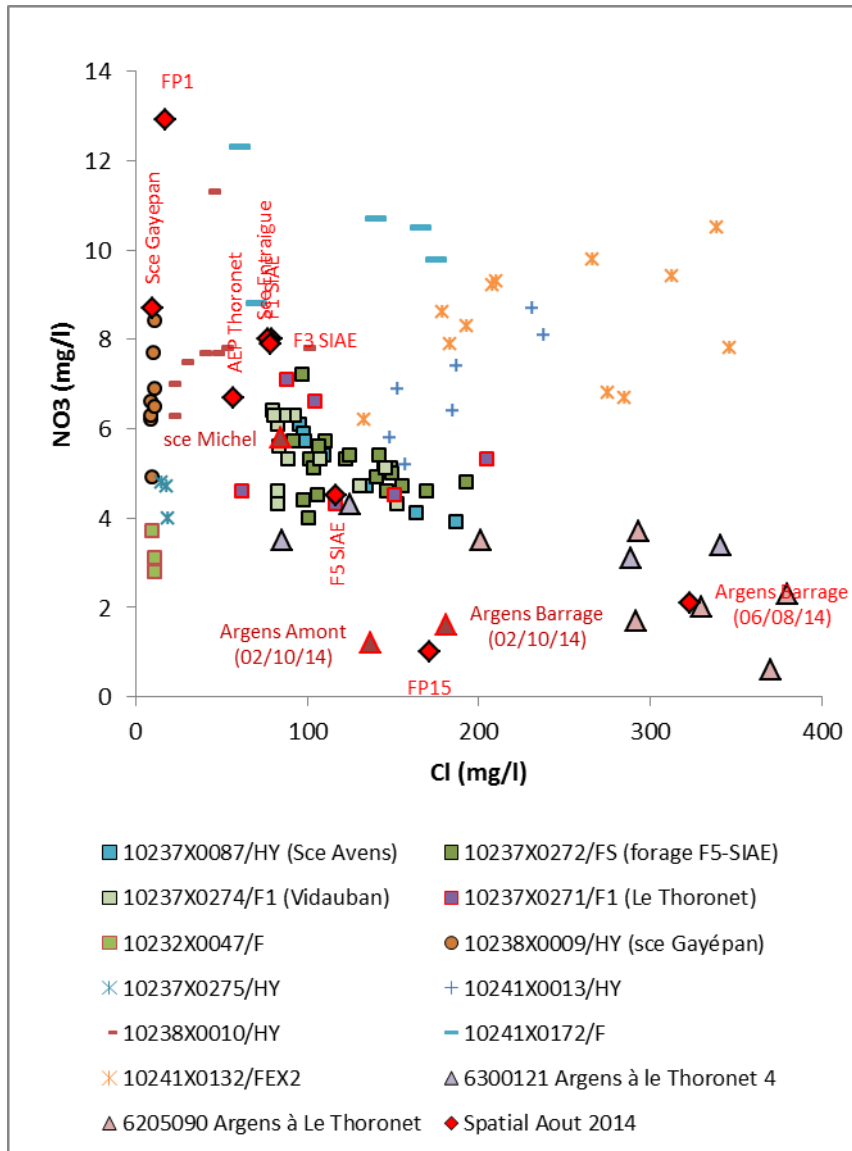


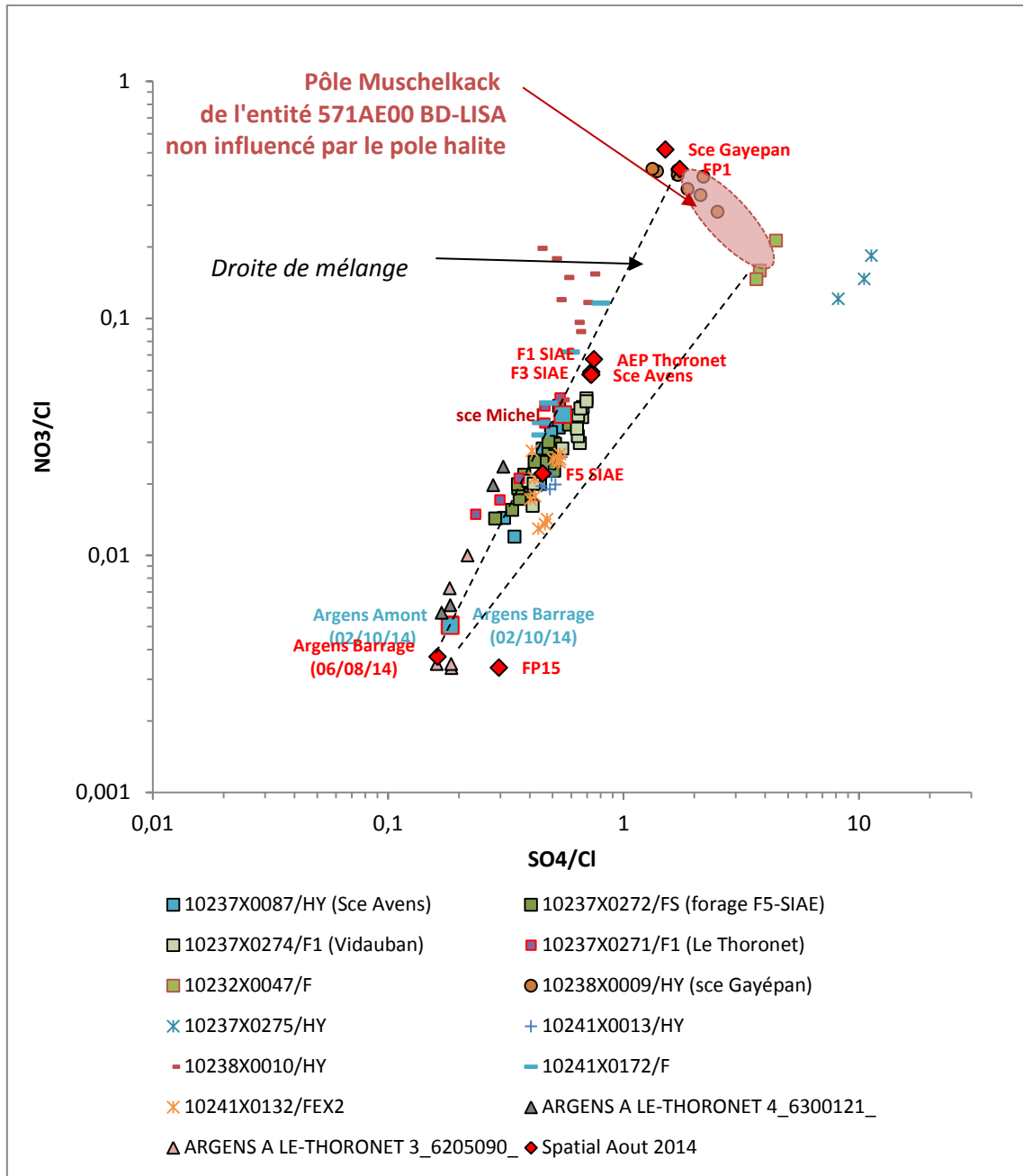
Diagramme de Piper des eaux de la campagne spatiale d'échantillonnage calculé à l'aide de Diagrammes (Roland SIMLER, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon).



Evolution des teneurs en bore et strontium en fonction des teneurs en chlorures des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.



Evolution des teneurs en nitrates en fonction des teneurs en chlorures des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.



Evolution du rapport molaire NO₃/Cl en fonction du rapport molaire SO₄/Cl des eaux souterraines et de surface (Argens) de la zone d'étude.

Annexe 10

Résultats détaillés des analyses SF6 / CFC



PLATEFORME CONDATE-eau

OSUR

Campus de Beaulieu Bat 15

263 av. du général Leclerc

35042 RENNES

osur-datation@univ-rennes1.fr

Point	Ampoule	altitude (m)	T° recharge	CONCENTRATION pmol/L				
				SF ₆	SF6 corr ex	CFC-12	CFC-11	CFC-113
AEP thornet	sf104	170	15	0.00172	0.00144		4.275	0.329
AEP thornet	cfc507	170	15			1.974	4.503	0.477
			<i>moyenne</i>	0.00172	0.00144	1.974	4.389	0.403
			<i>ecartype</i>				0.161	0.105
F1 SIAE	sf42	170	15	0.01220				0.554
F1-SIAE	cfc403	170	15			16.191	8.162	0.609
			<i>moyenne</i>	0.01220	#DIV/0!	16.191	8.162	0.582
			<i>ecartype</i>					
F1-V1	sf509	170	15	0.00775	0.00674		4.699	0.778
F1-V1	cfc401	170	15			2.984	4.791	0.762
			<i>moyenne</i>	0.00775	0.00674	2.984	4.745	0.770
			<i>ecartype</i>				0.065	0.011
F5 SIAE	cfc513	170	15			6.233	5.704	0.553
F5 SIAE	sf33	170	15	0.00526				0.439
			<i>moyenne</i>	0.00526		6.233	5.704	0.496
			<i>ecartype</i>	#DIV/0!				0.081
F6 SIAE	ac20	170	15	0.00694	0.00538	8.454		0.515
F6 SIAE	cfc503	170	15				6.430	0.583
			<i>moyenne</i>	0.00694	0.00538	8.454	6.430	0.549
			<i>ecartype</i>					0.04757
sce	sf44	170	15	0.01231		14.234		0.544
sce	cfc105	170	15				8.146	0.545
			<i>moyenne</i>	0.01231		14.234	8.146	0.545
			<i>ecartype</i>					0.001



PLATEFORME CONDATE-eau
 OSUR
 Campus de Beaulieu Bat 15
 263 av. du général Leclerc
 35042 RENNES
osur-datation@univ-rennes1.fr

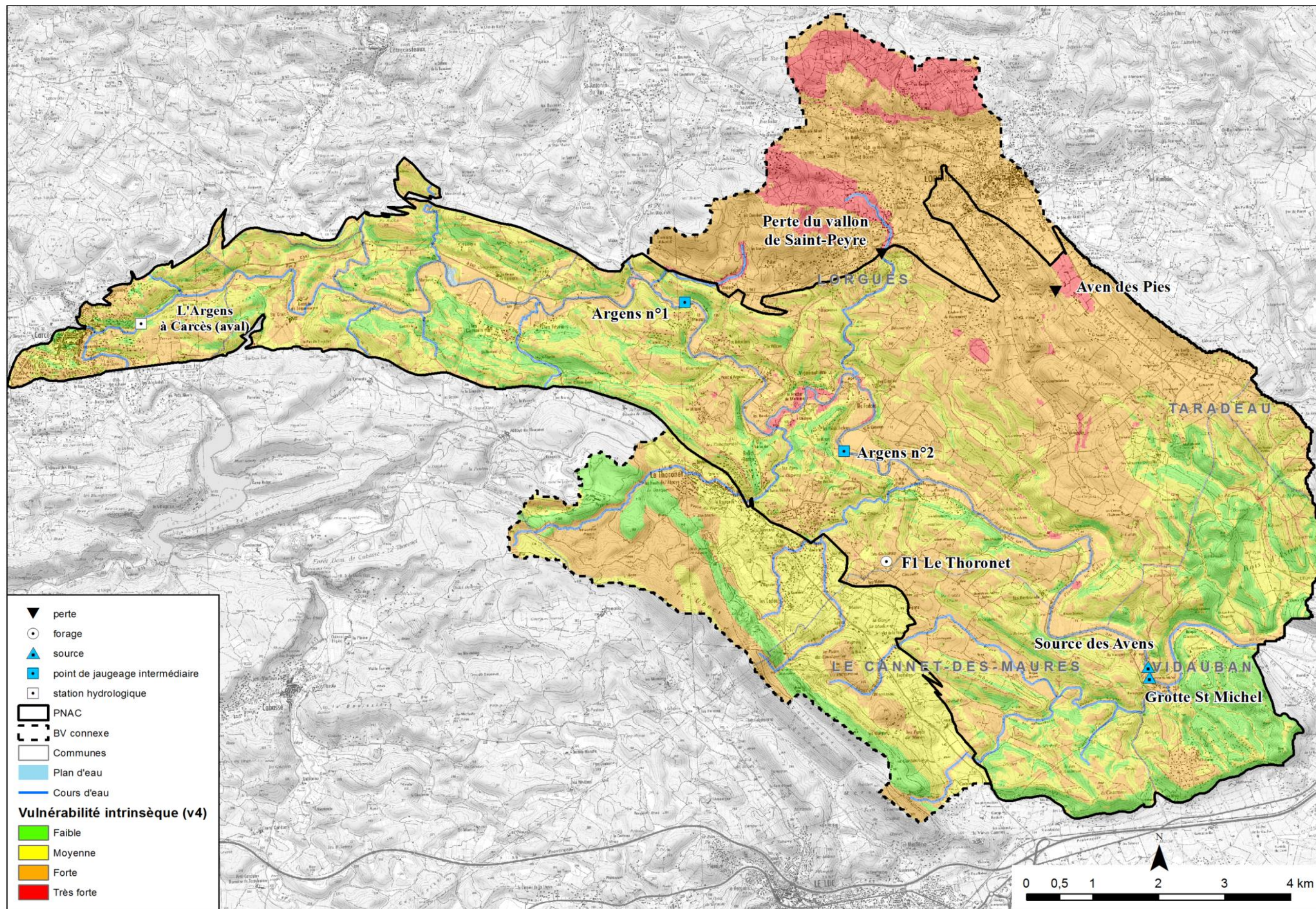
		Sugisaki mol/L calcul									
N° Flacon	Point	He	Ne	H2	Ar	O2	N ₂	CH4	CO2	N2O	H2S
GnA39	AEP_Thoronet		1.0232E-08	0	1.7802E-05	0.00013213	0.00061478	0	0.00159403	0	0
GNA36	AEP_Thoronet		9.5381E-09	0	1.7269E-05	0.00013402	0.00058806	0	0.00159075	0	0
GN707	F1_SIAE		8.4387E-09	0	1.6603E-05	0.00012447	0.00055212	0	0.00112501	0	0
GnV	F1-V1		8.4274E-09	0	1.5691E-05	0.0001099	0.00052286	0	0.00126774	0	0
GN1004	F1-V1		1.0872E-08	0	1.9428E-05	0.00017	0.00072776	0	0.00127099	0	0
GnA38	F5_SIAE		7.2336E-09	0	1.5054E-05	9.8562E-05	0.00049387	0	0.00109736	0	0
GN1002	F5_SIAE		8.1756E-09	0	1.7244E-05	0.00012683	0.0006293	0	0.00112412	0	0
GN748	F6_SIAE		1.0427E-08	0	1.8038E-05	0.00011368	0.000622	0	0.00114815	0	0
GN722	F6_SIAE		1.0485E-08	0	1.7861E-05	0.00015766	0.0006285	0	0.0011566	0	0
GNA13	Sce		8.5284E-09	0	1.5786E-05	0.00011099	0.0005382	0	0.00112667	0	0

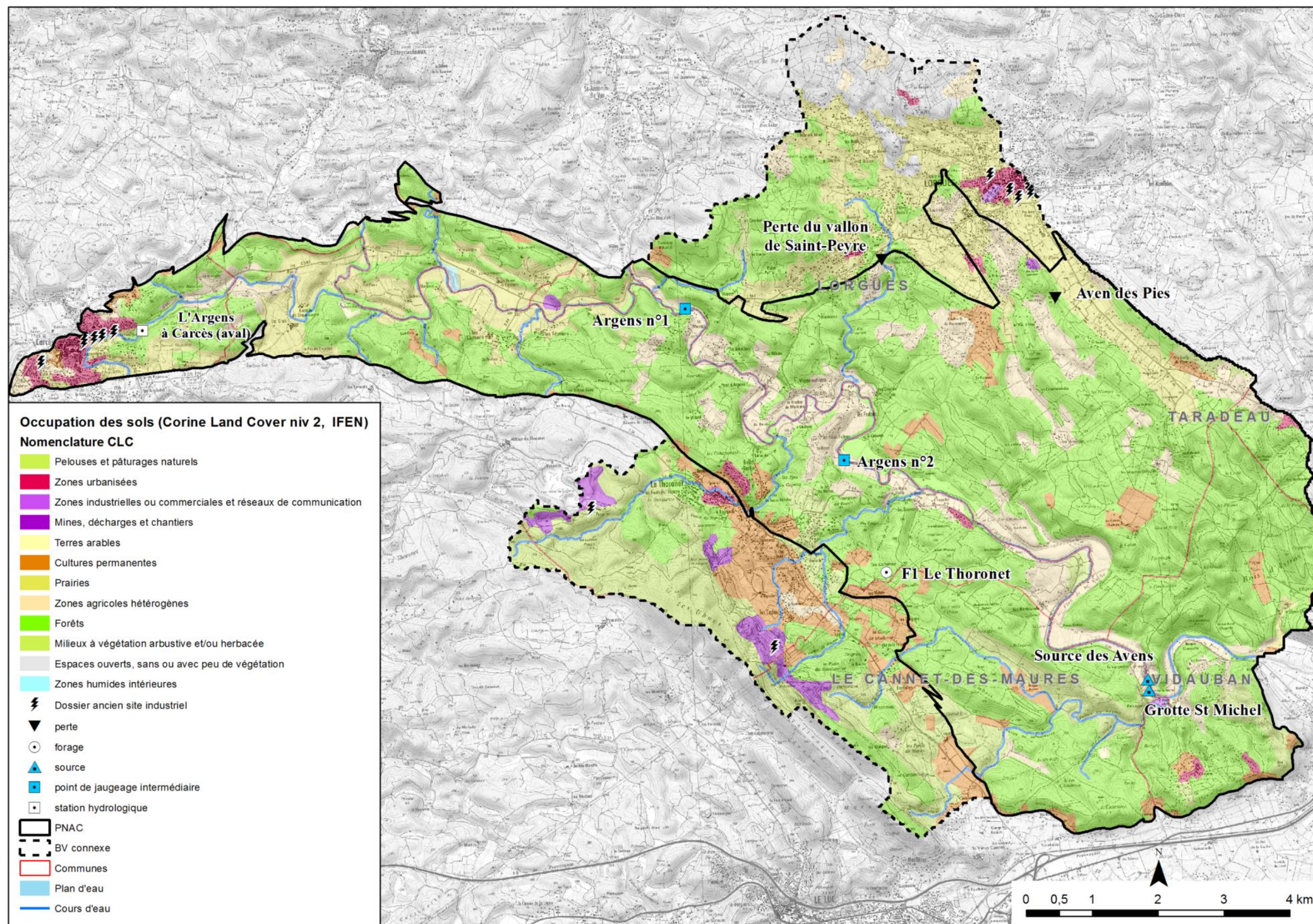
Annexe 11

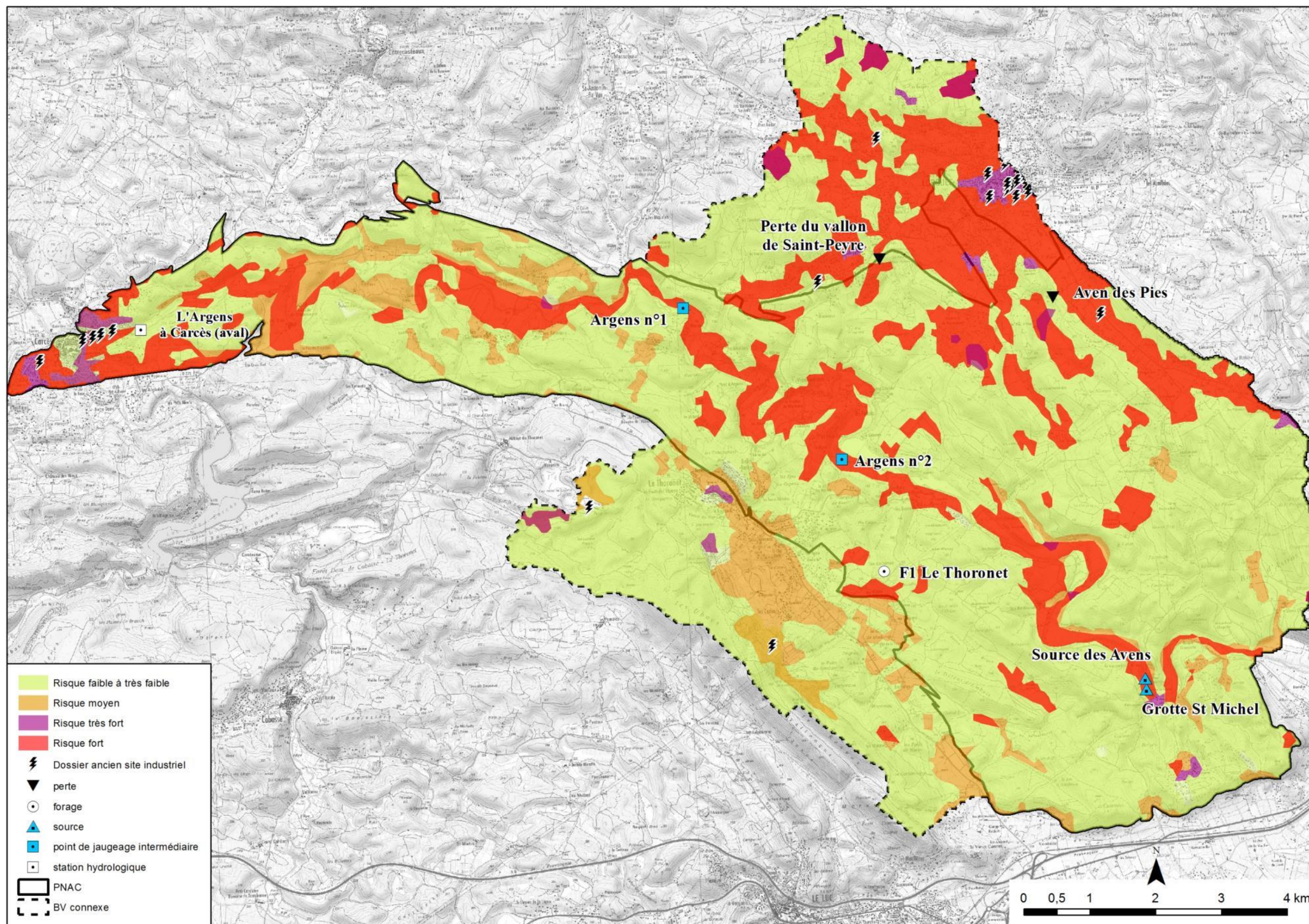
Carte de vulnérabilité globale selon la méthode PaPRIKa – pondération n°4

Carte de l'occupation des sols (pressions anthropiques)

Carte des risques, issue de la comparaison des cartes de vulnérabilité et des pressions









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 – Côte d'Azur
117, avenue de Luminy
BP169
13276 – Marseille cedex 09 – France
Tél. : 04 91 17 74 77