

Document public

Analyse des phénomènes de dissolution du gypse et de leur lien avec l'aléa effondrement Commune de Draguignan

Rapport final

BRGM/RP-63399-FR
CEREMA – H14-029
Juin 2014



Direction territoriale Méditerranée



Analyse des phénomènes de dissolution du gypse et de leur lien avec l'aléa effondrement Commune de Draguignan

Rapport final

BRGM/RP-63399-FR

Juin 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011RIS2019

Pour le BRGM : Rivet F., Cary L., Mathon C.

Pour le CEREMA : Thiébaud E., Giroux H.

Vérificateur :

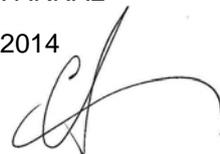
E. VANOUDHEUSDEN

Date : 18 avril 2014

Approbateur :

Signé par : C. ARNAL

Date : 3 juin 2014



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

DREAL PACA et CR PACA

Analyse des phénomènes de dissolution du gypse et de leur lien avec l'aléa effondrement

Commune de Draguignan – rapport final

date : février 2014**auteur** : Direction territoriale Méditerranée, Laboratoire d'Aix-en-Provence et BRGM PACA**responsable de l'étude** : Emilie Thiébaud (pour le CEREMA)**participants** :

pour le CEREMA : E. Thiébaud, H. Giroux, S. Arnaud, R. Gombault, A. Chopin

pour le BRGM : F. Rivet, C. Mathon et L. Cary

zone géographique : PACA – Var - Draguignan**nombre de pages** : 79 pages (+ annexes)

n° d'affaire : 126000161

maître d'ouvrage : DREAL PACA (JL. Genois et G. Verrhiest)

4 allée Louis Philibert

13 100 LE THOLONET

référence : devis n° 60 2012 D227

n° chrono	n° version	Description de la révision
H14-029	1	Version initiale

Réf : H14-029

Le : 14/04/2014

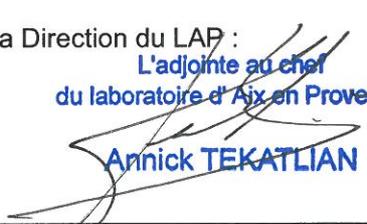
Auteur(s) du rapport :

Emilie THIEBAUD

Vérifié par le Responsable Technique :

**Pierre AZEMARD**

Vu et transmis,

La Direction du LAP :
L'adjointe au chef
du laboratoire d'Aix en Provence
Annick TEKATLIAN

Mots-clés : Draguignan, gypse, géochimie, sulfate, effondrement, hydrogéologie

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

Thiébaud E., Giroux H. (2014). Analyse des phénomènes de dissolution du gypse et de leur lien avec l'aléa effondrement – Commune de Draguignan – rapport final. Rapport H14-029, 101 p.

Rivet F., Cary L., Mathon C. (2014) – Analyse des phénomènes de dissolution de gypse et de leur lien avec l'aléa effondrement. Commune de Draguignan. Rapport final. BRGM/RP-63399-FR, 101 p., 47 ill., 2 ann.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
Pour le CEREMA : Obligation de reproduire ce document sous sa forme intégrale

Synthèse

Cette étude a été menée en collaboration technique entre le BRGM et le CEREMA, dans le cadre de la convention annuelle 2011 entre le Conseil Régional et le BRGM d'une part (action A2.3 « Risque d'effondrement lié au gypse sur la Dracénie (83) »), et dans le cadre d'une commande de la DREAL PACA pour le CEREMA¹ d'autre part.

La Dracénie a été fortement touchée par l'épisode pluvieux de juin 2010. Ajoutés aux problèmes d'inondation, de nombreux mouvements de terrain ont été activés ou réactivés par cet événement. Parmi ces mouvements de terrain, figurent l'affaissement de La Clappe situé au nord de Draguignan, sur lequel ont été observées des crevasses largement ouvertes. Le sous-sol de cette région est en effet marqué par une géologie complexe, où le gypse est présent dans les formations triasiques, le plus souvent sous forme de lentilles, aussi bien à l'affleurement qu'en profondeur. Le gypse est une roche très facilement dissoute, en particulier par des eaux peu minéralisées (telles que des eaux météoriques ou des eaux superficielles) ; dissolution menant à la formation de vides souterrains, d'évolution relativement rapide à l'échelle d'une vie humaine (comparée à l'évolution des karsts calcaires).

L'étude est plus particulièrement centrée sur la commune de Draguignan sur laquelle, en plus d'un contexte géologique particulièrement favorable à la présence de gypse, viennent s'ajouter des écoulements souterrains complexes répartis entre les deux principaux aquifères des formations carbonatées jurassiques du Plan de Canjuers et de ses bordures, et des formations marno-calcaires et argileuses du Trias (Muschelkalk).

Un des objectifs de cette étude a consisté dans un premier temps à réaliser une synthèse géologique et hydrogéologique du secteur d'étude centré sur la région de Draguignan, et de recenser et caractériser les mouvements de terrain affectant la commune de Draguignan. Cette synthèse s'est basée sur les données existantes (en grande partie issues de rapports dont disposaient la commune), et s'est appuyée également sur l'acquisition de données récentes sur le terrain (campagne de jaugeage, mesures piézométriques). Les zones de dissolution et effondrements sont alignées le long d'une direction sud sud-est. Les zones d'instabilité les plus remarquables recensées sur la commune de Draguignan sont localisées au niveau de deux secteurs : au lieu-dit « La Clappe » au nord de la commune, d'une part et dans le centre-ville, d'autre part : dans le centre ancien (église) et au foyer Ramadier (ancien jeu de boules). Trois entités hydrogéologiques sont identifiées sur la commune de Draguignan :

- Formations marno-calcaires et argileuses du Trias au Crétacé : représentées par les formations argilo-gypseuses du Keuper ;
- Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan (principal aquifère exploité par la commune de Draguignan pour l'AEP) dont le principal exutoire est la source de la Foux;
- Massifs carbonatés jurassiques du Plan de Canjuers et ses unités de bordure.

Les mesures de débits sériées (jaugeage) ainsi que l'analyse de la carte piézométrique levée en 1969 (Arvois et al. 1969) ont montré qu'il n'y aurait pas d'alimentation massive des gypses par une perte localisée de la Nartuby mais uniquement une alimentation diffuse par l'infiltration en surface et certainement des infiltrations diffuses de la nappe alluviale vers les gypses via

¹ CEREMA : Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (ex-CETE)

des zones de fractures. Cette synthèse a permis de consolider les connaissances sur la répartition des phénomènes de mouvements de terrain et sur le fonctionnement hydrogéologique du secteur.

Après cette première étape, un travail a été mené sur l'interprétation et la valorisation des données sur la composition chimique des eaux souterraines (hydrochimie), afin de mieux appréhender les phénomènes de dissolution des roches évaporitiques. Les données disponibles dans la banque de données ADES² ont été utilisées et ont montré que la chimie des eaux souterraines évolue entre deux pôles majeurs de mélange représentés par les eaux issues des calcaires jurassiques (fortes proportions de calcium, magnésium et bicarbonates) et les eaux du type de la Foux à faciès sulfaté-chloruré-sodique. L'évolution de la composition chimique des points d'eau montre, d'amont en aval, une augmentation de la teneur en sulfates, mais aussi en chlorures jusqu'à atteindre la saturation par rapport au gypse dans les eaux de la Foux, et pour les points aval situés à Trans-en-Provence. Les campagnes d'analyse géochimique réalisées en 2013 et leur interprétation ont apporté de nouvelles données, précieuses pour la compréhension de l'hydrochimie des eaux souterraines, plus particulièrement sur Draguignan. Ce travail a en effet permis d'affiner et compléter les pôles chimiques des eaux souterraines, en distinguant les pôles « halite, gypses, dolomies et carbonates » des eaux de la source de la Foux du pôle « gypses, dolomies et halite » des eaux prélevées près du lieu-dit de la Clappe.

A l'issue de cette étude, plusieurs points d'amélioration de la connaissance ont été soulevés et permettraient de lever les incertitudes :

- il s'avère nécessaire de replacer le tracé précis de l'ancienne galerie acheminant les eaux souterraines de la source des Rayollets vers le centre-ville afin d'évaluer les éventuelles influences de ce drain artificiel sur les écoulements souterrains et sur la répartition des mouvements en surface ;
- une étude plus fine de la tectonique locale permettrait de valider les hypothèses sur les écoulements préférentiels ;
- la réalisation d'un traçage artificiel quantitatif, avec une injection au niveau de l'effondrement de la Clappe, permettrait :
 - . d'identifier le(s) lien(s) hydraulique(s) entre ce point et d'autres points de sortie dont la source de la Foux (et d'autres points de suivi à définir) ;
 - . d'acquérir des informations sur l'hydrodynamisme de l'écoulement entre ce point d'injection et les points de sortie suivis (vitesse de transfert, taux de restitution, ...) ;
- l'analyse de la composition chimique (incluant également les éléments mineurs et traces) et isotopique, des eaux souterraines mais aussi des roches présentes sur le secteur, permettrait de valider définitivement l'hypothèse de la dissolution du gypse, de préciser les conditions de dissolution des carbonates et évaporites ainsi que les conditions de mélange entre les différents types d'eau.

Compte tenu du contexte varois, hors les investigations préconisées ci-dessus, il pourrait également être utile de valider les hypothèses en matière de dissolution diffuse/ablation par un suivi interférométrique (interférométrie différentielle satellitaire), tel que celui initié en 2011 suite aux inondations de 2010.

² Portail National d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines : <http://www.ad.es.eaufrance.fr/>

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte géologique et hydrogéologique du secteur d'étude.....	11
2.1. CONTEXTE GENERAL (BRGM)	11
2.1.1. Localisation géographique	11
2.1.2. Contexte géologique	12
2.1.3. Visite d'anciennes galeries d'exploitation de gypse.....	14
2.2. SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE (BRGM)	17
2.3. ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES (CEREMA).....	21
2.3.1. Mesures de débits sériés	21
2.3.2. Piézométrie.....	33
2.4. ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE LA VILLE DE DRAGUIGNAN (BRGM).....	38
2.5. SYNTHESE (BRGM+CEREMA)	39
2.5.1. Bilan	39
2.5.2. Perspectives	40
3. Les phénomènes d'effondrement sur la commune de Draguignan.....	41
3.1. RECENSEMENT DES EVENEMENTS (BRGM)	41
3.2. CAS REMARQUABLES (BRGM).....	42
3.2.1. Instabilités au lieu-dit « La Clappe » (BRGM + CEREMA)	42
3.2.2. Manifestations d'instabilités dans le centre ancien.....	47
3.2.3. Effondrement du foyer Ramadier, boulevard Joseph Collomp	49
3.3. SYNTHESE (BRGM).....	51
4. Hydrochimie et phénomènes de dissolution.....	53
4.1. ETAT DES LIEUX SUR LA COMPOSITION DES EAUX SOUTERRAINES SUR LA REGION DE DRAGUIGNAN (BRGM).....	53
4.1.1. Données exploitées	53
4.1.2. Résultats et interprétation	55
4.2. ZOOM SUR LA COMMUNE DE DRAGUIGNAN : ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES (CEREMA).....	59
4.2.1. Répartition de la conductivité des eaux.....	59
4.2.2. Analyses physico-chimiques	63
4.3. SYNTHESE (BRGM + CEREMA)	70
4.3.1. Bilan	70

4.3.2. Perspectives.....	70
5. Conclusions et perspectives.....	73
5.1. BILAN GENERAL (BRGM + CEREMA)	73
5.1.1. Fonctionnement hydrogéologique.....	73
5.1.2. Les phénomènes effondrements	73
5.1.3. Hydrochimie	74
5.2. PERSPECTIVES GENERALES (BRGM +CEREMA)	77
6. Bibliographie.....	79

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude (extrait www.geoportail.gouv.fr).....	11
Illustration 2 : Extrait carte géologique du BRGM à 1/250 000 et légende associée sur région de Draguignan (Feuille n°40 - NICE)	12
Illustration 3 : Carte géologique simplifiée à partir des cartes géologiques du BRGM à 1/50 000 sur Draguignan (Feuilles n°997-Salernes, n°1023-Draguignan, 1024-Fréjus-Cannes, limites communales représentées par traits noirs épais)	14
Illustration 4 : Plan schématique des galeries visitées (schéma réalisé à partir des mesures et observations de terrain prises le 20/07/12).....	15
Illustration 5 : Entrées des galeries centrale et nord. Affleurement chaotique de gypse et marnes affecté par de nombreux plis et microplis.	16
Illustration 6 : Photo de la galerie centrale	16
Illustration 7 : Photo du flanc nord à l'entrée de la galerie nord, observation de plis et microplis dans les bancs de gypse rouge et blanc, et dans les marnes (bancs plus clairs).....	16
Illustration 8 : Entités hydrogéologiques représentées sur la commune de Draguignan (d'après la synthèse hydrogéologique de la région PACA à 1/50 000 et la carte hydrogéologique du Var à 1/200 000)	18
Illustration 9 : Localisation des sources et lieux-dits cités dans l'étude de 1929	19
Illustration 10 : Liste des points de jaugeage	21
Illustration 11 : Carte de localisation des points de jaugeage	22
Illustration 12 : Exemple de jaugeage par micro-moulinet – campagne HE – point 5' : Nartuby à l'amont de la confluence avec la Nartuby d'Ampus	24
Illustration 13 : Résultats des campagnes de jaugeage HE (février 2013) et BE (juillet 2013). En gris foncé : mesure erronée / En gris clair : différence non significative	24
Illustration 14: Résultats de la campagne de jaugeages Hautes Eaux (février 2013)	27
Illustration 15 : Résultats de la campagne de jaugeages Basses Eaux (juillet 2013).....	28
Illustration 16 : Synoptique présentant les apports et pertes identifiés le long de la Nartuby lors des campagnes HE (février 2013) et BE (juillet 2013) – souligné avec accolades = ce qui est confirmé par les 2 campagnes et avec des différences supérieures à 15%.....	30
Illustration 17 : Synthèse des échanges substratum-cours d'eau identifiés lors des différentes campagnes de 1957, 1969, 1974 et 2013	31

Illustration 18 : Carte de localisation des points des campagnes de mesures de la conductivité et de la piézométrie.....	34
Illustration 19 : Carte piézométrique relevée en 1969 (d'après Arvois et al. 1969)	35
Illustration 20 : Évaluation grossière du débit transitant dans la nappe alluviale (cf. localisation des zones 1 et 2 sur l'illustration 19)	36
Illustration 21 : Résultats des campagnes de mesure de la piézométrie HE (février 2013) et BE (juillet 2013)	37
Illustration 22 : Localisation des points d'alimentation en eau potable exploités par la ville de Draguignan (points violet).....	38
Illustration 23 : Représentation schématique des échanges substratum/nappe alluviale/rivière et du transfert supposé de la fluorescéine (essai de 1929).....	40
Illustration 24 : Localisation des phénomènes de surface liés à la dissolution du gypse présents sur la commune de Draguignan (fond : feuilles géologiques du BRGM à 1/50 000 de Draguignan, Salernes et Fréjus).....	41
Illustration 25 : Photographie du secteur de La Clappe et des zones d'instabilités : fontis et affaissement (extrait rapport DDAF (Cova, 1998))	43
Illustration 26 : Photo des instabilités au lieu-dit de la Clappe (source CEREMA, juillet 2010).....	44
Illustration 27 : Photo des crevasses observées sur la zone d'affaissement sud (source CEREMA, juillet 2010).....	44
Illustration 28 : Schémas proposant un modèle d'évolution et de fonctionnement du secteur de la Clappe.....	46
Illustration 29 : Croquis d'interprétation montrant la structure géologique et les circulations d'eau souterraine sous le centre ancien, échelle 1/25 000 ^e (Uguet, 1958).....	47
Illustration 30 : Vue de la façade nord de l'église (photo de gauche) et fissure au sommet d'une ogive observée à l'intérieur de l'église (observation février 2013)	48
Illustration 31 : Fissures le long de la façade d'un immeuble (photo prise dans le centre ancien, février 2013)	48
Illustration 32 : Mise en sécurité de la zone de fontis (photo prise en février 2013)	50
Illustration 33 : Photo du fontis prise en février 2013. Dimensions observées : 5 à 6 m de diamètre, profondeur visible depuis la surface : au moins 4 m.	50
Illustration 34 : Tableau de correspondance n°BSS / nom du point	55
Illustration 35 : Diagramme de Piper des points d'eau de la région de Draguignan, dont les points d'eau 10241X0170/F2 (Sainte Barbe) et 10234X0087/FEX1 (Pont d'Aups), ainsi que les points d'eau Dragon, Frayères et Rayollets des aquifères des calcaires du Jurassique, le point d'eau Incapis de l'aquifère des dolomies du Muschelkalk. Les données incluent des données des campagnes 2013 du CEREMA d'Aix (La Foux, la Clappe et Rebouillon).	56
Illustration 36 : Evolution des rapports Mg/Na en fonction de Ca/Na et de Ca+Mg en fonction de HCO ₃ (bicarbonate) + SO ₄ (sulfate), incluant les données des campagnes 2013 du CEREMA.....	58
Illustration 37 : Carte de conductivité relevée en 1969, d'après Arvois et al. (1969) NB : les résistivités ont été converties en conductivité	60
Illustration 38 : Résultats des campagnes de mesure de la conductivité HE (février 2013) et BE (juillet 2013)	61
Illustration 39 : Conductivités mesurées en fonction de la profondeur des forages.....	62
Illustration 40 : Conductivités mesurées en fonction de l'altitude du fond des forages.....	63

Illustration 41 : Carte de localisation des points de prélèvement	65
Illustration 42 : Diagramme de Piper pour la campagne HE (février 2013).....	67
Illustration 43 : Calcul des volumes dissous et des taux d'ablation de la halite et de l'anhydrite pour la source de la Foux.....	68
Illustration 44 : Définition approximative du bassin versant hydrogéologique de la source de la Foux.....	69
Illustration 45 : Confrontation entre les valeurs de conductivité mesurées et les indices de mouvement en surface	75
Illustration 46 : Confrontation entre les faciès chimiques des eaux prélevées et les indices de mouvement en surface	76

Liste des annexes

Annexe 1 Analyse détaillée des données géochimiques existantes sur la région de Draguignan (données ADES et mairie)	83
Annexe 2 Analyse détaillée des données géochimiques nouvellement acquises lors des campagnes de prélèvement 2013	93

1. Introduction

La Dracénie a été fortement touchée par l'épisode pluvieux de juin 2010. Ajoutés aux problèmes d'inondation, de nombreux mouvements de terrain ont été activés ou réactivés par cet événement. Plus particulièrement, sur la commune de Draguignan, sur la zone d'affaissement connue au lieu-dit de la Clappe sont apparues des crevasses circulaires profondes témoignant de la réactivation de cet affaissement lié à la présence de vides souterrains. Le sous-sol de cette région est en effet marqué par une géologie complexe, où le gypse est présent dans les formations triasiques, le plus souvent sous forme de lentilles, aussi bien à l'affleurement qu'en profondeur. Le gypse est une roche très facilement dissoute, en particulier par des eaux peu minéralisées (telles que des eaux météoriques ou des eaux superficielles) ; dissolution menant à la formation de vides souterrains, d'évolution relativement rapide à l'échelle d'une vie humaine.

Dans ce contexte, cette étude a été menée en collaboration technique entre le BRGM et le CEREMA, dans le cadre de la convention annuelle 2011 entre le Conseil Régional et le BRGM d'une part (action A2.3 « Risque d'effondrement lié au gypse sur la Dracénie (83) »), et dans le cadre d'une commande de la DREAL PACA pour le CEREMA² d'autre part.

Ainsi, l'objet du présent rapport est de mieux comprendre la relation entre les phénomènes de dissolution et l'aléa effondrement/affaissement. Pour cela, l'étude est centrée sur le secteur de Draguignan où les mouvements de terrain type effondrement/affaissement sont récurrents, et où les formations gypseuses sont particulièrement bien représentées. La première partie du rapport présente le contexte géologique et hydrogéologique global, à partir des données bibliographiques d'une part et de nouvelles investigations d'autre part (visite d'anciennes carrières, mesures de débits sériées, mesures piézométriques). La deuxième partie présente les cas remarquables d'effondrements/affaissements présents sur la commune. Puis, dans la troisième partie, l'analyse des données hydrochimiques, existantes et nouvellement acquises dans le cadre de cette étude, permet de mieux appréhender les phénomènes de dissolution.

2. Contexte géologique et hydrogéologique du secteur d'étude

Dans ce chapitre, le BRGM propose une synthèse géologique et hydrogéologique, réalisée à partir de la bibliographie consultée et des observations terrain. Le CEREMA complète cette synthèse en présentant les résultats et l'interprétation des mesures réalisées dans le cadre de cette étude : mesures de débits sériées et mesures piézométriques.

2.1. CONTEXTE GENERAL (BRGM)

2.1.1. Localisation géographique

Draguignan se situe au pied du plateau de Canjuers et à environ 30 km de la mer Méditerranée (Illustration 1). La commune est traversée par la rivière la Nartuby dont le régime est intermittent, suivant les saisons. La Nartuby rejoint l'Argens quelques kilomètres plus à l'aval au niveau de la commune du Muy.

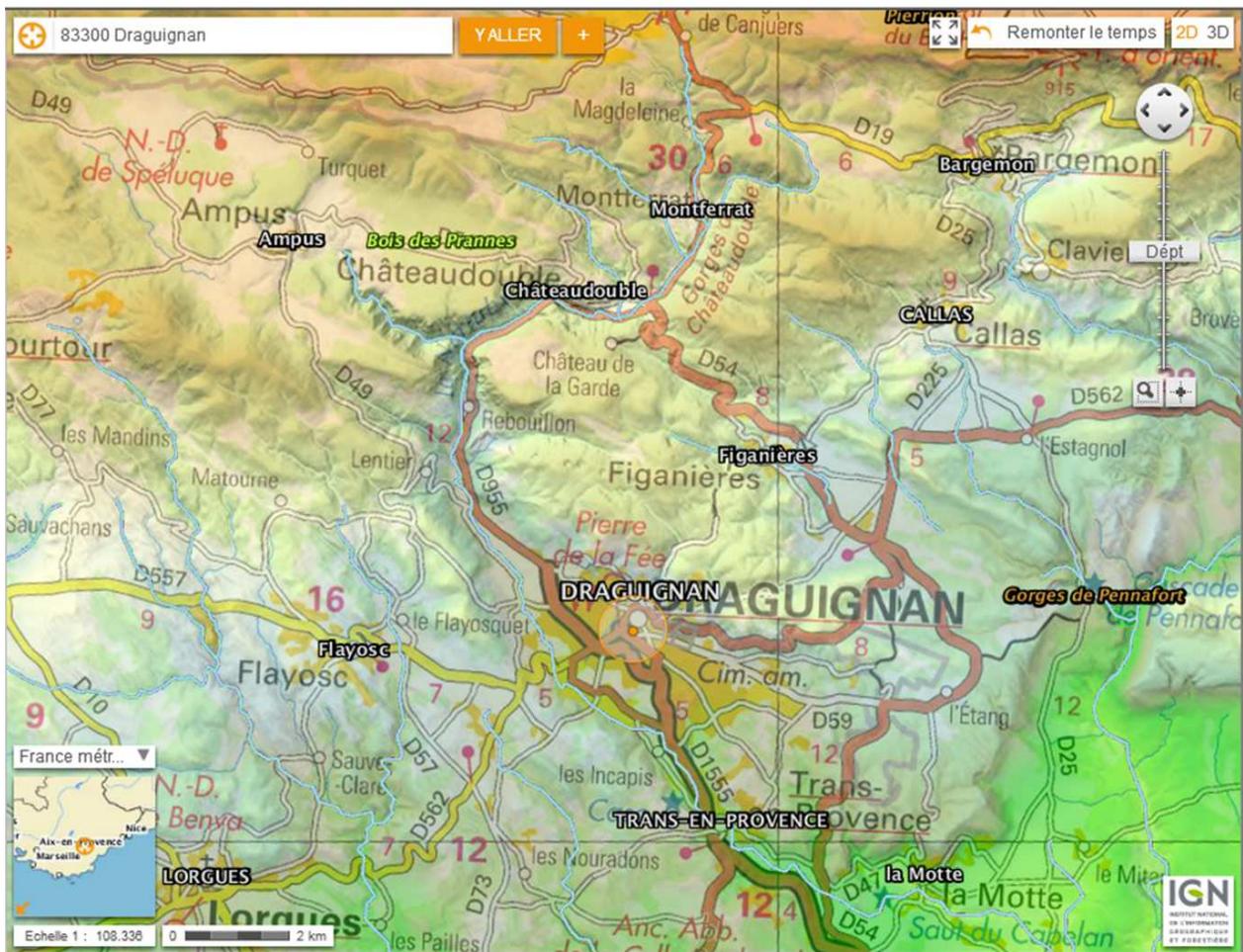


Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude (extrait www.geoportail.gouv.fr)

2.1.2. Contexte géologique

D'un point de vue géologique, trois principales formations affleurent sur le secteur, avec par ordre chronologique (de la plus âgée à la plus récente) : les calcaires et dolomies du Trias moyen (Muschelkalk), fortement karstifiés ; la formation argilo-gypseuse du Trias supérieur (Keuper) ; et les massifs carbonatés jurassiques (jurassique supérieur) du Plan de Canjuers (Illustration 2).

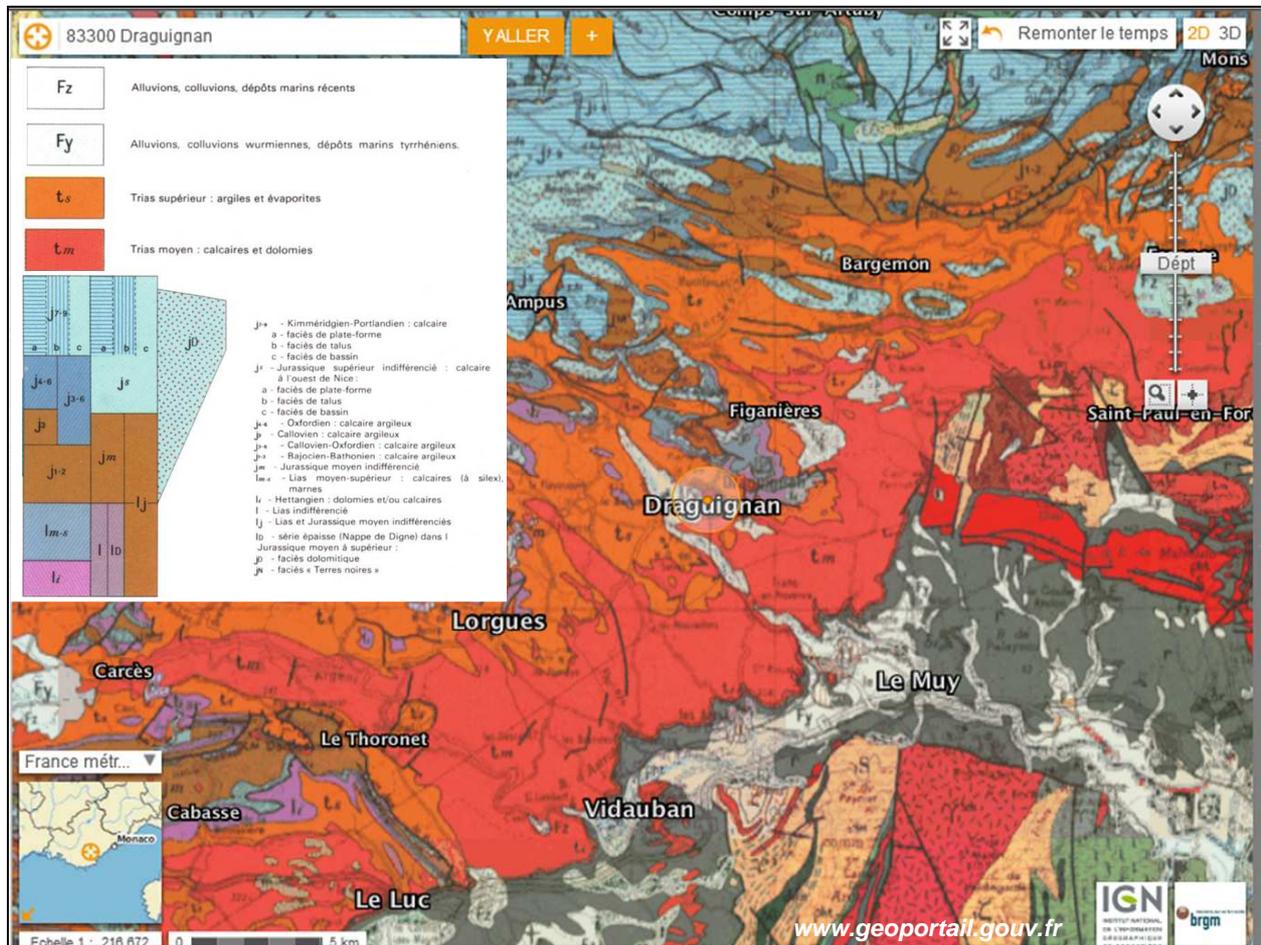


Illustration 2 : Extrait carte géologique du BRGM à 1/250 000 et légende associée sur région de Draguignan (Feuille n°40 - NICE)

Durant la phase pyrénéo-provençale, les calcaires et dolomies du Muschelkalk se plissent en une série d'anticlinaux, tandis que le Jurassique s'empile en une série de chevauchements, se mettant en place par décollement au niveau du Keuper. Le résultat est la mise en place de grands compartiments, peu plissés mais affectés de grandes cassures les séparant les uns des autres et le long desquelles le complexe inférieur (Trias) s'est fortement plissé et étiré. La direction générale des plis et chevauchements est E-O, correspondant à la phase pyrénéo-provençale. Ultérieurement, ces plis ont été disloqués par des plissements transversaux.

Sur la commune de Draguignan, ces formations géologiques sont bien représentées, comme le montre la carte géologique de l'illustration 3.

Les formations géologiques rencontrées sur la commune sont décrites par âge décroissant dans les paragraphes ci-dessous.

La formation du Muschelkalk est constituée par différents niveaux :

- des dolomies (« anhydrite grup ») : cargneules, dolomies mal stratifiées chaotiques, marnes. Ce niveau aurait été soumis à une dissolution ayant lessivé les évaporites (CaSO_4).
- des calcaires gris fumé, alternant avec des marno-calcaires et quelques lits dolomités.
- des dolomies blanches.

Son épaisseur est voisine de 200 m. Les manifestations karstiques y sont fréquentes (dolines d'effondrement, avens...). La formation affleure dans la partie sud de Draguignan.

La formation du Trias supérieur ou Keuper affleure sur près des deux-tiers de la commune de Draguignan (Illustration 3). De constitution particulièrement hétérogène, la formation est composée de bas en haut de (Arvois R., 1969) de :

- marnes jaunes et gypse avec cargneules, dolomies cargneulisées en bancs stratifiés, argiles noires à gypse, argiles plastiques à lignites ;
- dolomies stratifiées, marnes vertes avec cargneules et gypse ;
- dolomies blanches avec marnes vertes.

L'étage du Keuper est affecté par la tectonique, mais également par les phénomènes d'érosion et de dissolution du gypse, ce qui lui donne un aspect « chaotique ». Cet étage est considéré comme imperméable dans son ensemble, sauf en cas de dissolution du gypse, en particulier à la faveur de discontinuités préexistantes. Son épaisseur peut dépasser 800 m. Les horizons gypsifères ont donné lieu à des exploitations, notamment sur Draguignan où trois galeries d'une ancienne carrière d'exploitation du gypse sont visitables au nord de la commune (au nord-est du lieu-dit La Clappe). Ces galeries ont été visitées dans le cadre de l'étude afin d'observer la formation du Keuper dans son gisement et identifier d'éventuelles directions de plis ou fracturation (cf. §2.1.3).

Les massifs carbonatés jurassiques du Plan de Canjuers correspondent à un vaste ensemble karstique, constitué par une épaisse série de calcaires et dolomies karstiques d'environ 1 000 m d'épaisseur. Ils se présentent sous la forme de grands plateaux d'altitude élevée, dans lesquels se sont creusées les gorges du Verdon et de l'Artuby. Au nord, le Jurassique s'ennoie sous les dépôts tertiaires qui constituent le plateau de Valensole (sud des Alpes de Haute-Provence). Au sud, au pied de la corniche qui borde l'entablement calcaire, viennent à l'affleurement les marnes et les calcaires triasiques qui supportent ces assises et qui sont profondément entaillés par les réseaux hydrographiques de la Nartuby et de l'Endre.

Les principales formations géologiques de cet ensemble, et présentes dans la région de Draguignan, sont :

- les calcaires massifs blancs à beige parfois dolomités du Jurassique supérieur : d'une épaisseur totale de 400 à 1000 m ;
- les calcaires, calcaires dolomitiques et marnes du Jurassique moyen et inférieur (Lias).

La karstification actuelle du massif calcaire est le résultat d'une évolution hydrogéologique complexe, pratiquement ininterrompue depuis 35 millions d'années.

Les formations quaternaires, représentées par les alluvions déposées par la Nartuby, sont composées de graviers, galets et sables.

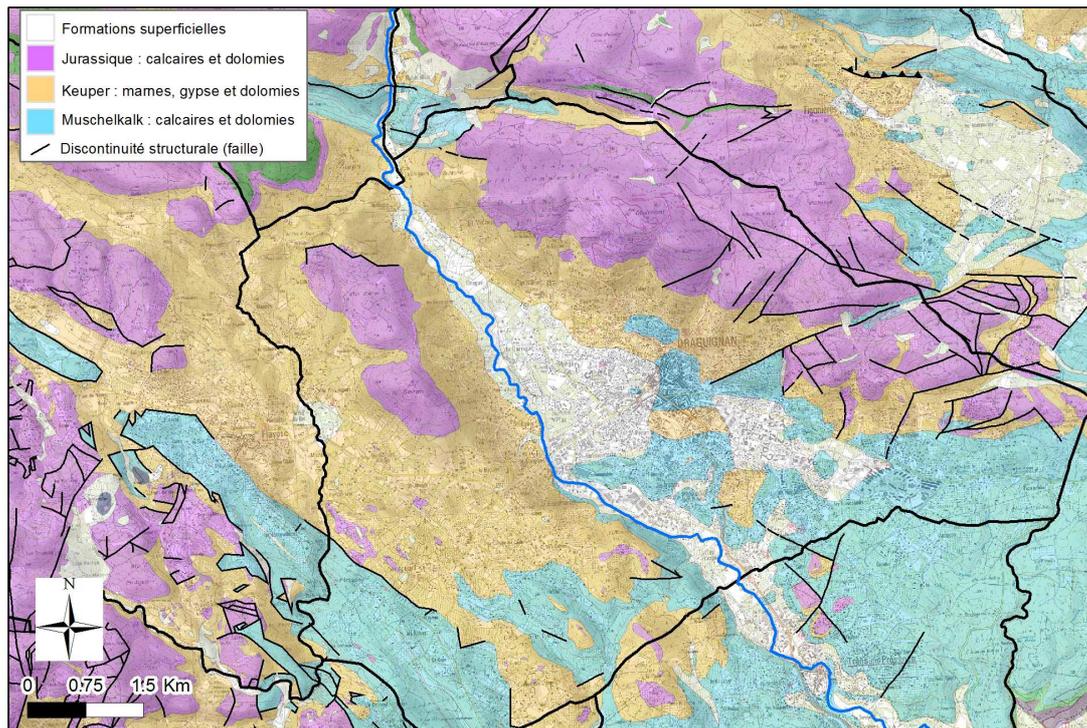


Illustration 3 : Carte géologique simplifiée à partir des cartes géologiques du BRGM à 1/50 000 sur Draguignan (Feuilles n°997-Salernes, n°1023-Draguignan, 1024-Fréjus-Cannes, limites communales représentées par traits noirs épais)

2.1.3. Visite d'anciennes galeries d'exploitation de gypse

Une visite des galeries de l'ancienne carrière souterraine d'exploitation du gypse, située au nord-ouest du lieu-dit de la Clappe, a été menée dans le cadre de l'étude. L'objectif de cette visite était d'observer les poches de gypses du Keuper, mises à nu par l'exploitation, et de tenter d'identifier des sens de fracturation et d'axes de plis préférentiels. Ces directions, si elles peuvent être identifiées, constituent des zones de faiblesse formant des axes d'écoulement des fluides souterrains. Dans la bibliographie (Arvois & al., 1969), les directions structurales générales, identifiées dans les grands ensembles calcaro-dolomitiques (Muschelkalk et Jurassique) séparés par l'épaisse série argilo-gypseuse du Keuper, sont globalement WNW-ESE, correspondant aux derniers plis méridionaux de l'arc alpin. Cette direction correspond également à l'orientation générale de la Nartuby dans le secteur d'étude.

La visite de la carrière souterraine s'est déroulée le 20 juillet 2012. Située sur une parcelle privée, une piste permet d'y accéder. Un plan schématique de la galerie est proposé sur l'illustration 4. La carrière, de taille relativement modeste, est composée de trois galeries souterraines horizontales de 20 à 30 m de longueur, d'environ 10 m de haut et d'une dizaine de mètres de largeur (Illustration 5, Illustration 6, Illustration 7). Le recouvrement au-dessus de la carrière est au maximum de 10 m, un peu moins au-dessus du fontis qui affecte le toit de la plus septentrionale. La direction des trois galeries amène à penser que celles-ci ont été creusées de manière à exploiter une veine de gypse, qui pourrait être d'orientation NNE-SSW. Les affleurements montrent un gypse de couleur rouge rosé, très compact et fortement plissé (nombreux microplis observables). Par endroits, des bancs plus clairs de couleur grise pourraient correspondre à des bancs d'anhydrite. Le fond des galeries est couvert de boue humide sur laquelle s'observent des fentes de dessiccation. Cette boue peut provenir des niveaux marneux altérés.

Dans la galerie située la plus au nord, un monticule d'environ 3 m de haut, formé par des débris de roches apparait au fond de la galerie. Ces débris proviennent de l'effondrement du toit de la galerie qui a donné naissance à un fontis débouchant au jour à environ 13 m au-dessus du plancher de la galerie.

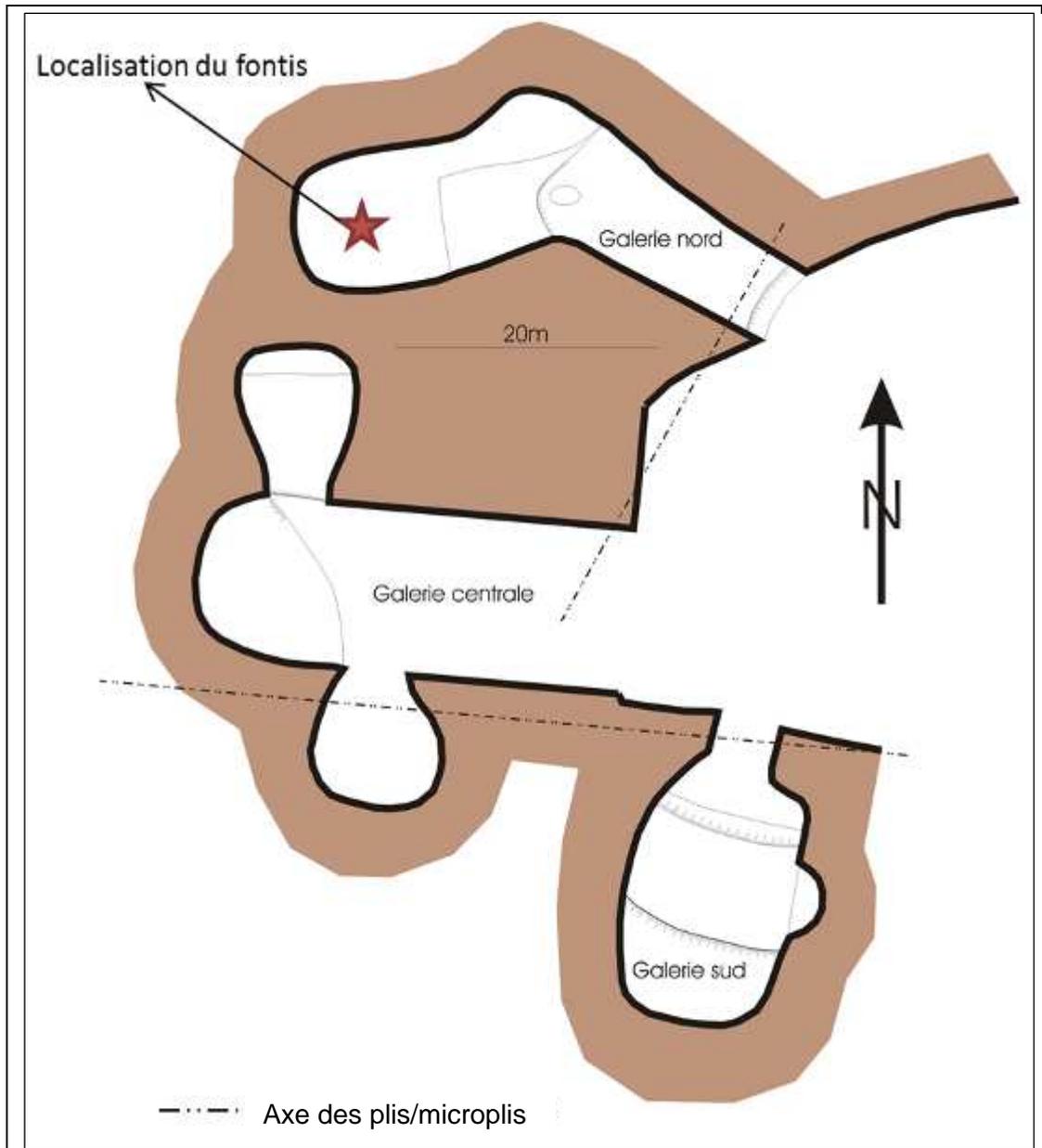


Illustration 4 : Plan schématique des galeries visitées (schéma réalisé à partir des mesures et observations de terrain prises le 20/07/12)



Illustration 5 : Entrées des galeries centrale et nord. Affleurement chaotique de gypse et marnes affecté par de nombreux plis et microplis.

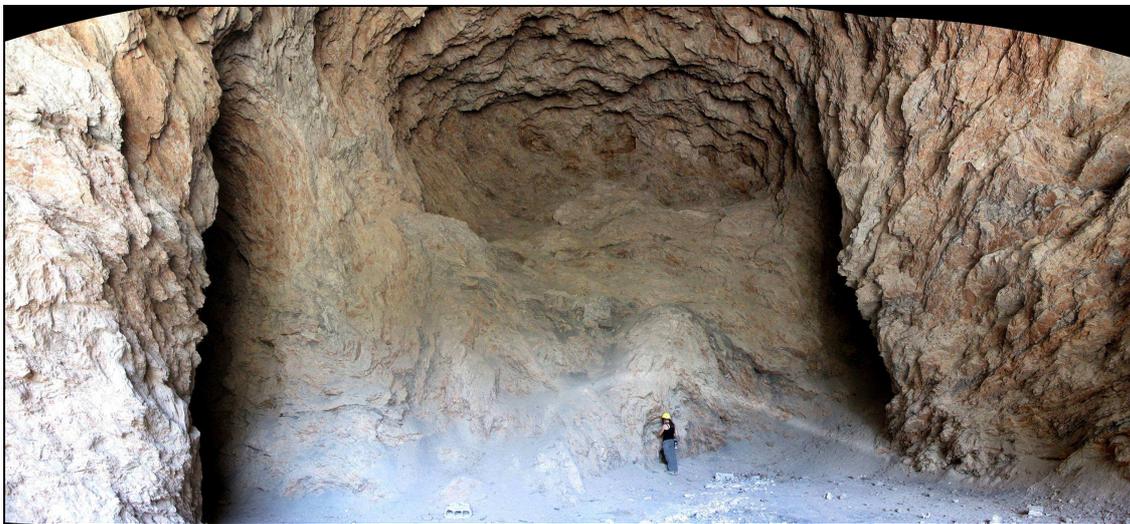


Illustration 6 : Photo de la galerie centrale



Illustration 7 : Photo du flanc nord à l'entrée de la galerie nord, observation de plis et microplis dans les bancs de gypse rouge et blanc, et dans les marnes (bancs plus clairs)

La formation marno-gypseuse exploitée est très affectée par la tectonique, comme en témoigne les nombreux plis et microplis observables sur les parois. Plusieurs mesures d'axe de pli ont été prises, mais aucune direction prépondérante n'a pu être identifiée : l'ensemble est trop hétérogène.

D'après la carte géologique (cf. Illustration 24), les événements d'effondrements semblent survenir selon des directions parallèles aux directions structurales principales WNW-ESE des grands ensembles géologiques (calcaires dolomitiques du Muschelkalk et Jurassique, et formation argilo-gypseuse du Trias). Aucune direction secondaire ne se distingue clairement après la visite des galeries souterraines.

2.2. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE (BRGM)

La synthèse hydrogéologique proposée ici est en partie basée sur les fiches descriptives des entités hydrogéologiques, rédigées dans le cadre de la synthèse hydrogéologique de la région PACA (Moulin & al., 2013), complétée par les rapports des hydrogéologues agréés réalisés sur Draguignan et mis à disposition par la ville de Draguignan ainsi que par l'étude datant de 1929.

D'après la synthèse hydrogéologique de la région PACA, trois entités hydrogéologiques sont identifiées sur la commune de Draguignan (Illustration 8) :

- les formations marno-calcaires et argileuses du Trias au Crétacé (entité PAC09A) ;
- les calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan (entité PAC07O) ;
- les massifs carbonatés jurassiques du Plan de Canjuers et ses unités de bordure (entité PAC08E).

Sur Draguignan, l'entité hydrogéologique des marno-calcaires du Trias au Crétacé est principalement représentée par la formation du Keuper. La succession complexe des assises du Keuper, très affectée par la tectonique et toujours chaotique, est à dominante marneuse. Elle constitue, par rapport à la série calcaro-dolomitique liasique et jurassique sus-jacente, un ensemble considéré « imperméable ». Les principales sources, aux débits importants, qui apparaissent au sein du Keuper, correspondent en fait à des eaux issues des aquifères du Muschelkalk ou du Jurassique, et qui émergent au contact du Keuper.

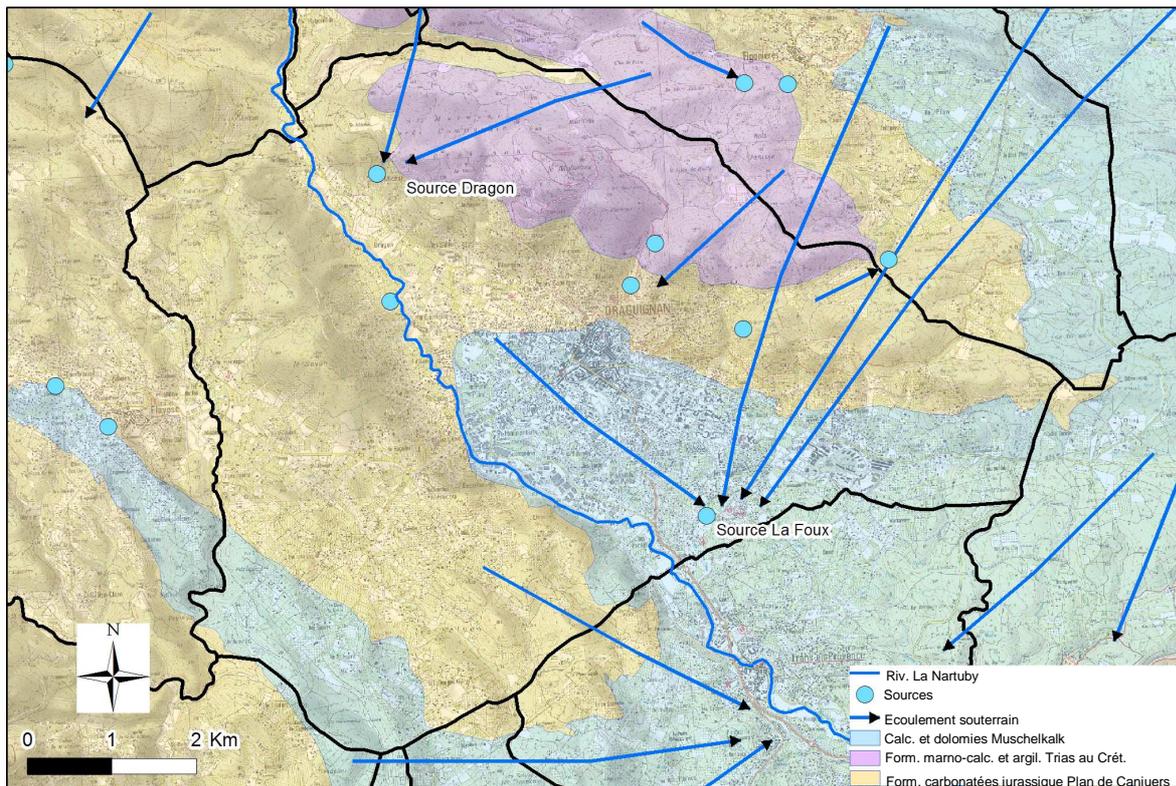


Illustration 8 : Entités hydrogéologiques représentées sur la commune de Draguignan (d'après la synthèse hydrogéologique de la région PACA à 1/50 000 et la carte hydrogéologique du Var à 1/200 000)

L'entité hydrogéologique des calcaires et dolomies du Muschelkalk constitue la principale ressource aquifère du département du Var, d'autant plus que les forages offrent souvent un potentiel de prélèvement élevé, contrairement aux calcaires jurassiques où les risques d'échec sont forts.

L'entité est présente au sud de la commune. La formation a subi une karstification intense et montre donc une perméabilité en grand liée au développement de la fissuration et de chenaux de karstification. La perméabilité est augmentée par le phénomène de cargneulisation, c'est-à-dire la dissolution préférentielle de la dolomite par des eaux chargées en sulfates (eaux ayant dissout des niveaux de gypse). Le caractère karstique de la formation est à l'origine d'écoulements préférentiels : il est donc difficile d'établir une piézométrie et de déterminer dans le détail les sens d'écoulements de la nappe. D'une manière générale, les écoulements souterrains sont drainés vers les sources situées en bordure sud de l'entité.

Le secteur de Draguignan-Callas, est drainé principalement par la source de la Foux de Draguignan (~900 l/s) ; émergence située au sud de Draguignan, dans la vallée de la Nartuby. Elle présente une teneur élevée en chlorures et en sulfates, indiquant l'influence du gypse (du Trias moyen et/ou supérieur). A Draguignan, des relevés hydrogéologiques ont montré que la nappe du Muschelkalk se situe généralement à une cote piézométrique de l'ordre de 165 m NGF. La source de la Foux est située à une cote d'environ 160 m.

Une étude hydrogéologique réalisée en 1929 et portant sur la dérivation possible d'une partie des eaux d'une nappe souterraine alimentant la source des Incapis, permet de mieux

comprendre l'importance de la source de la Foux dans le contexte hydrogéologique de Draguignan.

La source de la Foux alimente le ruisseau de la Foux. En été, la Nartuby est sèche à l'amont de la confluence avec ce ruisseau. Les analyses chimiques des eaux de la source de la Foux indiquent la présence en excès de chlorures, sulfates et chaux ($\text{NaCl}=900$, $\text{SO}_4=467$, $\text{CaO}=378$ mg/l). Telle quelle, elle est impropre à la consommation. Toujours dans cette étude de 1929, il est avancé que l'eau de la nappe alimentant la source de la Foux se minéralise en traversant une couche profonde de terrains gypseux et salifères où elle se charge en chlorures, sulfates et chaux.

La source de la Foux se situe au point bas d'une cuvette triangulaire, dont le sommet est le pont de Lorgues. Sa base prend une direction nord-ouest, sud-est. La base de cette cuvette fait environ 6 km de long et sa hauteur 3 km (secteur entouré en jaune sur l'illustration 9). La source est le point bas de cette cuvette. Toute masse d'eau emmagasinée sous Draguignan devrait donc avoir comme exutoire naturel le point bas de La Foux, de préférence au quartier des Incapis, cote 150-154 m NGF. Toutes les eaux pluviales et de ruissellement qui dévalent du massif du Malmont, au nord, à l'ouest des collines du Cayran, rejoignent cette cuvette. La topographie des lieux est telle que les 9/10^e des eaux s'infiltrent obligatoirement dans le thalweg, faute d'écoulement naturel vers la rivière. A partir des observations faites sur les puits en amont de la Foux, l'auteur de l'étude de 1929 en déduit qu'une nappe de plus de 800 hectares dont l'épaisseur totale est inconnue, mais qui peut atteindre 80 m, se vidange périodiquement de 5 m d'épaisseur en moyenne, sur un front de 1 800 m dans une direction nord-sud et donne naissance à la source de la Foux, aux sources des Incapis et aux émergences qui apparaissent sur 5 km le long de la Nartuby.

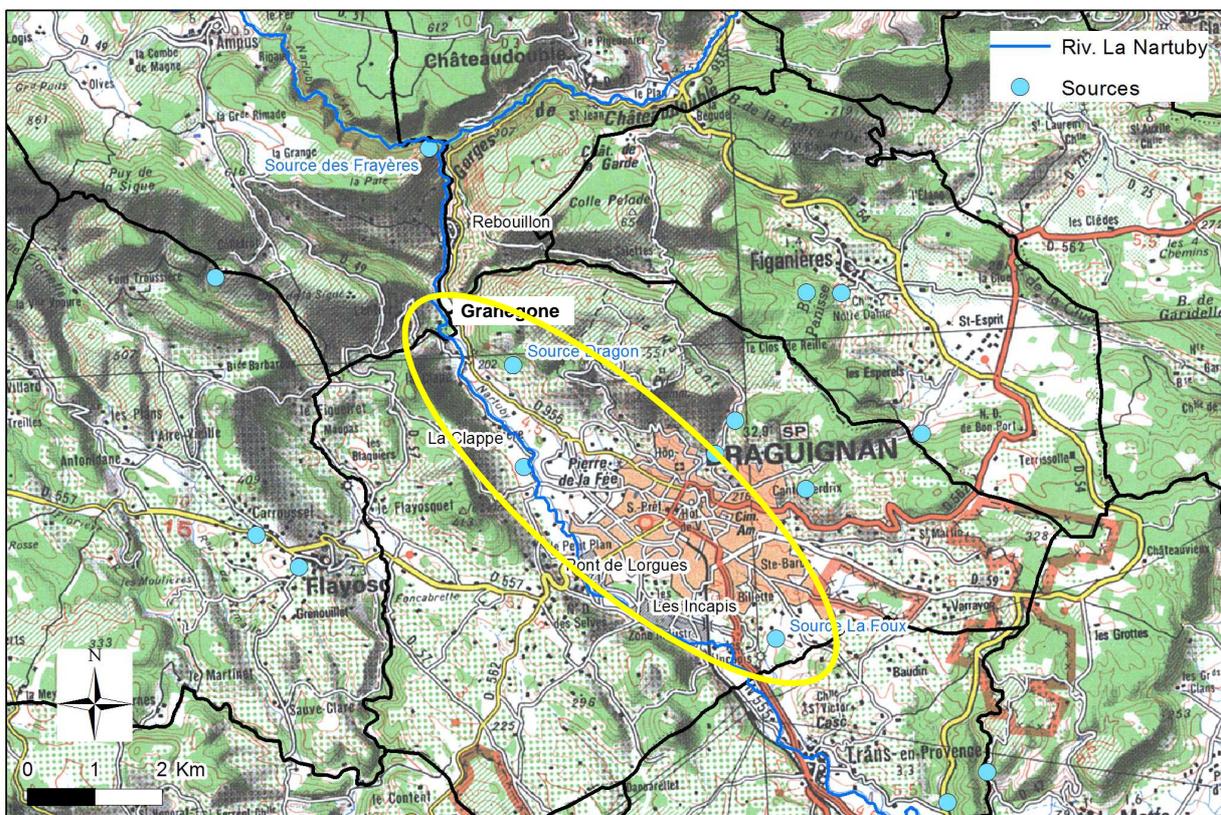


Illustration 9 : Localisation des sources et lieux-dits cités dans l'étude de 1929 (en jaune tracé approximatif de la cuvette d'alimentation de la source de La Foux)

D'après les essais de jaugeage réalisés dans l'étude de 1929, aucune perte d'eau n'a été identifiée entre la source des Frayères et Rebouillon. De Rebouillon à la Clappe, la perte est de 110 litres/s environ, de la Clappe au Pont de Lorgues, la perte varie de 1 000 à 1 600 litres/s et elle est d'autant plus élevée que le niveau d'eau est haut et que la surface du gravier baigné est grande. Vu la nature des terrains sur ces secteurs de perte, il est probable que l'eau s'infiltré dans les alluvions, dont l'épaisseur constatée par sondage est de plus de 40m, et dans les calcaires fissurés du Muschelkalk qui se trouvent sous le Malmont et sous toute la cuvette. L'eau ainsi infiltrée circulerait ensuite dans ces formations aquifères en direction de la source de la Foux et des cascades de Trans. De la fluorescéine, déversée dans la rivière de la Nartuby à la Clappe, a été ensuite observée dans toute la nappe, aux divers puits ainsi qu'aux sources. En outre, déversée dans la Nartuby au niveau du lieu-dit la Clappe, la fluorescéine a mis 3 jours pour sortir à la source de La Foux.

Toujours d'après cette même étude, durant tout l'hiver (novembre à mai), les pertes de la Nartuby constitueraient donc une part importante de l'alimentation en eau de l'aquifère des calcaires du Muschelkalk. Toute l'eau de pluie, sans exception, s'infiltré dans la cuvette s'étendant de la Granegone à Saint-Martin. En ce qui concerne les eaux de la nappe phréatique, qui baignent les alluvions de la Nartuby, elles s'infiltreront lentement dans la nappe sous-jacente des calcaires du Muschelkalk lorsque la pression hydrostatique de cette dernière le permet. En outre, l'étude montre qu'il est à peu près certain que des eaux plus lointaines doivent venir au travers des calcaires fissurés du Jurassique.

Les calcaires du Jurassique supérieur, constituant la troisième entité hydrogéologique sur le secteur de Draguignan, présentent une perméabilité en grand élevée en raison de leur degré de karstification relativement important. Le réseau superficiel est quasiment inexistant. En effet, les eaux de pluie s'infiltreront rapidement à la faveur des fissures, lapiaz et autres structures karstiques de surface. Des traçages par coloration, effectués par EDF lors des études pour la réalisation du barrage de Sainte Croix, ont montré des interconnexions profondes et à longue distance d'Est en Ouest, entre le bassin de l'Artuby, le Moyen Verdon et la région de Sainte Croix. Des traçages complémentaires ont été réalisés par la Cellule Géologique du département du Var lors de l'installation du camp militaire de Canjuers, et dans le cadre de la thèse de M. Etienne (Etienne, 1987), consacrée au bassin d'alimentation des sources de la Siagnole. Les écoulements sont rapides, avec des vitesses estimées de l'ordre de 20 m/h à 110 m/h pour la partie est de l'entité (Montagnes de Mons). La source des Frayères est le principal exutoire de ce système karstique, et draine le massif du bois des Prannes. Avant l'épisode pluvieux intense de 2010 qui a provoqué l'endommagement de la conduite d'adduction sur plusieurs centaines de mètres, elle était captée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Draguignan. Elle présente un débit moyen de 145 l/s. Un traçage hydrogéologique avec injection dans le secteur du camp de Canjuers a mis en évidence un transfert vers cette source, indiquant ainsi un drainage partiel de la bordure sud du Plan de Canjuers. Dans sa traversée des gorges de Chateaudouble (limite entre les massifs des Prannes et de Malmont), la Nartuby draine l'aquifère karstique jurassique. Les apports de l'aquifère avaient été estimés à environ 100 à 800 l/s en 1969. D'autres émergences de débit plus faible sont répertoriées en bordure du massif de Malmont, notamment sur le versant sud où se trouve la source de Dragon (~ 17 l/s), captée pour l'AEP de la commune de Draguignan.

La nappe alluviale de la Nartuby, relativement restreinte et constituée par les matériaux alluvionnaires qui remplissent la dépression de Draguignan, est décrite dans la littérature comme ayant des qualités hydrogéologiques médiocres en raison d'un pourcentage en limon et argile assez élevé.

2.3. ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES (CEREMA)

Afin de compléter la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur, de nouvelles données ont été acquises lors d'une campagne Hautes Eaux (HE : février 2013) et une campagne Basses Eaux (BE : juillet 2013) :

- mesures de débits séries afin d'identifier plus précisément les zones de pertes et d'apports sur les cours d'eau superficiels ;
- mesures de la piézométrie après inventaire des points d'eau accessibles sur le secteur.

2.3.1. Mesures de débits sériés

a) Choix des points de mesure

Des mesures de débits séries ont déjà été réalisées sur le secteur (étude 1929, Gouvernet 1957, Arvois et al. 1969 et inconnu 1974) et ont permis d'identifier des zones de pertes et d'apports entre les cours d'eau superficiels et le substratum. Les points ayant déjà fait l'objet de mesures en 1957, 1969 et 1974 (Gouvernet 1957, Arvois et al. 1969 et étude 1974) font partie de ces 2 nouvelles campagnes. Les autres points de mesure ont été sélectionnés de façon à affiner l'identification des zones de pertes et d'apports (cf. Illustration 11 et tableau de l'illustration 10).

Point	cours d'eau	Lieu-dit
1	Nartuby	Chateaudouble
2	Nartuby	Rioublanc
3	Nartuby	Pont piste
4	Nartuby d'Ampus	Amont sce Frayères
5	Nartuby	Aval confluence
5'	Nartuby	Amont confluence
6	Nartuby	Point 6
7	Nartuby	Les Ferrières
8	Nartuby	Rebouillon Nord
10	Nartuby	Rebouillon Sud
12	Nartuby	Le Clos
13	Nartuby	La Clappe Nord
14	Nartuby	La Clappe Sud
15	Nartuby	Pont d'Aups
16	Nartuby	St Louis
17	Nartuby	Pont de Lorgues
18	Nartuby	Pont de Salamandrier aval
18'	Nartuby	Pont de Salamandrier amont
20	Nartuby	Caserne
21	Nartuby	Encapis aval
21'	Nartuby	Encapis amont
22'	Nartuby	Aval confluence Foux
22	Nartuby	Amont confluence Foux
24	Nartuby	Aval Carrefour

Illustration 10 : Liste des points de jaugeage

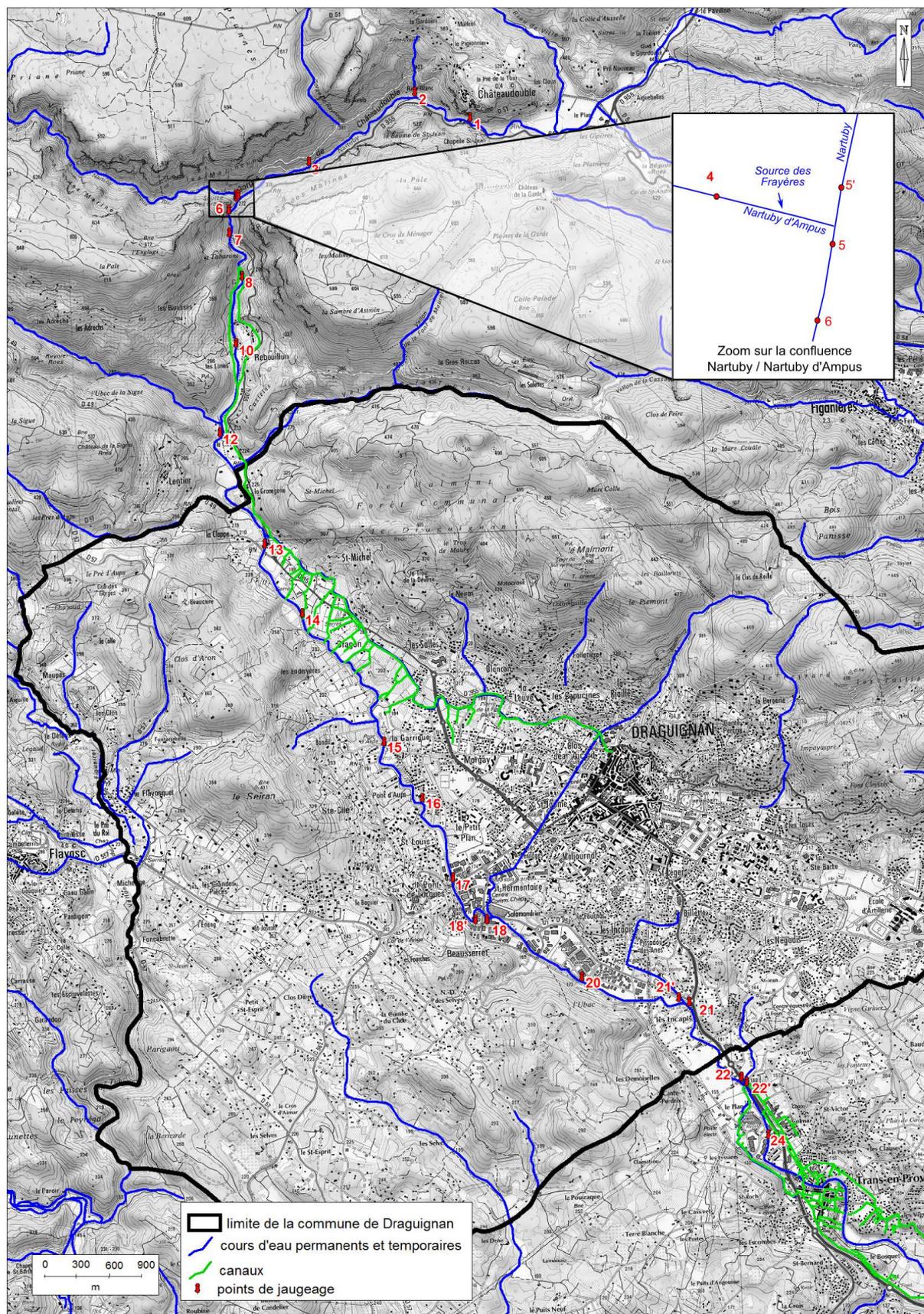


Illustration 11 : Carte de localisation des points de jaugeage

Lors de la campagne HE, les mesures n'ont pas pu être réalisées au niveau des points amont 1 et 2.

Il est à noter que, durant la période de BE, la Nartuby présente habituellement un tronçon complètement à sec entre la Clappe et les Incapis (cf. Illustration 11) ; ceci étant justement lié à la présence de pertes dans ce secteur. Lors d'un repérage réalisé le 24/08/2012, ce tronçon à sec s'étendait entre l'aval du point 12 et l'aval du point 21.

La période précédant notre campagne de mesure BE (du 15 au 17 juillet 2013) a été marquée par un printemps relativement pluvieux et une semaine précédente orageuse (du 8 au 14 juillet 2013). Ainsi, le tronçon habituellement à sec durant cette période laissait donc encore s'écouler un faible débit lors de notre campagne BE. Ce secteur a donc également fait l'objet de mesures durant cette campagne.

Le choix des lieux précis de mesure a été fait sur le terrain après analyse de l'hydromorphologie de chaque site : tronçon rectiligne (sans coude), section de mesure perpendiculaire à l'écoulement, profondeur d'eau suffisante, pas d'influence d'obstacles (rochers, branches d'arbres, ...) situés à l'amont ou l'aval (charte qualité hydrométrie 1998) (repérage des zones réalisé le 23/08/2012).

b) Méthodologie mise en œuvre

Trois types de méthodes existent pour réaliser des mesures de débit :

- les méthodes volumétriques, consistant à mesurer le temps nécessaire pour remplir un réceptacle de volume connu → adapté uniquement à des faibles débits (<10 l/s) ;
- les méthodes par dilution chimique, consistant à injecter une quantité connue de traceur dans la rivière et à mesurer à l'aval l'évolution de la concentration en ce traceur → adapté aux cours d'eau à écoulement torrentiel ;
- les méthodes d'exploration du champ de vitesse, consistant à déterminer le champ de vitesse dans une section transversale du cours d'eau, dont la géométrie est connue → adapté aux cours d'eau à écoulement non torrentiel.

La Nartuby et ses affluents présentent de nombreux tronçons à écoulement non torrentiel : les méthodes d'exploration du champ de vitesses sont donc adaptées à notre contexte et ont été mises en œuvre (Illustration 12)³.

Pour la campagne HE, les mesures ont été réalisées à l'aide d'un micromoulinet à perche intégratrice, prêté par le BRGM.

Pour la campagne BE, les mesures ont été réalisées à l'aide d'un courantomètre électromagnétique avec mesure automatique de la profondeur (acquisition CEREMA en cours d'étude).

Le changement de matériel entre les 2 campagnes n'a pas d'importance quant à l'identification des zones d'apports et de pertes. Les valeurs de débit mesurées en HE et BE peuvent être comparées puisque « *les résultats en débit sont comparables* » avec un micromoulinet et un courantomètre (Ministère de l'environnement, 1998).

Les incertitudes de mesure sont quant à elles difficilement quantifiables pour les mesures par exploration du champ de vitesses [charte qualité hydrométrie 1998 : « *Pour les mesures par exploration du champ de vitesse, il n'existe aucun calcul pertinent. Les formules proposées dans la norme NF ISO 188 ne conduisent pas à des résultats exploitables et leur utilisation est à proscrire* »]. L'incertitude classiquement admise pour les mesures par exploration du champ de vitesse est de l'ordre de 6% (charte qualité hydrométrie 1998). Pour notre étude, les

³ Le contexte évaporitique ne permet pas de mettre en œuvre une méthode simple par dilution de sel de cuisine (NaCl)

variations de débit ont été considérées comme significatives à partir d'une différence supérieure à 15% de la valeur du débit amont.

Les mesures ont été réalisées par une équipe de 2 personnes du 18 au 21 février pour la campagne HE et du 15 au 17 juillet pour la campagne BE.



Illustration 12 : Exemple de jaugeage par micro-moulinet – campagne HE – point 5' : Nartuby à l'amont de la confluence avec la Nartuby d'Ampus

c) Résultats

L'ensemble des résultats obtenus lors des 2 campagnes de mesures est présenté dans le tableau de l'illustration 13.

Point	cours d'eau	Lieu-dit	campagne HE février 2013			campagne BE juillet 2013		comparaison BE – HE			
			Q (l/s)	Cond (µS/cm)	Temp (°C)	Q (l/s)	Cond (µS/cm)	variation débit	% variation	variation cond	% variation
1	Nartuby	Chateaudouble	-	-	-	150	1060	-	-	-	-
2	Nartuby	Rioubanc	-	-	-	170	1020	-	-	-	-
3	Nartuby	Pont piste	325	1100	8,2	170	1320	-155	-48	220	20
4	Nartuby d'Ampus	Amont soc Frayères	389	675	10,2	100	870	-289	-74	195	29
5	Nartuby	Aval confluence	721	790	10,2	480	720	-241	-33	-70	-9
5	Nartuby	Amont confluence	191	1076	10,4	130	1050	-61	-32	-25	-2
6	Nartuby	Point 6	769	830	9,5	460	740	-309	-40	-90	-11
7	Nartuby	Les Ferrières	863	825	10,1	560	-	-303	-35	-	-
8	Nartuby	Rebouillon Nord	998	-	-	550	750	-448	-45	-	-
10	Nartuby	Rebouillon Sud	899	830	11,1	520	-	-379	-42	-	-
12	Nartuby	Le Cios	764	776	11,2	540	770	-224	-29	-8	-1
13	Nartuby	La Clappe Nord	775	778	10,8	380	720	-395	-51	-58	-7
14	Nartuby	La Clappe Sud	680	747	10,7	370	770	-310	-46	23	3
15	Nartuby	Pont d'Aups	484	749	10,5	220	660	-264	-55	-69	-9
16	Nartuby	St Louis	223	752	10,7	100	740	-123	-55	-12	-2
17	Nartuby	Pont de Loignes	114	726	10,9	30	660	-84	-74	-36	-5
18	Nartuby	Pont de Salamandrier aval	57	725	10,4	20	-	-37	-66	-	-
18	Nartuby	Pont de Salamandrier amont	82	761	9,7	10	-	-72	-88	-	-
20	Nartuby	Caserne	141	876	11,8	120	-	-21	-15	-	-
21	Nartuby	Encapis aval	200	1001	8,7	610	-	-	-	-	-
21	Nartuby	Encapis amont	259	-	-	190	970	-69	-27	-	-
22	Nartuby	Aval confluence Foux	1222	4480	14,2	1280	3630	58	5	-850	-19
22	Nartuby	Amont confluence Foux	138	1318	9,9	110	1300	-28	-20	-18	-1
24	Nartuby	Aval Carrebur	1091	4650	13,6	1280	3690	189	17	-960	-21

Illustration 13 : Résultats des campagnes de jaugeage HE (février 2013) et BE (juillet 2013). En gris foncé : mesure erronée / En gris clair : différence non significative

d) Campagne Hautes Eaux (HE)

A partir des résultats du tableau de l'illustration 13, la carte de l'illustration 14 localise les zones de pertes et d'apports identifiés lors de la campagne HE.

Pour rappel, les échanges identifiés peuvent être considérés comme réellement significatifs lorsque la différence est supérieure à 15% du débit amont. Ainsi, il a pu être observé de l'amont vers l'aval :

- une perte de l'ordre de 130 l/s entre le point 3 et l'amont de la confluence avec la Nartuby d'Ampus (point 5') ;
- une zone sans différences significatives entre les débits amont et aval entre la confluence avec la Nartuby d'Ampus (point 5) et le hameau du Dragon (point 14) ;
- une zone marquée par une succession de pertes entre le hameau du Dragon (point 14) et le pont de Salamandrier (point 18') : la perte totale sur ce tronçon est de l'ordre de 600 l/s ;
- une zone avec deux apports successifs entre le pont de Salamandrier (point 18) et les Encapis (point 21') : l'apport total sur ce tronçon est de l'ordre de 200 l/s ;
- une perte de l'ordre de 60 l/s entre les Encapis (point 21) et la confluence avec la Foux (point 22) ;
- une perte de l'ordre de 130 l/s entre la confluence avec la Foux (point 22') et le centre commercial (point 24).

En prenant en compte toutes les valeurs, l'addition des apports et pertes entre les points amont (point 3) et aval (point 24) mène à un bilan global de l'ordre de -820 l/s.

En prenant en compte uniquement les valeurs supérieures à 15 %, l'addition des apports et pertes entre les points amont (point 3) et aval (point 24) mène à un bilan global de l'ordre de - 20 l/s.

e) Campagne Basses Eaux (BE)

A partir des résultats du tableau de l'illustration 13, la carte de l'illustration 15 localise les zones de pertes et d'apports identifiés lors de la campagne BE.

Pour rappel, les échanges identifiés peuvent être considérés comme réellement significatifs lorsque la différence est supérieure à 15% du débit amont. Ainsi, il a pu être observé de l'amont vers l'aval :

- une zone sans différence significative entre les débits amont et aval entre Chateaudouble (point 1) et le point 3 ;
- une perte de l'ordre de 40 l/s entre le point 3 et l'amont de la confluence avec la Nartuby d'Ampus (point 5') ;
- une zone sans différence significative entre les débits amont et aval entre la confluence avec la Nartuby d'Ampus (point 5) et le hameau du Clos (point 12), mis à part un apport de l'ordre de 100l/s entre le point 6 et les Ferrières (point 7) ;
- une zone marquée par une succession de pertes entre le hameau du Clos (point 12) et le pont de Salamandrier (point 18') : la perte totale sur ce tronçon est de l'ordre de 530 l/s ;
- une zone avec deux apports successifs entre le pont de Salamandrier (point 18) et les Incapis (point 21') : l'apport total sur ce tronçon est de l'ordre de 170 l/s ;
- la partie aval, entre la confluence avec la Foux (point 22') et le centre commercial (point 24) ne présente pas de différence significative.

En prenant en compte toutes les valeurs, l'addition des apports et pertes entre les points amont (point 3) et aval (point 24) mène à un bilan global négatif de l'ordre de 320 l/s.

En prenant en compte uniquement les valeurs supérieures à 15 %, l'addition des apports et pertes entre les points amont (point 3) et aval (point 24) mène à un bilan global négatif de l'ordre de 290 l/s.

Campagne Hautes Eaux (février 2013)

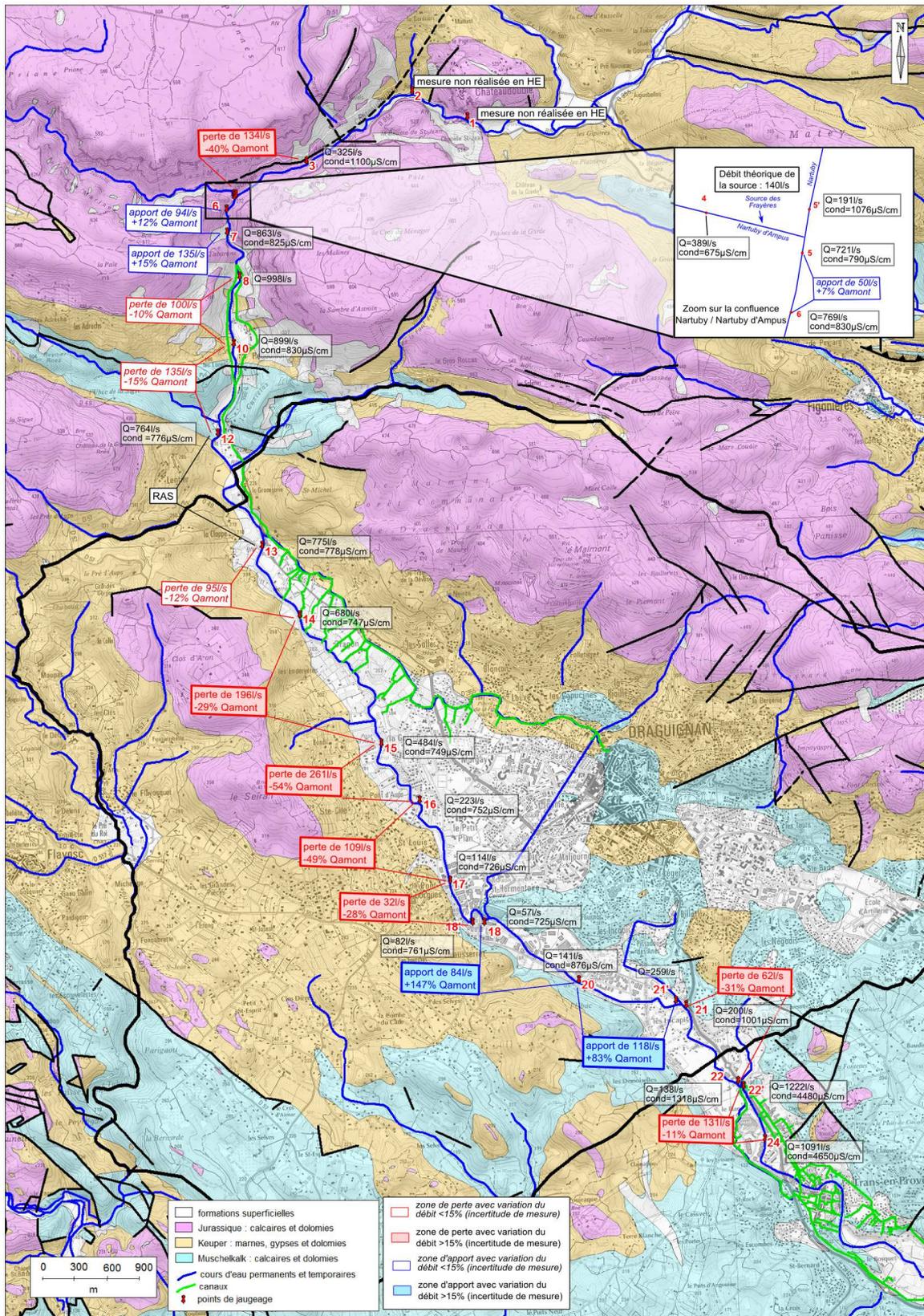


Illustration 14: Résultats de la campagne de jaugeages Hautes Eaux (février 2013)

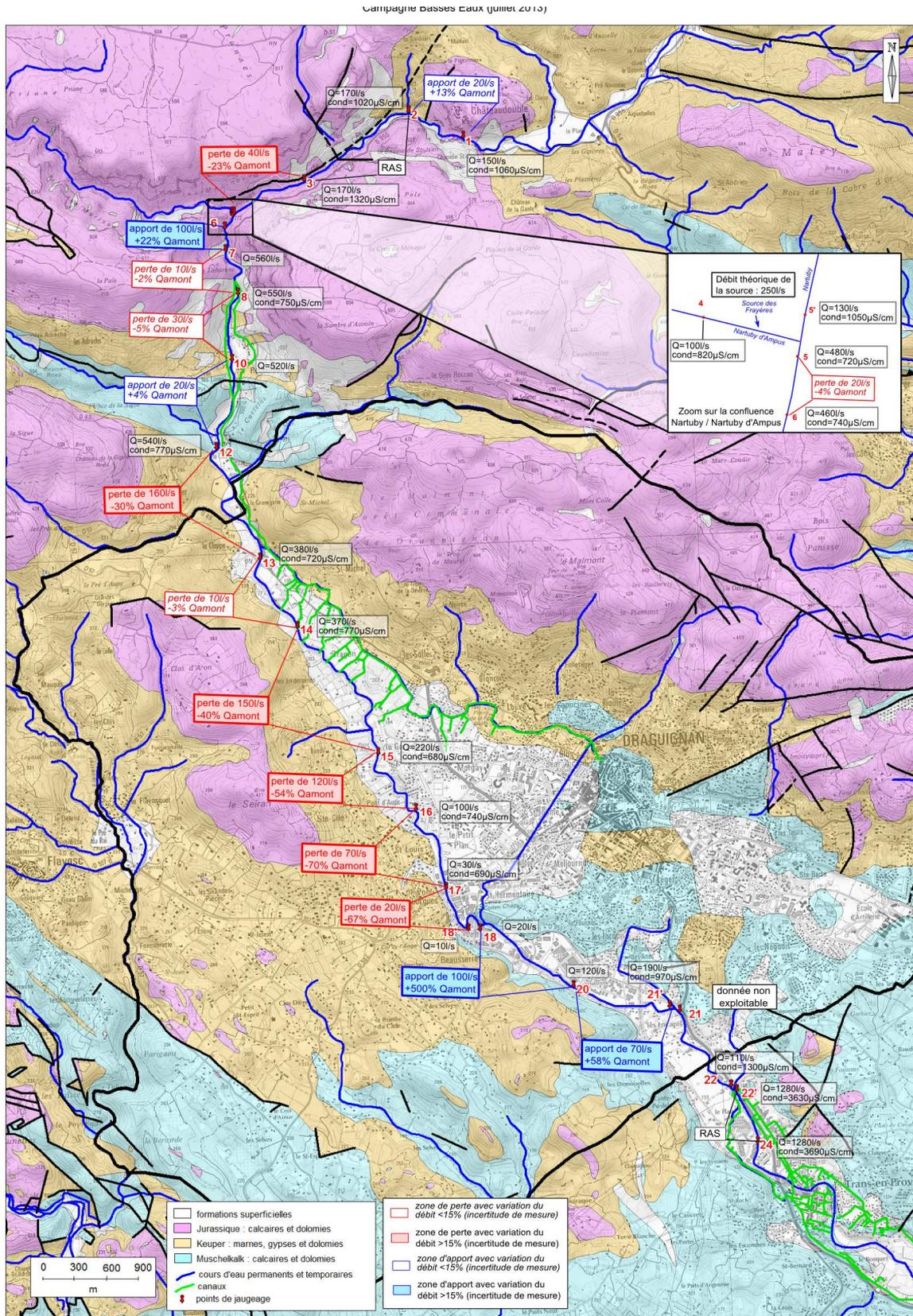


Illustration 15 : Résultats de la campagne de jaugeages Basses Eaux (juillet 2013)

f) Comparaison des résultats HE et BE et interprétation des mesures de conductivité

D'une manière générale, les débits mesurés en BE sont, comme on pouvait s'y attendre, plus faibles que ceux mesurés en HE : entre -15% (point 20 - Caserne) et -88% (point 18' – pont de Salamandrier amont) (cf. tableau de l'illustration 13). Seul le débit mesuré au niveau du centre commercial (point 24) est plus important en BE qu'en HE (+17%). Ceci est vraisemblablement dû à un débit plus fort de la Foux durant la campagne BE. Comme précisé au § 2.3.1.a, la période de mesure BE a été précédée d'une semaine orageuse. Le débit de la Nartuby, principalement lié à du ruissellement, a vraisemblablement diminué plus rapidement que le débit de la source de la Foux, lié quant à lui, à des écoulements souterrains plus lents.

Parallèlement aux mesures de débit par exploration du champ de vitesse, les conductivités électriques des eaux ont été mesurées sur les différents points de jaugeage. Ces conductivités électriques des eaux sont représentatives de l'état de minéralisation des eaux. En amont de la confluence avec la Nartuby d'Ampus, la Nartuby présente une conductivité de l'ordre de 1 000 µS/cm. La Nartuby d'Ampus présente une conductivité moins importante de l'ordre de 700 - 800 µS/cm. Après sa confluence, la Nartuby présente alors elle aussi une conductivité moins importante de l'ordre de 800 µS/cm. Entre les Incapis (point 21) et l'amont de la confluence avec la Foux (point 22), la conductivité augmente pour atteindre 1 300 µS/cm. Après sa confluence avec la Foux (fortement minéralisée : 4 000 à 5000 µS/cm, cf § 4.2.1), la Nartuby atteint une conductivité de l'ordre de 4 000 µS/cm dans sa partie aval.

Les conductivités électriques mesurées sont globalement du même ordre de grandeur en HE et BE (cf. tableau de l'illustration 13). Les seules différences significatives sont :

- à l'amont, au niveau des points 3 et 4, une augmentation de la conductivité entre HE et BE ;
- à l'aval, au niveau des points 22' et 24, une diminution de la conductivité entre HE et BE.

Ces différences restent pour le moment non expliquées.

Les données de conductivité disponibles permettent également de valider la présence d'un apport entre les points 18 et 20 lors de la campagne HE. En effet :

Minéralisation amont = Minéralisation aval

$$Q_{(\text{point } 18)} \times \text{cond.}_{(\text{point } 18)} = Q_{(\text{point } 20)} \times \text{cond.}_{(\text{point } 20)} + Q_{(\text{apport})} \times \text{cond.}_{(\text{apport})}$$

$$\text{cond.}_{(\text{apport})} = [Q_{(\text{point } 18)} \times \text{cond.}_{(\text{point } 18)} - Q_{(\text{point } 20)} \times \text{cond.}_{(\text{point } 20)}] / Q_{(\text{apport})}$$

L'apport de 84 l/s, identifié par les mesures de débit en HE, aurait ainsi une conductivité théorique de 910 µS/cm. Le manque de données sur la conductivité ne permet pas de faire les mêmes observations sur les autres secteurs d'apport.

Pour conclure, en ce qui concerne les zones d'apport et de perte identifiées, les observations sont globalement cohérentes en HE et BE (Illustration 16) :

- une zone de perte est présente à l'amont de la confluence avec la Nartuby d'Ampus (perte de 130 l/s en HE et de 40 l/s en BE) ;
- les pertes sont diffuses entre le hameau du Clos (point 12) et le pont de Salamandrier (point 18) (perte totale de 600 l/s en HE et de 530 l/s en BE) ;
- une zone d'apport est présente entre le pont de Salamandrier (point 18) et les Incapis (point 21') (apport total de 200 l/s en HE et de 170 l/s en BE).

Les ordres de grandeur des volumes échangés entre le substratum et les cours d'eau sont globalement comparables en HE et BE ; avec des volumes légèrement plus importants en HE.

Quelques différences existent tout de même entre HE et BE :

- la zone de perte identifiée en HE entre les Encapis (point 21' et le centre commercial (point 24) n'a pas été identifiée en BE ;
- la zone de pertes diffuses remonte plus en amont (jusqu'au hameau du Clos – point 12) en BE alors qu'elle n'est clairement identifiée qu'à partir du hameau du Dragon (point 14) en HE.

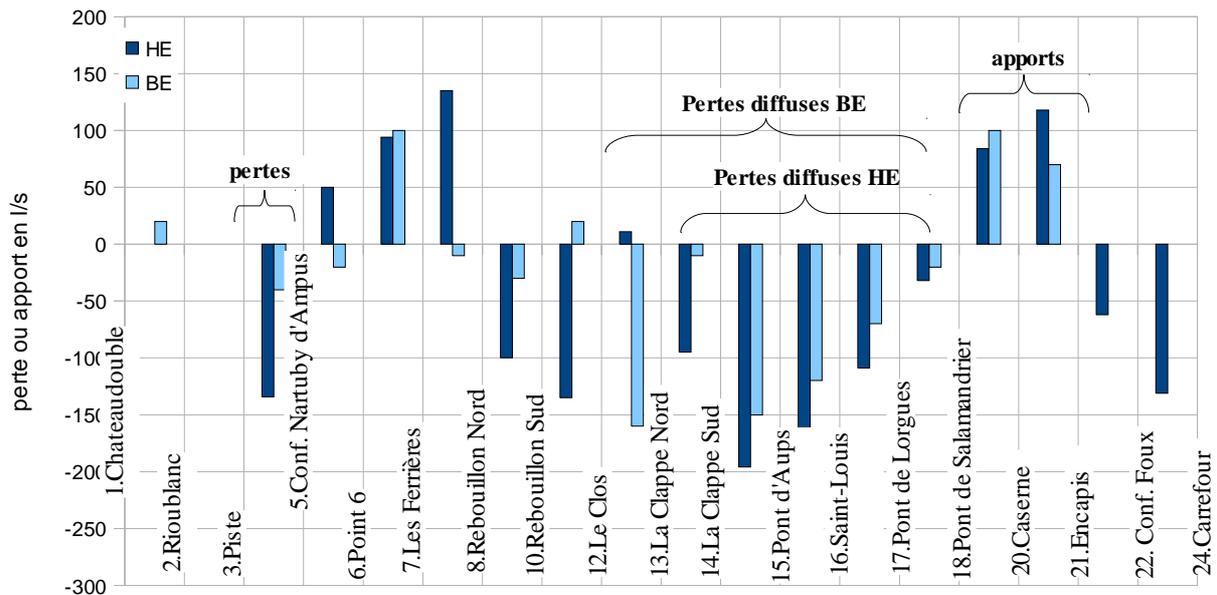


Illustration 16 : Synoptique présentant les apports et pertes identifiés le long de la Nartuby lors des campagnes HE (février 2013) et BE (juillet 2013) – souligné avec accolades = ce qui est confirmé par les 2 campagnes et avec des différences supérieures à 15%

g) Conclusions

- **Rappel des observations faites dans les études précédentes**

Le tableau de l'illustration 17 dresse un bilan des échanges substratum/cours d'eau identifiés lors des différentes campagnes de mesures de débit sériés (étude 1929, Gouvernet 1957, Arvois et al. 1969 et étude 1974), que l'on compare aux résultats obtenus lors des 2 campagnes de mesures de 2013.

Globalement, les échanges identifiés lors de ces différentes campagnes sont en cohérence.

Les 2 campagnes réalisées en 2013, moins globalisantes, permettent de localiser plus précisément les zones d'échanges.

Localisation	Résultats de la référence	Résultats 2013	Conclusion
Réf.1 (1929)			
Entre Frayères (point 5) et Rebouillon (point 8)	Aucune perte	Apport de 100 l/s en BE RAS en HE	En cohérence
Entre Rebouillon (point 8) et la Clappe (point 13)	Perte de 110 l/s	Pertes de 60 l/s en BE RAS en HE	En cohérence
Entre la Clappe (point 13) et Pont de Lorgues (point 17)	Perte de 1000 à 1600 l/s	Pertes de 340 l/s en BE Pertes de 570 l/s en HE	En cohérence
Réf.2 (1957)			
Entre Rioublanc (point 2) et la confluence avec la Nartuby d'Ampus (point 5')	Perte d'environ 20l/s dans le lit caillouteux de la Nartuby	Pertes de 40 l/s en BE Pertes de 130 l/s en HE	En cohérence
Entre la confluence avec la Nartuby d'Ampus (point 5) et les Ferrières (point 7)	Les eaux perdues précédemment ressortent en totalité (coloration)	Apports de 100 l/s en BE RAS en HE	En cohérence
Entre les Ferrières (point 7) et le point 8	Apport d'environ 10l/s	RAS en BE et HE	En cohérence (l'apport identifié en 1957 est vraisemblablement dans la fourchette d'incertitude liée à la mesure)
A l'aval du point 8	Perte de l'ordre de 15l/s	RAS en BE et HE	En cohérence (la perte identifiée en 1957 est vraisemblablement dans la fourchette d'incertitude liée à la mesure)
Réf. 3 (1969)			
Entre Chateaudouble (point 1) et les Ferrières (point 7)	Pertes de l'ordre de 85l/s à 800 l/s selon la période	Apports de 110 l/s en BE Pertes de 40 l/s en HE	Tronçon sur lequel sont présentes à la fois des zones d'apports et de pertes. L'addition globale mène à un résultat variable selon la période de mesure.
Entre les Ferrières (point 7) et la confluence avec la Foux (point 22)	Apports de l'ordre de 80 l/s en BE Pertes de l'ordre de 800 l/s en HE	Pertes de 340 l/s en BE Pertes de 650 l/s en HE	Tronçon sur lequel sont présentes à la fois des zones d'apports et de pertes. L'addition globale mène à un résultat variable selon la période de mesure.
Réf. 4 (1974)			
Entre le pont de la Clappe (point 13) et le pont d'Aups (point 15)	pertes	Pertes de 160 l/s en BE Pertes de 290 l/s en HE	En cohérence
Entre le pont d'Aups (point 15) et le pont de Lorgues (point 17)	pertes	Pertes de 190 l/s en BE Pertes de 370 l/s en HE	En cohérence

Illustration 17 : Synthèse des échanges substratum-cours d'eau identifiés lors des différentes campagnes de 1957, 1969, 1974 et 2013

• Conclusions générales

Les résultats obtenus ainsi que les résultats des campagnes précédentes (étude 1929, Gouvernet 1957, Arvois et al. 1969 et étude 1974) permettent d'émettre les conclusions suivantes :

- le tronçon de la Nartuby à sec en période de BE correspond à une zone de pertes diffuses : il n'y a pas de point d'infiltration privilégié ;
- les zones d'apport se trouvent dans les secteurs où le substratum est constitué de calcaires et dolomies du Jurassique ou du Muschelkalk, recouverts ou non par des alluvions ;
- les zones de pertes se trouvent dans les secteurs où le substratum est constitué de Keuper (marnes, gypses et dolomies), recouvert par des alluvions ;
- l'apport identifié entre les points 18 et 20 (Illustration 15) correspond à une arrivée d'eau de conductivité 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$; ce qui ne correspond pas nécessairement à des eaux ayant circulé au contact avec des évaporites ;
- à l'aval du point 24, des apports de l'ordre de 1 500 l/s avaient été identifiés en 1969 (Réf. 3, Illustration 17) dans une zone où le substratum est constitué de calcaires et dolomies du Muschelkalk, recouverts d'alluvions.

Ainsi, il apparaît que les échanges rivière/substratum diffèrent en fonction de la nature du substratum :

- des pertes ou apports sont identifiés dans les secteurs où le substratum est constitué de calcaires jurassiques ;
- des pertes sont identifiées dans les secteurs où le substratum est constitué des marnes et gypses du Keuper ;
- des apports sont identifiés dans les secteurs où le substratum est constitué de calcaires du Muschelkalk.

Deux hypothèses peuvent expliquer ces observations :

- hypothèse 1 : les zones d'apport et de perte correspondent à des zones d'échange entre la rivière et le substratum, le sens des échanges étant variable en fonction des conditions locales d'écoulement souterrain et ne serait pas lié au type de substratum ; la nappe alluviale ne servant que d'aquifère de transition entre la rivière et le substratum. Cette première hypothèse nécessite que les pertes dans le substratum du Keuper se fassent par l'intermédiaire de zones d'infiltration privilégiées dans le gypse. Le fait que les pertes identifiées ne sont pas localisées mais diffuses ne plaide pas en faveur de cette première hypothèse.
- hypothèse 2 :
 - dans les zones où le substratum est constitué de calcaires et dolomies du Jurassique ou du Muschelkalk, les écoulements souterrains dans le substratum participent à l'alimentation de la rivière (directement ou via les alluvions) ;
 - dans les zones où le substratum est constitué de marnes, gypses et dolomies du Keuper peu perméables, la nappe alluviale n'est plus alimentée par les écoulements souterrains mais principalement par la rivière ;
 - le fait que les pertes identifiées ne sont pas localisées mais diffuses semble plaider en faveur de cette deuxième hypothèse. Cette deuxième hypothèse impliquerait qu'il n'y ait pas une alimentation **massive** des petits compartiments aquifères gypseux par l'intermédiaire d'une perte localisée sur la Nartuby mais plutôt par l'infiltration diffuse en surface et certainement par des infiltrations diffuses de la nappe alluviale vers les gypses via les zones de fractures⁴.

⁴ L'effondrement de la Clappe serait un exemple de zone d'infiltration des eaux de la nappe alluviale vers les gypses, via une zone de fracture préexistante

En conséquence sur les phénomènes de dissolution des gypses :

- l'hypothèse 1 d'alimentation massive des gypses par une perte localisée de la Nartuby impliquerait le développement de conduits karstiques de grandes dimensions et par conséquence, des mouvements en surface de grande importance ;
- l'hypothèse 2 d'alimentation des gypses par infiltration diffuse en surface et à l'interface alluvions/gypse impliquerait le développement de conduits karstiques de dimensions plus réduites et par conséquence, des mouvements en surface d'importance moindre.

L'aspect diffus des pertes identifiées plaide plutôt en faveur de l'hypothèse 2 et d'un développement relativement restreint du karst gypseux, pouvant tout de même se manifester en surface par des effondrements comme celui de la Clappe (cf. § 3.2.1).

2.3.2. Piézométrie

a) *Méthodologie mise en œuvre*

- **Définition du réseau de mesures**

La définition du réseau de mesures s'est basée sur les points identifiés dans la BSS du BRGM.

Les points de la BSS ont été classés de la façon suivante :

- groupe 1a : sources, cavités et piézomètres ou forages crépinés, réalisés après 1990 ;
- groupe 1b : piézomètres ou forages crépinés, réalisés avant 1990 ;
- groupe 2a : forages dont l'équipement n'est pas précisé, réalisés après 1990 ;
- groupe 2b : forages dont l'équipement n'est pas précisé, réalisés avant 1990.

La recherche de ces points s'est ensuite concentrée en priorité sur les groupes 1a et 1b, puis 2a et enfin 2b.

La recherche de ces points a été réalisée en novembre 2012 par enquête téléphonique et enquête terrain (porte à porte) (en tout, environ 5 jours d'enquête). Grâce à cette enquête, quelques nouveaux points ont également pu être identifiés.

- **Mesures**

La carte de l'illustration 18 localise l'ensemble des points qui ont finalement pu faire l'objet des campagnes de mesure de la piézométrie et de la conductivité (cf. résultats pour la conductivité au § 4.2.1) :

- 19 points avec mesure de la piézométrie : lorsqu'il a été possible de faire descendre la sonde piézométrique sans risquer d'endommager les pompes ;
- 39 points avec mesure de la conductivité : beaucoup plus nombreux car les points équipés d'une pompe ont permis de faire des mesures de la conductivité des eaux au robinet ;
- 26 points sans autorisation d'accès : personnes absentes lors de notre enquête ou refus ;
- 7 points pour lesquels la mesure s'est avérée impossible : captage AEP ou points à sec par exemple ;
- 38 points non retrouvés.

Au niveau de ces points, la piézométrie a été mesurée à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle à signal lumineux et sonore.

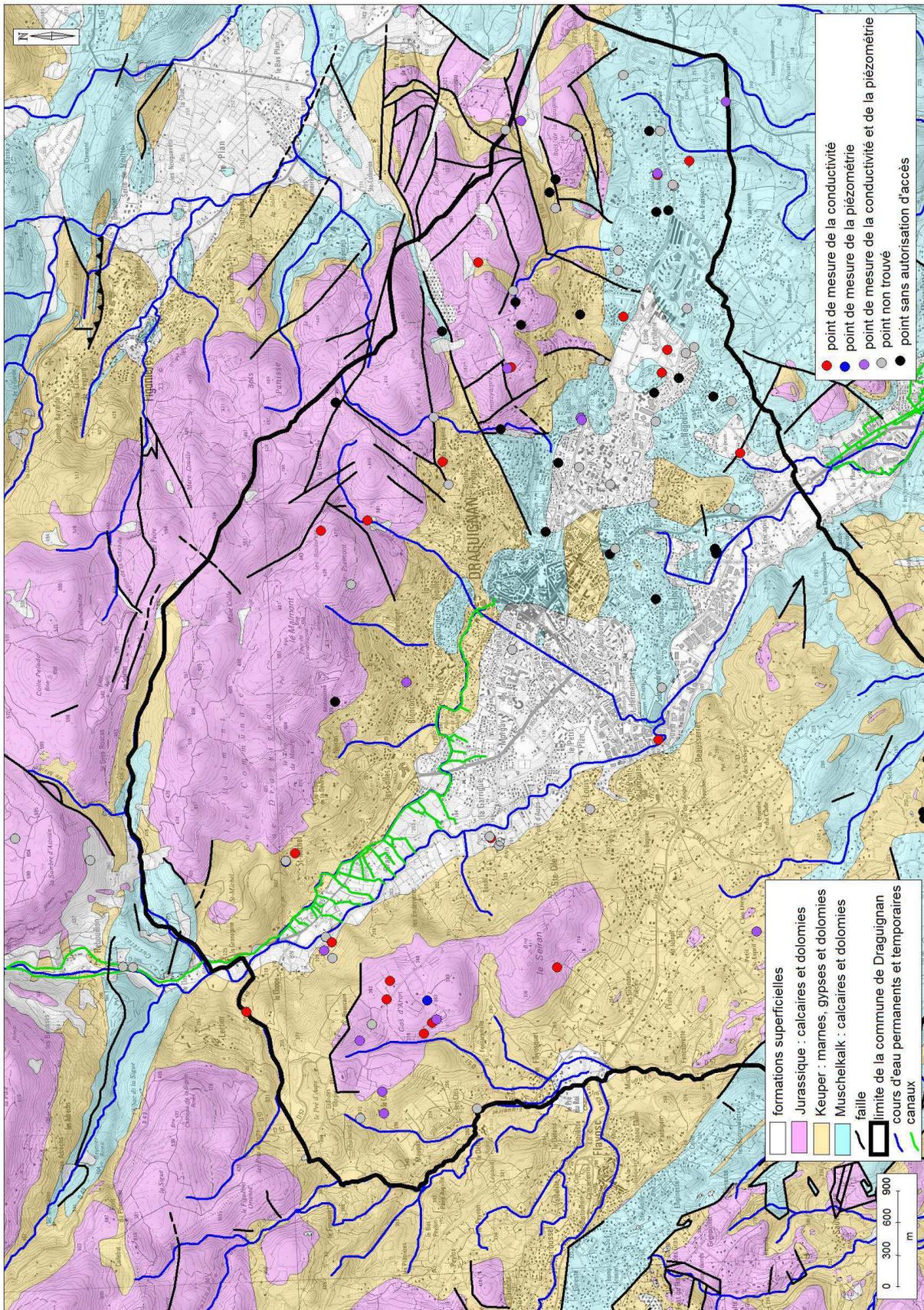


Illustration 18 : Carte de localisation des points des campagnes de mesures de la conductivité et de la piézométrie

- **Carte piézométrique de 1969**

Une carte piézométrique de la nappe alluviale a été levée en 1969 (Arvois et al. 1969) (Illustration 19).

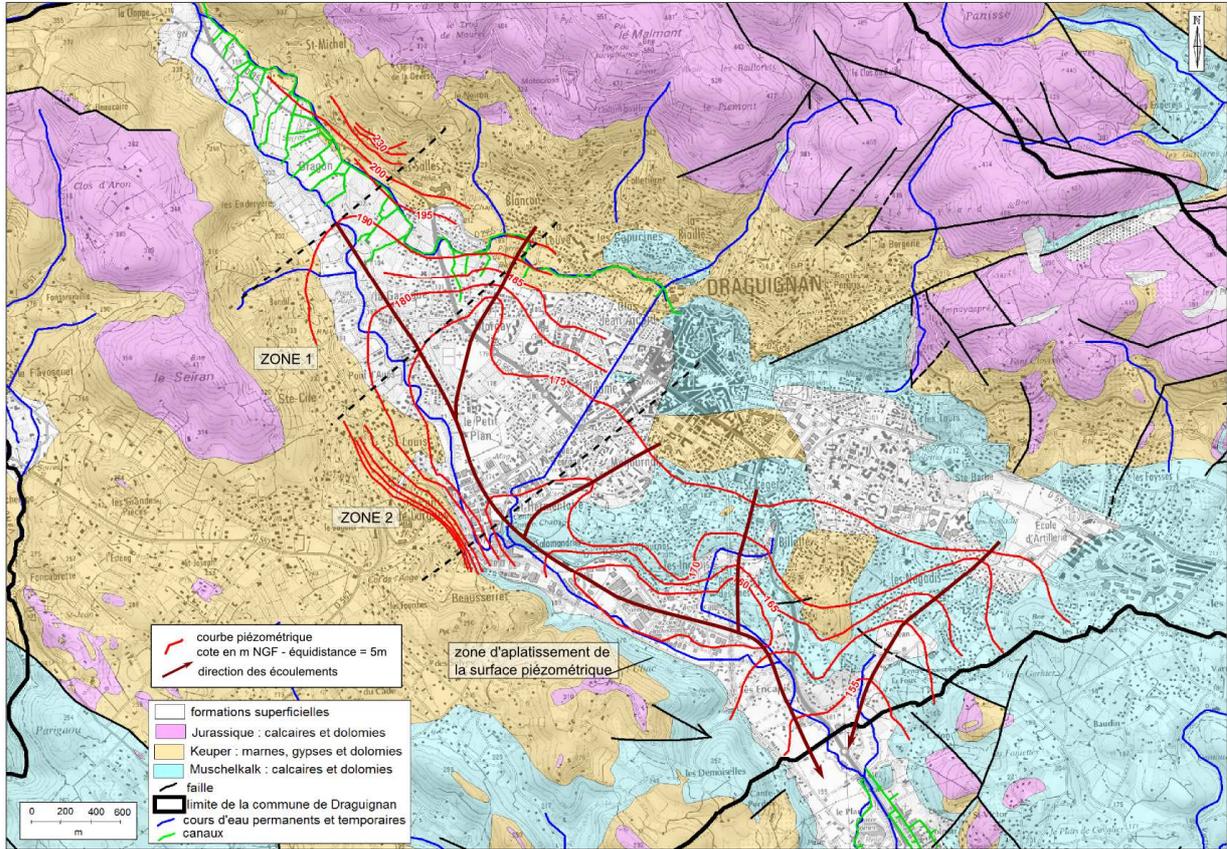


Illustration 19 : Carte piézométrique relevée en 1969 (d'après Arvois et al. 1969)

Sur cette carte, on peut voir que la nappe alluviale est alimentée par les versants et elle alimente elle-même la rivière. Cette carte ne permet pas d'identifier un sens d'écoulement correspondant à une alimentation de la nappe par la rivière. Par contre, une zone d'aplatissement de la surface piézométrique est présente au niveau de la transition entre substratum imperméable et substratum perméable (cf. Illustration 19). Cette observation semble appuyer l'hypothèse 2 retenue précédemment dans le § 2.3.1.g.

Une évaluation grossière du débit transitant par la nappe alluviale peut être faite à partir de la loi de Darcy (Tableau de l'illustration 20) :

$$Q = k \times A \times i = T \times l \times i$$

avec :

- k : perméabilité en m/s
- A : section de l'aquifère
- i : gradient hydraulique (sans unité) ($i = \Delta h/d$)
- Δh : différence de piézométrie
- d : distance sur laquelle est calculé le gradient
- l : largeur de l'aquifère en m

- T : transmissivité en m²/s ($T = k \times e$)
- e : épaisseur de l'aquifère en m

Des valeurs de transmissivité pour la nappe alluviale de l'Argens sont données par Durozoy et al. (1969) et sont de l'ordre de $5 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$. Aucune valeur n'étant disponible pour les alluvions de la Nartuby, nous utiliserons cette transmissivité bien qu'elle soit plutôt optimiste pour les alluvions de la Nartuby décrites comme de « *qualités hydrogéologiques médiocres en raison d'un pourcentage en limon et argile assez élevé* » (cf. § 2.2). Les valeurs de débits calculées ci-dessous sont donc sur-évaluées.

Zone	transmissivité en m ² /s	largeur moyenne de la nappe alluviale en m	piézo amont en m NGF	piézo aval en m NGF	Δh en m	distance en m	débit en l/s
1	5,00E-002	900	190	175	15	1000	675
2	5,00E-002	1450	175	160	15	1840	591

Illustration 20 : Évaluation grossière du débit transitant dans la nappe alluviale (cf. localisation des zones 1 et 2 sur l'illustration 19)

Les résultats de mesures de débit sériées ont fait apparaître au niveau des zones 1 et 2 une perte globale de 690l/s en HE et 530l/s en BE. Le débit de perte identifié en 2013 est du même ordre de grandeur que le débit transitant par la nappe alluviale ; ce qui appuie encore une fois l'hypothèse 2.

- **Résultats des campagnes de 2013**

En ce qui concerne les campagnes réalisées en 2013, les piézométries mesurées correspondent à la piézométrie du substratum (Jurassique ou Keuper/Muschelkalk) ; la nappe alluviale n'ayant pas fait l'objet de mesure durant ces campagnes (points non retrouvés).

Il n'y a pas de différence notable de piézométrie entre la campagne BE et la campagne HE (Illustration 21).

Dans les calcaires du Jurassique, la piézométrie est de l'ordre de 280 m NGF à l'Est de Draguignan et de 294 à 312 m NGF à l'Ouest de Draguignan. Le faible nombre de points permettant de mesurer la piézométrie dans les calcaires du Jurassique ne permet pas de tirer de conclusion.

Dans le Keuper ou le Muschelkalk, la piézométrie est très variable d'un point à un autre ; s'expliquant par le fait qu'il s'agit d'un aquifère fortement fracturé dans lequel les circulations d'eau se font par des conduits et fractures. A l'Est de Draguignan, la piézométrie est comprise entre 256 et 310 m NGF tandis qu'à l'Ouest, elle est comprise entre 317 et 244 m NGF. Au niveau des points Sainte-Anne, Pont d'Aups et Ragosa, la piézométrie est à une cote d'environ 170-180 m NGF, vraisemblablement en équilibre avec la piézométrie de la nappe alluviale.

Pour conclure, ces campagnes de mesure de la piézométrie 2013 permettent uniquement d'avoir une image de la répartition spatiale des niveaux piézométriques mais ne permet pas d'avoir d'information sur les conditions d'écoulement dans ces aquifères.

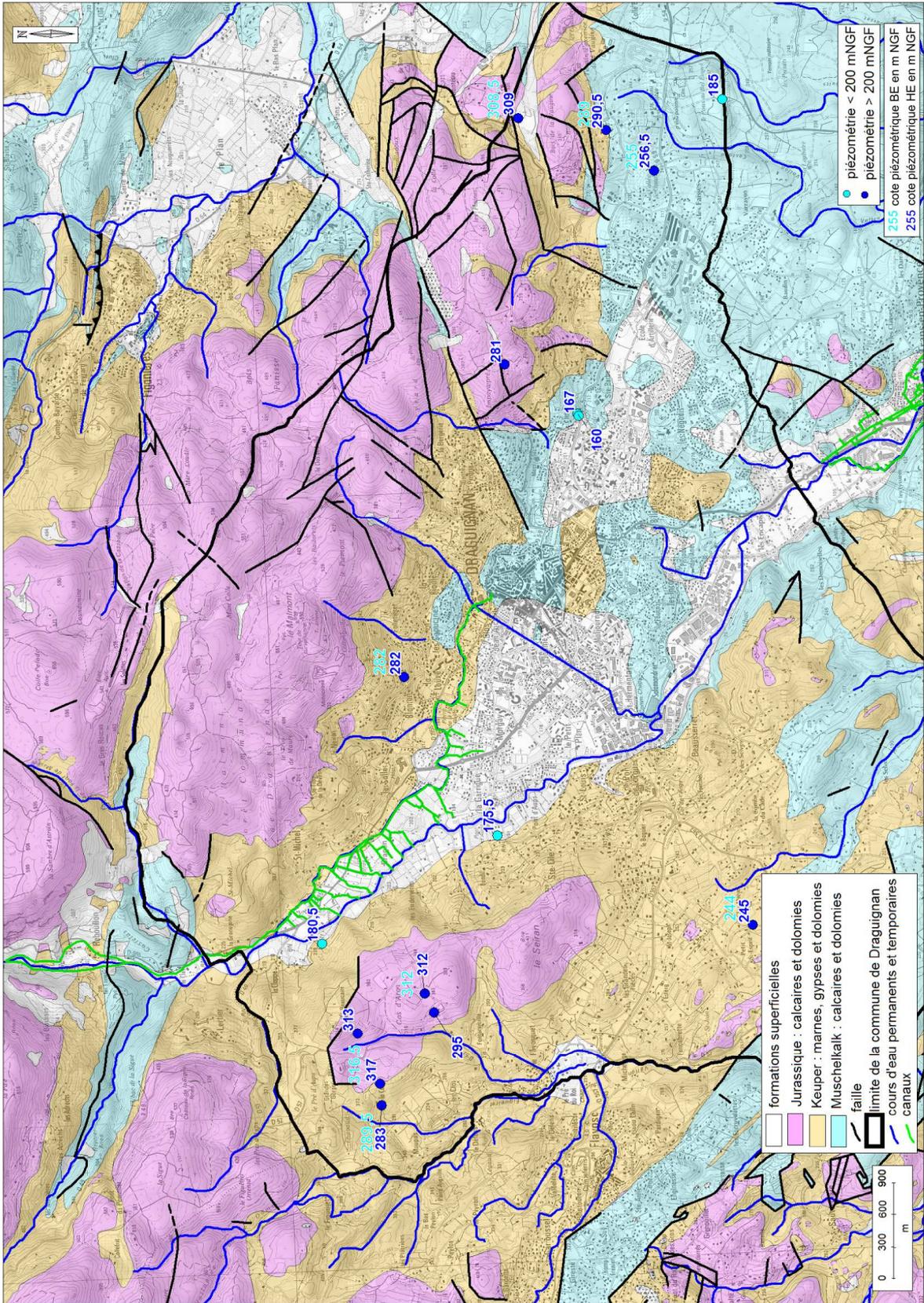


Illustration 21 : Résultats des campagnes de mesure de la piézométrie HE (février 2013) et BE (juillet 2013)

2.4. ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE LA VILLE DE DRAGUIGNAN (BRGM)

La ville de Draguignan capte les eaux souterraines des deux principaux aquifères : calcaires et dolomies du Muschelkalk et calcaires karstiques du Jurassique (Illustration 22).

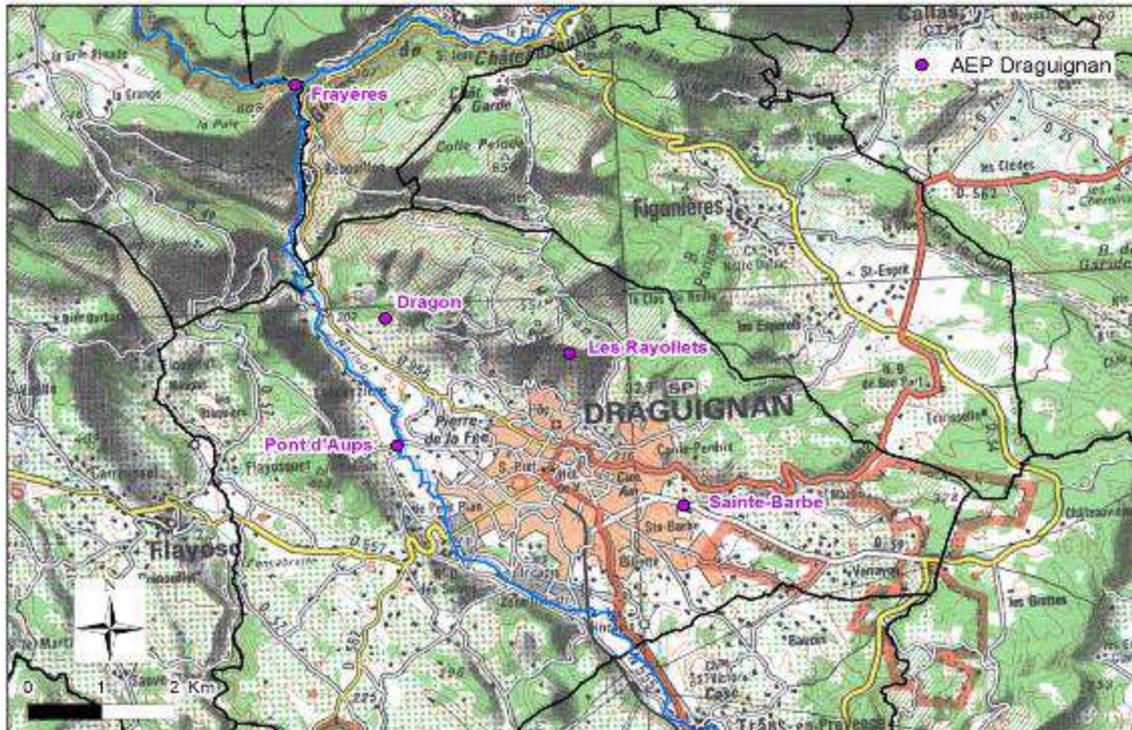


Illustration 22 : Localisation des points d'alimentation en eau potable exploités par la ville de Draguignan (points violet)

Les ressources en AEP de la ville de Draguignan sont les suivantes (Riou Consultant, 2006) :

- Source des Frayères dont le bassin d'alimentation est constitué par les massifs des calcaires jurassiques qui la dominent. Cette source n'est plus exploitée depuis l'épisode pluvieux intense de 2010 car la conduite d'adduction entre le captage et la Ville a été endommagée sur plusieurs centaines de mètres.
- Source du Dragon : située au nord-ouest de la ville sur le flanc gauche de la vallée de la Nartuby et au pied du massif du Malmont. Elle capte l'aquifère jurassique de ce massif à travers les éboulis de pente. Le captage a été amélioré avec un gain de l'ordre de 10% par des drains horizontaux. L'aquifère est constitué par le plateau calcaire présentant de nombreuses manifestations karstiques.
- Forage des Rayollets : situé sur le plateau à l'est de Draguignan, il s'agit de deux forages dans les calcaires jurassiques dont un seul est exploité. Le niveau statique de la nappe se trouve à environ 30 m de profondeur. Une galerie creusée au XVIème siècle permettait autrefois l'acheminement des eaux de la source vers le centre-ville de Draguignan. Cette galerie n'est plus exploitée car des phénomènes de calcification ont rendu son exploitation impossible. La galerie a fait l'objet d'une visite en 2011 par les sapeurs-pompiers ; son tracé est connu mais n'a pas été exploité dans le cadre de cette étude.

- Champ captant du Pont d'Aups : comprend 3 forages d'exploitation captant l'aquifère du Muschelkalk. Ces trois forages sont globalement dans le même aquifère captif sous les marnes du Keuper ou semi captif sous les alluvions de la Nartuby. Le niveau statique de la nappe se trouve entre 28 et 35 m de profondeur selon les forages.
- Champ captant Saint-Anne (ou quartier Sainte-Barbe) : comprend trois forages qui captent un aquifère captif sous une épaisse couche de marnes du Keuper. Le niveau statique de la nappe se trouve aux environs de 45 m de profondeur et varie entre 43 m (hautes eaux) et 50 m (basses eaux) de profondeur.

L'alimentation en eau potable à partir des captages d'eau souterraine représente 95% de la production totale d'eau potable. Pour compléter cette production, la commune est alimentée par de l'eau brute provenant du Lac de Saint-Cassien, desservie par la Société du Canal de Provence (SCP) et traitée dans l'usine de potabilisation de la commune (source commune de Draguignan, données 2012).

2.5. SYNTHÈSE (BRGM+CEREMA)

2.5.1. Bilan

Trois entités hydrogéologiques sont identifiées sur la commune de Draguignan :

- Formations marno-calcaires et argileuses du Trias au Crétacé : représentées par les formations argilo-gypseuses du Keuper ;
- Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan (principal aquifère exploité par la commune de Draguignan pour l'AEP) dont le principal exutoire est la source de la Foux;
- Massifs carbonatés jurassiques du Plan de Canjuers et ses unités de bordure.

Les écoulements souterrains se font principalement en direction des sources émergentes au contact entre les formations jurassiques perméables et la formation du Keuper très peu perméable, et convergent également vers la source de la Foux.

En ce qui concerne les zones d'apports et de pertes identifiées dans les études précédentes et dans le cadre de cette étude, plusieurs éléments plaident en faveur d'une hypothèse de fonctionnement où (Illustration 23) :

- dans les zones où le substratum est perméable (calcaires et dolomies du Jurassique ou du Muschelkalk), les écoulements souterrains dans le substratum participent à l'alimentation de la rivière (directement ou via les alluvions) ;
- dans les zones où le substratum est peu perméable (marnes, gypses et dolomies du Keuper), la nappe alluviale n'est plus ou peu alimentée par les écoulements souterrains mais principalement par la rivière.

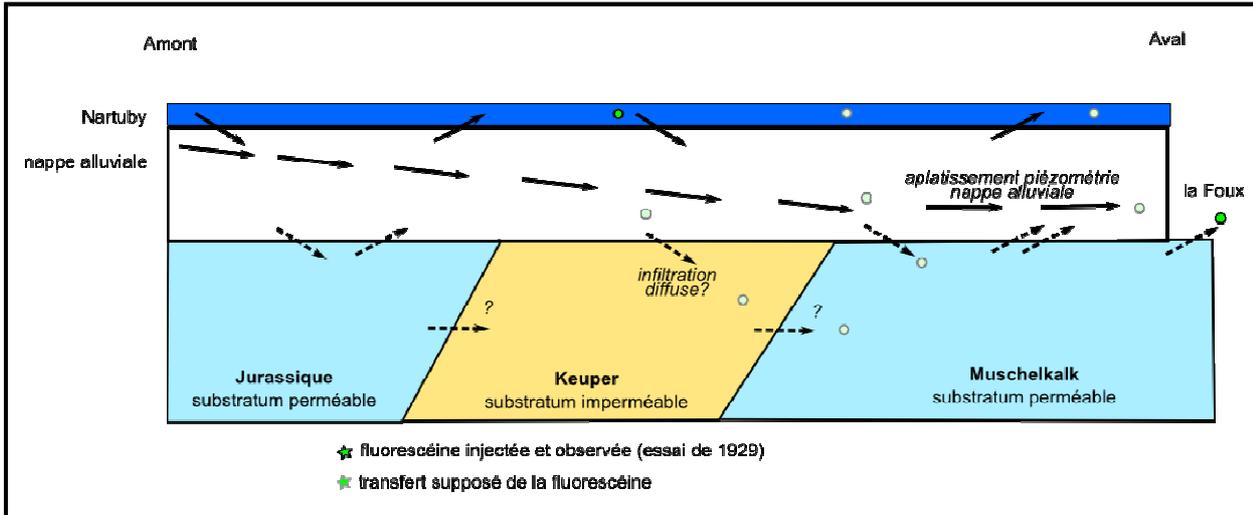


Illustration 23 : Représentation schématique des échanges substratum/nappe alluviale/rivière et du transfert supposé de la fluorescéine (essai de 1929) – schéma CEREMA

Il n'y aurait donc pas d'alimentation massive des gypses par une perte localisée de la Nartuby mais plutôt une alimentation diffuse par l'infiltration en surface et certainement des infiltrations diffuses de la nappe alluviale vers les gypses via des zones de fractures. Ce fonctionnement impliquant le développement de conduits karstiques de dimensions plus réduites et par conséquent, de façon relative, des mouvements en surface d'importance moindre, pouvant tout de même se manifester en surface par des effondrements comme celui de la Clappe (cf. § 3.2.1).

Le traçage artificiel réalisé en 1929 (cf. § 2.2) a montré que la fluorescéine, injectée dans la Nartuby au niveau de la Clappe, est ressortie au niveau de la source de la Foux au bout de 3 jours. Le schéma de l'Illustration 23 propose une représentation du transfert supposé de cette fluorescéine, en accord avec les hypothèses de fonctionnement émises ci-dessus.

2.5.2. Perspectives

Le tracé précis de l'ancienne galerie acheminant les eaux souterraines de la source des Rayollets vers le centre-ville n'a pu être exploité dans le cadre de cette étude, mais il serait intéressant de replacer ce tracé dans le contexte géologique et hydrogéologique pour voir les éventuelles influences possibles de ce drain artificiel sur les écoulements souterrains et la répartition des mouvements en surface.

La réalisation d'un traçage artificiel quantitatif, avec une injection au niveau de l'effondrement de la Clappe, permettrait :

- d'identifier le(s) lien(s) hydraulique(s) entre ce point et d'autres points de sortie dont la source de la Foux (et d'autres points de suivi à définir) ;
- d'acquérir des informations sur l'hydrodynamisme de l'écoulement entre ce point d'injection et les points de sortie suivis (vitesse de transfert, taux de restitution, ...).

3. Les phénomènes d'effondrement sur la commune de Draguignan

3.1. RECENSEMENT DES EVENEMENTS (BRGM)

Différentes sources d'information ont été exploitées afin d'effectuer un recensement le plus exhaustif possible des événements effondrements/affaissements, sur la commune de Draguignan, liés à la présence de gypse. La table des événements recensés dans l'étude régionale de cartographie de l'aléa effondrement/affaissement lié à la présence de gypse (Rivet, 2012) a été complétée par les événements recensés suite aux inondations de juin 2010 par le CEREMA. Les services techniques de la ville de Draguignan ont également été consultés et ont mis à disposition les dossiers d'études, menées à la suite d'effondrements s'étant produits sur leur commune. Les zones d'effondrements potentiels, détectées par l'étude photo-interprétative sur le Trias provençal (Pothérat, 1996), ont également été reportées sur la carte. Finalement, la carte de l'illustration 24 localise l'ensemble des événements ainsi recensés.

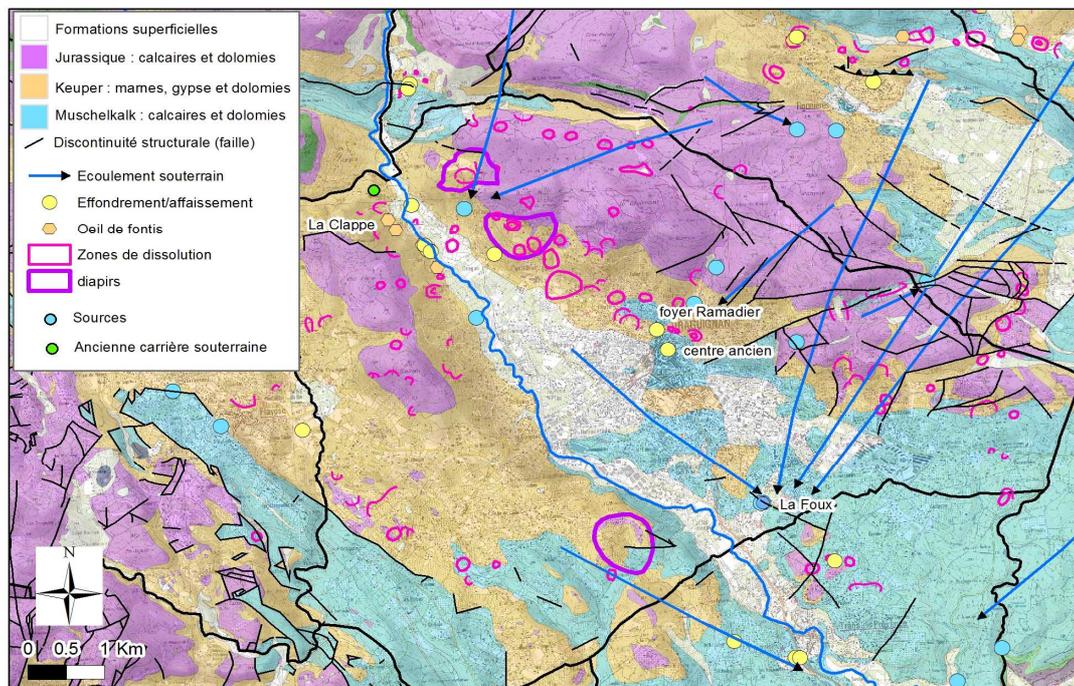


Illustration 24 : Localisation des phénomènes de surface liés à la dissolution du gypse présents sur la commune de Draguignan (fond : feuilles géologiques du BRGM à 1/50 000 de Draguignan, Salernes et Fréjus)

La carte montre nettement que les zones de dissolution du gypse (dolines) sont nombreuses et principalement situées à l'aplomb des formations argilo-gypseuses du Keuper. Des formes comparables sont également observables dans les calcaires du Jurassique sur le plateau du Malmont à l'est de Draguignan. Ces formes sont dues, dans ces formations, à la dissolution du calcaire donnant naissance à des karsts (vides souterrains).

Les écoulements souterrains identifiés sur la carte hydrogéologique du Var ainsi que les différentes sources présentes sur le territoire ont également été reportés. Les écoulements souterrains sont étroitement liés aux phénomènes de dissolution dans les formations

gypseuses. Le gypse est en effet une roche très soluble, et sa présence, combinée à l'action des variations d'une nappe d'eau souterraine, favorisent la formation de vides en souterrain. Ces vides peuvent se propager jusqu'à la surface et donner naissance à des fontis.

D'après la synthèse hydrogéologique du paragraphe 2.2 et d'après la localisation des effondrements recensés, plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- Effondrement de la Clappe : les mesures de jaugeages réalisées par le CEREMA au cours de l'étude ont montré qu'il n'y avait pas de perte localisée de la Nartuby dans les formations gypseuses mais uniquement une alimentation diffuse par l'infiltration en surface et certainement des infiltrations diffuses de la nappe alluviale vers les gypses via des zones de fractures. Il semble possible que l'évolution du fontis de La Clappe soit directement liée aux variations du niveau de la nappe phréatique, en lien avec la Nartuby.
- Ecoulements souterrains vers la source de la Foux : des données citées dans la synthèse hydrogéologique (étude de 1929), il apparaît l'existence d'un lien hydraulique entre les pertes de la Nartuby (identifiées à l'aval de la Clappe) et la source de la Foux ; indiquant que des circulations préférentielles au sein des gypses ont vraisemblablement lieu sur de relativement grandes distances. Les phénomènes de dissolution provoquant les affaissements observés dans le centre ancien et au niveau de l'ancien foyer Ramadier sont liés à ces circulations préférentielles des eaux souterraines (Illustration 24).

Ces deux hypothèses sont traitées dans les paragraphes suivants, présentant les principaux effondrements recensés et étudiés sur la commune de Draguignan : effondrement de La Clappe, fontis de l'ancien foyer Ramadier et affaissement du centre ancien. Pour ces trois événements, les études géotechniques ont été mises à disposition par la ville de Draguignan et sont citées en bibliographie.

3.2. CAS REMARQUABLES (BRGM)

Trois événements particulièrement bien renseignés ont pu être caractérisés au sein de la présente étude (Illustration 24) :

- Instabilités au lieu-dit « La Clappe » ;
- Effondrements du Foyer Ramadier ;
- Affaissement du Centre ancien.

Les documents consultés proviennent principalement des archives que la ville de Draguignan a mises à disposition.

3.2.1. Instabilités au lieu-dit « La Clappe » (BRGM + CEREMA)

Les instabilités gravitaires, observées au lieu-dit de la Clappe, au nord de la commune de Draguignan, en rive droite de la Nartuby, semblent très anciennes, puisque dès le XIX^{ème} siècle il est mentionné des événements dans ce secteur. Dans sa thèse, Nicod (1967) rapporte qu'un effondrement se serait produit le 19 janvier 1878 sur le secteur de La Clappe, provoquant l'ouverture d'un gouffre de 40 m de diamètre et 36 m de profondeur.

Dans le rapport de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (Cova, 1998), il est rappelé un historique des événements sur le secteur. Deux phénomènes d'instabilité se

sont produits : Un fontis situé en pied de versant au nord du secteur et une zone d'affaissement plus au sud et affectant une surface plus étendue (Illustration 25).

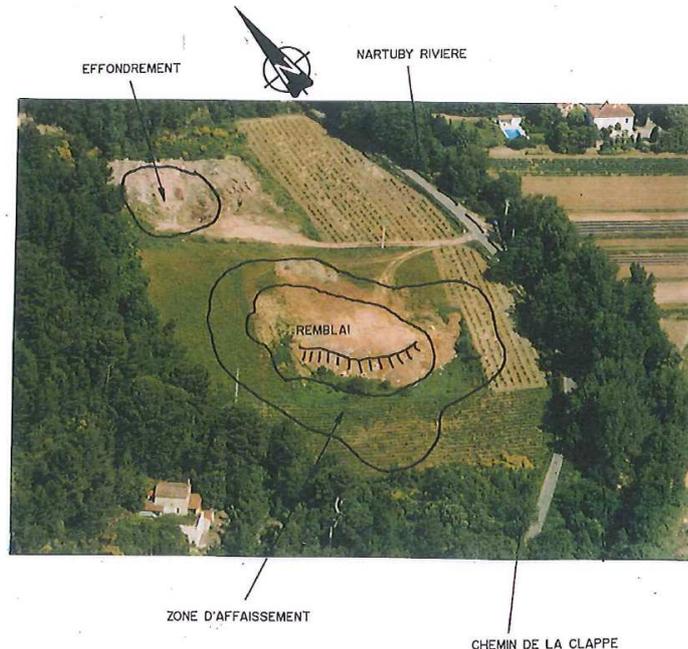


Illustration 25 : Photographie du secteur de La Clappe et des zones d'instabilités : fontis et affaissement (extrait rapport DDAF (Cova, 1998))

Au nord de la zone, un premier fontis est apparu en juillet 1983, avec un diamètre de 50 m et une profondeur d'environ 20 m. L'effondrement a provoqué la déstabilisation des formations du pied de versant par « appel au vide », qui ont glissé vers le fontis et l'ont en partie comblé. Ce fontis a été réactivé en avril 1998 : un cratère de 40 m de diamètre et d'une profondeur de 8 m est en effet apparu à l'emplacement de l'ancien fontis. L'origine du fontis est attribuée à la présence de gypse et anhydrite solubles au sein des marnes triasiques. Le volume total d'alluvions puis de remblais absorbés par le sous-sol est estimé à 20 000 m³. Suite à l'évènement de 1998, et au risque encouru en cas de reprise de l'effondrement au niveau de l'affaissement de la zone sud ou d'une extension du fontis vers l'est (coupure de la route et détournement de la rivière), une campagne de prospection géophysique a été menée, complétée par des sondages sur le secteur instable, ainsi qu'un levé topographique précis de la zone.

La prospection géophysique menée en 1998 par le bureau d'études « Européenne De Géophysique (EDG) » a mis en évidence 3 zones d'anomalies :

- Entre le fontis de 1998 et la route au Nord ;
- Dans la zone d'affaissement au sud ;
- En rive gauche de la rivière au nord-est.

Ces anomalies seraient dues à des dissolutions localisées dans les marnes, plus ou moins argileuses et plus ou moins imprégnées d'eau. Ces anomalies sont de forme plus ou moins circulaires et prennent une forme allongée au sud (100 m x 30 m). Les décompressions semblent affecter principalement les alluvions dans la tranche 5-15 m de profondeur et les marnes sous-jacentes. Suite à cette reconnaissance géophysique, une campagne de sondages a été menée sur le secteur en mars 1999 (bureau d'étude Sol Provençal). Au fond de

l'affaissement au sud, un sondage montre une épaisseur de formation alluvionnaires (sables, galet, graviers) d'environ 60 m, puis viennent les marnes gypseuses du Keuper jusqu'à 90 m de profondeur, puis les calcaires du Muschelkalk. Le niveau d'eau rencontré par le sondage est mesuré à environ 30 m de profondeur.

En juin 2010, un épisode pluvieux intense s'est produit dans l'est du Var, provoquant la crue de nombreux cours d'eau. De nombreux mouvements de terrain se sont également manifestés suite à ces pluies intenses. Le CEREMA a effectué un inventaire de ces phénomènes. Lors de cet inventaire, il a été identifié l'apparition de crevasses profondes sur la zone affaissée dans le secteur sud du fontis de La Clappe (Illustration 26 et Illustration 27).



Illustration 26 : Photo des instabilités au lieu-dit de la Clappe (source CEREMA, juillet 2010)



Illustration 27 : Photo des crevasses observées sur la zone d'affaissement sud (source CEREMA, juillet 2010)

En juillet 2010, il est observé que le niveau de la rivière est nettement supérieur à la cote du fond de la zone d'affaissement (sec le 2/7/10). Les mesures de jaugeages réalisées en hautes et basses eaux par le CEREMA dans le cadre de cette étude, montrent qu'il existe une zone de perte des eaux de la Nartuby vers la nappe sur ce secteur : perte de 3% en basses eaux et 12% en hautes eaux entre le point de mesure situé à La Clappe (point 13) et le point de mesure suivant situé environ 900 m en aval (point 14) (Illustration 11). Cela implique que des

circulations d'eau souterraines ont lieu sur ce secteur accentuant les phénomènes de dissolution des formations gypseuses situées directement sous les formations superficielles.

Les schémas de l'illustration 28 ci-après synthétisent l'ensemble de ces informations et propose un modèle d'évolution et de fonctionnement actuel du secteur de la Clappe.

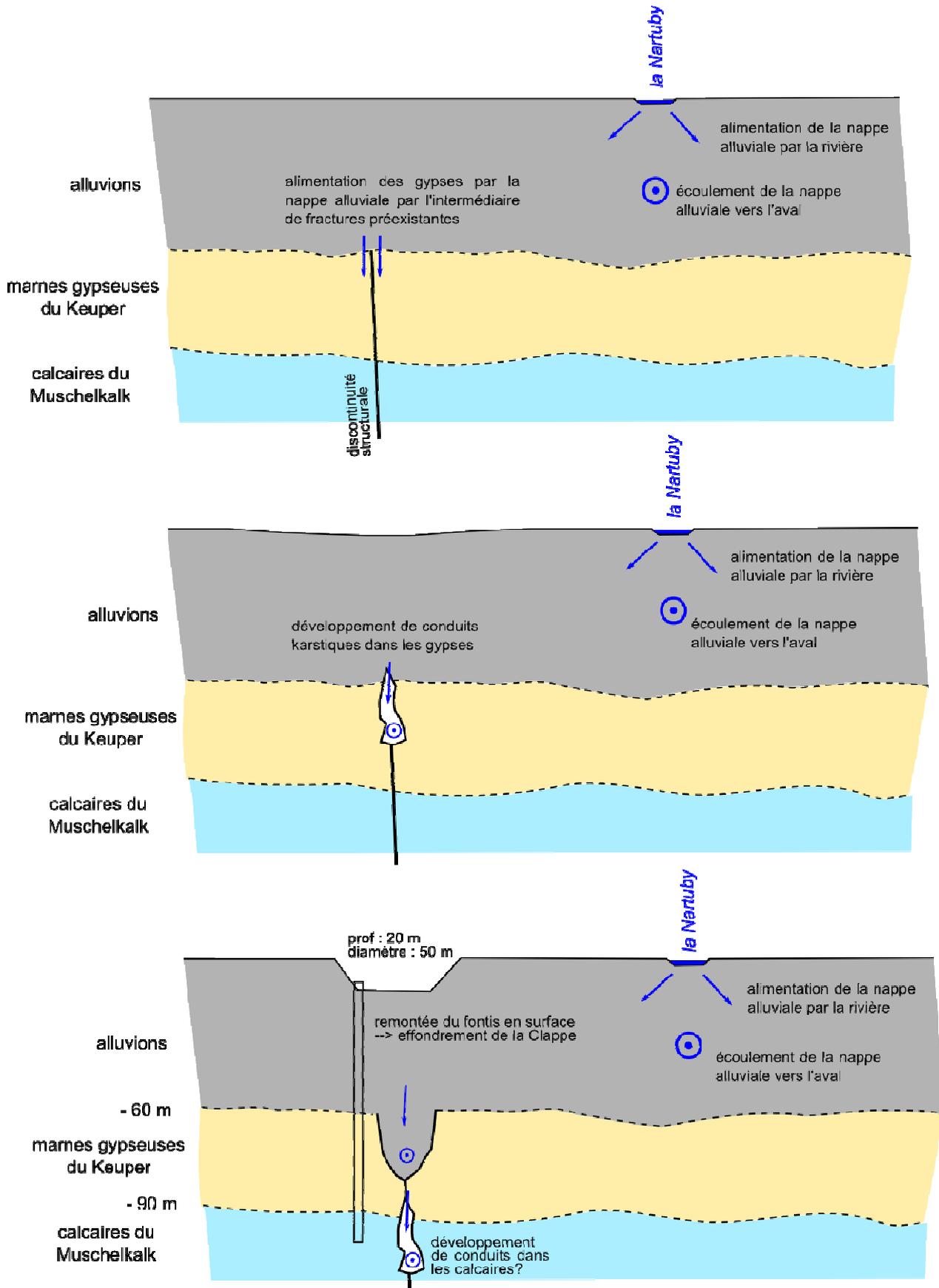


Illustration 28 : Schémas proposant un modèle d'évolution et de fonctionnement du secteur de la Clappe schémas CEREMA

3.2.2. Manifestations d'instabilités dans le centre ancien

Dans la bibliographie consultée, il apparaît que, depuis sa construction, l'église paroissiale a été reconstruite deux fois au même endroit. L'édifice actuel date de 1870, et dès 1892 des désordres sont apparus : tassements inégaux et déversement des murs et piliers (Uguet, 1958).

En 1958, une étude géologique et géotechnique du secteur (Uguet, 1958), montre que l'église se trouve dans une zone d'affaissement au sein de laquelle l'action des eaux souterraines joue un rôle d'accélérateur du phénomène, provoquant la dissolution des couches gypseuses sous-jacentes. Selon l'auteur, « *les formations du Keuper sous-jacentes sont mises en sous-pression et dépression alternatives et périodiques par les circulations d'eau souterraine tantôt ascendantes, tantôt descendantes* » (Illustration 29). Cela signifie que ce sont les fluctuations du niveau de la nappe qui mènent aux phénomènes de dissolution. Ces circulations portent l'action dévastatrice des eaux à son paroxysme provoquant des phénomènes de dissolution, lessivage du gypse soluble et la plastification des argiles de décalcification contenues dans le Keuper.

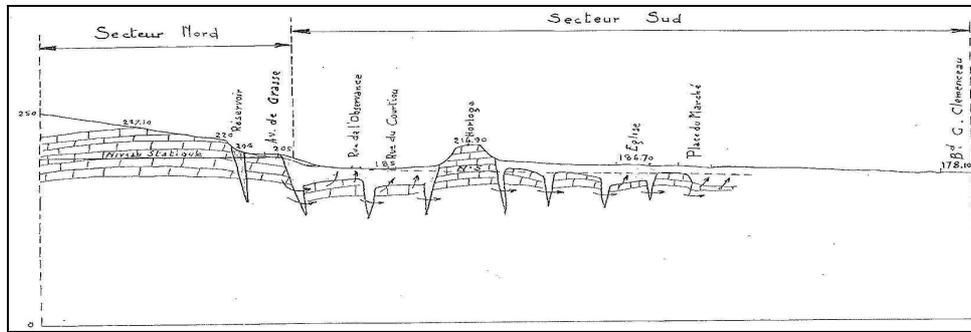


Illustration 29 : Croquis d'interprétation montrant la structure géologique et les circulations d'eau souterraine sous le centre ancien, échelle 1/25 000^e (Uguet, 1958)

En 1988, Simecsol a mené une étude microgravimétrique sur le centre ancien. Cette campagne et les forages destructifs associés ont permis de mettre en évidence une zone de faible compacité à proximité immédiate du chœur de l'église et principalement à faible profondeur (de 10 m à 28 m de profondeur). A priori, il ne s'agit pas de vides francs mais plutôt de zones limono-argileuses peu compactes pouvant correspondre à une déconsolidation progressive des terrains au-dessus d'un karst jadis actif mais effondré. Ainsi, à l'échelle historique, les mouvements de surface, qui induisent des désordres sur les existants, semblent correspondre à un réarrangement des blocs calcaires, consécutif à la consolidation des argiles voire à des comblements de vides limités ou à des entrainements de fines.

En 2013, une visite de terrain a permis d'observer des désordres qui semblent se poursuivre (Illustration 30 et Illustration 31).



Illustration 30 : Vue de la façade nord de l'église (photo de gauche) et fissure au sommet d'une ogive observée à l'intérieur de l'église (observation février 2013)



Illustration 31 : Fissures le long de la façade d'un immeuble (photo prise dans le centre ancien, février 2013)

3.2.3. Effondrement du foyer Ramadier, boulevard Joseph Collomp

Les premiers désordres observés remontent au début des années 1970. Des sondages carottés d'une quinzaine de mètres de profondeur ont été réalisés de part et d'autre du foyer, rencontrant 6 m d'éboulis de pente argilo-sableux puis des marnes gypseuses et calcaires dolomitiques. Le substratum rencontré (marnes gypseuses et calcaire dolomitique) est caractérisé par la présence de zones de dissolution de gypse et de réseaux karstiques, comblés ou non par des argiles. Le niveau statique de l'eau, observé lors de la réalisation des sondages, est à une profondeur de 8 m, et se situe donc dans le substratum marno-gypseux.

En 1985, plusieurs désordres sont décrits :

- Fissuration du bâtiment
- Affaissement en sous-sol en forme de quart de cône, le long d'un pieu. La profondeur de l'affaissement est estimée à 1,5 m, avec présence d'un conduit naturel au fond ;
- Affaissement généralisé du terre-plein du bâtiment, dont l'amplitude est estimée entre 0,2 et 0,4 m.

Des réfections sont alors effectuées pour réparer les dommages. Mais les fissures réapparaissent peu après les travaux, avec une vitesse d'ouverture d'environ 1 mm/a.

En 1995, un fontis apparaît dans la partie ouest du bâtiment. Le volume de la cavité souterraine, à l'origine du fontis, est estimé de 60 m³ à 80 m³. Des sondages d'une dizaine de mètres de profondeur sont effectués sous le bâtiment : plusieurs d'entre eux rencontrent des zones de vides francs, d'épaisseur allant jusqu'à plus de 2 m. Les sondages mettent en évidence successivement :

- des remblais, essentiellement argileux et contenant des petits blocs calcaires ;
- un ensemble de marnes blanchâtres, plus ou moins gypseuses et de bancs calcaires, localement altérés, entrecoupés de vides de hauteur variable (de quelques centimètres à plusieurs mètres). Cette formation géologique correspond à la formation hétérogène du Keuper.

Les sondages ont rencontré des zones fortement décomprimées, correspondant à des terrains remaniés suite à l'effondrement du toit des vides de dissolution.

Suite à cette étude, il est proposé de démolir la partie ouest du bâtiment et de conserver et réhabiliter la partie est. La zone libérée à l'ouest est intégrée dans l'espace du jeu de boules.

Pendant les travaux, des effondrements se sont développés autour du fontis, finalement stabilisés sous forme d'une cavité cylindrique de 6 m de diamètre, et de 6,5 m de profondeur. La capacité d'absorption du coulis fut plus forte dans le secteur sud-ouest. Cela amène à penser que les vides communiquent dans cette zone avec un réseau karstique qui se développe vers le sud-ouest.

Cependant, malgré ces travaux, le fontis réapparaît rapidement. Depuis, la zone concernée par le fontis est protégée, et rechargée chaque année par les services de la mairie (Illustration 32 et Illustration 33).



Illustration 32 : Mise en sécurité de la zone de fontis (photo prise en février 2013)



Illustration 33 : Photo du fontis prise en février 2013. Dimensions observées : 5 à 6 m de diamètre, profondeur visible depuis la surface : au moins 4 m.

3.3. SYNTHÈSE (BRGM)

Sur la commune de Draguignan, dans le secteur nord de la Nartuby, les zones de dissolution et d'effondrements s'intègrent dans un fuseau de direction nord nord-ouest sud sud-est (Illustration 24). D'après la carte hydrogéologique du Var (échelle 1/200 000^{ème}), l'écoulement souterrain se faisant globalement en direction de la source de La Foux. Une première hypothèse qui peut être émise concerne le fait que les concentrations de sulfates dans les eaux de La Foux sont fortement liées aux zones gypseuses traversées par les eaux souterraines depuis le pied du massif du Malmont jusqu'à la source de la Foux. En effet, les sulfates proviennent de la dissolution du gypse sous l'action de la circulation des eaux souterraines. On peut également supposer retrouver des sulfates issus de cette dissolution aux forages des Incapis et de Sainte-Barbe, tous deux situés en aval des zones de désordres, dans le sens de circulation des eaux souterraines : sud et sud-ouest. L'exploitation des données physico-chimiques sur ces points d'eau et l'acquisition de nouvelles données sur la commune de Draguignan font l'objet du chapitre suivant, dans lequel on propose de vérifier ces hypothèses et d'évaluer les volumes de gypse dissous.

4. Hydrochimie et phénomènes de dissolution

A partir de la synthèse géologique et hydrogéologique réalisée précédemment, l'objectif est maintenant de déterminer s'il est possible d'établir un lien entre les phénomènes d'effondrement/affaissement observés en surface et les phénomènes de dissolution du gypse. Un travail a été mené sur la composition des eaux souterraines traversant les différentes formations géologiques du Muschelkalk, Keuper et Jurassique afin d'identifier, localiser, et si possible quantifier les phénomènes de dissolution du gypse. Dans un premier temps, à partir des données disponibles dans la banque de données ADES, complétées par les données transmises par la mairie, un état des lieux est réalisé sur la composition chimique et les tendances observées sur les eaux des captages AEP de la région de Draguignan ainsi qu'en amont et en aval du secteur étudié. Cet état des lieux est présenté par le BRGM. Sont ensuite détaillés les résultats de deux campagnes (hautes-eaux et basses-eaux) de mesure de la conductivité et de prélèvement des eaux, réalisées par le CEREMA en 2013. Une interprétation commune de l'ensemble de ces résultats est finalement proposée.

4.1. ETAT DES LIEUX SUR LA COMPOSITION DES EAUX SOUTERRAINES SUR LA REGION DE DRAGUIGNAN (BRGM)

4.1.1. Données exploitées

Les données utilisées proviennent de la banque de données ADES, de la mairie de Draguignan et de données issues de la bibliographie. Ces données sont complétées par trois points provenant des récentes campagnes de terrain et de prélèvement des eaux souterraines effectuées par le CEREMA dans le cadre de cette étude. Ces trois nouveaux points prélevés ont en effet été intégrés à l'analyse globale des données géochimiques sur la région de Draguignan, car ils présentent des caractéristiques très importantes pour comprendre le fonctionnement du système étudié. Il s'agit des points de La Foux, La Clappe et Rebouillon. La localisation des points disposant d'analyses géochimiques est reportée sur l'illustration 34. Le tableau de l'illustration 35 récapitule ces points et les numéros BSS associés.

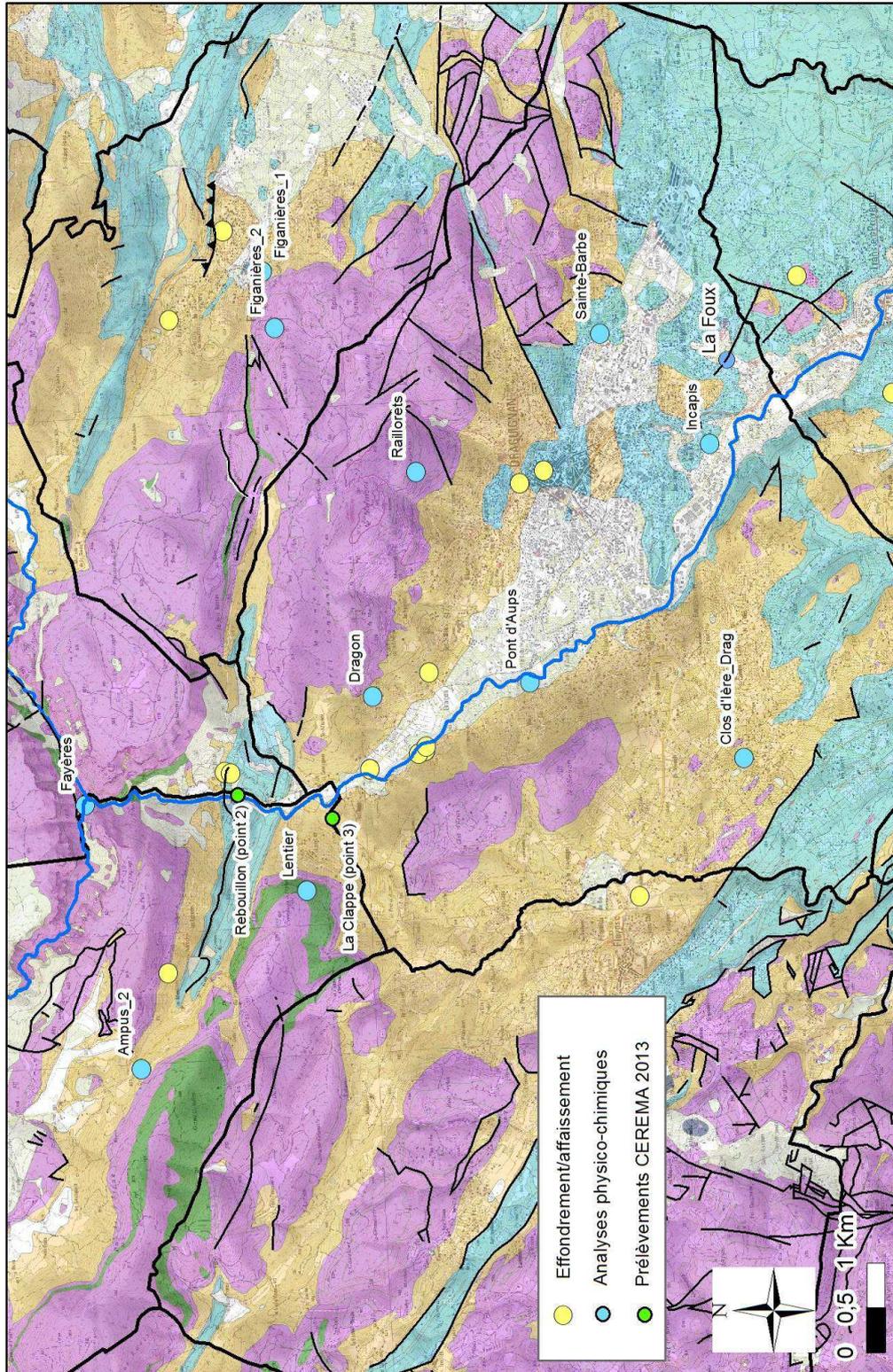


Illustration 34 : Localisation des données hydrochimiques exploitées (source ADES, ville de Draguignan, carte hydrogéologique du Var)

BSS	Nom	BSS	Nom
09977X0004/GL	Ampus	10241X0102/F	Trans_2
09977X0023/HY	Ampus_2	10241X0132/FEX2	Trans_1
09977X0024/HY	Ampus_3	10246X0086/FEX1	Le Muy_1
09978X0047/FEX1	Lentier	10246X0089/F	Le Muy_2
09985X0027/SOU	Figanières_1	10234X0087/FEX1	Pont d'Aups
09985X0065/FEX	Figanières_2	10241X0170/F2	Sainte-Barbe
10234X0014/SOU	Dragon	09978X0023/HY	Frayères
10234X0074/F	Rayollets	10234X0007/S1	Incapis
10234X0089/F	Clos d'ère_Drag	10241X0012/SOU	La Foux
10241X0018/HY	Trans_3	/	La Clappe (point 3)
		/	Rebouillon (point 2)

Illustration 34 : Tableau de correspondance n°BSS / nom du point

4.1.2. Résultats et interprétation

Cette partie reprend les principales conclusions de l'analyse des données géochimiques qui est présentée en détail en Annexe 1.

a) *Faciès des eaux souterraines*

Le diagramme de Piper a été réalisé avec les données disponibles sur ADES ainsi qu'avec les données récupérées auprès de la mairie de Draguignan, complété par trois points échantillonnés par le CEREMA en 2013 car ces points se sont avérés présenter des résultats nécessaires à l'interprétation qui va suivre.

Le faciès des eaux souterraines évolue entre les faciès bicarbonaté calcique et sulfaté calcique (Illustration 36). Les eaux de la source de la Foux montrent un faciès chloruré sodique. Les points reportés sur le diagramme s'organisent selon un système ternaire dont le mélange des trois pôles peut expliquer la grande majorité des compositions chimiques présentées. (NB : les teneurs en nitrates n'ont pas été mesurées dans les campagnes de 2013 pour les eaux de la Foux et de la Clappe - voir § 4.2).

Le premier pôle est celui des **eaux issues des calcaires jurassiques en amont de Draguignan** (Ampus, Rayollets, Frayères, Figanières). Ces eaux montrent typiquement de fortes proportions de calcium, magnésium et bicarbonates, issus de la dissolution des roches calcaires.

Le second pôle est constitué par **les eaux de la Clappe qui présentent un faciès sulfaté calcique et magnésien**. Les proportions en calcium, sulfates sont dominantes, indiquant probablement une très forte contribution des éléments provenant de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ainsi que des éléments (Ca, Mg) provenant de la dissolution des dolomies (Ca, Mg CO_3) présentes dans le Muschelkalk.

Le troisième pôle est représenté par **les eaux de la source de la Foux**, qui montrent de fortes proportions de sodium et chlorures, sulfates et calcium. Le sodium et les chlorures proviennent probablement de la dissolution de la halite (NaCl) tandis que celle des sulfates et du calcium provient très probablement, étant donné le contexte géologique, de la dissolution du gypse.

Les eaux du point d'eau Sainte Barbe (ou Sainte Anne) et de Pont d'Aups évoluent entre les deux faciès sulfaté et bicarbonaté. Les eaux de Sainte Barbe se distinguent des eaux de Pont d'Aups par des teneurs en sodium et potassium plus fortes. Les champs captants du Pont d'Aups et de Saint-Anne comprennent des forages captant un aquifère captif sous une épaisse couche de marnes du Keuper, dont le lessivage est susceptible de contribuer au stock de sulfates dans les eaux souterraines.

La nappe des alluvions de la Nartuby peut alimenter également les eaux de Pont d'Aups.

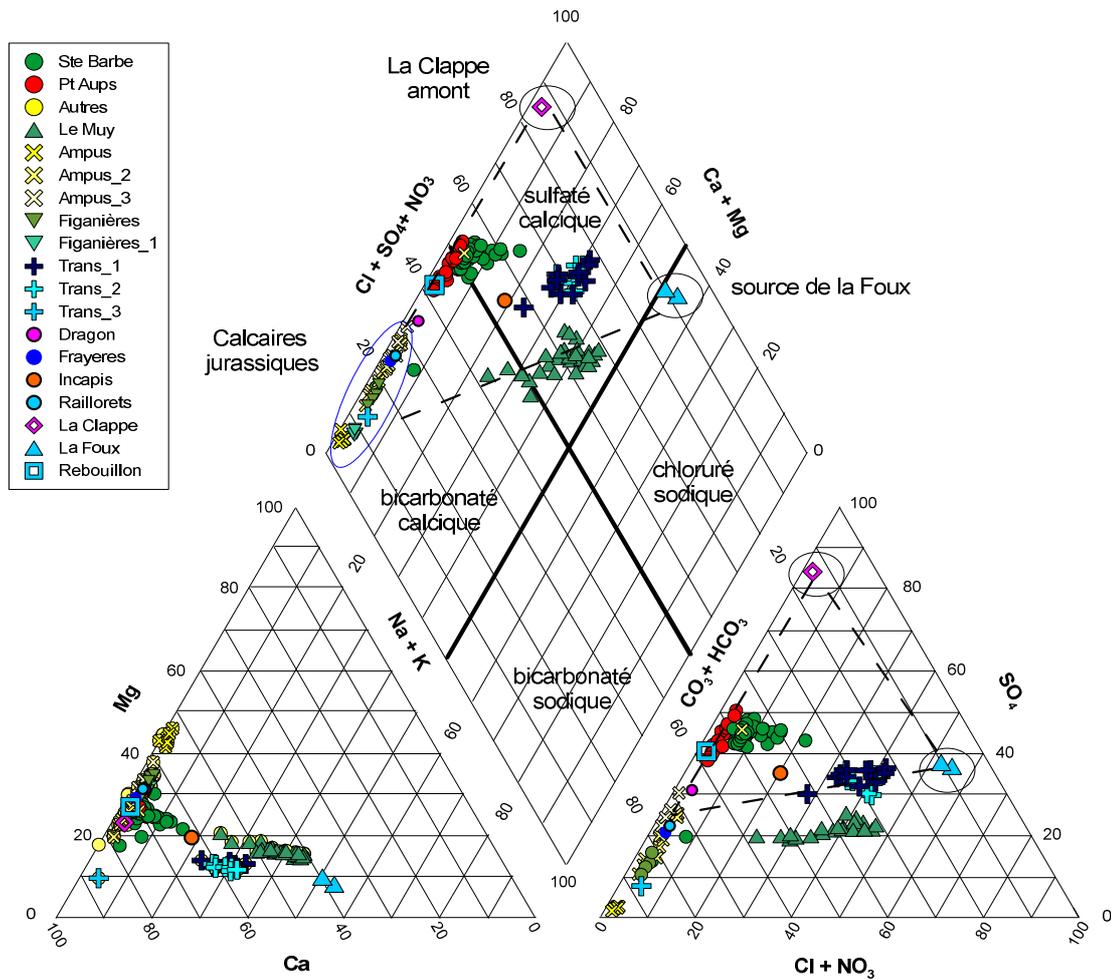


Illustration 35 : Diagramme de Piper des points d'eau de la région de Draguignan, dont les points d'eau 10241X0170/F2 (Sainte Barbe) et 10234X0087/FEX1 (Pont d'Aups), ainsi que les points d'eau Dragon, Frayères et Rayollets des aquifères des calcaires du Jurassique, le point d'eau Incapis de l'aquifère des dolomies du Muschelkalk. Les données incluent des données des campagnes 2013 du CEREMA d'Aix (La Foux, la Clappe et Rebouillon).

Le point d'eau du Muy (10246X0086/FEX1), est situé à l'aval de Draguignan, et possède un faciès bicarbonaté calcique avec une minéralisation importante (conductivité supérieure à

1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et TDS⁵ compris entre 680 et 1 000 mg/L. Les eaux du Muy et de Trans montrent des compositions différentes qui semblent prouver qu'elles ne résultent pas des mêmes mélanges d'eau.

Les eaux les plus enrichies en sulfates sont les eaux de la source de la Foux et du point d'eau Trans_1 (10241X0132/FEX2) à Trans-en-Provence.

b) Mélanges d'eaux souterraines

Les rapports Mg/Na (Magnésium/Sodium) et Ca/Na (Calcium/Sodium) des solutions sont classiquement utilisés pour montrer les origines des eaux souterraines. Les données issues de Meybeck sont utilisées pour la comparaison car ce sont des eaux de surface provenant de bassins monolithographiques indiquant une composition globale.

Dans l'illustration 37, la majorité des points s'aligne sur une droite de mélange dont les pôles sont les **eaux de la source de la Foux** et les **eaux calcaires d'Ampus**. Les premières représentent un pôle proche de celui des eaux drainant des évaporites comme défini par Meybeck (1986), quoique plus concentré en sodium. Cette source de sodium est très probablement la halite (NaCl), qui est présente dans les formations géologiques. Les secondes sont très proches du pôle bicarbonaté calcique, en cohérence avec leur origine issue des calcaires jurassiques.

Les eaux de Sainte Barbe montrent une variabilité temporelle entre ces deux pôles qui sera illustrée ci-après, témoignant de contributions variables des deux pôles d'eaux de type Ampus et La Foux. Les eaux souterraines de Pont d'Aups sont plus faiblement concentrées en sodium, chlorures, calcium et sulfates que les eaux de Sainte Barbe. Elles sont proches des eaux des calcaires jurassiques de Dragon, Frayères et Rayollets qui ont des teneurs en sodium faibles, proches de 0,15-0,2 meq/L, et des teneurs en chlorures variant entre 0,18 et 0,3 meq/L.

Le point d'eau Incapis est proche des eaux de bassin versant évaporitique, ce qui valide l'hypothèse que les eaux provenant de l'aquifère des dolomies du Muschelkalk ont traversé des formations gypseuses.

Les eaux de Trans-en-Provence et du Muy montrent des rapports Mg/Na et Ca/Na proches mais plus concentrées de celles des bassins versants évaporitiques. Les eaux du Muy montrent néanmoins des teneurs en calcium (moyenne de 2.4 mmol/L) et magnésium (moyenne de 0.8 mmol/L) inférieures à celles des points d'eau de Trans-en-Provence (moyenne en calcium de 5.4 mmol/L et magnésium de 1.1 mmol/L), et des teneurs en sodium légèrement inférieures (moyenne de 4 mmol/L pour Le Muy et de 5 mmol/L pour Trans).

⁵ TDS signifie Total des Solides Dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau incluent le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium qui sont des cations, et des carbonates, nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates qui sont tous des anions. Des cations sont des ions chargés positivement et des anions sont des ions chargés négativement. Ces minéraux peuvent provenir d'un certain nombre de source naturelle autant que suite aux activités humaines. Des sources d'eau minérales contiennent de l'eau avec un taux élevé de solides dissous parce qu'elles ont coulé à travers des régions où les roches contiennent beaucoup de sel (www.safewater.org).

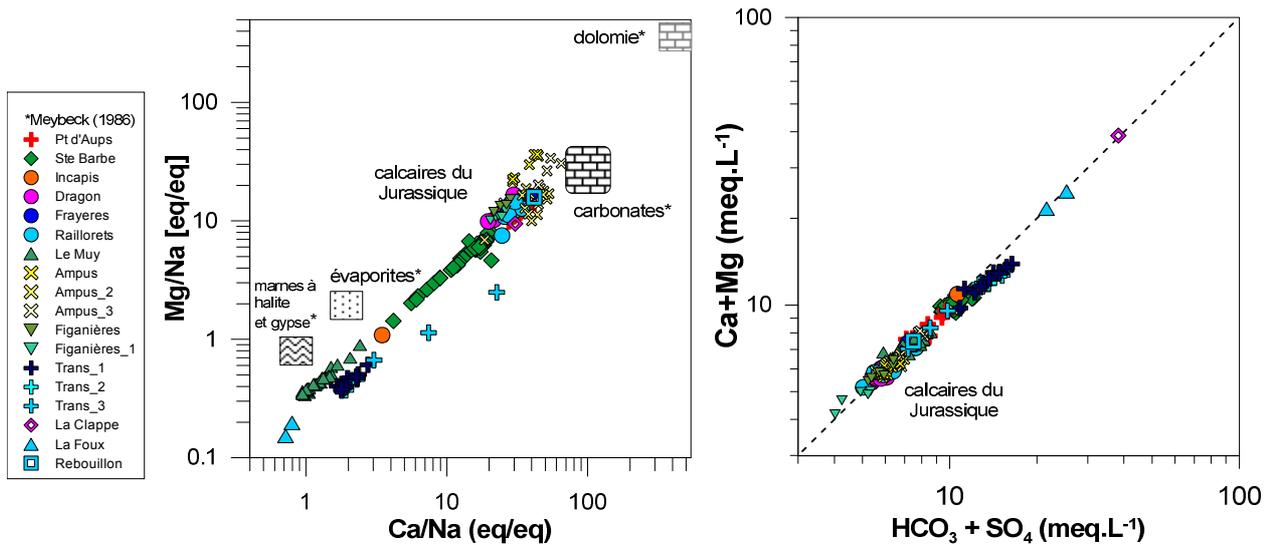


Illustration 36 : Evolution des rapports Mg/Na en fonction de Ca/Na et de Ca+Mg en fonction de HCO₃ (bicarbonate) + SO₄ (sulfate), incluant les données des campagnes 2013 du CEREMA.

c) Conclusion partielle

L'étude préliminaire des données existantes sur les eaux souterraines permet de montrer que la composition chimique des eaux souterraines de la région de Draguignan évolue entre deux pôles de mélange :

- Un pôle dont la composition provient de la dissolution des calcaires jurassiques en amont de la zone d'étude ;
- Un pôle représenté par les eaux de la source de la Foux, montrant une saturation relativement au gypse mais aussi une contribution des chlorures et sodium provenant de la dissolution de la halite.

L'évolution de la composition chimique des points d'eau montre, d'amont en aval, une augmentation de la teneur en sulfates, mais aussi en chlorures jusqu'à atteindre la saturation par rapport au gypse dans les eaux de la Foux, et pour les points aval situés à Trans-en-Provence.

Les eaux du point d'eau Sainte Barbe et de Pont d'Aups évoluent dans le temps entre les deux faciès sulfaté et bicarbonaté, les eaux de Sainte Barbe sont plus concentrées en sulfates que les eaux de Pont d'Aups, en fonction probablement de mélanges d'eau en proportions variables. La chronique de la chimie des eaux au point Sainte Barbe montre que les teneurs en chlorures, sulfates, calcium et magnésium varient beaucoup en fonction du temps. De plus fortes teneurs en sulfates et calcium sont mesurées en période de bas niveau piézométrique. Ces eaux sont légèrement sous-saturées par rapport au gypse. L'origine des sulfates en période de bas niveau piézométrique pourrait donc être liée à la dissolution de formations évaporitiques, en particulier de gypse et d'anhydrite. Cette dissolution fournit également du calcium aux eaux souterraines, et accentue la sursaturation relativement à la calcite. Il n'existe pas assez de données au point d'eau Pont d'Aups pour mener une telle analyse.

4.2. ZOOM SUR LA COMMUNE DE DRAGUIGNAN : ACQUISITION DE NOUVELLES DONNEES (CEREMA)

Afin de compléter la compréhension des échanges eau-roche du secteur, de nouvelles données ont été acquises, lors d'une campagne Hautes Eaux (HE : février 2013) et une campagne Basses Eaux (BE : juillet 2013):

- mesure la conductivité des eaux souterraines après inventaire des points d'eau accessibles sur le secteur ;
- prélèvements d'eau sur certains de ces points d'eau.

4.2.1. Répartition de la conductivité des eaux

a) Définition du réseau de mesures

La définition du réseau de mesures s'est basée sur les points identifiés dans la BSS du BRGM.

Les points de la BSS ont été classés de la façon suivante :

- groupe 1a : sources, cavités et piézomètres ou forages crépinés, réalisés après 1990 ;
- groupe 1b : piézomètres ou forages crépinés, réalisés avant 1990 ;
- groupe 2a : forages dont l'équipement n'est pas précisé, réalisés après 1990 ;
- groupe 2b : forages dont l'équipement n'est pas précisé, réalisés avant 1990.

La recherche de ces points s'est ensuite concentrée en priorité sur les groupes 1a et 1b, puis 2a et enfin 2b.

La recherche de ces points a été réalisée en novembre 2012 par enquête téléphonique et enquête terrain (porte à porte, environ 5 jours d'enquête). Grâce à cette enquête, quelques nouveaux points ont pu être identifiés.

La carte de l'illustration 18 localise l'ensemble des points qui a finalement pu faire l'objet des campagnes de mesure de la conductivité et de la piézométrie :

- 19 points avec mesure de la piézométrie : lorsqu'il a été possible de faire descendre la sonde piézométrique sans risquer d'endommager les pompes ;
- 39 points avec mesure de la conductivité : beaucoup plus nombreux car les points équipés d'une pompe ont permis de faire des mesures de la conductivité des eaux au robinet ;
- 26 points sans autorisation d'accès : personnes absentes lors de notre enquête ou refus ;
- 7 points pour lesquels la mesure s'est avérée impossible : captage AEP ou points à sec par exemple ;
- 38 points non retrouvés.

Au niveau de ces points, la conductivité des eaux a été mesurée à l'aide d'un conductimètre de terrain.

b) Carte de conductivité de 1969

Une carte de la conductivité des eaux de la nappe alluviale a été levée en 1969 (Illustration 38).

Le couloir de forte minéralisation (930 $\mu\text{S}/\text{cm}$) entourant la Nartuby semble pouvoir s'expliquer par les pertes de la Nartuby sur ce secteur, bien que les conductivités mesurées dans le cours d'eau en 2013 soit plutôt de l'ordre de 700-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Illustrations 14 et 15).

Une zone de plus faible conductivité (450 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est présente au niveau de l'élargissement de la plaine alluviale, correspondant vraisemblablement à un secteur où la nappe alluviale est alimentée directement par des infiltrations d'eau de pluie en surface.

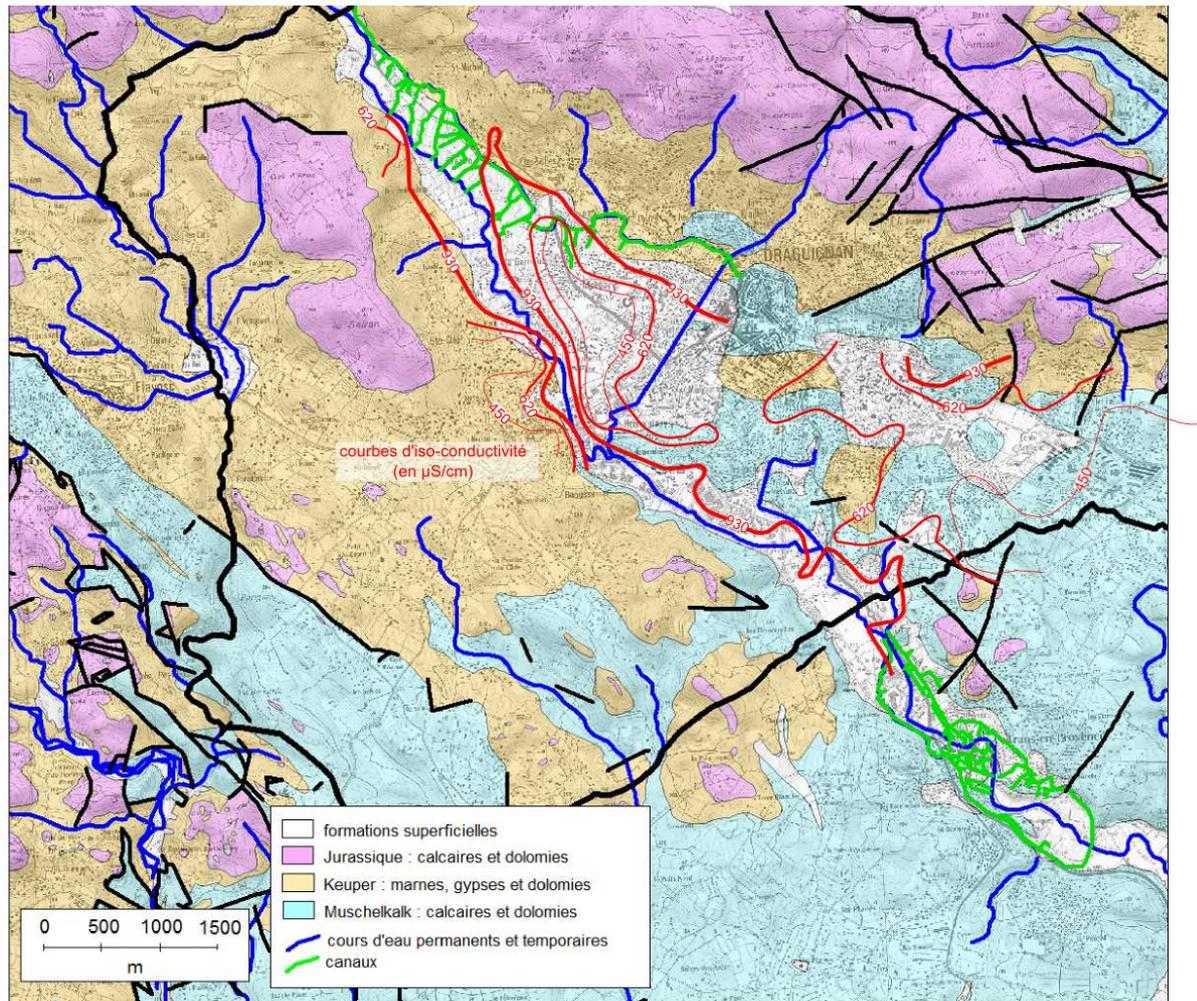


Illustration 37 : Carte de conductivité relevée en 1969, d'après Arvois et al. (1969) NB : les résistivités ont été converties en conductivité

c) Résultats des campagnes de 2013

Le sens et l'importance de la variation de conductivité entre la campagne HE et la campagne BE sont variables selon les points (Illustration 39) et il ne semble pas qu'il y ait une tendance qui se dégage en fonction du compartiment aquifère capté.

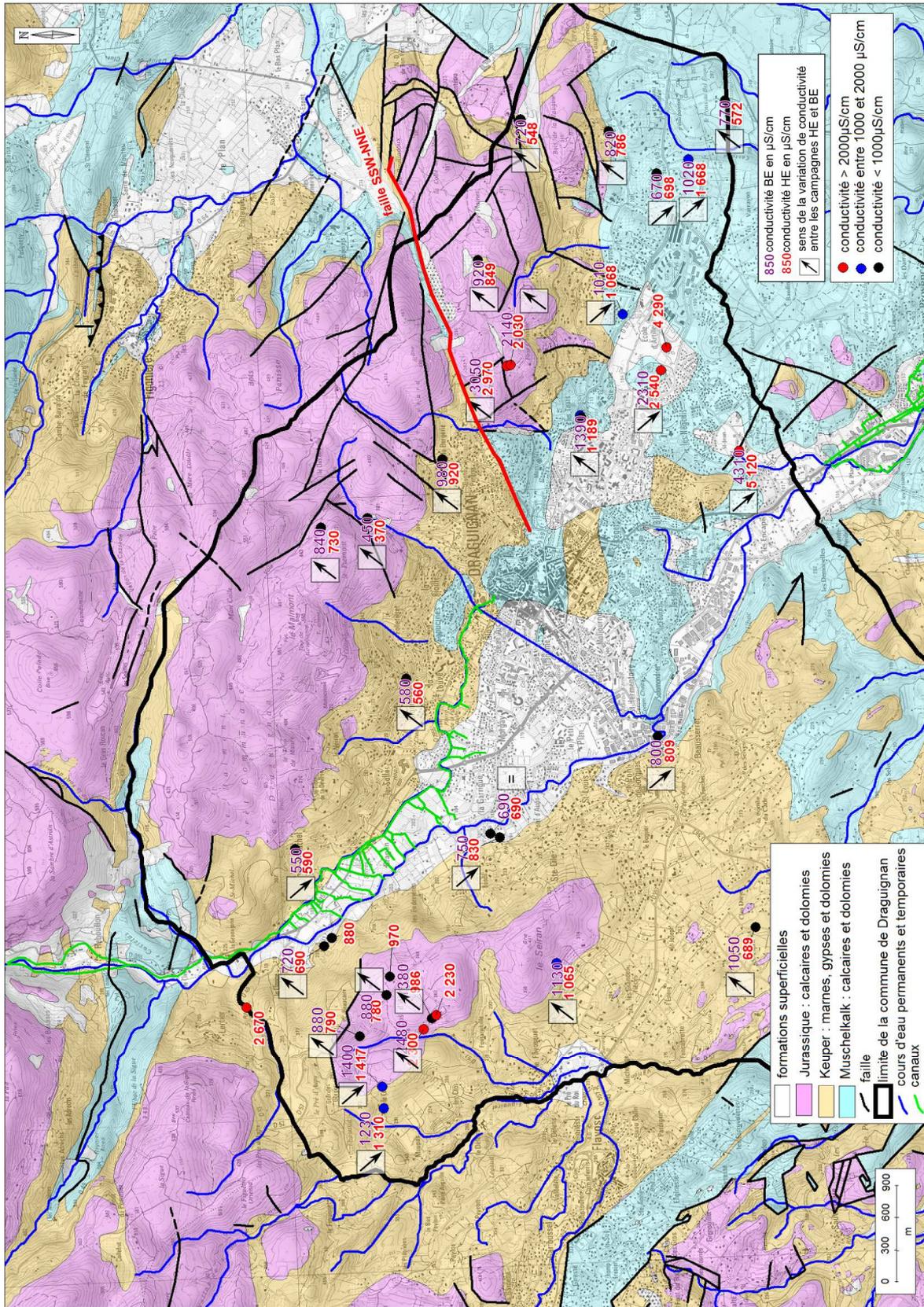


Illustration 38 : Résultats des campagnes de mesure de la conductivité HE (février 2013) et BE (juillet 2013)

Au-delà de cette comparaison entre campagnes HE et BE, de très fortes conductivités ont été observées :

- un maximum de 5 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la source de la Foux ;
- au NNE et au NE de la source de la Foux, des conductivités de l'ordre de 2 000 à 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- à l'W de la commune de Draguignan, au niveau du Clos d'Aron, des conductivités de l'ordre de 2 000 à 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les fortes conductivités observées à l'amont hydrogéologique de la source de la Foux semblent indiquer l'apparition d'une forte minéralisation au Sud de la faille orientée SSW-NNE, semblant donc jouer un rôle non négligeable pour les écoulements souterrains.

Les eaux fortement minéralisées, présentes également au NW de la commune, permettent d'envisager comme possible la connexion hydraulique NW-SE mise en évidence par traçage artificiel entre la Clappe et la Foux (étude 1929 et cf. § 2.2).

Il n'existe pas de relation claire entre la conductivité mesurée et la profondeur du forage ou l'altitude du fond de forage (Illustrations 40 et 41).

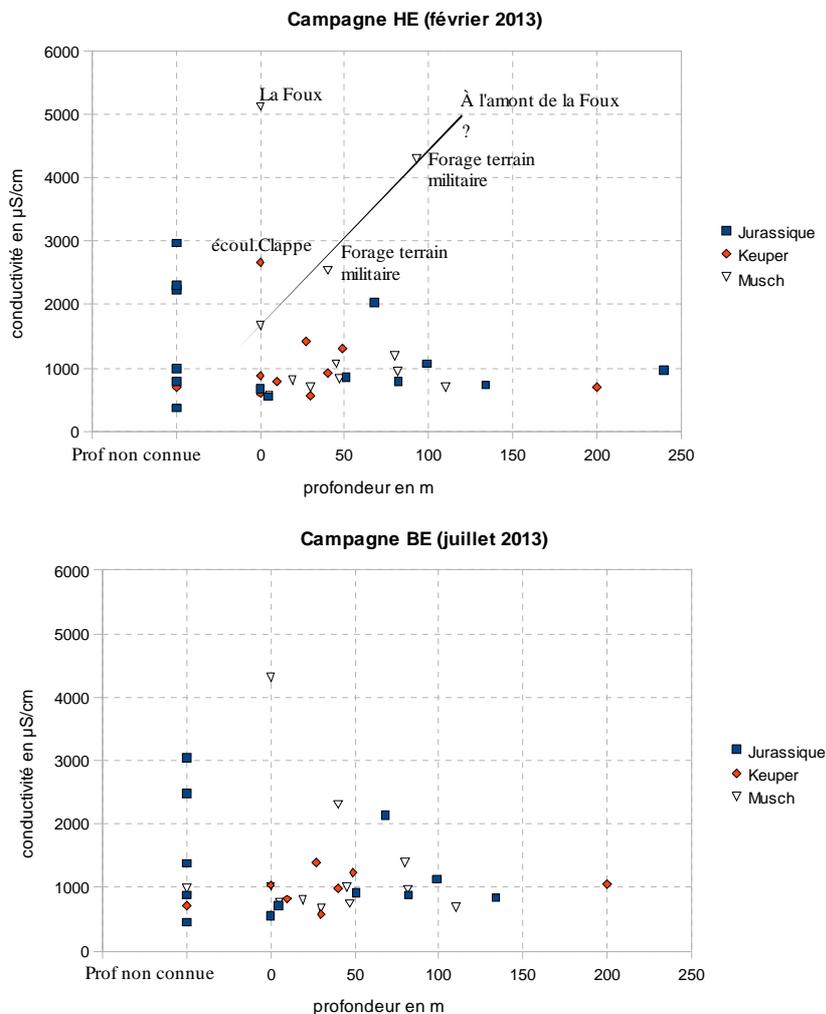


Illustration 39 : Conductivités mesurées en fonction de la profondeur des forages

- des points d'eau accessibles et situés à proximité des zones d'affaissement :

- à proximité du centre ancien : Caporal forage(10) et forage 10234X0042 (7) ;
- à proximité de la Clappe : écoulement de la Clappe (3) ainsi que le forage (6) et la source de la propriété Ragosa (5).

L'ensemble de ces points est localisé sur l'illustration 42.

N° point	localisation
1	Source des Frayères
2	Rebouillon - rivière
3	La Clappe
4	Source du Dragon
5	Ragosa - forage
6	Ragosa - source
7	10234X0042 - forage

N° point	localisation
8	Pont d'Aups – forage 1
9	Pont d'Aups – forage 2
10	Caporal - forage
11	Saint-Anne – forage 1
12	Source de la Foux
13	Source de la Bergerie
14	Rayollets – forage 1
15	Arrivée Ferrières

NB : les eaux du champ captant des Incapis n'ont pas pu être prélevées lors de nos deux campagnes.

L'ensemble de ces prélèvements ont fait l'objet d'analyses des éléments majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻)⁶.

⁶ Analyses réalisées par : CEREMA / Direction Territoriale Méditerranée / Laboratoire Régional d'Aix-en-Provence / Service Chimie

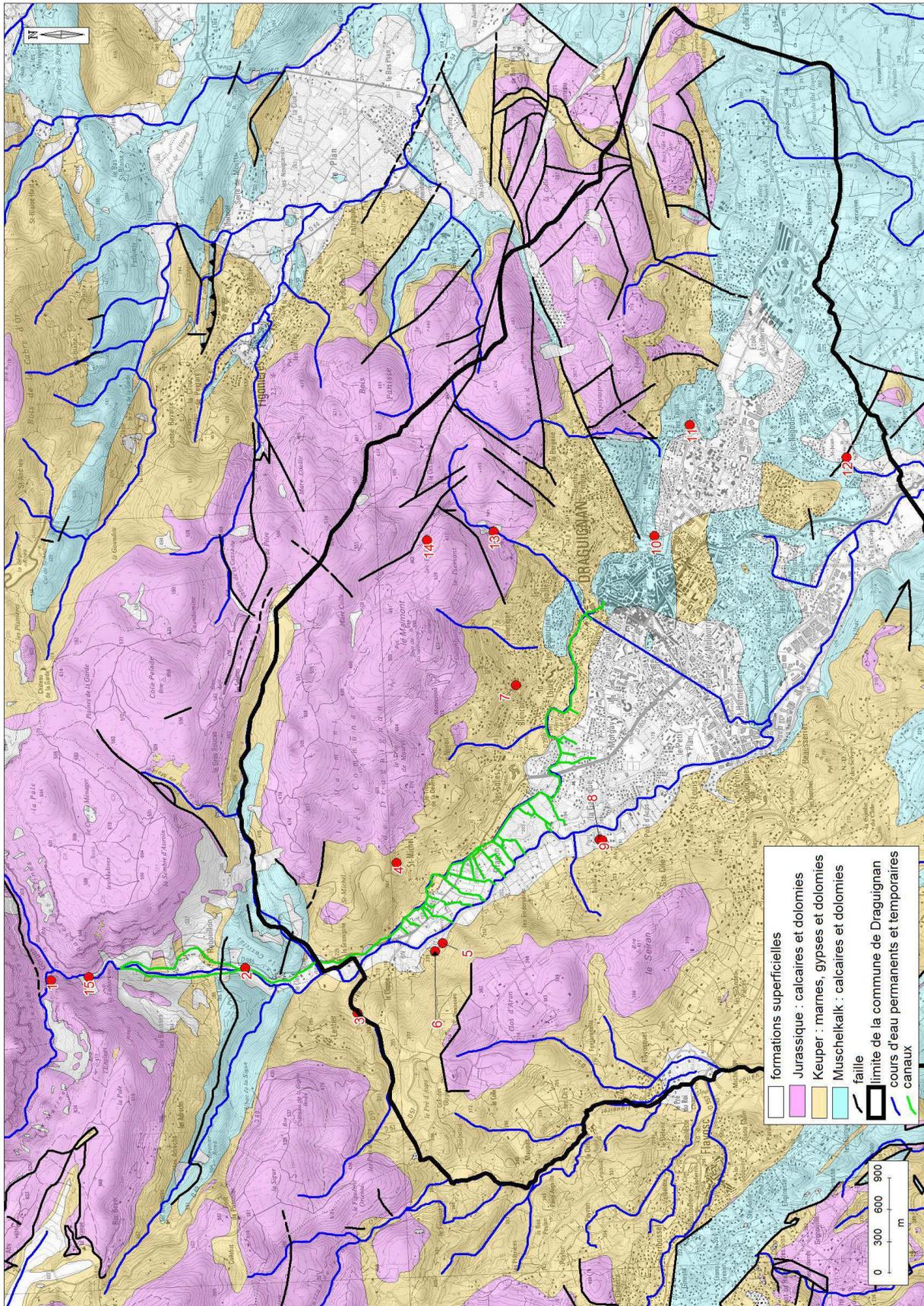


Illustration 41 : Carte de localisation des points de prélèvement

b) Interprétation

L'ensemble de l'interprétation de l'annexe 2, rejoint les conclusions du § 4.1.2 et peut être résumé ainsi (Illustration 43) :

- les points Bergerie (13) et Frayères (1) sont marqués uniquement par des échanges avec les carbonates du Jurassique ;
- la source de la Foux (12) est marquée par une forte interaction avec la halite et dans une moindre mesure avec des gypses, dolomies et carbonates ;
- l'écoulement prélevé à proximité de la Clappe (3) est marqué par des interactions avec des gypses et dolomies et dans une moindre mesure avec de la halite ;
- parmi les points AEP de la commune, les Rayollets (14) sont marqués uniquement par des interactions avec des carbonates du Jurassique tandis que Pont d'Aups (8 et 9), Dragon (4) , Sainte-Anne (11) sont également marqués par des interactions avec des gypses et dolomies du Trias ; les eaux de Sainte-Anne (11) présentant la plus grande proportion d'eau triasique : ces nouvelles observations confortent ce qui a déjà été décrit au § 4.1.2 ;
- de même, les points Ragosa (5 et 6), Caporal (10) et Nartuby à Rebouillon (2) résulte d'un mélange entre eaux jurassiques et eaux triasiques ;
- le point 10234X0042 (7) présente un excès en Na+K et en Ca par rapport aux autres points qui reste pour le moment sans explication.

Diagramme de Piper - Campagne Hautes-Eaux

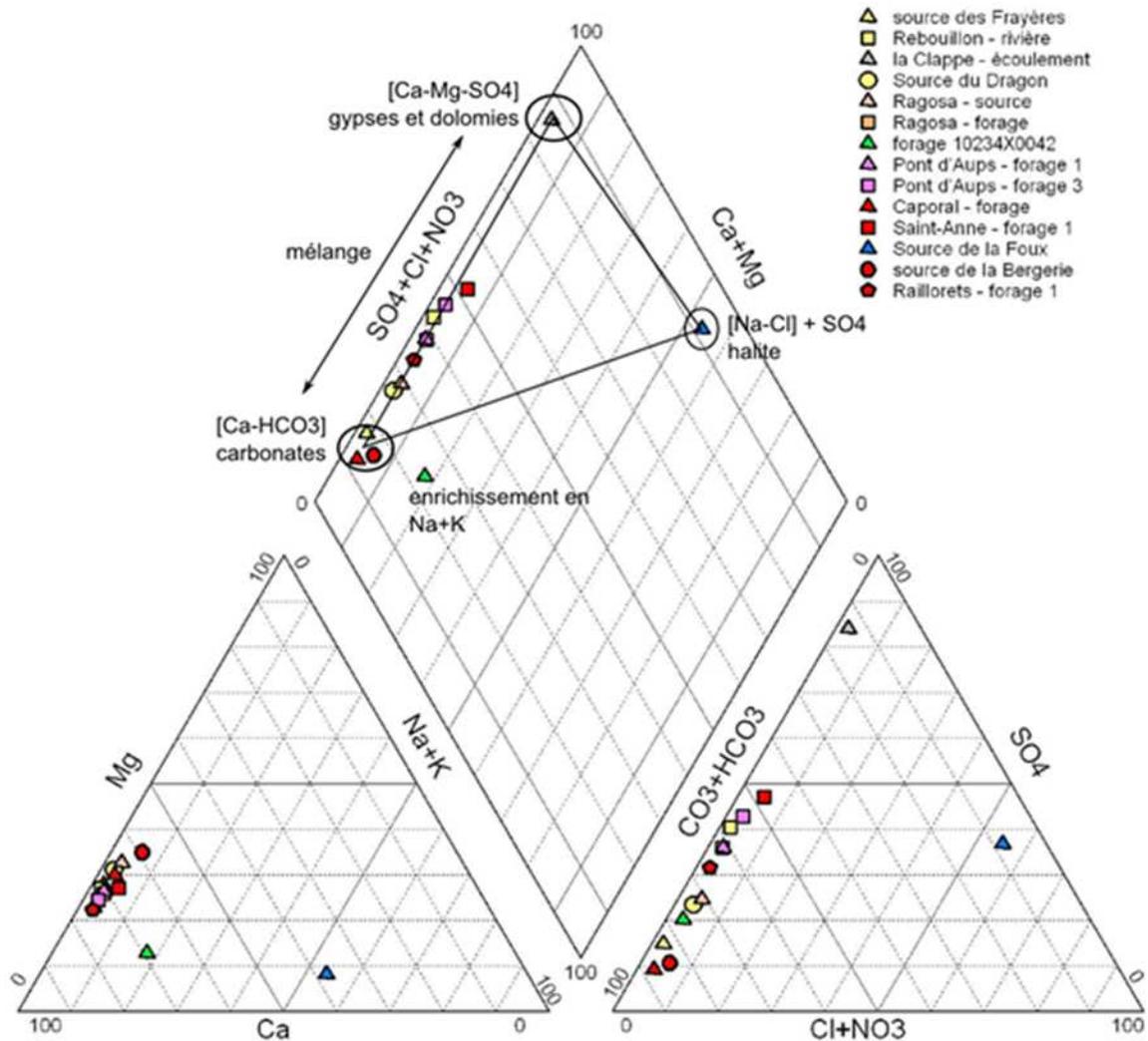


Illustration 42 : Diagramme de Piper pour la campagne HE (février 2013)

c) Taux d'ablation

Des volumes annuels dissous de halite ou d'anhydrite peuvent être calculés avec les formules suivantes :

$$\text{volume dissous}_{(\text{halite})} = ([\text{Na}^+] \times [\text{m. mol}_{(\text{NaCl})}] \times [\text{Q}_{\text{Foux}} / 1000]) / [d_{(\text{halite})} \times 10^6]$$

avec :

- volume dissous en m³
- [Na⁺] : concentration en mmol/l
- m.mol_(NaCl) : masse molaire de la halite en mg
- Q_{Foux} : débit moyen de la Foux en l/s
- d_(halite) : densité de la halite en kg/dm³

$$\text{volume dissous}_{(\text{anhydrite})} = ([\text{Ca}^{2+}] \times [\text{m. mol}_{(\text{CaSO}_4)} / 1000] \times [\text{Q}_{\text{Foux}} / 1000]) / [d_{(\text{anhydrite})} \times 10^6]$$

avec :

- volume dissous en m³
- [Ca²⁺] : concentration en mmol/l
- m.mol_(CaSO₄) : masse molaire de l'anhydrite en mg
- Q_{Foux} : débit moyen de la Foux en l/s
- d_(anhydrite) : densité de l'anhydrite en kg/dm³

A partir des données de la synthèse bibliographique, le bassin versant hydrogéologique potentiel de la source de la Foux a été tracé de manière très sommaire en Illustration 45 : il intègre la zone de la Clappe et les écoulements depuis la partie NE identifiés en Illustration 8. La surface de ce bassin versant hydrogéologique serait d'un ordre de grandeur de 30km² soit 3000 hectares.

Le tableau de l'illustration 44 donne les résultats ainsi obtenus pour la source de la Foux :

Q Foux en l/s	900
Surface BV en ha	3000

HE

espèce minérale	concentration en mmol/l	masse molaire en mg	densité en kg/m ³	volume dissous en m ³ /s	volume dissous en m ³ /an	taux d'ablation en m/an	taux d'ablation en mm/an	taux d'ablation en mm/1000 ans
halite	30	58,45	2,16	0,00073063	23040,99	0,0007680	0,7680	768,03
anhydrite	10	134	2,96	0,00040743	12848,79	0,0004283	0,4283	428,29

BE

espèce minérale	concentration en mmol/l	masse molaire en mg	densité en kg/m ³	volume dissous en m ³ /s	volume dissous en m ³ /an	taux d'ablation en m/an	taux d'ablation en mm/an	taux d'ablation en mm/1000 ans
halite	22	58,45	2,16	0,00053579	16896,73	0,0005632	0,5632	563,22
anhydrite	8,75	134	2,96	0,00035650	11242,69	0,0003748	0,3748	374,76

Illustration 43 : Calcul des volumes dissous et des taux d'ablation de la halite et de l'anhydrite pour la source de la Foux

Ainsi, on obtient des taux d'ablation de l'ordre de 500 à 800 mm/1000 ans pour la halite et de 400 mm/1000 ans pour l'anhydrite.

A titre de comparaison, les taux d'ablation classiquement observés pour les calcaires sont de l'ordre de 25 à 50 mm/1000 ans.

Sachant que la surface du bassin versant hydrogéologique de la source de la Foux a été déterminée de façon peu précise, ces taux d'ablation restent à prendre en considération avec circonspection et restent des ordres de grandeur. Les volumes dissous, quant à eux, sont bien réels puisque reposant sur des données connues (débit de la source et composition chimique).

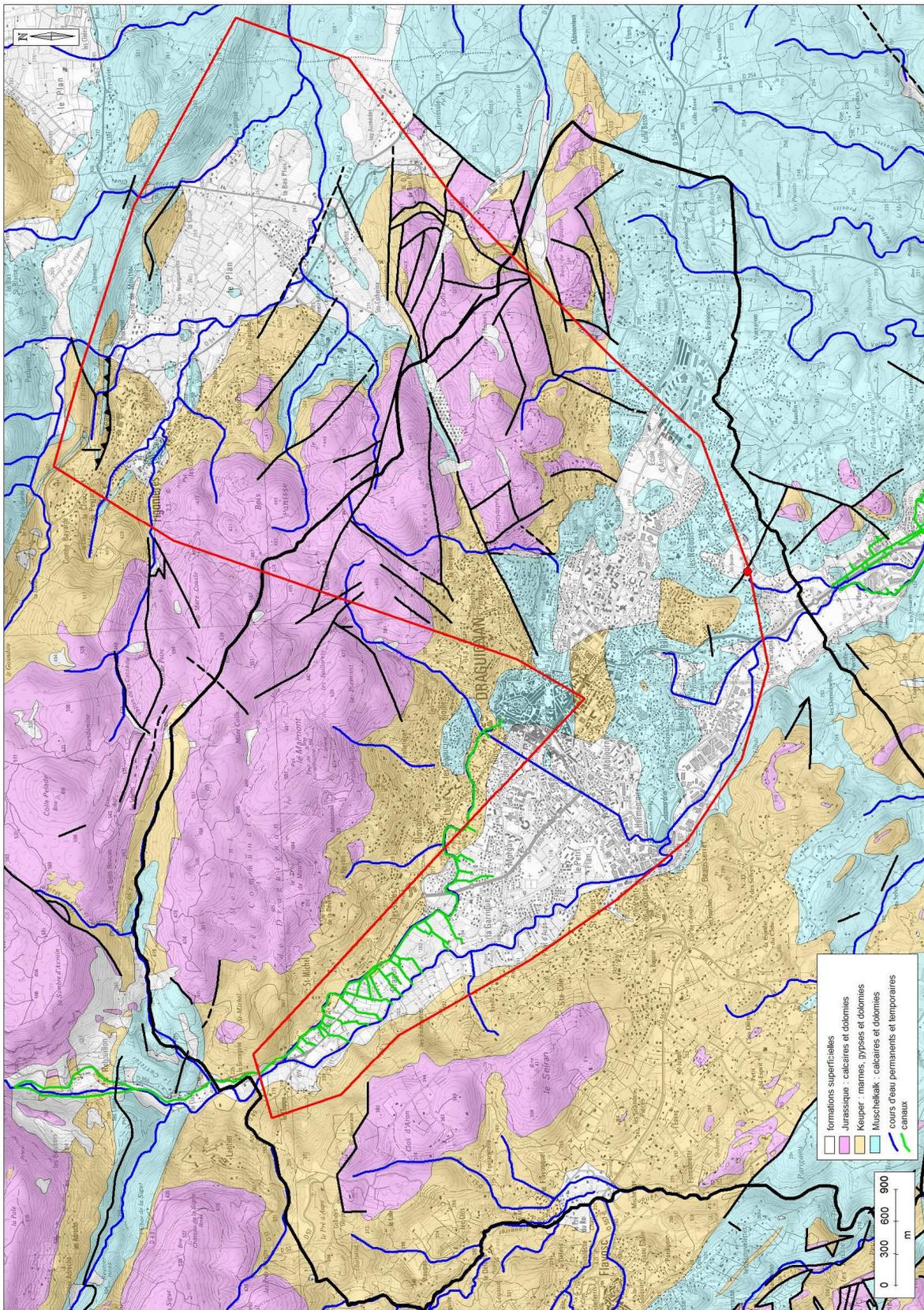


Illustration 44 : Définition approximative du bassin versant hydrogéologique de la source de la Foux

4.3. SYNTHÈSE (BRGM + CEREMA)

4.3.1. Bilan

A partir de l'analyse des données physico-chimiques existant sur le secteur et nouvellement acquises au cours des campagnes 2013, il apparaît que plusieurs points d'eau sont fortement minéralisés et donc vraisemblablement marqués par une influence évaporitique (§ 4.2.1). Plus les eaux sont minéralisées, plus elles sont proches de la saturation vis-à-vis des différentes espèces minérales et moins leur « pouvoir » de dissolution sera important. Ainsi, à partir de la carte de répartition de la conductivité des eaux (Illustration 39), il semblerait que dans le secteur SE de la commune, les eaux souterraines aient un potentiel de dissolution moins important.

Parmi les points d'eau ayant fait l'objet d'analyses physico-chimiques, 3 pôles ont été identifiés :

- pôle 1 : « carbonates du Jurassique » (Rebouillon, Bergerie, Frayères, Ampus, Rayollets, Figanières) ;
- pôle 2 : « **halite**, gypses, dolomies et carbonates » (la Foux) ;
- pôle 3 : « **gypses, dolomies** et halite » (la Clappe).

Les autres points d'eau (le Muy, Ampus, Trans, Pont d'Aups, Dragon, Sainte-Anne ou Sainte-Barbe, Ragosa et Caporal) résultent d'un mélange en proportion variable entre ces 3 pôles.

A l'échelle de la région de Draguignan, la proportion d'eau évaporitique devient de plus en plus importante de l'amont vers l'aval.

A l'échelle locale, le captage AEP de Sainte-Anne (ou Sainte-Barbe) est celui qui est le plus marqué par les eaux traversant les évaporites.

A partir des analyses physico-chimiques des eaux de la Foux, l'ordre de grandeur des taux d'ablation dus aux écoulements rejoignant ce point serait de 500 à 800 mm/1000 ans pour la halite et de 400 mm/1000 ans pour l'anhydrite.

4.3.2. Perspectives

Une étude approfondie de l'origine des sulfates dans les eaux souterraines permettrait de valider définitivement l'hypothèse de la dissolution du gypse et d'écarter l'hypothèse d'une éventuelle influence du biseau salé sur le secteur étudié. L'objectif est donc d'étudier à la fois la composition des roches et des eaux souterraines locales, se fondant sur des analyses chimiques et isotopiques.

En ce qui concerne les compositions chimiques, les analyses suivantes sont préconisées :

- l'analyse des éléments majeurs sur des échantillons de roche (gypse des anciennes carrières / dolomies du Muschelkalk et calcaires du Jurassique carottés sur le site de la Clappe en 1999) permettra de remplacer les pôles théoriques de Meybeck avec des données locales ;
- la réalisation d'analyses physico-chimiques sur différents points d'eau du secteur, à un pas de temps journalier lors d'un épisode pluvieux, permettrait de visualiser la réponse physico-chimique du système hydrogéologique à une sollicitation pluviométrique et de valider les hypothèses émises en annexe 1 (§ piézométrie) ;
- ceci pourrait également être complété par des analyses des éléments mineurs ou traces sur les échantillons d'eau et de roche : par exemple le Br, le Ce et le Rb dont

les concentrations sont les témoins du stade d'évaporation des eaux, ayant mené à la formation des roches évaporitiques → ces analyses permettraient donc de valider l'origine triasique de la composition des eaux.

En ce qui concerne les compositions isotopiques, les analyses suivantes permettraient également de compléter cette compréhension :

- l'analyse de la composition isotopique de la molécule d'eau [$\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$, δD (ou $\delta^2\text{H}$ ou deutérium) et ^3H (ou tritium)] permettrait d'identifier des phénomènes d'évaporation, de définir une altitude d'infiltration des eaux et de déterminer un ordre de grandeur de temps de séjour des eaux ;
- l'analyse de la composition isotopique des sulfates [$\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)$, $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4)$] permettrait de confirmer l'origine triasique des sulfates et d'écartier totalement l'hypothèse d'une éventuelle influence du biseau salé sur le secteur étudié ;
- l'analyse de la composition isotopique du Strontium (Sr) permettrait d'avoir une signature fine des processus de dissolution des carbonates et évaporites.

5. Conclusions et perspectives

5.1. BILAN GENERAL (BRGM + CEREMA)

La synthèse bibliographique et les nouvelles investigations menées sur le secteur, notamment en hydrochimie, ont permis une certaine avancée concernant la compréhension des phénomènes de dissolution du gypse par les écoulements souterrains sur la commune de Draguignan. Les paragraphes suivants dressent un bilan de chaque thématique explorée dans ce rapport : fonctionnement hydrogéologique général, les phénomènes de surface et l'hydrochimie.

5.1.1. Fonctionnement hydrogéologique

Trois entités hydrogéologiques sont identifiées sur la commune de Draguignan :

- Formations marno-calcaires et argileuses du Trias au Crétacé : représenté par les formations argilo-gypseuses du Keuper ;
- Calcaires et dolomies du Muschelkalk de la région de Draguignan (principal aquifère exploité par la commune de Draguignan pour l'AEP) dont le principal exutoire est la source de la Foux;
- Massifs carbonatés jurassiques du Plan de Canjuers et ses unités de bordure.

Les écoulements souterrains se font principalement en directions des sources émergentes au contact formations jurassiques perméables et la formation du Keuper très peu perméable, et convergent également vers la source de la Foux.

D'après les résultats des mesures de débit, il n'y aurait donc pas d'alimentation massive des gypses par une perte localisée de la Nartuby mais plutôt une alimentation diffuse par l'infiltration en surface et certainement des infiltrations diffuses de la nappe alluviale vers les gypses via des zones de fractures. Ce fonctionnement impliquant le développement de conduits karstiques de dimensions plus réduites et par conséquent, de façon relative, des mouvements en surface d'importance moindre, pouvant tout de même se manifester en surface par des effondrements comme celui de la Clappe (cf. § 3.2.1).

Le traçage artificiel réalisé en 1929 (cf. § 2.2) a montré que la fluorescéine, injectée dans la Nartuby au niveau de la Clappe, est ressortie au niveau de la source de la Foux au bout de 3 jours. Le schéma de l'illustration 23 propose une représentation du transfert supposé de cette fluorescéine, en accord avec les hypothèses de fonctionnement émises ci-dessus.

5.1.2. Les phénomènes d'effondrements

Dans le secteur nord de la Nartuby, près de la limite communale, les zones de dissolution et d'effondrements s'intègrent dans un fuseau de direction nord nord-ouest sud sud-est, vraisemblablement en lien avec la direction des écoulements souterrains. L'ampleur de certaines manifestations, en particulier celle de La Clappe, ne s'accordant cependant pas totalement avec des infiltrations diffuses depuis la nappe alluviale vers le Keuper, il paraît à peu près certain que cette ampleur est en relation avec la présence d'accidents - type faille – favorisant les écoulements souterrains préférentiels et plus nocifs que les écoulements diffus.

5.1.3. Hydrochimie

A partir de l'analyse des données physico-chimiques existant sur le secteur et nouvellement acquises au cours des campagnes 2013, il apparaît que plusieurs points d'eau sont fortement minéralisés et donc vraisemblablement marqués par une influence évaporitique (§ 4.2.1). Plus les eaux sont minéralisées, plus elles sont proches de la saturation vis-à-vis des différentes espèces minérales, et moins leur « pouvoir » de dissolution sera important. Ainsi, à partir de la carte de répartition de la conductivité des eaux (Illustration 39), il semblerait que dans le secteur SE de la commune, les eaux souterraines aient un potentiel de dissolution moins important.

La confrontation entre les valeurs de conductivité des eaux et les indices de mouvement en surface (Illustration 46) semble effectivement montrer que les mouvements de surface sont moins nombreux dans ce secteur.

Parmi les points d'eau ayant fait l'objet d'analyses physico-chimiques, 3 pôles ont été identifiés (Illustration 47) :

- pôle 1 : « carbonates du Jurassique » (Rebouillon, Bergerie, Frayères, Ampus, Raillourets, Figanières) ;
- pôle 2 : « **halite**, gypses, dolomies et carbonates » (la Foux) ;
- pôle 3 : « **gypses, dolomies** et halite » (la Clappe).

Les autres points d'eau (le Muy, Ampus, Trans, Pont d'Aups, Dragon, Sainte-Anne ou Sainte Barbe, Ragosa et Caporal) résultent d'un mélange en proportion variable entre ces 3 pôles.

A l'échelle de la région de Draguignan, la proportion d'eau évaporitique devient de plus en plus importante de l'amont vers l'aval.

A l'échelle locale, le captage AEP de Sainte-Anne (ou Sainte-Barbe) est celui qui est le plus marqué par les eaux évaporitiques (Illustration 47).

A partir des analyses physico-chimiques des eaux de la Foux, l'ordre de grandeur des taux d'ablation dus aux écoulements rejoignant ce point serait de 500 à 800 mm/1000 ans pour la halite et de 400 mm/1000 ans pour l'anhydrite.

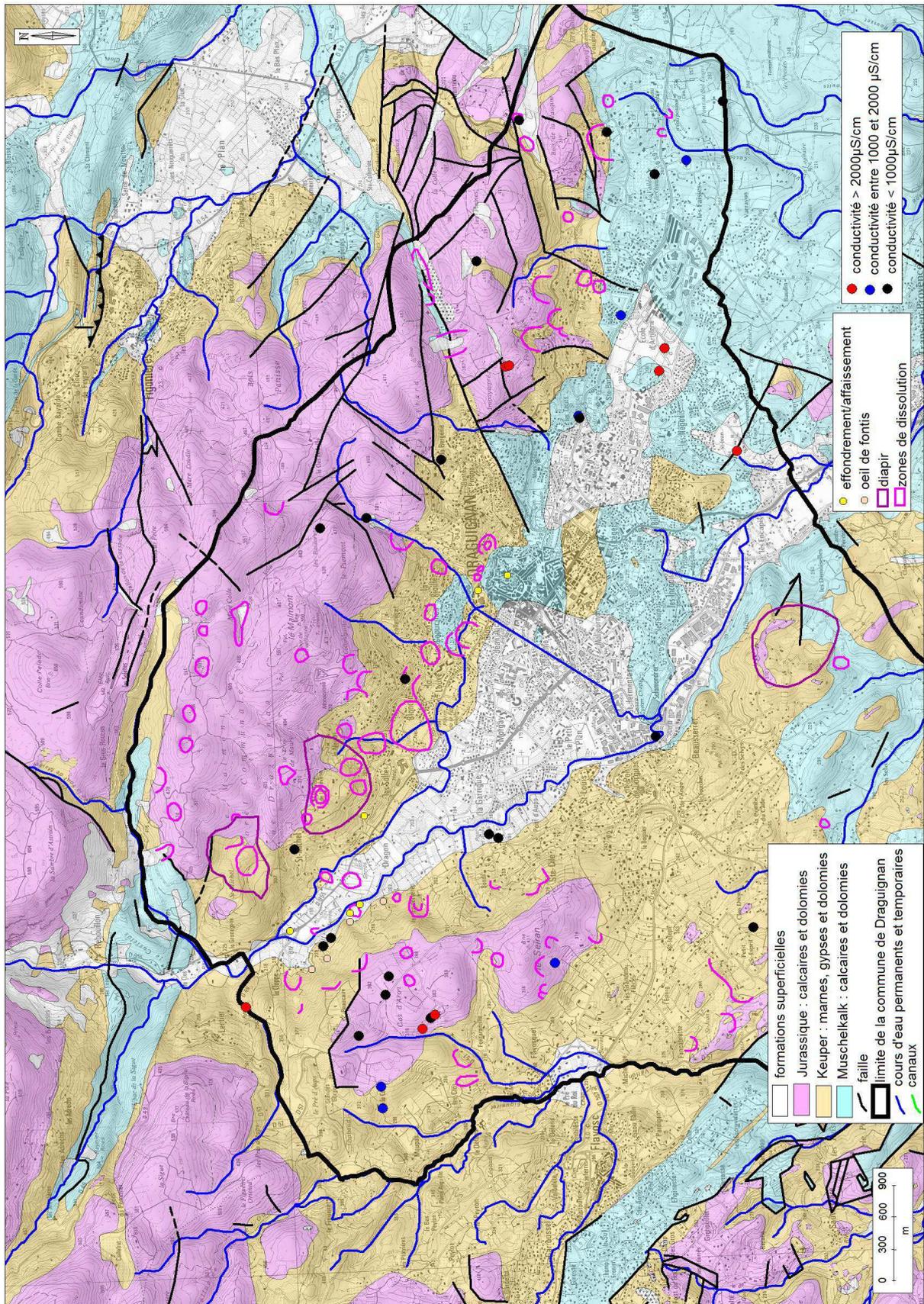


Illustration 45 : Confrontation entre les valeurs de conductivité mesurées et les indices de mouvement en surface

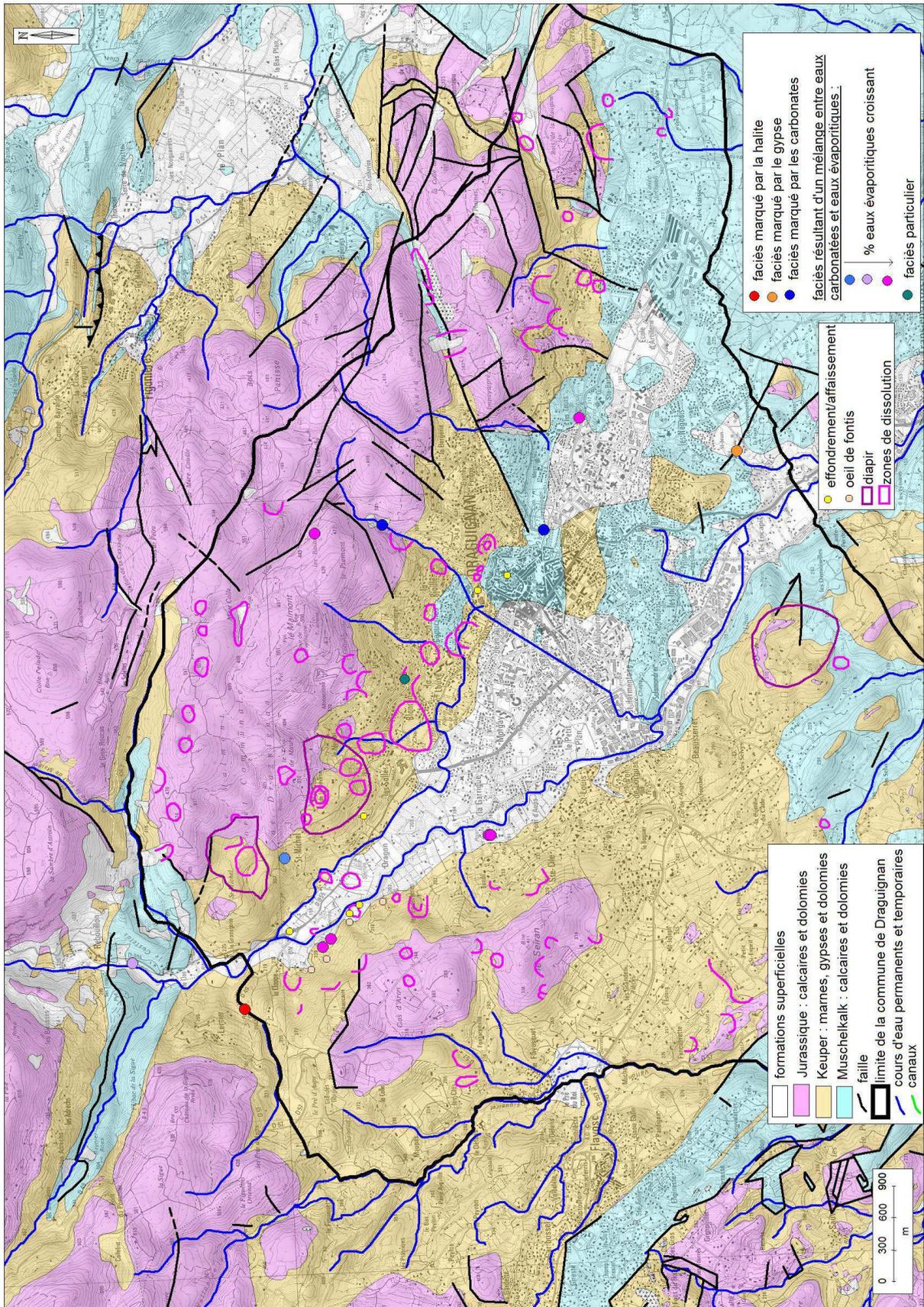


Illustration 46 : Confrontation entre les faciès chimiques des eaux prélevées et les indices de mouvement en surface

5.2. PERSPECTIVES GENERALES (BRGM +CEREMA)

Plusieurs points restent encore en suspens et nécessitent des investigations complémentaires :

- il s'avère nécessaire de replacer le tracé précis de l'ancienne galerie acheminant les eaux souterraines de la source des Rayollets vers le centre-ville afin d'évaluer les éventuelles influences de ce drain artificiel sur les écoulements souterrains et les mouvements en surface ;
- une étude plus fine de la tectonique locale permettrait de valider les hypothèses sur les écoulements préférentiels ;
- la réalisation d'un traçage artificiel quantitatif, avec une injection au niveau de l'effondrement de la Clappe, ceci permettrait :
 - d'identifier le(s) lien(s) hydraulique(s) entre ce point et d'autres points de sortie dont la source de la Foux (et d'autres points de suivi à définir) ;
 - d'acquérir des informations sur l'hydrodynamisme de l'écoulement entre ce point d'injection et les points de sortie suivis (vitesse de transfert, taux de restitution, ...)
- l'analyse de la composition chimique (incluant également les éléments mineurs et traces) et isotopique, des eaux souterraines mais aussi des roches présentes sur le secteur, permettrait de valider définitivement l'hypothèse de la dissolution du gypse, d'écartier totalement l'hypothèse d'une éventuelle influence du biseau salé, de préciser les conditions de dissolution des carbonates et évaporites ainsi que les conditions de mélange entre les différents types d'eau.

Avant de pouvoir aller plus loin dans une évaluation de l'aléa effondrement, il est réellement nécessaire de lever les incertitudes encore présentes sur les échanges eau-roche

L'objectif final à atteindre est d'avoir suffisamment de connaissances sur l'écoulement des eaux souterraines, sur les mouvements de terrain se formant en surface et sur les échanges eau-roche afin de pouvoir définir une méthodologie permettant d'évaluer l'aléa effondrement/affaissement sur la commune de Draguignan. Des pistes peuvent être trouvées dans certaines références faisant part de telles évaluations, menées dans le cadre de l'aménagement et de la protection d'un site naturel affecté par de nombreux fontis et destiné à accueillir du public (Lecomte et al. 2012).

A delà, compte tenu du contexte varois, il pourrait également être utile de valider les hypothèses en matière de dissolution diffuse/ablation par un suivi interférométrique (interférométrie différentielle satellitaire), tel que celui initié en 2011 suite aux inondations de 2010

6. Bibliographie

Arcadis (2003). Ville de Draguignan – Foyer Ramadier – Affaissement sur jeu de boules – Rapport d'expertise. 11 p.

Etude du Nord-Est Varois – la Nartuby (1974). archives DREAL PACA, service Biodiversité, Eau et Paysages, Unité Eau et Milieux Aquatiques, Pôle Données de l'Eau.

Arvois R., Cova R., Durozoy G., Gouvernet C., Olivo C. (1969). Etude hydrogéologique du Nord-Est varois, 1969. Rapport BRGM/69-SGN-295-PRC, 78 p. 14 pht., 1 carte.

Communes de Trans, Roquebrune, Le Puget, Fréjus, Saint-Raphaël « Dérivation d'une partie des eaux d'une nappe souterraine alimentant la source des Incapis à Draguignan » (1929). Mémoire de l'ingénieur des TPE.

Cova R. (1998). Commune de Draguignan, quartier « La Clappe », Effondrement de terrain. Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, service de l'Aménagement Rural et de l'Environnement, cellule géologique.

Cova R. et Durozoy G. (1983). Carte hydrogéologique département du Var, Echelle 1/200 000e. DDA et BRGM.

Durozoy G., Gouvernet Cl., Jonquet P. et Theillier P. (1969). Inventaire des ressources hydrauliques dans la Basse Vallée de l'Argens (Var). Données géologique et hydrogéologiques. 54p.

Frappin P. (1998). Commune de Draguignan, lieu-dit « La Clappe » - Prospection géophysique. Européenne de Géophysique 14 p.

ERG Géotechnique (2007). Mairie de Draguignan – Affaissement Jardin des plantes – Draguignan (83) – Diagnostic géotechnique. 12 p., 2 annexes.

Etienne M. (1987) – Les sources de la Siagnole de Mons : Contribution à l'étude des sources et du bassin d'alimentation – Etude et carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Thèse de l'Université du Languedoc.

Gignoux M. (1913). Rapport sur les conditions géologiques des sources des Rayollets que la ville de Draguignan se propose de capter pour l'alimentation publique. Université de Grenoble, faculté des sciences, Laboratoire de Géologie et de minéralogie et service de la carte géologique de France. 7p.

Gouvernet (1957). Recherche de ressources nouvelles en vue d'une amélioration de l'alimentation en eau de la ville de Draguignan. Faculté des sciences de Marseille. 23 p.

Gouvernet (1959). Etude géologique relative aux affaissements de terrains qui menacent la stabilité de l'église paroissiale. 30 p.

Inconnu (1974). Etude du Nord-Est Varois – la Nartuby. archives DREAL PACA, service Biodiversité, Eau et Paysages, Unité Eau et Milieux Aquatiques, Pôle Données de l'Eau.

Kloppmann, W. (2010). Synthèse des travaux scientifiques portant sur la salure de l'aquifère rhénan (méthodes géochimiques et isotopiques), in: BRGM/RP-59171 (Ed.).

Lecomte A., Charmoille A., Daupley X. et Gombert Ph. (2012). Méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain résultant de la dissolution naturelle de gypse. Exemple du Bois de la Tussion, Seine-Saint-Denis, France. Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur 2012, p731-738.

Marçot, N., De Michèle, M., Rivet, F. (2011). Mise en évidence d'indices d'effondrements potentiels sur la zone de Draguignan (Var) suite aux intempéries du 15 juin 2010, par analyse interférométrie radar. Rapport final BRGM/RP-59323-FR, 69 p.

Meybeck, M. (1986). Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Sci. Géol. Bull. 39, 3-77.

Ministère de l'environnement (1998). Charte de qualité de l'hydrométrie – code de bonnes pratiques.

Moulin M., avec la collaboration de Salquèbre 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. 1967 Recherches morphologiques en Basse-Provence calcaire thèse

Potherat P. (1996). Etude photo-interprétative appliquée à la détection de zones à effondrements potentiels, Le Trias Provençal de Fayence à Draguignan (Var) - CETE Méditerranée et LCPC. 8 p.

Riou Consultant (2006). Synthèse hydrogéologique des ressources en eau sout de Draguignan.

Rivet F., Girard A. avec la collaboration de Mathon C. (2012). Amélioration de la connaissance sur les risques d'effondrement/glissement liés à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport final BRGM/RP-60896-FR - 100 pages, 43 Ill., 3 ann. Simecsol (1985). Ville de Draguignan – Foyer Ramadier – Avis sur l'origine des désordres observés. 3 p, 7 ill.

Simecsol (1988). Ville de Draguignan – Etude générale géologique, hydrogéologique et de génie civil – Campagne test de gravimétrie – Contrôle par forages destructifs – Rapport de conclusions. 19 p.

Simecsol (1994). Ville de Draguignan – Foyer Ramadier à Draguignan (83) – Compte-rendu de la visite effectuée le 15/6/94. 4 p.

Simecsol (1995). Ville de Draguignan – Foyer Ramadier à Draguignan – Reconnaissance géotechnique. 40 p., 2 annexes.

Simecsol (1996). Ville de Draguignan – Centre ancien – Etude et reconnaissance des sols – cahier des sondages. 44 p.

Simecsol (1997). Ville de Draguignan – Foyer Ramadier – Travaux d'injection – Rapport de fin de travaux. 6p.

Société d'études géotechniques et géophysiques (1996). Ville de Draguignan – Reconnaissance gravimétrique – Rapport d'étude. 24 p.

Sol Provençal (1999). Affaissement du trou de La Clappe – Sondages de reconnaissance. 6 p.

Temsol (1997). Foyer Ramadier – Draguignan (83) – Dossier de récolement – Travaux de forage et injection. 11 p.

Uguet (1958). Ville de Draguignan – Travaux de reconnaissance de l'église – étude hydrogéologique préliminaire. 9 p.

Ville de Draguignan (1959). Historique sur l'évolution des mouvements divers de l'Eglise paroissiale de 1861 à 1959. 90 p.

Annexe 1

Analyse détaillée des données géochimiques existantes sur la région de Draguignan (données ADES et mairie)

Corrélations entre éléments

Les corrélations entre éléments sont étudiées afin de montrer des mélanges de types d'eau ou des processus majeurs tels que la dissolution de phases minérales. Les diagrammes montrent un mélange entre des eaux peu minéralisées de faciès calcaire, de type Ampus ou eau de surface à Rebouillon, avec un pôle d'eau de la Foux, arrivant à saturation avec le gypse. Ce mélange sera illustré par une droite dans les diagrammes binaires (Figure 1).

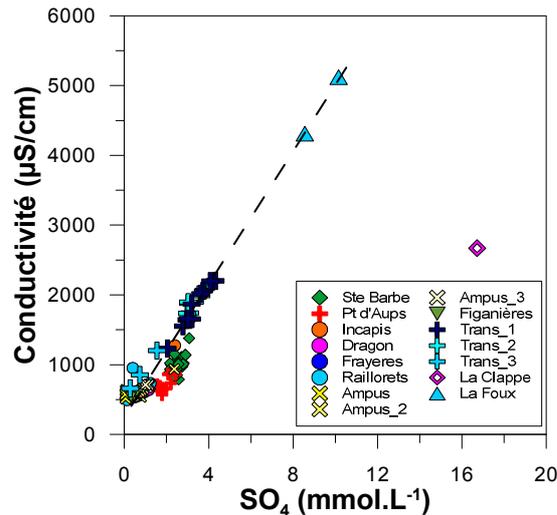


Figure 1 : Conductivité en fonction de la teneur en sulfates dans les eaux de la région de Draguignan, incluant les données des campagnes 2013 du CEREMA.

Le diagramme illustrant l'évolution de la conductivité en fonction de la teneur en sulfates dans les eaux souterraines montre que la conductivité est essentiellement contrôlée par les sulfates, entre les deux pôles précédemment définis, les eaux de type calcaire d'Ampus et les eaux de la source de la Foux (Figure 1). Les eaux les moins concentrées, avec une conductivité relativement faible, sont celles des calcaires jurassiques. Les eaux de la Clappe ne s'inscrivent pas dans ce système, montrant une conductivité relativement faible pour une telle teneur en sulfates.

Dans le diagramme Na en fonction de Cl, les teneurs en sodium et chlorures sont relativement faibles et très bien corrélées (Figure 2). L'ensemble des points s'aligne sur la courbe de mélange entre l'échantillon des eaux de surface à Rebouillon et l'eau de mer, passant par les eaux de la Foux, ainsi que sur la droite de dissolution de la halite. Les concentrations en sodium et chlorures des eaux de la Foux sont équivalentes à celles d'un mélange avec 4 à 6 % d'eau de mer. Draguignan étant situé à environ 30 km du front de mer, les aérosols marins peuvent contribuer de façon faible aux teneurs en chlorures et sodium mesurées dans les eaux souterraines. Dans notre site d'étude, chlorures et sodium proviennent très probablement de la dissolution des évaporites contenant de la halite présentes dans les terrains secondaires tels que le Muschelkalk et le Keuper, comme cela a été étudié dans le bassin rhénan.

Dans le diagramme calcium versus chlorures, deux droites de mélanges ont été tracées entre les eaux de la Foux et des eaux de type calcaire Ampus ou Rebouillon. Ces droites expliquent parfaitement les teneurs mesurées dans les eaux souterraines. Typiquement, les eaux du Muy semblent résulter d'un mélange entre eaux de type bicarbonaté calcique et eaux de type la Foux.

Dans le diagramme sulfates vs chlorures, la composition des eaux souterraines évolue entre ces mêmes pôles de mélange. Les eaux de la Clappe présentent le maximum de sulfates (33 meq/L), à peu près le double de ce qui est mesuré dans les eaux de la Foux. Les eaux de la Clappe (amont) ne semblent pas participer au mélange. Leur composition chimique est dominée par les sulfates (16,7 mmol/L) et calcium (14,6 mmol/L), proche d'un rapport de proportion 1/1, typique de la dissolution du gypse comme indiqué sur la figure 2.

Les eaux du Muy sont généralement moins concentrées en chlorures, sulfates, calcium et magnésium que les eaux souterraines de Trans. Elles pourraient intégrer deux pôles calcaires à composition légèrement différente. Les eaux du Muy sont typiquement un mélange avec les eaux les moins minéralisées de type Ampus ou Figanières et de la Foux, tandis que celles de Trans proviendrait d'un mélange avec un type d'eau correspondant aux chimies les plus minéralisées de type Ampus. Les eaux de Sainte-Barbe montrent, pour le calcium, le magnésium et les sulfates, une variation de composition, témoignant probablement de contributions variables des pôles de mélange.

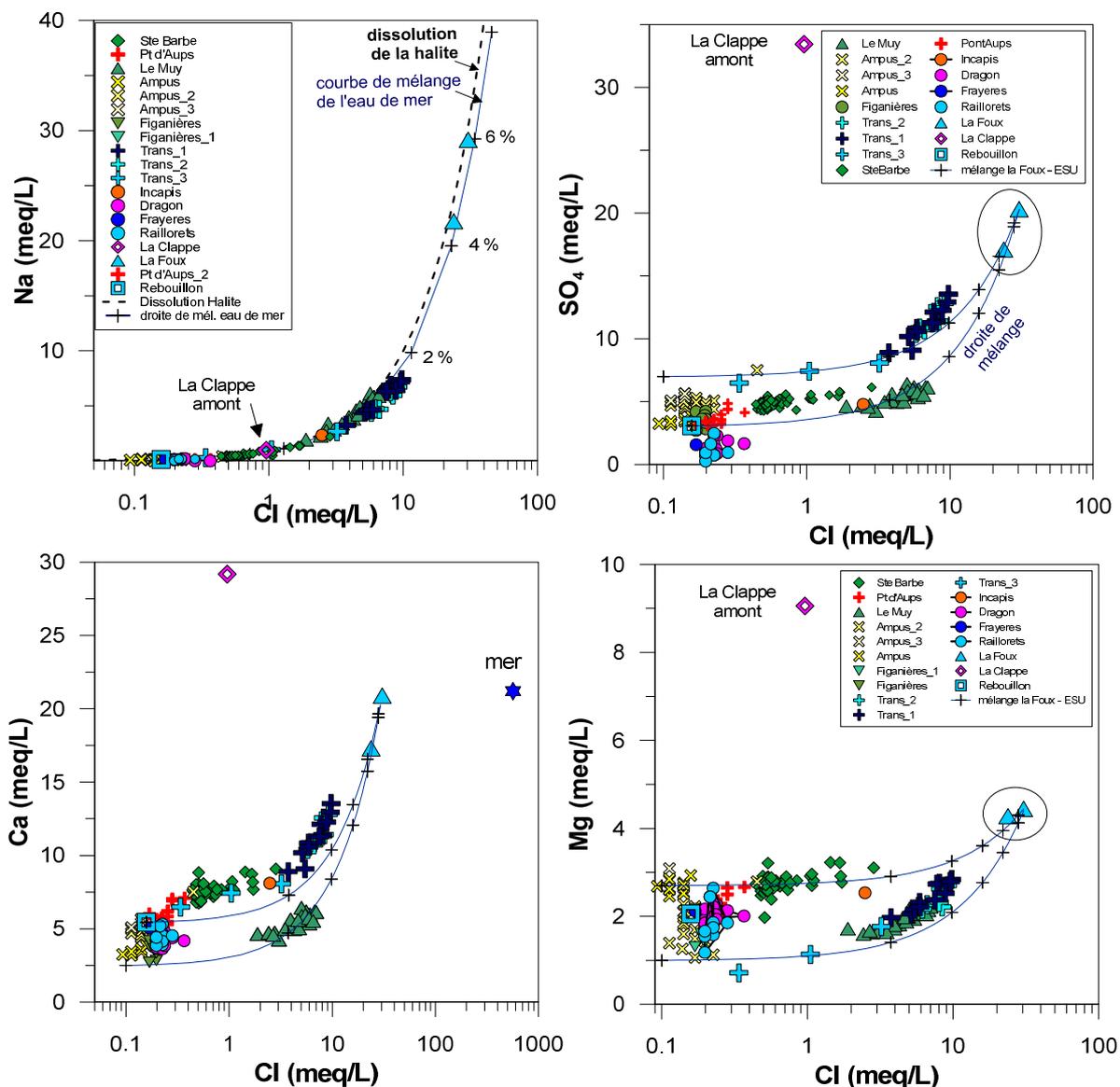


Figure 2 : Evolution des teneurs en Na, Ca, SO4 et Mg en fonction de Cl, incluant les données des campagnes 2013 du CEREMA d'Aix. Dans la légende, ESU est donné pour eau de surface. La courbe

théorique de mélange avec l'eau de mer est calculée entre un pôle très peu concentré en chlorures et l'eau de mer. La variabilité des teneurs en calcium, magnésium et sulfates des pôles calcaires nous permet ici de définir deux pôles théoriques de mélange. Les courbes de mélanges passent en général par les points analysés. Dans le diagramme Ca vs Cl, un excès de calcium est noté dans les échantillons par rapport à un simple mélange avec l'eau de mer notamment pour les points de Sainte Barbe et de Trans. Cet excès provient de la dissolution des calcaires.

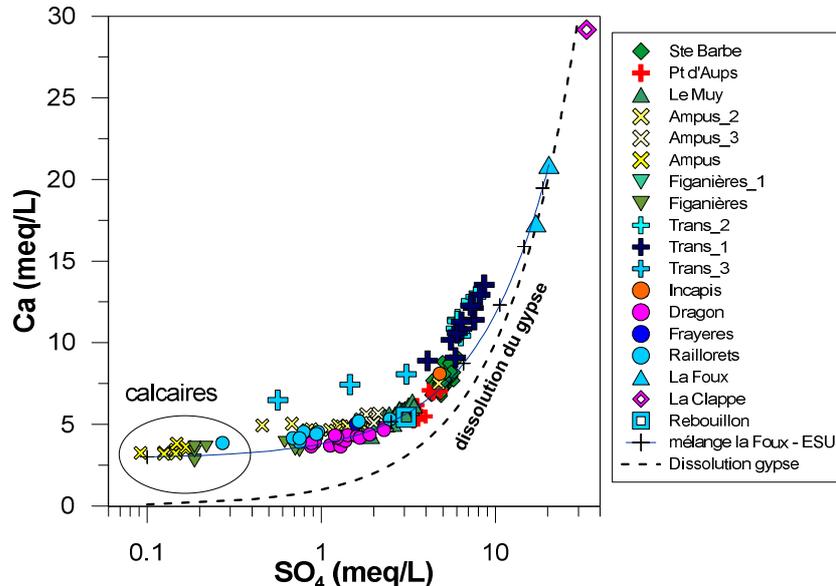


Figure 3 : Calcium en fonction des sulfates dans les eaux souterraines de la région de Draguignan, incluant les données des campagnes 2013 du CEREMA d'Aix.

Les teneurs en calcium et sulfates sont bien expliquées par la droite de mélange entre les eaux drainant les calcaires d'Ampus et les eaux de la Foux (Figure 3). Hormis pour les eaux de la Clappe et de la Foux, il existe un excès de calcium par rapport à une simple dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), montrant qu'il existe une autre source de calcium. En l'occurrence, l'altération des roches calcaires du Jurassique est susceptible de fournir du calcium aux eaux souterraines.

La figure 4 montre l'évolution des indices de saturation de la calcite, de la dolomie et du gypse en fonction de la teneur en sulfates des points d'eau étudiés. Une tendance apparaît nettement vers la saturation par rapport au gypse en fonction des teneurs en sulfates. Les indices de saturation en gypse les plus élevés sont calculés pour les points d'eau de la Foux et de la Clappe, ainsi que les points d'eau de Trans. Pour ces points d'eau, la dissolution du gypse contrôle la présence des sulfates dans les eaux souterraines.

Les eaux de la Foux, de la Clappe et de Reboillon sont sursaturées par rapport à la calcite (Figure 4). Les solutions des autres points d'eau sont à l'équilibre voire légèrement sursaturées par rapport à la calcite. C'est typiquement le cas pour les deux points d'eau Sainte Barbe et Pont d'Aups. Les points d'eau des calcaires jurassiques sont à l'équilibre avec la calcite. Les eaux sont légèrement sous-saturées par rapport à l'anhydrite, qui est une phase deshydratée du gypse. L'indice de saturation des eaux d'Incapis est toujours supérieur à celui des eaux calcaires jurassiques, illustrant une contribution en sulfates plus importante.

L'évolution des indices de saturation en fonction du temps ne montre pas de tendance particulière, incluant petites augmentations et diminutions de la saturation des solutions (Figure 5).

Saturation des solutions

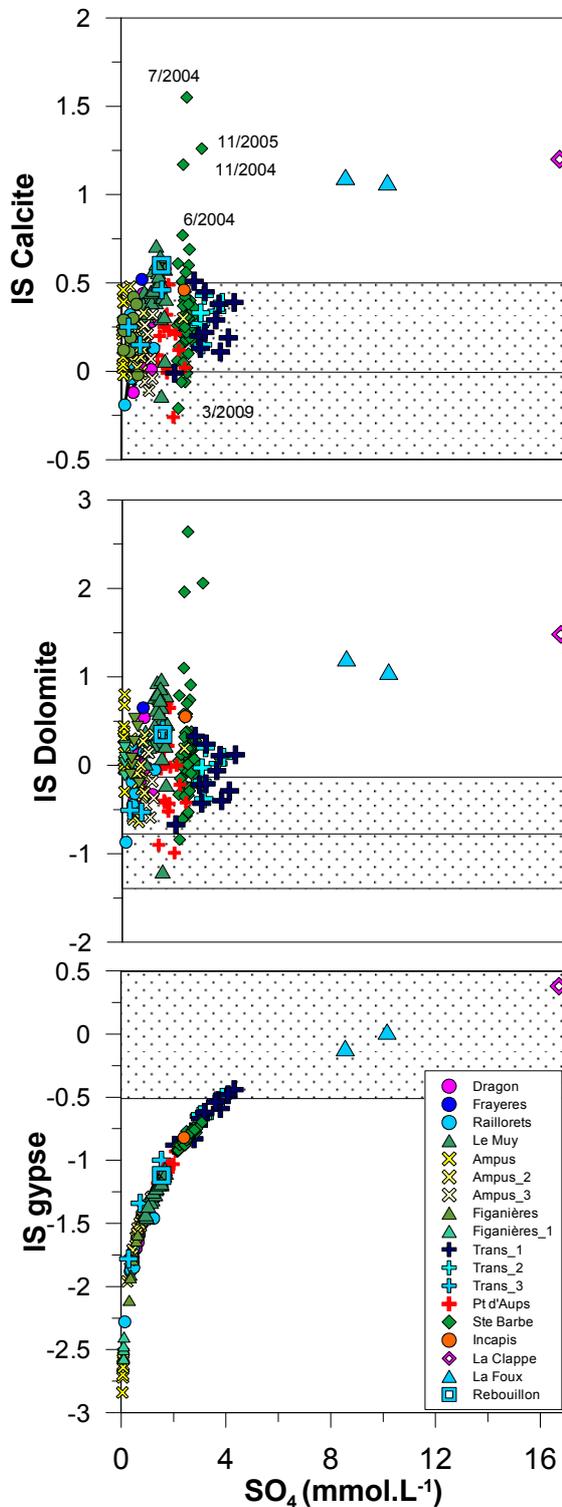


Figure 4 : Evolution des indices de saturation de la calcite, de la dolomie et du gypse en fonction de la teneur en sulfates.

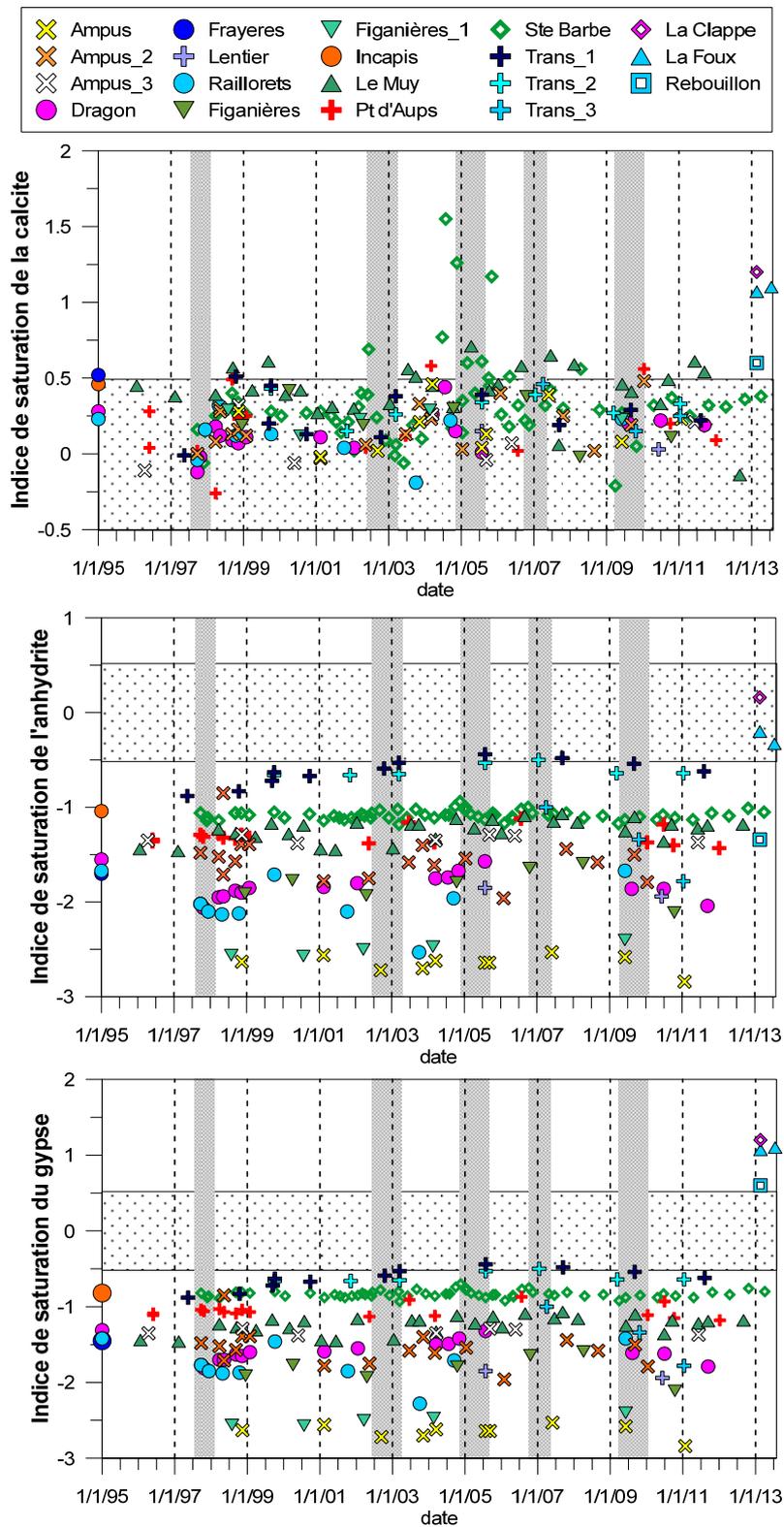


Figure 5 : Evolution de l'indice de saturation du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite (CaSO_4) et de la calcite en fonction du temps pour les ponts d'eau étudiés. Les bandes grisées correspondent à des événements pluvieux. La bande à points noirs correspond à la zone d'équilibre de la solution relativement à la phase minérale indiquée.

Piezométrie

Les teneurs en sulfates sont relativement bien corrélées au niveau piézométrique pour le point Sainte Barbe : les niveaux piézométriques les plus bas correspondent à des teneurs fortes en sulfates (Figure 6). Les teneurs maximales en sulfates sont associées à des teneurs fortes en calcium et chlorures notamment pour la période juillet 2004-hiver 2005 et l'hiver 2006 (Figure 7). En période de haut niveau piézométrique, les teneurs plus basses en sulfates pourraient témoigner d'un effet de dilution.

Néanmoins, le pas de temps d'analyse n'est pas adapté au problème traité : de nombreux hauts niveaux piézométriques liés en particulier aux grandes précipitations de juin 2010 et novembre 2011 n'ont pas été suivis de prélèvements et d'analyse de la qualité de l'eau. De plus, la correspondance entre niveau piézométrique et qualité de l'eau doit prendre en compte un retard dû à l'équilibration du système et au temps de transfert des eaux de recharge. Il serait important de pouvoir, à l'avenir, adapter la fréquence de l'échantillonnage, notamment suite aux grands événements hydrologiques et climatiques afin de mieux comprendre la réactivité du système.

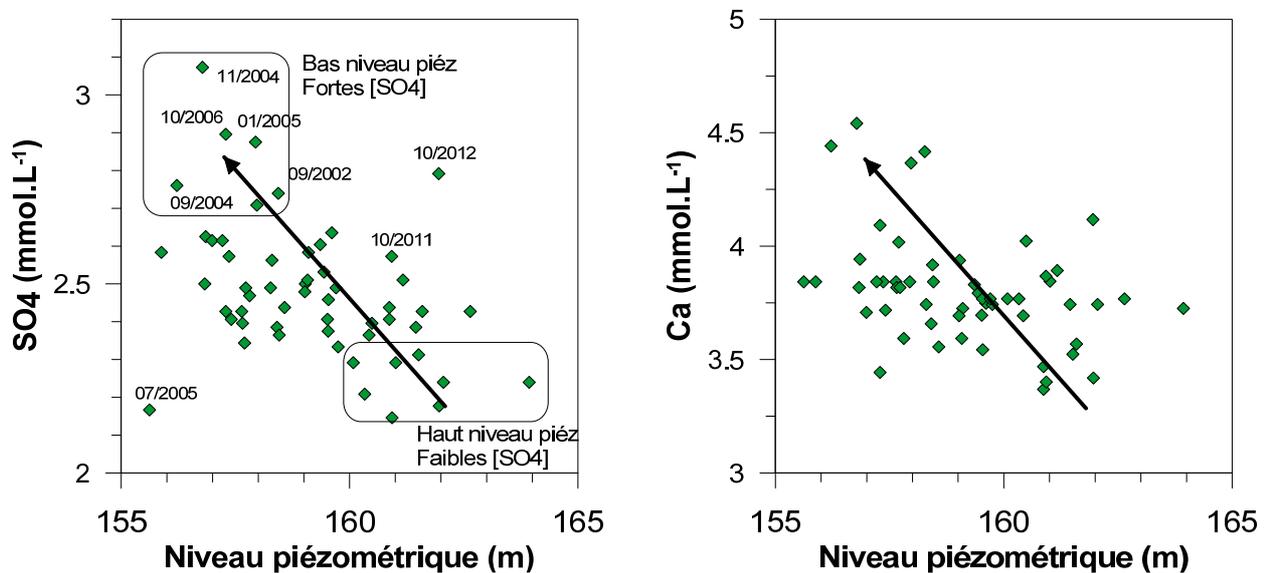


Figure 6 : Teneurs en sulfates et calcium en fonction du niveau piézométrique au point d'eau Sainte Barbe.

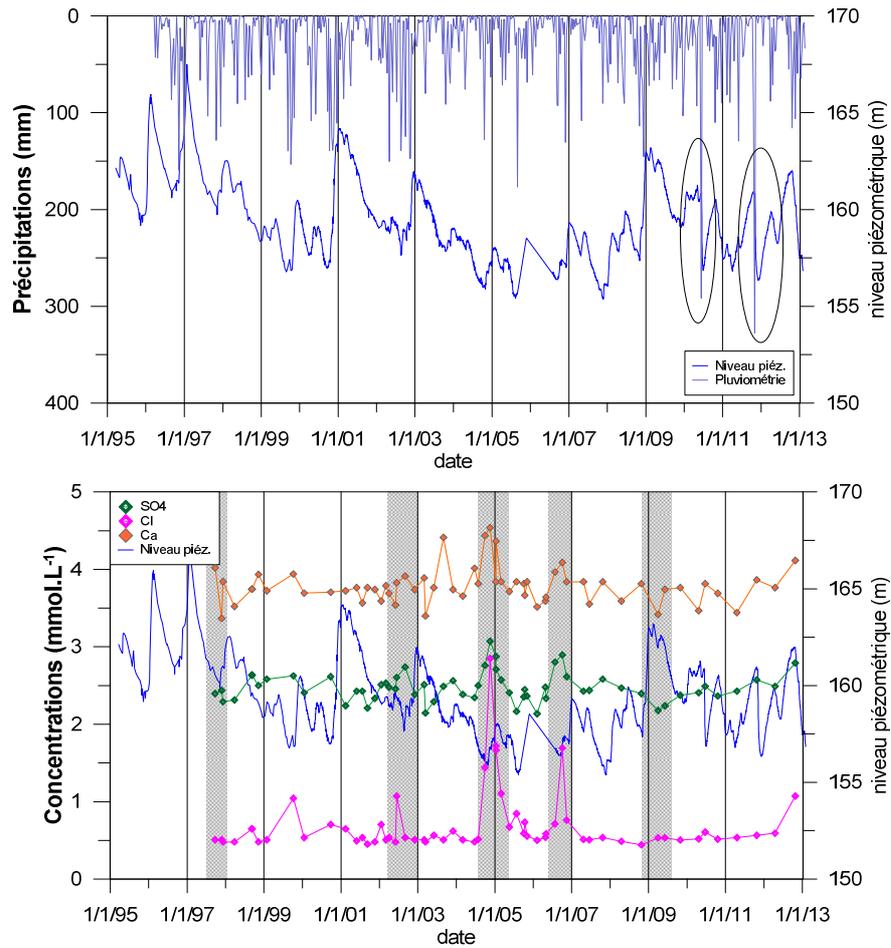


Figure 7 : Evolution de la piézométrie et des teneurs en sulfates, calcium et chlorures en fonction du temps au point d'eau 10241X0170/F2 Sainte Barbe.

Les deux points d'eau de Trans présentent des teneurs en SO_4^{2-} proches de celles de Ste-Barbe. A l'inverse, les teneurs en Cl^- et Ca^{2+} sont plus élevées.

Il n'existe pas assez de valeurs pour conclure sur un lien entre le niveau piézométrique et la teneur en sulfates pour le point d'eau Pont d'Aups (Figure 9).

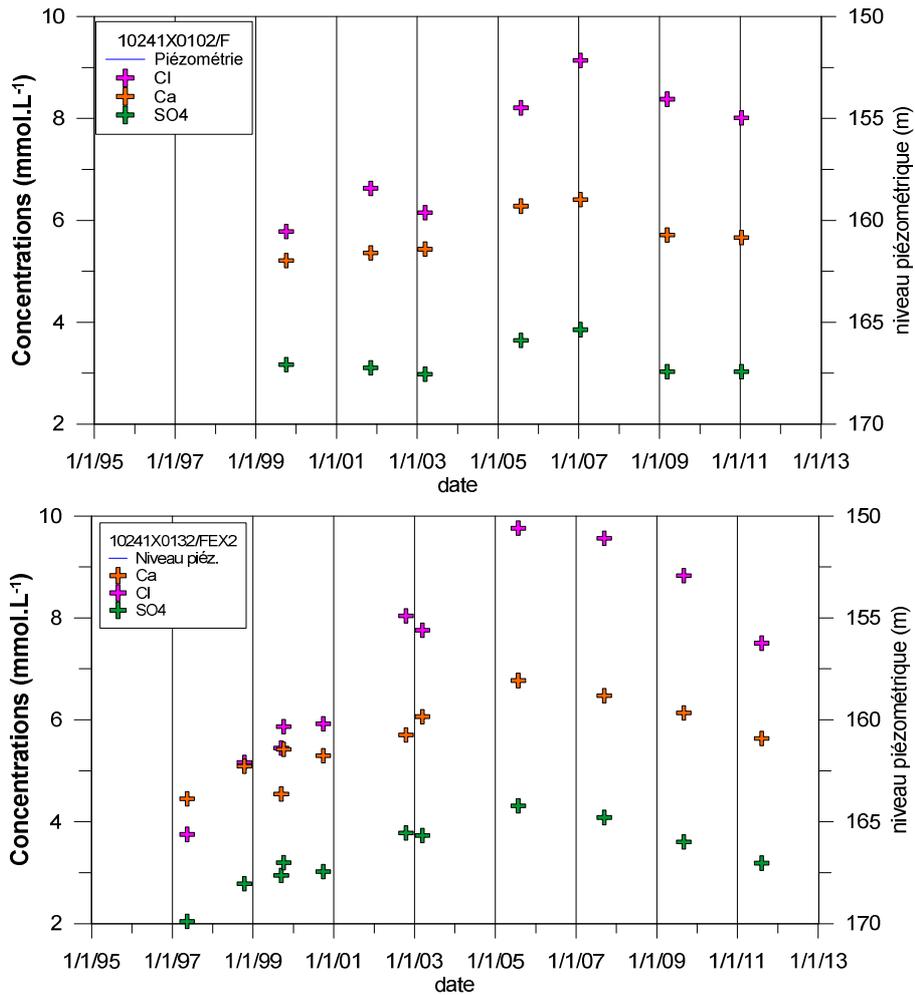


Figure 8 : Evolution de la piézométrie et des teneurs en sulfates, calcium et chlorures en fonction du temps aux points d'eau de Trans en Provence 10241X0132/FEX2 et 10241X0102/F.

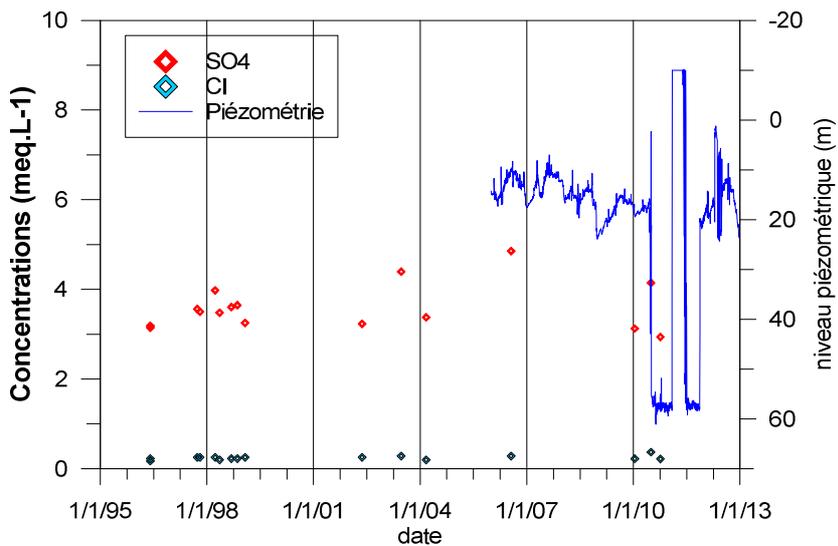


Figure 9 : Evolution de la piézométrie et des teneurs en sulfates et chlorures en fonction du temps au point d'eau 10234X0087/FEX1 Pont d'Aups.

Annexe 2

Analyse détaillée des données géochimiques nouvellement acquises lors des campagnes de prélèvement 2013

Définition du réseau de prélèvement

Le réseau de prélèvement a été défini de la façon suivante :

- les points de captage AEP de la commune de Draguignan : Frayères (1), Dragon (4), Rayollets (14), Sainte-Anne (ou Sainte-Barbe) (11), Pont d'Aups (8 et 9) ;
- les sources connues sur le secteur : la Foux (12), source de la Bergerie (13) ;
- les eaux de surface : la Nartuby à Rebouillon (2) ;
- des points d'eau accessibles et situés à proximité des zones d'affaissement :
 - . à proximité du centre ancien : Caporal forage (10) et forage 10234X0042 (7);
 - . à proximité de la Clappe : écoulement de la Clappe (3) ainsi que le forage (6) et la source de la propriété Ragosa (5).

L'ensemble de ces points sont localisés sur l'illustration 41.

NB : les eaux du champ captant des Incapis n'ont pas pu être prélevées lors de nos deux campagnes.

L'ensemble de ces prélèvements ont fait l'objet d'analyses des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-)⁷.

NB : dans un premier temps, il avait été prévu de prélever des eaux à proximité des zones identifiées comme subsidentes lors de l'étude interférométrique réalisée sur le secteur (Marçot et al. 2011). Cependant, aucun point d'eau accessible n'a pu être finalement identifié à proximité de ces zones.

Résultats bruts

Les résultats des deux campagnes HE et BE sont synthétisés dans les tableaux 1 et 2.

D'une manière générale, les eaux prélevées en BE présentent une minéralisation plus faible qu'en HE sauf les points Caporal, Saint-Anne et Bergerie qui présentent une légère augmentation de leur minéralisation.

⁷ Analyses réalisées par : CEREMA / Direction Territoriale Méditerranée / Laboratoire Régional d'Aix-en-Pce / Service Chimie

campagne HE

n° point	nom point	date de prélèvement	paramètres physiques		concentration en mg/l							en mmol/l H ⁺		concentration en méq/l							balance ionique en %
			pH	Cond. En μ S/cm	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TA	TAC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
1	Source des Frayères	20/02/13	7,7	670	88	21	0,5	2,8	5	45	317	0	5,2	4,4	1,7	0,0	0,1	0,1	1,0	5,2	-0,3
2	Rebouillon – rivière	21/02/13	7,6	620	109	25	0,9	3	5,6	148	268	0	4,4	5,5	2,1	0,0	0,1	0,2	3,1	4,4	-0,3
3	la Clappe – écoulement	20/02/13	7,6	2670	585	110	4	22	34	1605	329	0	5,4	29,3	9,1	0,1	1,0	1,0	34,1	5,4	-1,4
4	Source du Dragon	21/02/13	7,7	590	88	25	0,5	3,5	8,3	74	293	0	4,8	4,4	2,1	0,0	0,2	0,2	1,6	4,8	0,1
5	Ragosa – source	20/02/13	7,6	880	119	37	1,3	6,1	16	115	421	0	6,9	6,0	3,0	0,0	0,3	0,5	2,4	6,9	-2,6
6	Ragosa – Forage	20/02/13	8,1	690	118	26	2,4	4,8	7,8	144	311	0	5,1	5,9	2,1	0,1	0,2	0,2	3,1	5,1	-0,4
7	10234X0042 – Forage	20/02/13	7,6	560	83	9,4	30	6,7	7	58	281	0	4,6	4,2	0,8	0,8	0,3	0,2	1,2	4,6	-0,4
8	Pont d'Aups – Forage 1	21/02/13	7,6	690	106	24	1,1	4,5	8	132	287	0	4,7	5,3	2,0	0,0	0,2	0,2	2,8	4,7	-1,6
9	Pont d'Aups – Forage 3	21/02/13	7,4	830	142	29	1,2	6	11	198	317	0	5,2	7,1	2,4	0,0	0,3	0,3	4,2	5,2	0,3
10	Caporal – Forage	21/02/13	7,4	640	96	26	1,1	4,8	8,7	33	397	0	6,5	4,8	2,1	0,0	0,2	0,2	0,7	6,5	-1,9
11	Saint-Anne – Forage 1	21/02/13	7,9	940	140	34	3,1	11	19	235	305	0	5	7,0	2,8	0,1	0,5	0,5	5,0	5,0	-0,9
12	Source de la Foux	21/02/13	7,7	5120	419	54	21	670	1080	975	275	0	4,5	21,0	4,4	0,5	29,1	30,5	20,7	4,5	-0,6
13	source de la Bergerie	21/02/13	7,9	370	56	20	0,36	4,3	9,5	25	250	0	4,1	2,8	1,6	0,0	0,2	0,3	0,5	4,1	-2,7
14	Raillorets – Forage 1	21/02/13	7,7	730	111	20	0,9	4,5	7,8	123	329	0	5,4	5,6	1,6	0,0	0,2	0,2	2,6	5,4	-5,2

Tableau 1: Résultats de la campagne de prélèvement Hautes Eaux (février 2013)

campagne BE

n° point	nom point	date de prélèvement	paramètres physiques		concentration en mg/l							en mmol/l H ⁺		concentration en méq/l							balance ionique en %	
			pH	Cond. En μ S/cm	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TA	TAC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
1	Source des Frayères	15/07/13	7,9	560	81	25	0,5	2,5	4,5	49	299	0	4,9	4,1	2,1	0,0	0,1	0,1	1,0	4,9	1,3	
2	Rebouillon – rivière	18/07/13	7,7	720	109	28	1	3,3	5,3	173	268	0	4,4	5,5	2,3	0,0	0,1	0,1	3,7	4,4	-1,9	
3	la Clappe – écoulement																					
4	Source du Dragon	17/07/13	8	550	74	24	0,5	3,4	8,4	47	287	0	4,7	3,7	2,0	0,0	0,1	0,2	1,0	4,7	-0,9	
5	Ragosa – source	16/07/13	7,8	880	134	38	0,8	6,2	16	117	445	0	7,3	6,7	3,1	0,0	0,3	0,5	2,5	7,3	-0,6	
6	Ragosa – Forage	16/07/13	8	720	105	27	2,3	4,5	7,5	136	293	0	4,8	5,3	2,2	0,1	0,2	0,2	2,9	4,8	-1,2	
7	10234X0042 – Forage	-	8,2	530	74	9	29	4,9	5,4	41	262	0	4,3	3,7	0,7	0,7	0,2	0,2	0,9	4,3	0,7	
8	Pont d'Aups – Forage 1	16/07/13	7,5	690	108	25	1	3,7	7,5	152	250	0	4,1	5,4	2,1	0,0	0,2	0,2	3,2	4,1	0,7	
9	Pont d'Aups – Forage 3	16/07/13	7,8	750	124	29	1,2	4,6	11	165	317	0	5,2	6,2	2,4	0,0	0,2	0,3	3,5	5,2	-1,1	
10	Caporal – Forage	17/07/13	7,7	660	100	27	1,1	3,5	9,5	27	403	0	6,6	5,0	2,2	0,0	0,2	0,3	0,6	6,6	-0,3	
11	Saint-Anne – Forage 1	17/07/13	7,3	970	150	34	3	10	20	243	305	0	5	7,5	2,8	0,1	0,4	0,6	5,2	5,0	0,4	
12	Source de la Foux	17/07/13	7,8	4310	347	52	15	500	842	821	275	0	4,5	17,4	4,3	0,4	21,7	23,8	17,5	4,5	-2,2	
13	source de la Bergerie	17/07/13	8,1	450	70	20	0,3	4,1	9,3	27	262	0	4,3	3,5	1,6	0,0	0,2	0,3	0,6	4,3	1,9	
14	Raillorets – Forage 1	17/07/13	8	660	98	29	0,8	3,7	8	74	360	0	5,9	4,9	2,4	0,0	0,2	0,2	1,6	5,9	-1,5	
15	arrivée Ferrières	15/07/13	7,5	840	128	29	1,3	3,7	6,5	226	268	0	4,4	6,4	2,4	0,0	0,2	0,2	4,8	4,4	-2,2	

Tableau 2: Résultats de la campagne de prélèvement Basses Eaux (juillet 2013)

Faciès des eaux

Les faciès des eaux prélevées sont représentés sur des diagrammes de Piper et de Schoeller (Figures 1, 2 et 3).

Ces diagrammes permettent de constater que :

- la source de la Foux présente un faciès chloruré sodique et sulfaté calcique [Na-Ca-Cl-SO₄], pouvant s'expliquer par des échanges avec de la halite (NaCl) et des gypses (CaSO₄) ;
- l'écoulement prélevé à proximité de la Clappe présente un faciès sulfaté calcique et magnésien [Ca-Mg-SO₄], pouvant s'expliquer par des échanges avec des gypses (CaSO₄) et dolomies (Ca,MgCO₃) ;

- les points Caporal, Frayères et Bergerie présentent un faciès bicarbonaté calcique [Ca-HCO₃] représentatif d'échanges uniquement avec des carbonates (CaCO₃) ;
- le forage 10234X0042 présente un faciès particulier, enrichi en K par rapport aux eaux du pôle carbonaté ;
- les autres points résultent d'un mélange entre le pôle carbonates et le pôle gypse/dolomie ;
- parmi ceux-ci, les points Sainte-Anne (ou Sainte-Barbe) et arrivée Ferrières se rapprochent le plus du pôle gypse/dolomie.

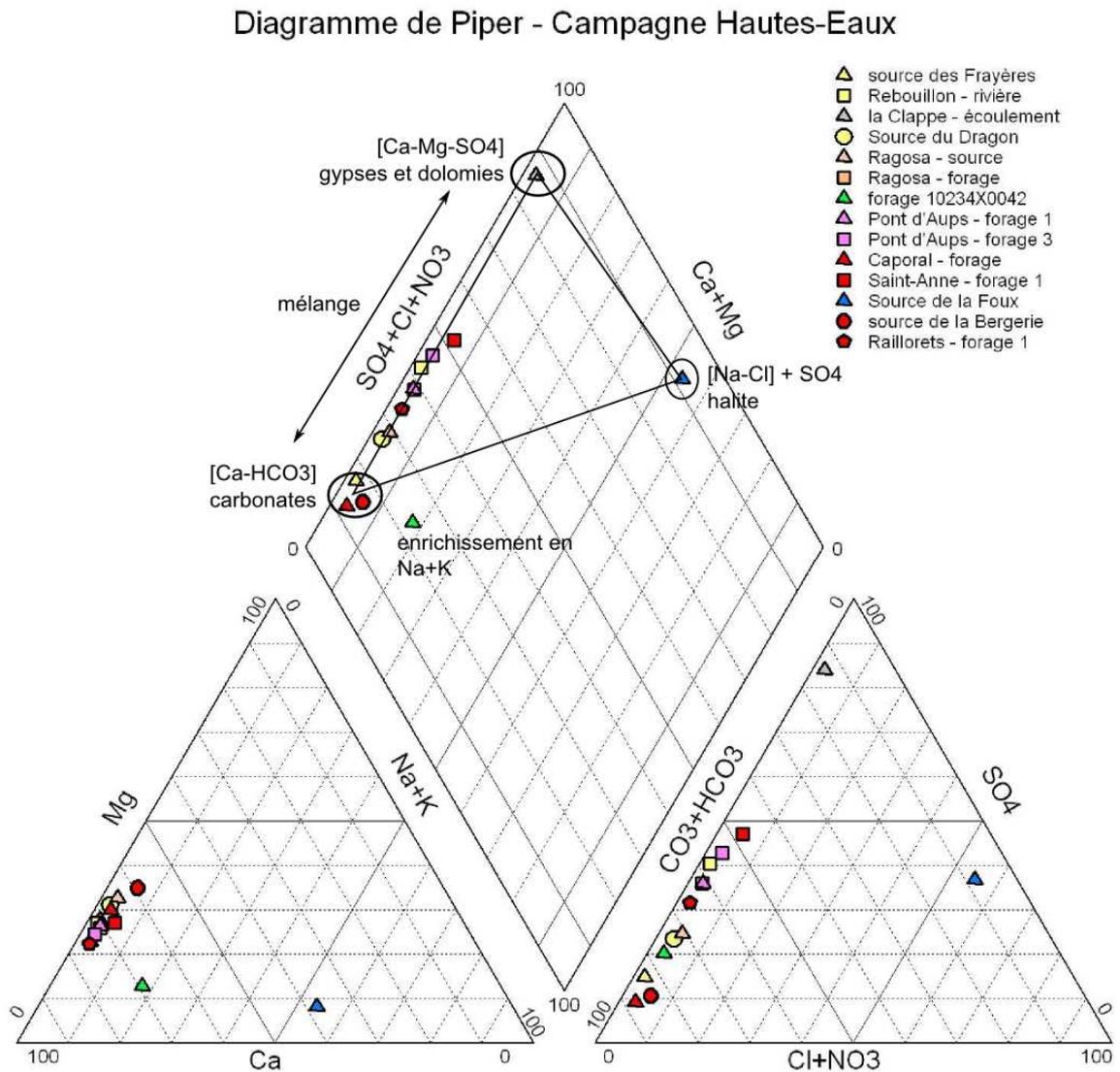


Figure 1 : Diagramme de Piper pour la campagne HE (février 2013)

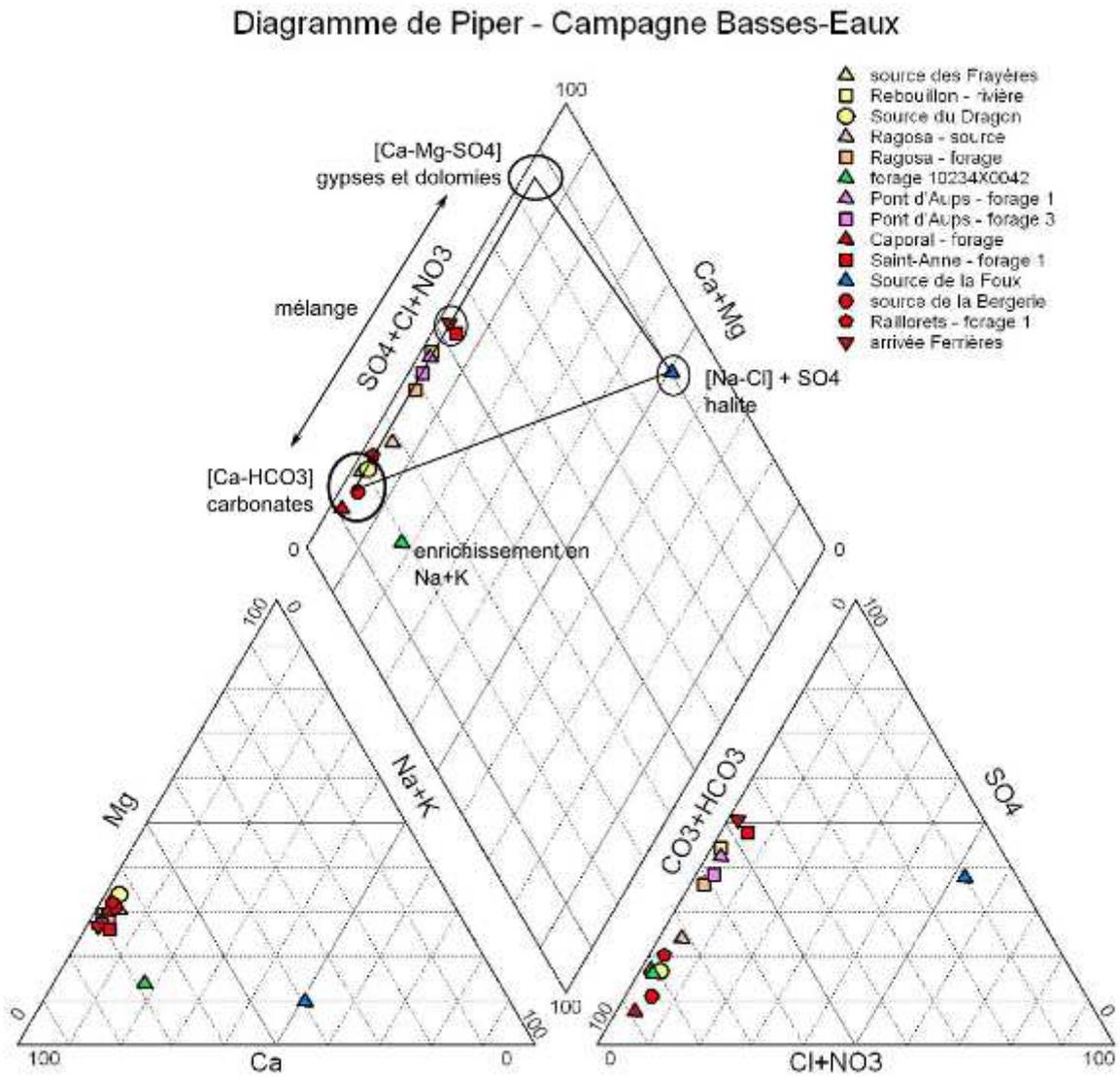


Figure 2 : Diagramme de Piper pour la campagne BE (juillet 2013)

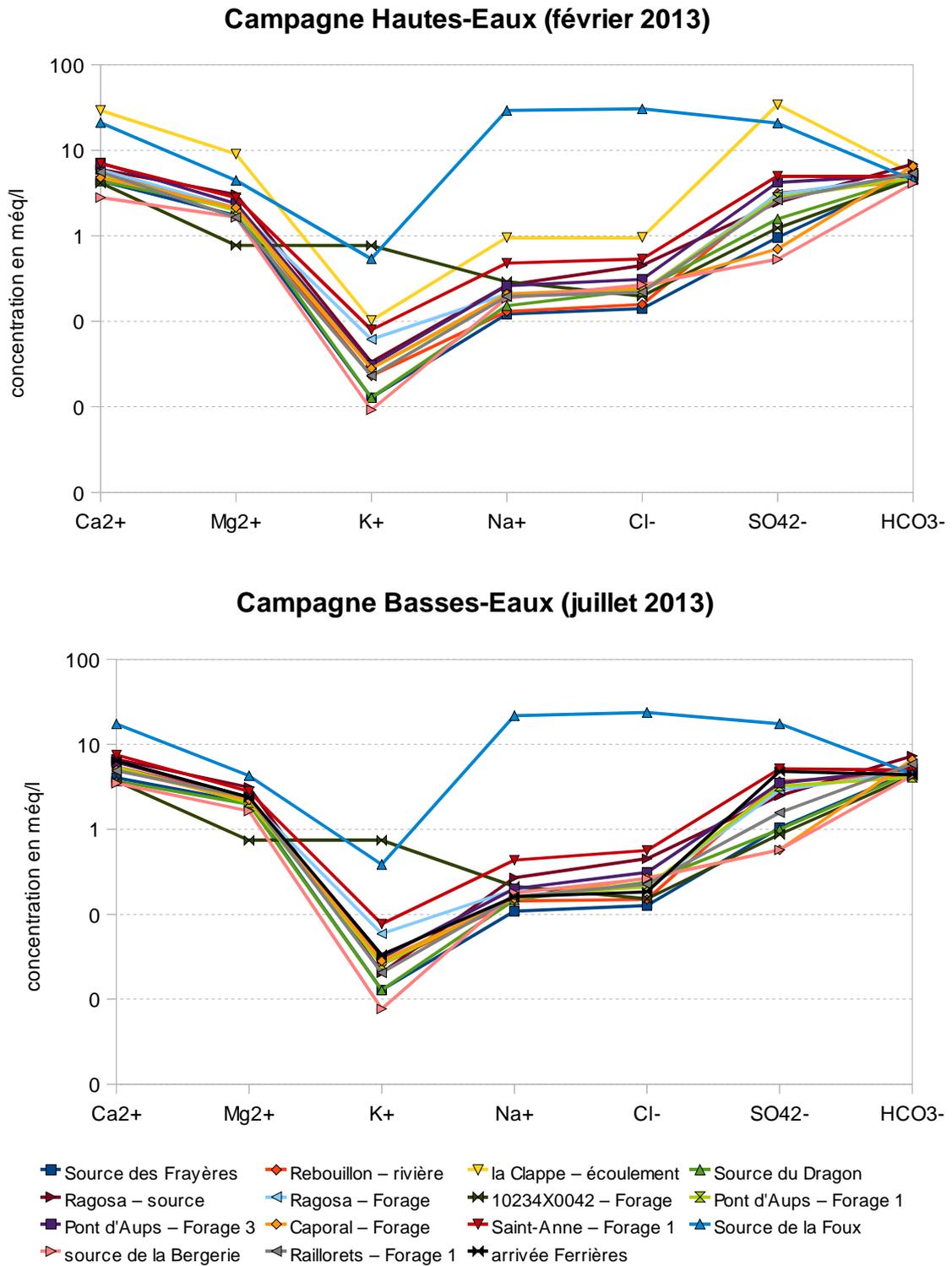


Figure 3 : Diagrammes de Schoeller – campagne HE (février 2013) et campagne BE (juillet 2013)

Diagrammes binaires

L'établissement de diagrammes binaires permet également d'évaluer les échanges eau / roche (Figure 4) :

- sur l'ensemble des graphes :
 - on retrouve les 2 pôles évaporites (la Foux) et carbonates (Caporal, Frayères et Bergerie) ;
 - les autres points présentent des teneurs intermédiaires entre ces 2 pôles ;
 - parmi ceux-ci, ce sont bien les points Sainte-Anne et arrivée Ferrières qui sont les plus proches du pôle évaporitique ;
- le graphe $SO_4 = f(\text{cond})$ (graphe 1) permet de constater que l'acquisition d'une forte minéralisation aux points la Foux et la Clappe ne s'explique pas uniquement par des échanges avec le gypse ;
- le graphe $SO_4 = f(\text{Ca})$ (graphe 2) montre que seuls les points la Foux et la Clappe sont sur la droite de dissolution de l'anhydrite, les autres points présentent un excès de Ca, du au une interaction avec de la calcite ;
- sur le graphe $Ca = f(\text{HCO}_3)$ (graphe 3), la quasi constance de la teneur en HCO_3 montre que l'ensemble des échantillons a vraisemblablement atteint la saturation en calcite ;
- le graphe $Cl = f(\text{Na}+\text{K})$ (graphe 4) montre que quasi tous les points sont alignés sur la droite de dissolution de la halite :
 - les plus marqués par une interaction avec la halite sont les points la Foux puis la Clappe ;
 - les autres points se répartissent entre le pôle évaporites et le pôle carbonates ;
 - le point 10234X0042 présente un excès de Na+K de l'ordre de 1még/l par rapport aux autres points ;
- le graphe $Mg = f(\text{Ca})$ (graphe 5) montre que l'ensemble des points s'alignent sur une droite parallèle à la droite de dissolution de la dolomie (Ca,MgCO_3), l'excès en Ca de la majorité des points s'explique par la dissolution de calcite en plus de la dolomie ; le point 10234X0042 présente un excès de Ca de l'ordre de 2még/l par rapport aux autres points ;
- le graphe $Mg/\text{Na} = f(\text{Ca}/\text{Na})$ (graphe 6) permet d'identifier les échantillons pour lesquels l'interaction avec la halite (NaCl) est prépondérante par rapport à des interactions avec la calcite (CaCO_3), l'anhydrite (CaSO_4) ou la dolomie (Ca,MgCO_3) : il apparaît que seule la Foux est marquée par une très forte interaction avec la halite, la Clappe n'étant pas plus marquée par cette interaction que par les autres interactions avec la calcite, la dolomie ou l'anhydrite, au même titre que les autres points.

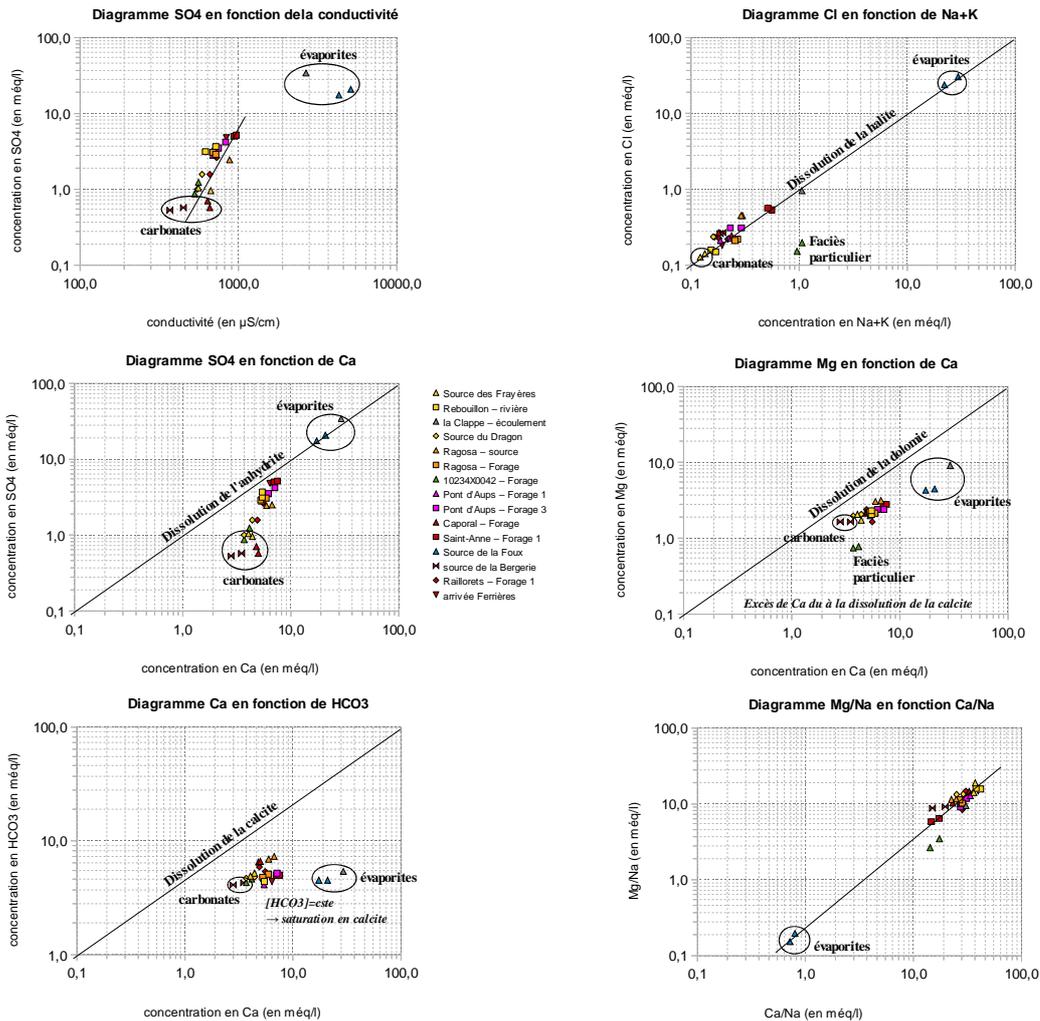


Figure 4 : Diagrammes binaires – campagne HE (février 2013) et campagne BE (juillet 2013)

Conclusions

Pour conclure :

- les points Bergerie et Frayères sont marqués uniquement par des échanges avec les carbonates du Jurassique ;
- la source de la Foux est marquée par une forte interaction avec la halite et dans une moindre mesure avec des gypses, dolomies et carbonates ;
- l'écoulement prélevé à proximité de la Clappe est marqué par des interactions avec des gypses et dolomies et dans une moindre mesure avec de la halite ;
- parmi les points AEP de la commune, les Raillourets sont marqués uniquement par des interactions avec des carbonates du Jurassique tandis que Pont d'Aups, Dragon, Sainte-Anne sont également marqués par des interactions avec des gypses et dolomies du Trias ; les eaux de Sainte-Anne présentant la plus grande proportion d'eau ;
- de même, les points Ragosa, Caporal et Nartuby à Rebouillon résulte d'un mélange entre eaux jurassique et eaux triasiques ;
- le point 10234X0042 présente un excès en Na+K et en Ca par rapport aux autres points qui reste pour le moment sans explication.

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables



**Direction territoriale Méditerranée
Laboratoire d'Aix-en-Provence**

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités 30 Avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 24 76 76

Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30 - www.cerema.fr



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 PACA
117, av. de Luminy
BP168
13276 – Marseille Cedex09 – France
Tél. : 04 91 17 74 78