ETUDE POUR L'ELABORATION DU SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX DU BASSIN VERSANT DU GAPEAU

Diagnostic hydrogéologique du bassin versant du Gapeau

HYDROFIS

RCS Nice – SIRET 448 175 349 000 43– APE 7112B
N°TVA intra-C : FR 384 481 75 349
Siège social : 21 avenue Auber 06000 NICE

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 5

Définition de la mission 5
Moyens technique 6

2. ETAT INITIAL 8

2.1 GENERALITES 8

Bassin versant et masses d'eau 8
Identification des nappes 9

2.2 LES NAPPES DE TETE DE BASSIN VERSANT 10

La bordure Sud du massif calcaire de l'Agnis (FRDG167) 10
Les massifs calcaires de la bordure Nord du bassin du Beausset (FRDG168) 12
Les massifs calcaires jurassiques de Cuers, Neoules et Rocbaron (FRDG170) 14
Le massif triasique de Flassans (FRDG169) 19

2.3 LES AQUIFERES INTERMEDIAIRES 22

Les grès et pélites du Permien (FRDG520) 22
Les roches fissurés du massif des Maures (FRDG609) 25

2.4 LES ALLUVIONS DU GAPEAU 27

Généralités 27
Relations entre la nappe et le cours d'eau 29
Etat quantitatif 32
Usages 34
Etat qualitatif 34

3. DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES 35

3.1 PREAMBULE 35

Etendue des connaissances 35
Implications méthodologiques 36

3.2 APPLICATION AUX MASSES D'EAU 38

Règle générale pour les nappes en inter-relation avec les cours d'eau 38
Cas particulier des alluvions du Gapeau aval 38

4. BIBLIOGRAPHIE 44

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Localisation de la zone projet (fond : géologie au 1 : 250 000 éditée par le BRGM).....5
Figure 2 : Localisation des masses d'eau souterraines au sein du bassin versant. 8
Figure 3 : Carte de situation des masses d'eau – Massif de l'Agnis et cuvette de Signes..... 11
Figure 4 : Carte de situation des masses d'eau – Massif de Néoules..... 15
Figure 5 : Coupes hydrogéologiques illustratives du massif de Rocbaron. 16
Figure 6 : Carte de situation des masses d'eau – Massifs de Rocbaron et de Flassans. 18
Figure 7 : Coupes illustratives de l'aquifère triasique de Flassans. 20
Figure 8 : Coupes illustratives montrant la disposition relative des aquifères du Trias, du Permien et des roches de socle. 22
Figure 9 : Modèles conceptuels des aquifères de socle (d'après Lachassagne et Wyns, 2005). 25
Figure 10 : Carte de situation des masses d'eau – alluvions du Gapeau. 28
Figure 11 : Zone de confluence Gapeau- Réal Martin. 29
Figure 12 : Relations nappe rivière à l'échelle du BV (SAFEGE, 2011). 29
Figure 13 : Schéma explicatif des relations nappe-rivière pour une géométrie variable du corps alluvial. 30
Figure 14 : Schéma explicatif des relations nappe-rivière pour les alluvions aval du Gapeau (GRONTMIJ et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014). 31
Figure 15 : Principe de la méthode des gradients (document de communication SAFEGE). 33
Figure 16 : Principe du projet AQUARENOVA (SAFEGE, 2013)..... 33
Figure 17 : Impact des pompages agricoles en fonction de la distance et de la transmissivité pour les nappes alluviales dans le système Rhône (BRLi & HYDROFIS, 2013). 37
Figure 18 : Seuils d'alerte et de crise pour la nappe du Gapeau aval (RIVAGE ENVIRONNEMENT, 2014). 43

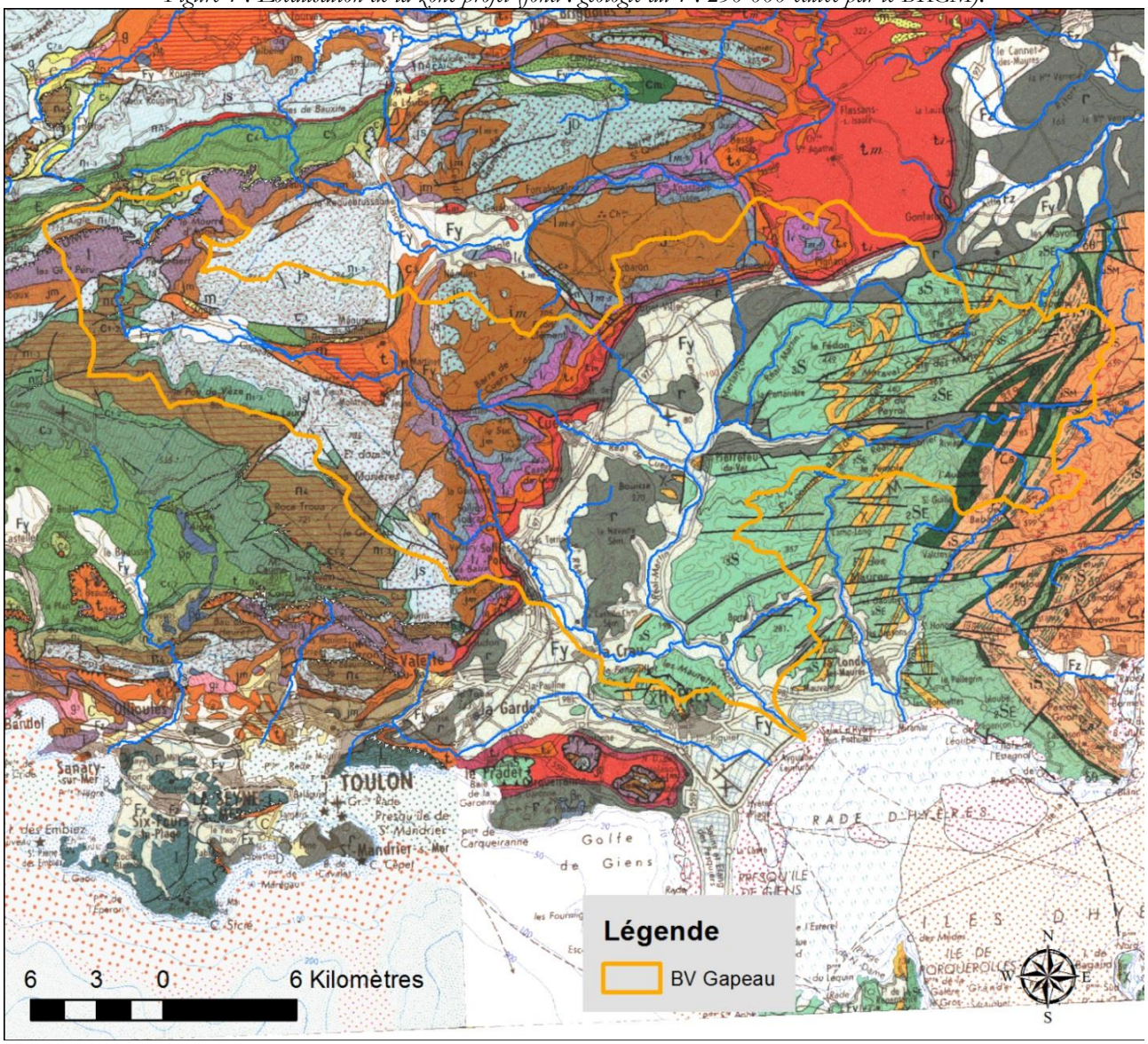
1 . INTRODUCTION

DEFINITION DE LA MISSION

BRLi a remporté l'appel d'offre relatif à l'« ETUDE POUR L'ELABORATION DU SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX DU BASSIN VERSANT DU GAPEAU», portée par le Syndicat Mixte du Bassin Versant du Gapeau.

Il s'agit d'accompagner le Syndicat dans la démarche d'élaboration du SAGE, de l'état des lieux au choix de la stratégie. En plus de l'accompagnement du Syndicat et de la production des rapports constitutifs du SAGE, un objectif supplémentaire de l'étude est de déterminer les volumes prélevables par usage et par ressource, pour assurer l'équilibre des ressources et la durabilité des usages.

Figure 1 : Localisation de la zone projet (fond : géologie au 1 : 250 000 éditée par le BRGM).



Les études volumes prélevables constituent un des éléments de connaissance nécessaire à la mise en œuvre de différents objectifs phares en termes de gestion quantitative de la ressource en eau :

- L'objectif de retour à l'équilibre entre l'offre et la demande en eau, affiché par le Plan national de gestion de la rareté de la ressource ;
- La loi sur l'eau de décembre 2006, qui promeut la gestion collective de l'irrigation, nécessite une connaissance des volumes prélevables ;
- La circulaire 17-2008 du 30 juin 2008 sur la résorption des déficits quantitatifs et la gestion collective de l'irrigation, qui fixe des objectifs parmi lesquels figurent la mise en cohérence des autorisations de prélèvements et les volumes prélevables, et dans les bassins où le déficit est particulièrement lié à l'agriculture, la constitution d'organismes uniques regroupant les irrigants sur un périmètre adapté et répartissant les volumes d'eau d'irrigation.
- La circulaire du 3 Août 2010 relative à la résorption des déséquilibres quantitatifs en matière de prélèvement d'eau, dans les bassins où l'écart entre le volume prélevé en année quinquennale sèche et le volume prélevable est supérieur à un seuil de l'ordre de 30%.

Dans cette étude, les travaux d'expertise relatifs aux eaux souterraines ont été confiés à la société HYDROFIS.

Plus précisément, il s'agit d'essayer de proposer des analyses argumentées sur les problématiques suivantes :

- Description des unités aquifères.
- Détermination des volumes prélevables dans les eaux souterraines.
- Participation à un atelier technique sur la gestion quantitative des ressources en eau (commission thématique quantité).

Ce rapport a été rédigé par P. Fénart, hydrogéologue.

Il décrit dans un premier temps les unités aquifères ainsi que leurs principales caractéristiques (géologie et hydrogéologie, relations avec les cours d'eau, état qualitatif et quantitatif, usages) ; puis détaille le travail mené pour la détermination des volumes prélevables sur les ressources souterraines du bassin versant du Gapeau.

MOYENS TECHNIQUE

Concernant la détermination des volumes prélevables, notre mission était basée sur la reprise des études antérieures. Elles sont décrites dans leur objectif comme dans leur portée scientifique, plus avant dans le rapport. Nous avons donc réalisé les actions suivantes :

- Analyse de la documentation existante.
- Reprise des études techniques de modélisation de la nappe.
- Reconnaissances de terrain sur la zone projet.

Sur cette thématique, nous avons pu rencontrer et échanger avec certains acteurs du territoire que nous tenons à remercier ici :

- M. Lenhaff de la Ville d'Hyères.
- M. Duzan et M. Charbonnier de SUEZ Environnement / Lyonnaise des Eaux, qui ont notamment en charge le projet AQUARENOVA.

Concernant la description des unités aquifères, nous nous sommes bien entendu inspirés des nombreuses études techniques qui intéressent la zone d'étude mais surtout des descriptions des masses d'eau que nous avions rédigées dans la cadre de la révision du référentiel hydrogéologique de l'Agence de l'Eau (Fénart et al., 2011).

Dans un souci de clarté, nous avons choisi de présenter les nappes en interaction avec les eaux superficielles selon le référentiel des masses d'eau défini par l'Agence de l'Eau. Ceci étant, afin de faciliter la compréhension des phénomènes physiques en jeu, nous avons essayé, dans la mesure du possible, de superposer à ce référentiel administratif, des éléments de géographie physique : massifs montagneux, cours d'eau et sources.

Concernant des sources, les données proviennent de plusieurs origines : base de données BRGM pour le référentiel BD LISA, cartes hydrogéologiques, articles ou documents scientifiques. Ces données doivent donc être considérées comme partielles et lacunaires : on peut supposer que toutes les sources du bassin versant ne sont pas identifiées et que pour celles qui le sont, leur caractérisation est faible (peu ou pas de mesures de débits).

En particulier, **il faut considérer toutes les valeurs de débits proposés dans ce rapport comme indicatives :** les mesures sont rares et les chroniques souvent incomplètes. Elles ont été rappelées ici pour donner des ordres de grandeur et souligner leur importance en tête de bassin versant pour l'alimentation des cours d'eau.

2 . ETAT INITIAL

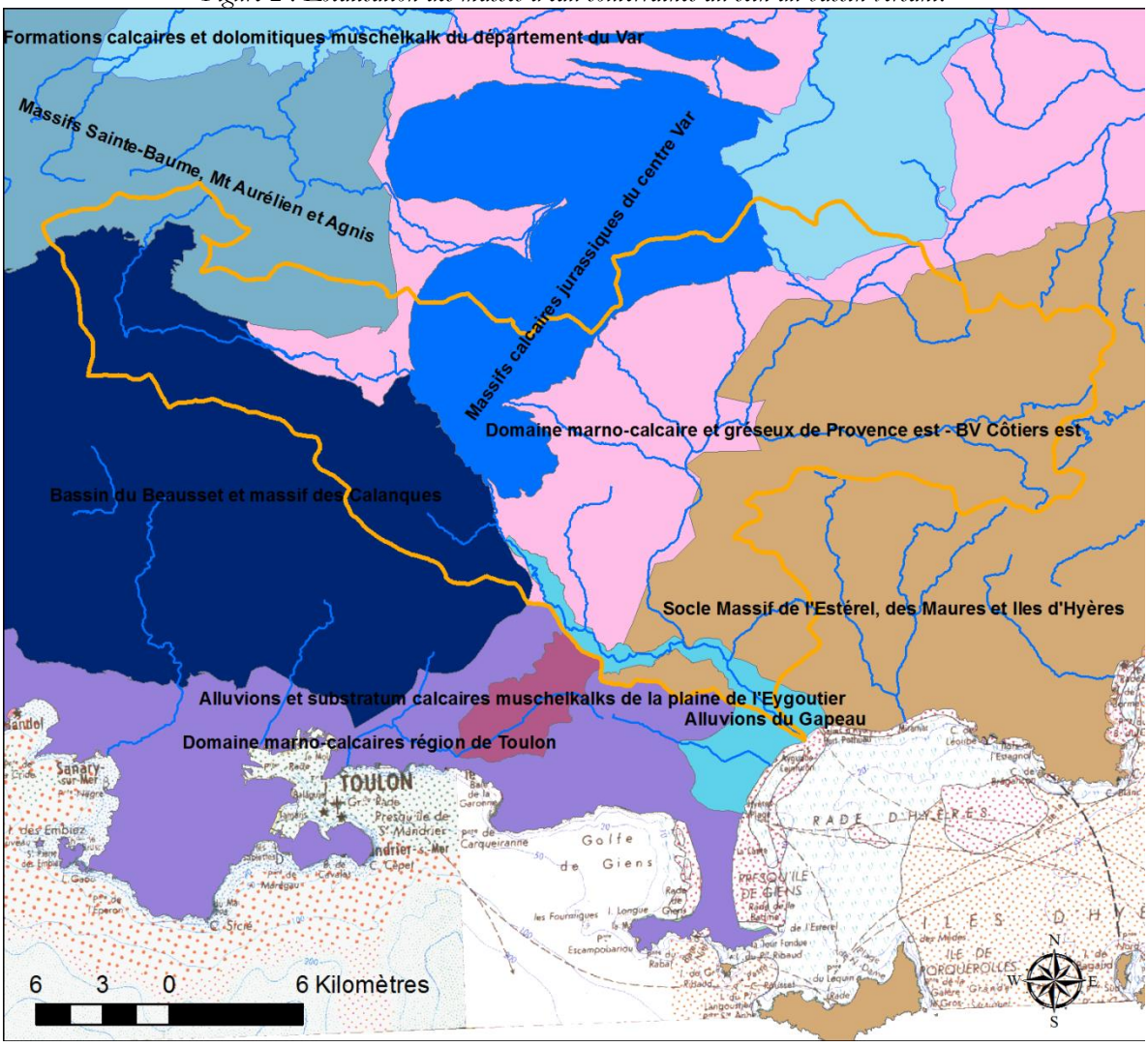
2.1 GENERALITES

BASSIN VERSANT ET MASSES D'EAU

Le bassin versant du Gapeau intéresse neuf masses d'eau souterraines selon le référentiel de l'Agence de l'Eau :

- Les calcaires de la Sainte-Baume, du Mont Aurélien et Agnis (FRDG167).
- Les calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques (FRDG168).
- Les calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal (FRDG169).
- Les massifs calcaires jurassiques du Centre Var (FRDG170).
- Les alluvions et substratum calcaire du Muschelkalk et de la plaine de l'Eygoutier (FRDG205).
- Les alluvions du Gapeau (FRDG343).
- Les formations variées de la région de Toulon (FRDG514).
- Les formations gréseuses et marno-calcaires de l'avant-Pays provençal (FRDG520).
- Les socles des massifs de l'Esterel, des Maures et Iles d'Hyères (FRDG609).

Figure 2 : Localisation des masses d'eau souterraines au sein du bassin versant.



IDENTIFICATION DES NAPPES

D'un point de vue hydrogéologique, toutes les masses d'eau ne se valent pas.

Certaines ont leurs exutoires hors bassin versant et ne contribuent pas aux écoulements superficiels dans le bassin versant du Gapeau :

- Les alluvions et substratum calcaire du Muschelkalk et de la plaine de l'Eygoutier (FRDG205).
- Les formations variées de la région de Toulon (FRDG514).

Nous ne nous intéresserons plus à ces masses d'eau dans la suite de cette étude.

D'autres, au contraire, sont d'une importance majeure en termes de contributions aux écoulements des cours d'eau. Elles correspondent à des nappes d'eau puissantes, situées en tête de bassin versant, qui ont pour exutoire des sources qui vont assurer un soutien au débit des cours d'eau :

- Les calcaires de la Sainte-Baume, du Mont Aurélien et Agnis (FRDG167).
- Les calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques (FRDG168).
- Les calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal (FRDG169).
- Les massifs calcaires jurassiques du Centre Var (FRDG170).

De la même manière, certaines masses d'eau contribuent aussi partiellement, de façon moins significative, au soutien des débits des cours d'eau. Il s'agit de roches aquifères hétérogènes qui sont le siège de nombreuses nappes, plus ou moins connectées, plus ou moins étendues. Citons :

- Les formations gréseuses et marno-calcaires de l'avant-Pays provençal (FRDG520).
- Le socle des massifs de l'Esterel, des Maures et Iles d'Hyères (FRDG609).

Remarquons que ces masses d'eau sont situées en position intermédiaire dans le bassin versant.

Pour finir, une masse d'eau est d'importance première dans cette étude car elle abrite une nappe en inter-relation évidente avec la Gapeau :

- Les alluvions du Gapeau (FRDG343).

Notons que toutes ces masses d'eau, excepté les alluvions du Gapeau, sont pour partie situées hors du bassin versant. Dans un souci de cohérence géographique, nous avons fait le choix de les renommer par les massifs qui font partie de ces masses d'eau mais qui sont situés dans le bassin versant. Il nous semble en effet confus, par exemple, de parler des calcaires de la St Baume quand on s'intéresse aux massifs et aux nappes du bassin versant du Gapeau.

2.2 LES NAPPES DE TETE DE BASSIN VERSANT

LA BORDURE SUD DU MASSIF CALCAIRE DE L'AGNIS (FRDG167)

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Entièrement délimité par des contacts anormaux, le massif d'Agnis est constitué de jurassique moyen (à dominante marno-calcaire) et de jurassique supérieur (calcaires et dolomies) qui chevauchent au Nord le plateau de Mazaugues. Il est limité à l'Est par la zone faillée de la Roquebrussanne d'orientation Nord-Sud, et au Sud par le fossé de Signes à cœur triasique, d'orientation Est-Ouest. Le souterrain Mazaugues-Signes (canal SCP) a confirmé le chevauchement vers le Nord et l'écaillage basal de la base de la série jurassique. D'une surface d'impluvium de l'ordre de 45 km², ce massif est drainé par un nombre important de sources sur ses limites Nord, Est, Ouest et Sud, pour un débit moyen cumulé d'environ 350 l/s.

Les formations jurassiques sont très développées. Elles sont constituées par des calcaires, des calcaires dolomitiques, des dolomies, des calcaires marneux. L'épaisseur de la série peut atteindre plusieurs centaines de mètres ; les épaisseurs sont variables selon que la série est auto ou allochtone.

Le mur de la masse d'eau est formé par les marnes du Keuper.

Les épais bancs calcaires et dolomitiques du Jurassique constituent les principales formations aquifères de la masse d'eau. Elles possèdent une morphologie karstique développée (Le Lias est moins épais et plus marneux mais peut néanmoins constituer un aquifère non négligeable). Ces karsts possèdent toutefois des niveaux peu perméables introduisant des discontinuités qui vont se traduire par un morcellement et un compartimentage des unités karstiques.

RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Le massif d'Agnis est drainé par de nombreuses sources :

- Certaines sont sans relation avec les cours d'eau du bassin versant du Gapeau : au Nord par les sources du Caramy (Qmoy = 70 l/s), à l'Est par la Foux et la Sambuc à la Roquebrussanne et par la Servie à Méounes (110 l/s).

- D'autres alimentent les cours d'eau du bassin versant : la source du Raby (Qmoy=20 l/s), les sources du Gapeau (90l/s) et de Beaupré (60 l/s), sources du Latay (débit inconnu), source de la Servie (captée).

Soit un cumul de l'ordre de 200 l/s en termes de débit moyen annuel qui participe à l'alimentation de la tête du bassin versant du Gapeau.

ETAT QUALITATIF

Les eaux souterraines sont très vulnérables aux éventuelles pollutions de surface, en raison de la rapidité des infiltrations et des écoulements, et de l'absence de terrains de couverture et d'épaisseur de sols suffisante pour avoir un rôle de filtre.

Dans le système karstique, la zone non saturée présente une forte karstification dès la surface, engendrant une infiltration rapide vers la zone noyée. Insistons : la bonne karstification du massif le rend vulnérable à toute pollution. En particulier, les très nombreuses formes de dissolution (dolines, ponors, avens,...) qui recueillent les eaux de ruissellement sont directement connectées au réseau de drainage rapide du système karstique.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état chimique (données de 2010 à 1014).

Sur la bordure Sud du massif, nous disposons de nombreux champs captant AEP avec des mesures régulières de qualité des eaux reportées dans la base de données ADES :

- Forage des Launes (10452X0230/E3), commune de Signes avec 6 prélèvements entre 2006 et 2014.
- Source du Raby (10452X0153/HY), commune de Signes avec 50 prélèvements entre 1997 et 2015.
- Forage Vigne Groussière (10453X0316/F), commune de Méo unes-Les-Montreux, avec 19 prélèvements entre 1996 et 2011.

- Source de la Servie (10457X0099/SOU), commune de Méounes-Les-Montrieux, avec 11 prélèvements entre 1997 et 2015.

Les eaux sont bicarbonatées calciques, de très bonne qualité. Les teneurs en nitrate sont faibles (< 10 mg/l) et les pesticides absents.

ETAT QUANTITATIF

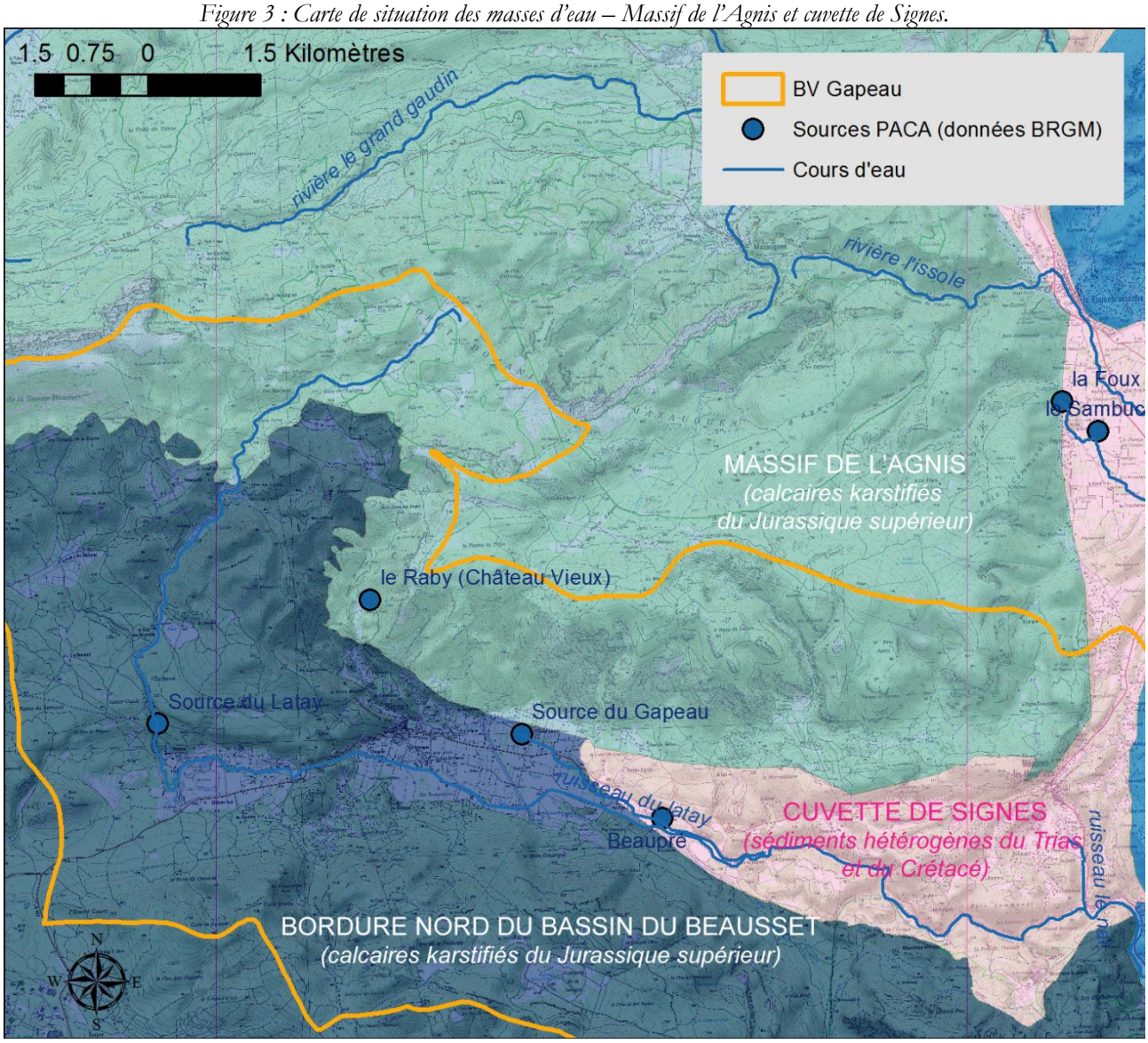
L'alimentation de ce massif se fait uniquement par infiltration des eaux de pluie. Il est donc très vulnérable aux aléas climatiques.

Les réserves statiques sont inconnues.

Nous ne disposons pas de suivi piézométrique patrimonial susceptible de nous renseigner sur les variations du niveau de nappe sur la bordure sud du massif d'Agnis. Le piézomètre de Mazaugues est bien trop éloigné pour apporter une information sur les phénomènes en bordure Sud du massif.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état quantitatif.

Figure 3 : Carte de situation des masses d'eau – Massif de l'Agnis et cuvette de Signes.



USAGES

Cette masse d'eau souterraine fait l'objet de plusieurs prélèvements sur sa bordure Sud.

Pour l'AEP :

- Source du Raby.
- Source de la Servie
- Forage de Vigneroussière.

LES MASSIFS CALCAIRES DE LA BORDURE NORD DU BASSIN DU BEAUSSET (FRDG168)

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Le bassin versant du Gapeau recoupe pour partie le flanc Nord-Est du bassin du Beausset.

Le bassin du Beausset est un synclinal, allongé Est-Ouest, constitué par une série d'assises concentriques bien développées au Nord, mais relevées au sud le long d'un accident orienté Est-Ouest, entre la Vallette et la Ciotat, qui isole au Sud la chaine montagneuse dominant Bandol, Ollioules et Toulon. Ce synclinal chevauche par son flanc Nord le massif de la Sainte-Baume.

Plus précisément, le bassin versant recouvre les assises du synclinal, d'âge jurassique supérieur, qui affleurent au sud de la cuvette de Signes. Ces formations constituent une série dolomitique et calcaire épaisse de plusieurs centaines de mètres, pouvant comporter quelques niveaux de marnes et de calcaires marneux, notamment dans le Néocomien. Ces formations aquifères ont une morphologie karstique très développée. Elles possèdent donc une perméabilité en grand élevée ; l'aquifère est principalement alimenté par l'infiltration des eaux de pluie.

RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Le principal exutoire de la nappe karstique est constitué par le Ragas du Revest, qui draine une grande partie de la partie orientale du synclinal du Beausset (soit une surface d'impluvium de l'ordre de 150 km², avec un Q moyen de l'ordre de 500 l/s pour les sources du Ragas). Il s'agit d'une source vauclusienne, située sur une faille affectant les calcaires urgoniens et les mettant en contact avec un niveau marneux du Cénomanien. L'eau de cette source est stockée dans le barrage de Dardennes et sert à l'alimentation en eau potable de Toulon. Cette ressource n'intéresse donc pas le bassin versant du Gapeau.

Par contre, on observe des exutoires secondaires qui drainent très localement cette même unité, le long de la vallée du Gapeau (La Rouvière, Font d'Ouvin, Lacanal, Gavaudan), ainsi que les sources de Montrieux, plus au Nord. Nous ne disposons d'aucune donnée sur ces résurgences qui contribuent à soutenir les cours d'eau en tête du bassin versant. De même, la plupart d'entre elles ne sont pas géolocalisées et ne figurent pas dans les bases de données de référence du BRGM.

On peut cependant supposer une contribution significative : avec un impluvium de l'ordre de 30 km² et un débit spécifique supposé de 7 l/s/km², leur contribution devrait s'élever en moyenne annuelle autour de 200 l/s en régime non influencé. Ces apports latéraux se produisent principalement entre Méounes et Solliès-Toucas.

ETAT QUANTITATIF

L'alimentation des calcaires jurassiques de bordure se fait uniquement par infiltration des eaux de pluie. Les nappes associées sont donc très vulnérables aux aléas climatiques.

Les réserves statiques sont inconnues.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état quantitatif.

ETAT QUALITATIF

En raison de leur caractère karstique, les eaux souterraines des formations aquifères jurassiques sont fortement vulnérables aux éventuelles pollutions de surface.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état chimique (données de 2010 à 1014).

Sur la bordure Nord-Est du massif, nous disposons de trois champs captant AEP avec des mesures régulières de qualité des eaux reportées dans la base de données ADES :

- Forage de la Font du Thon (10457X0041/HY), commune de Solliès Toucas avec 20 prélèvements entre 2001 et 2015.
- Puits Font d'Ouvin (10457X0118/P), commune de Belgentier avec 12 prélèvements entre 1997 et 2015.
- Source de Gavaudan (10457X0168/HY), commune de Belgentier, avec 17 prélèvements entre 2000 et 2014.

Les eaux sont bicarbonatées calciques. Les teneurs en nitrate sont faibles (< 10 mg/l) et les pesticides absents. Notons seulement des contaminations bactériennes récurrentes.

USAGES

Cette masse d'eau souterraine fait l'objet de plusieurs prélèvements sur sa bordure Nord-Est.

Pour l'AEP :

- Source Gavaudan.
- Puits Font d'Ouvien
- Forage de la Font du Thon.

Pour l'industrie :

- Industrie des eaux de table de Signes.

LES MASSIFS CALCAIRES JURASSIQUES DE CUERS, NEOULES ET ROCBARON (FRDG170)

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La masse d'eau correspond aux séries aquifères allant du Lias au Jurassique supérieur. Elle regroupe des massifs au sein desquels se développent des écoulements souterrains de type fissuré/karstique, à l'origine de nombreuses émergences en bordure de ces massifs.

Les massifs jurassiques sont systématiquement posés sur une semelle de Keuper, supposée imperméable en grand. Très localement, on peut avoir des contacts directs avec les séries gréso-pélitiques du Permien (secteur de Cuers), mais à grande échelle, on peut considérer une absence d'échanges hydrauliques entre cette masse d'eau et la masse d'eau FRDG520 qui forme son mur.

On peut distinguer schématiquement deux ensembles aquifères :

- Le Lias, des dolomies de l'Hettangien aux calcaires à silex du Bajocien inférieur (ensemble d'une épaisseur comprise entre 100 et 150 m).
- Le Jurassique supérieur, depuis les calcaires du Bathonien supérieur jusqu'aux dolomies du Portlandien : de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, lorsqu'il a été érodé, jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

L'ensemble de la série jurassique, dolomitisée ou non, est perméable par fissures.

Pour le Jurassique supérieur, de nombreux signes de karstification sont répertoriés : avens, grottes, dolines… Les observations spéléologiques de la région ont mis en évidence l'existence de paléo karsts datant du Crétacé et du Tertiaire, et de karsts plus récents (Messinien à l'actuel) qui conditionnent les écoulements souterrains actuels. Lorsque l'on sollicite les réseaux karstiques, les perméabilités et les vitesses de propagation des polluants peuvent s'avérer élevées.

Le Lias est réputé moins karstifié mais cette assertion doit être envisagée avec prudence (manque de données concordantes).

Les nappes sont rechargées principalement par l'infiltration des eaux de pluie. Localement, on peut avoir une alimentation non négligeable par des pertes des cours d'eau temporaires en provenance des contreforts hauts, lorsqu'ils sont composés de terrain peu perméables comme les marno-calcaires du Bajocien et du Bathonien inférieur. On observe en effet en général et de façon simplifiée, une géométrie de type synclinale avec un cœur marno calcaire qui va favoriser le ruissellement vers les bordures composées de calcaires perméables.

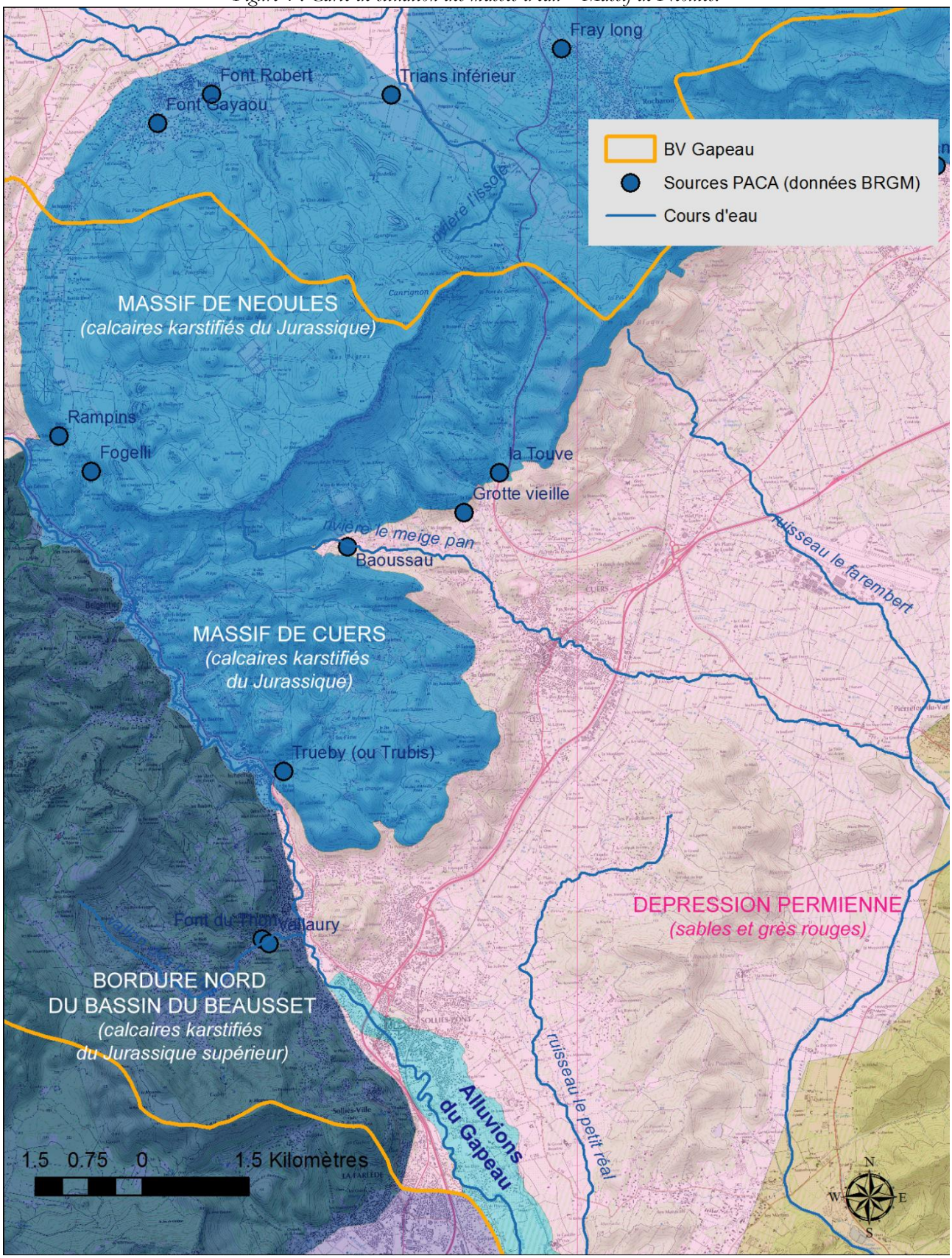
Les principaux exutoires correspondent soit à des sources de débordement, soit à des venues sous alluviales dans les cours d'eau qui entaillent les plateaux calcaires.

D'une manière générale, les sources sont situées en bordure des unités aquifères, aux points topographiquement les plus bas et au contact du mur imperméable (le Bathonien inférieur pour le Jurassique supérieur, les séries hétérogènes du Keuper ou les marno calcaires du Rhétien pour les aquifères du Lias). Notons que localement, ce schéma peut se révéler plus complexe :

- Les marno calcaires du Bajocien et du Bathonien inférieur peuvent être fissurés et localement autoriser des alimentations entre les formations carbonatées du Jurassique supérieur et celles du Lias (alimentations prouvées par traçages).

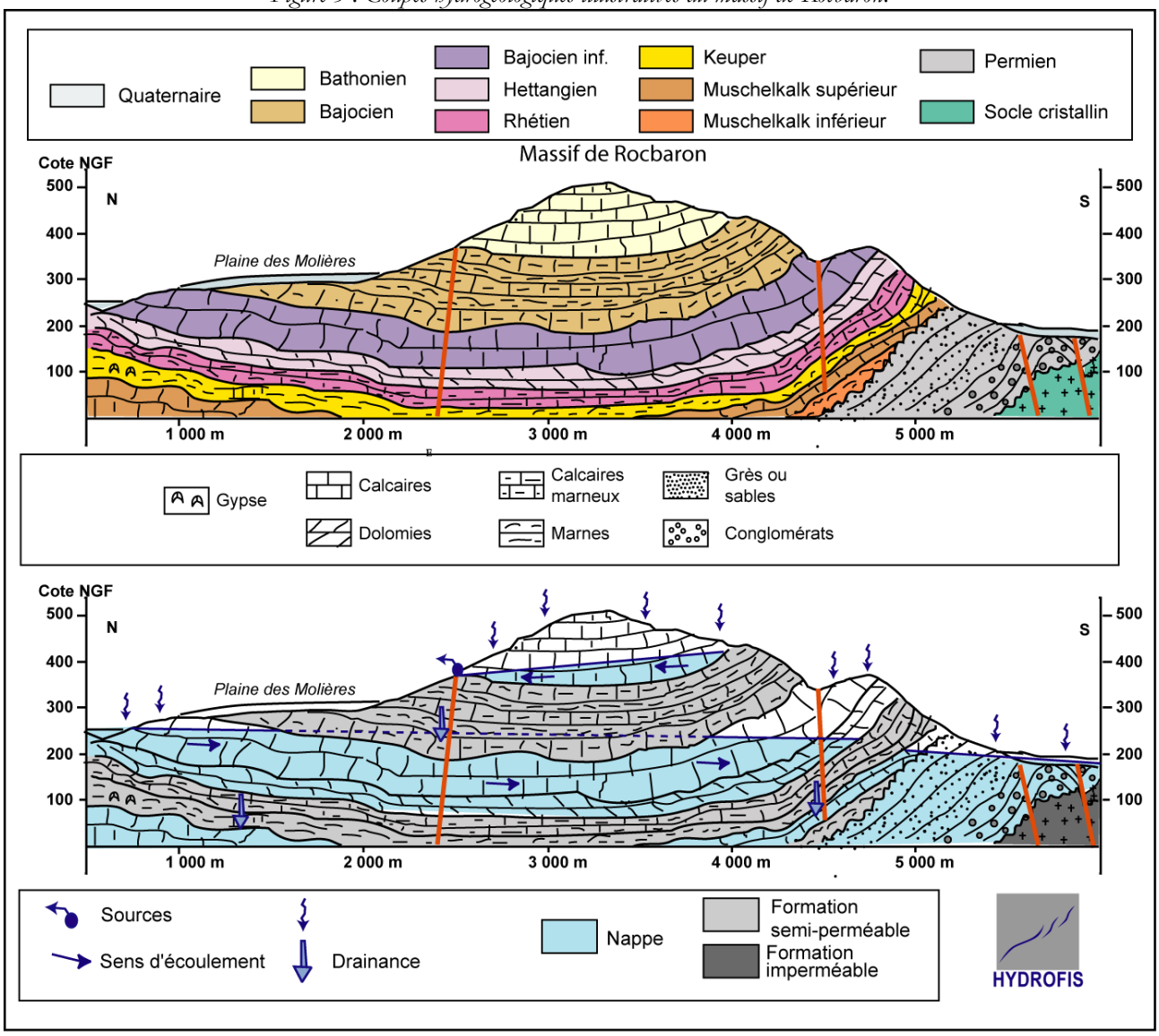
- Les séries hétérogènes du Keuper (Trias supérieur) peuvent être localement aquifères (dolomies, gypses et calcaires) et peuvent ainsi, soit décaler les griffons de sources du Lias en aval dans le versant, soit, s'ils ont été laminés et que leur épaisseur a été fortement réduite, autoriser des alimentations souterraines des unités du Lias vers le Muschelkalk carbonaté.

Figure 4 : Carte de situation des masses d'eau – Massif de Néoules.



A noter qu'une des particularités de ces unités aquifères est l'absence redoutée de réserves hydrauliques. Si on exclut les structures clairement plissées avec des pendages significatifs (cas des synclinaux de Rocbaron et de Cabasse par exemple), on observe en effet des unités jurassiques de type quasi-tabulaire qui correspondent à des radeaux tectoniques charriés vers le Nord sur les horizons plastiques du Keuper. L'absence de réelle structure synclinale, ou de structures faillées type graben, peut impliquer des structures caractérisées par de faibles réserves, ce qui peut être un inconvénient à leur sollicitation par pompage.

Figure 5 : Coupes hydrogéologiques illustratives du massif de Rocbaron.



Les émergences présentent d'importantes variations de débit, avec une période d'étiage correspondant à la fin de l'été. Plusieurs sources ont fait l'objet de jaugeages réguliers au cours de l'année 1970. Les résultats montrent de fortes fluctuations, typiques de transferts rapides au sein de réseaux karstiques, avec un étiage marqué à la fin de l'été. On peut citer la source de Cologne au sud du massif du Val (3 à 170 l/s) et Font Gayaou à Néoules (5 à 280 l/s). Il est généralement difficile de déterminer avec précision le bassin d'alimentation de ces sources, en l'absence de données traçages hydrogéologiques.

Cela est encore plus difficile pour certaines sources qui apparaissent dans des formations géologiques qui peuvent jouer le rôle de relais : alluvions, formations miocènes, éboulis, Keuper…

RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Une partie de ces massifs (Rocbaron, Néoules) et la totalité du massif de Cuers, sont drainés vers le bassin versant du Gapeau.

Les massifs jurassiques sont généralement drainés par une ou plusieurs sources de débit important :

- Massif de Rocbaron : Source de Garouvin (Q_{moy} = 12 l/s, Q_{min}= 1 l/s et Q_{max}= 40 l/s) et source de la Mère des Fontaines (Q_{moy} = 5 l/s, Q_{min}= 1 l/s et Q_{max}= 14 l/s) et de Fontinelles (débit non connu) pour la commune de Carnoules ; la Foux de Piestan (Q_{moy} >10 l/s) sur la commune de Puget-Ville. Toutes ces sources alimentent directement ou indirectement le Réal Martin.

- Massif de Néoules : source de Font Gayaou (Q_{moy} = 65 l/s,Q_{min}= 5 l/s et Q_{max}= 280 l/s), source de Trians (Q_{moy} = 20 l/s,Q_{min} = 1,5 l/s et Q_{max} = 40 l/s) et Font Robert (Q_{moy} = 50 l/s,Q_{min}= 1 l/s et Q_{max}= 960 l/s) au nord ; émergence des Rampins dans la vallée du Gapeau (Q_{moy} = 30 l/s).

- Massif de Cuers : drainage principal supposé vers l'émergence de Trueby (ou Trubis) au sud-ouest, environ 25 l/s en moyenne (mesures entre 1966-67) et la Font Nègre, sur la commune de Solliès Toucas, qui sort dans le lit du Gapeau avec un débit moyen de 150 l/s (1966-1967). La carte hydrogéologique du Caramy et de l'Issole fait apparaître de nombreuses sources secondaires : Touve, Grotte Vieille, La grille, St Emmanuel, Les Tuves, Fontgelli, Font St Jacques, Chanteperdix, Grand Pré ; elles témoignent du caractère diffus des résurgences sur les coteaux au Nord de la dépression permienne.

Les données montrent donc un débit cumulé non négligeable en moyenne annuelle (de l'ordre de 200 l/s), qui viendrait en alimentation du Réal Martin et du Gapeau.

ETAT QUANTITATIF

Nous ne disposons pas d'un suivi piézométrique à titre patrimonial de ces nappes qui alimentent le bassin versant du Gapeau. Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état quantitatif.

USAGES

Ces massifs font l'objet de plusieurs prélèvements.

Pour l'AEP :

- Forage de Valcros.
- Forage des Terres Blanches.
- Source de la Foux.
- Source Maire des Fontaines.

ETAT QUALITATIF

La vulnérabilité à la pollution est forte, en raison du caractère fissuré et karstique des calcaires et dolomies. Les réseaux sont hiérarchisés et ce type de dispositif répercute rapidement les infiltrations sur les impluviums, aux exutoires. Elle est moyenne sous couverture des marno calcaires du Jurassique moyen.

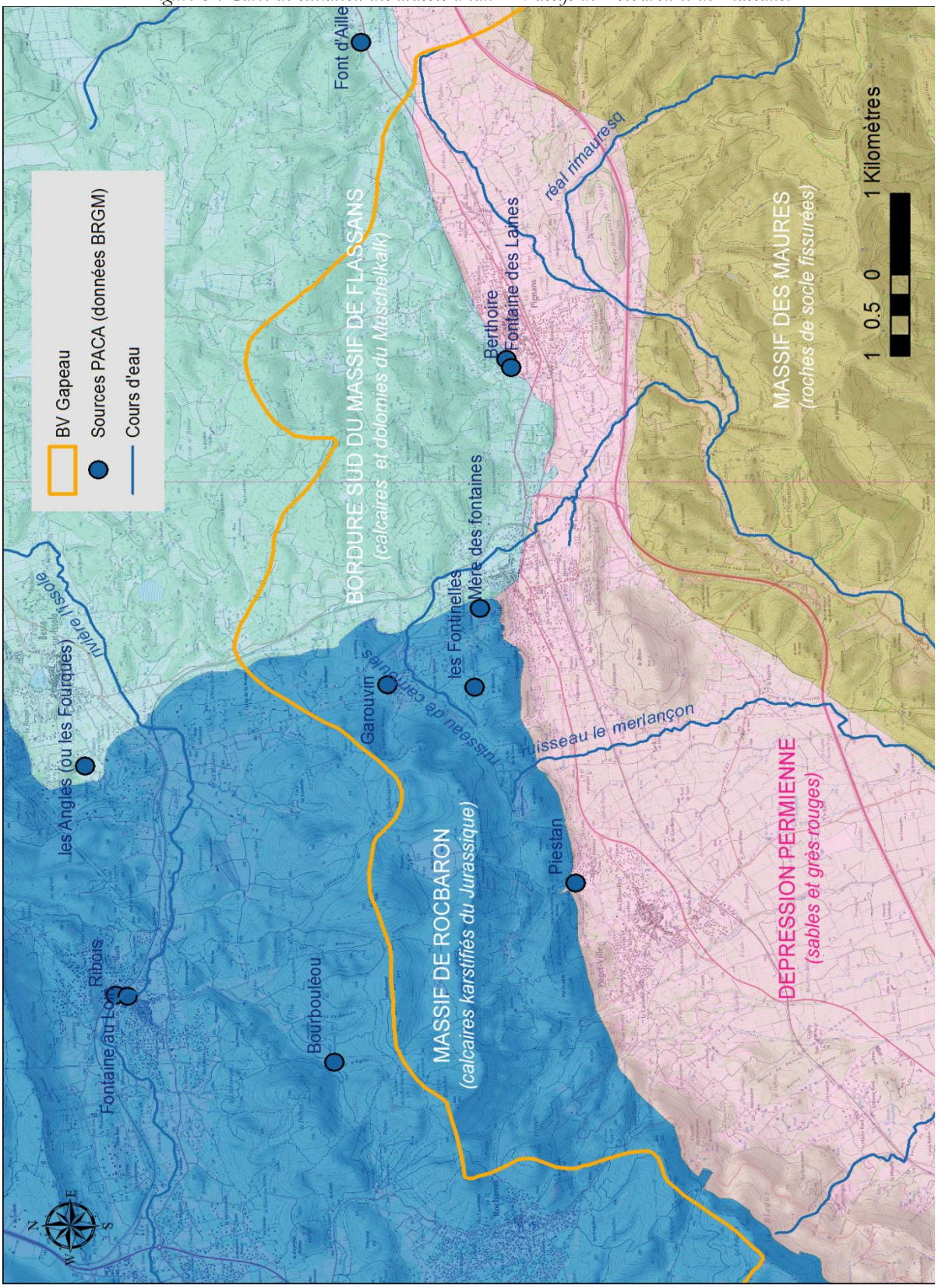
L'eau est réputée de bonne qualité, de type bicarbonatée-calcique et magnésienne (influence des dolomies). Cette masse d'eau est classé comme étant en bon état chimique (données de 2010 à 1014).

Sur la bordure Sud des massifs, nous disposons de trois champs captant AEP avec des mesures régulières de qualité des eaux dans la base de données ADES :

- Forage des Terres Blanches (10461X0081/F), commune de Puget Ville avec 10 prélèvements entre 1997 et 20143.
- Source Maire des Fontaines (10461X0034/HY), commune de Carnoules avec 23 prélèvements entre 1997et 2015.
- Source de la Foux (10461X0037/SOURCE), commune de Puget Ville, avec 19 prélèvements entre 1998 et 2015

Les eaux sont bicarbonatées calciques. Les teneurs en nitrate sont faibles (< 10 mg/l) mais on note la présence épisodique de pesticides (terbuthylazine désethyl, trois fois), sous la norme de potabilité.

Figure 6 : Carte de situation des masses d'eau – Massifs de Rocbaron et de Flassans.



LE MASSIF TRIASIQUE DE FLASSANS (FRDG169)

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Le massif de Flassans, entre Besse-sur-Issole et Le Luc, est situé entre la dépression permienne et la vallée de Brignoles. Il est drainé par l'Issole d'une part, laquelle s'écoule vers le lac de Carcès au nord, et le Réal Martin au sud, qui rejoint le Gapeau vers la ville d'Hyères. L'altitude moyenne du massif est d'environ 300 m NGF.

Le trait principal de cette région est l'allure confuse de la topographie qui résulte pour une bonne part d'une évolution karstique qui a désorganisé le réseau hydrographique et crée un grand nombre de dépressions fermées ou semi-fermées. Le drainage est précaire et, en périodes de fortes pluies, des portions assez importantes de ces cuvettes peuvent être submergées pendant des semaines, voire des mois.

La masse d'eau correspond aux calcaires et dolomies du Muschelkalk.

Les épaisseurs des formations triasiques sont très variables. En effet, la complexité de la structure rend l'estimation des épaisseurs très difficile, en particulier pour les niveaux marneux, fortement tectonisés. Le Trias est en effet caractérisé par une grande complexité de détail. Il est affecté de plis de différentes amplitudes qui se surimposent, et il a de plus été intensément fracturé. Lors de la mise en place de la chaîne provençale, la base du Muschelkalk, de nature gypseuse, a constitué une surface de décollement et favorisé un déplacement de la couverture secondaire vers le Nord. Durant la phase pyrénéo-provençale (optimum au Bartonien), le Muschelkalk se plisse en une série d'anticlinaux, tandis que le Jurassique s'empile en une série de chevauchements facilités par le décollement au niveau du Keuper. Le résultat est la mise en place de grands compartiments peu plissés (massifs jurassiques de Néoules, Rocbaron, Saint-Quinis, Vins…), séparés les uns des autres par de grandes cassures le long desquelles le complexe inférieur (Trias) s'est fortement plissé et étiré.

L'imperméable basal est constitué par le socle gneissique et sa couverture gréseuse du Werfénien et marno-dolomitique du Muschelkalk inférieur.

RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Pour le massif de Flassans, on peut distinguer trois secteurs, où se trouvent les principales émergences issues des calcaires et dolomies du Muschelkalk, sans qu'il soit possible d'en délimiter les contours :

- Exutoires vers le Sud (bassin versant du Gapeau)- Sources de Carnoules, Pignans et Gonfaron : Mère des Fontaines (débit capté), source des platanes (débit moyen ~13 l/s), fontaine des Laines et source de Berthoire, sources de Font l'Aille (débit moyen : 80 l/s) et Saint-Tiburce (~ 8 l/s) ;

- Exutoire vers le nord-est - Source du Luc (hors bassin versant du Gapeau): sources de Gamaton (~ 15 l/s) et d'Anglaisasse (débit moyen : 35 l/s) ;

- Exutoire vers le nord-ouest, dans la vallée de l'Issole (hors bassin versant du Gapeau): sources de Colombier (~ 20 l/s) et de Raya (~ 8 l/s), à Flassans ; fontaine des Meuniers (~ 5 l/s) plus en aval, et drainage supposé par l'Issole en amont de Cabasse.

Ce sont les exutoires principaux au Sud de la masse d'eau qui soutiennent les écoulements du Réal Martin. Ils présenteraient un débit annuel moyen de l'ordre de 100 l/s en régime influencé. Rappelons en effet que certaines sources sont captées et qu'il existe aussi des prélèvements par forage dans cette nappe. L'impluvium pourrait être estimé autour de 30 km² et le débit moyen non influencé devrait être plus proche de 200 l/s.

A ce sujet, la carte hydrogéologique du Caramy et de l'Issole fait apparaître de nombreuses sources secondaires : source des Platanes, Berthier, Pré des Anes, St Pierre, le Cresson, Cam Pages ; elles témoignent du caractère diffus des résurgences sur les coteaux au Nord de la dépression permienne.

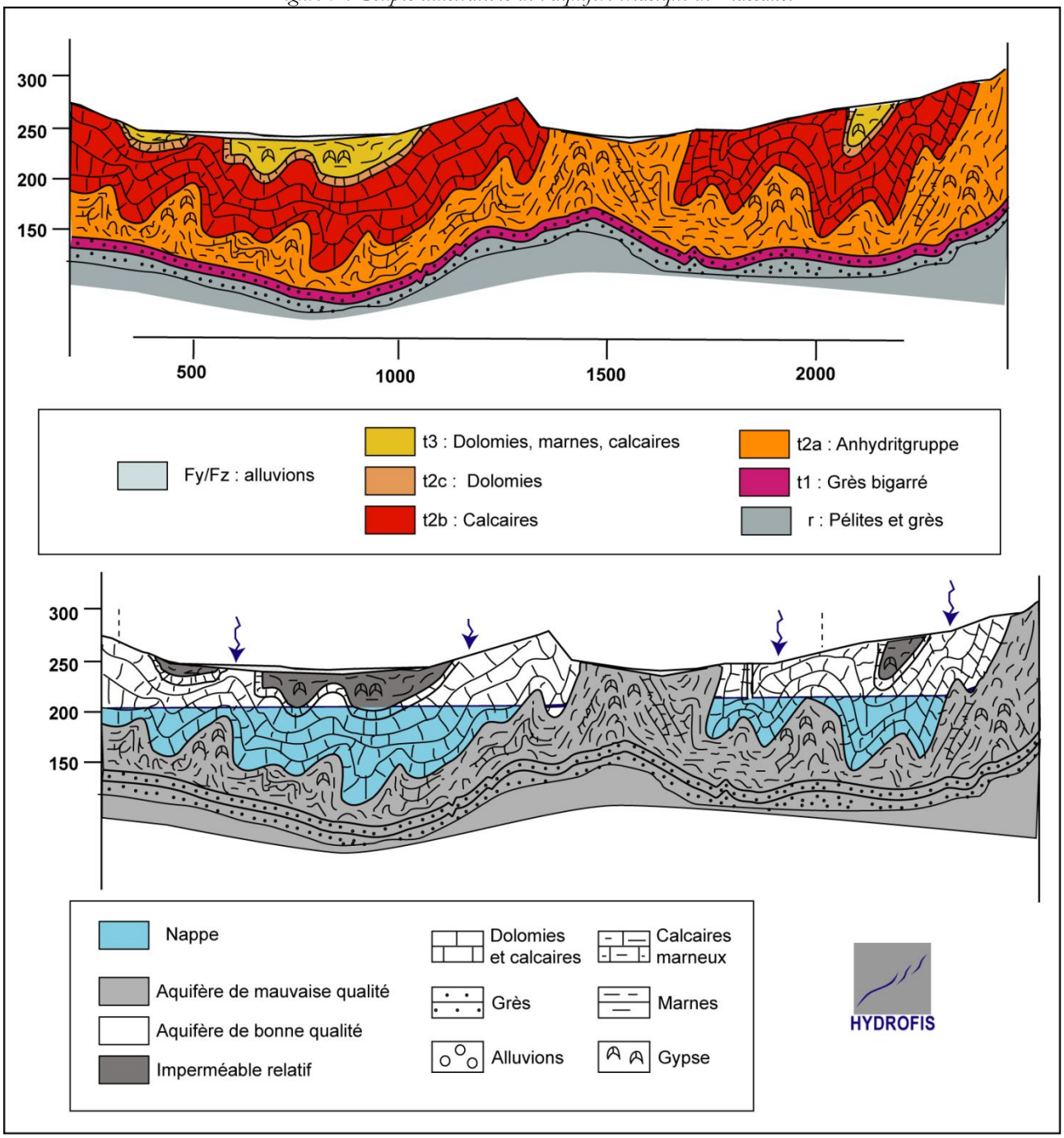
ETAT QUANTITATIF

Les nappes sont rechargées principalement par l'infiltration des eaux de pluie, secondairement par des pertes des rivières en provenance des contreforts hauts formés par le Keuper et les aquifères jurassiques qui dominent l'avant pays provençal.

Dans le massif de Flassans, le niveau piézométrique se trouve à une cote généralement comprise entre 230 et 270 m NGF.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état quantitatif.

Figure 7 : Coupes illustratives de l'aquifère triasique de Flassans.



USAGES

Cette masse d'eau fait l'objet de plusieurs prélèvements sur sa bordure Sud.

Pour l'AEP :

- Sources dites de Carnoules (export SCP).
- Forage de l'Ecluse.
- Source des Laines.
- Forage des Laines.

ETAT QUALITATIF

Le Muschelkalk a subi une karstification intense. Il présente donc une perméabilité en grand, lié 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 dissous des niveaux de gypses).

La vulnérabilité à la pollution est forte, en raison du caractère fissuré et karstique des calcaires et dolomies. Elle est moyenne sous couverture marneuse du Keuper.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état chimique (données de 2010 à 1014).

Dans le détail, sur la bordure Sud du massif, nous disposons de trois champs captant AEP avec des mesures régulières de qualité des eaux dans la base de données ADES :

- Forage de l'Ecluse (10461X0065/F), commune de Carnoules avec 12 prélèvements entre 2007 et 2013.
- Fontaine des Laines (10462X0025/SOU), commune de Pignans avec 8 prélèvements entre 1998 et 2013.
- Forage des Laines (10462X0074/FEX1), commune de Pignans, avec 11 prélèvements entre 2005 et 2013.

Les eaux sont bicarbonatées calciques, de relativement bonne qualité. Le seul point remarquable est la teneur élevée en sulfates (de 50 à 200 mg/l), expliquée par la présence de gypses au toit et au mur de l'aquifère.

Les teneurs en nitrate sont faibles (< 10 mg/l) mais on note la présence épisodique de pesticides (terbuthylazine désethyl, atrazine déisopropyl, simazine, glyphosate), généralement sous la norme de potabilité (2 exceptions sur 31 analyses). On observe aussi de façon répétée des traces de pollution chimique sur le forage des Laines (Trichloroéthylène avec des teneurs comprises entre 1 et 8 µg/l).

Rappelons la présence de vignobles étendus sur l'impluvium de cette masse d'eau.

2.3 LES AQUIFERES INTERMEDIAIRES

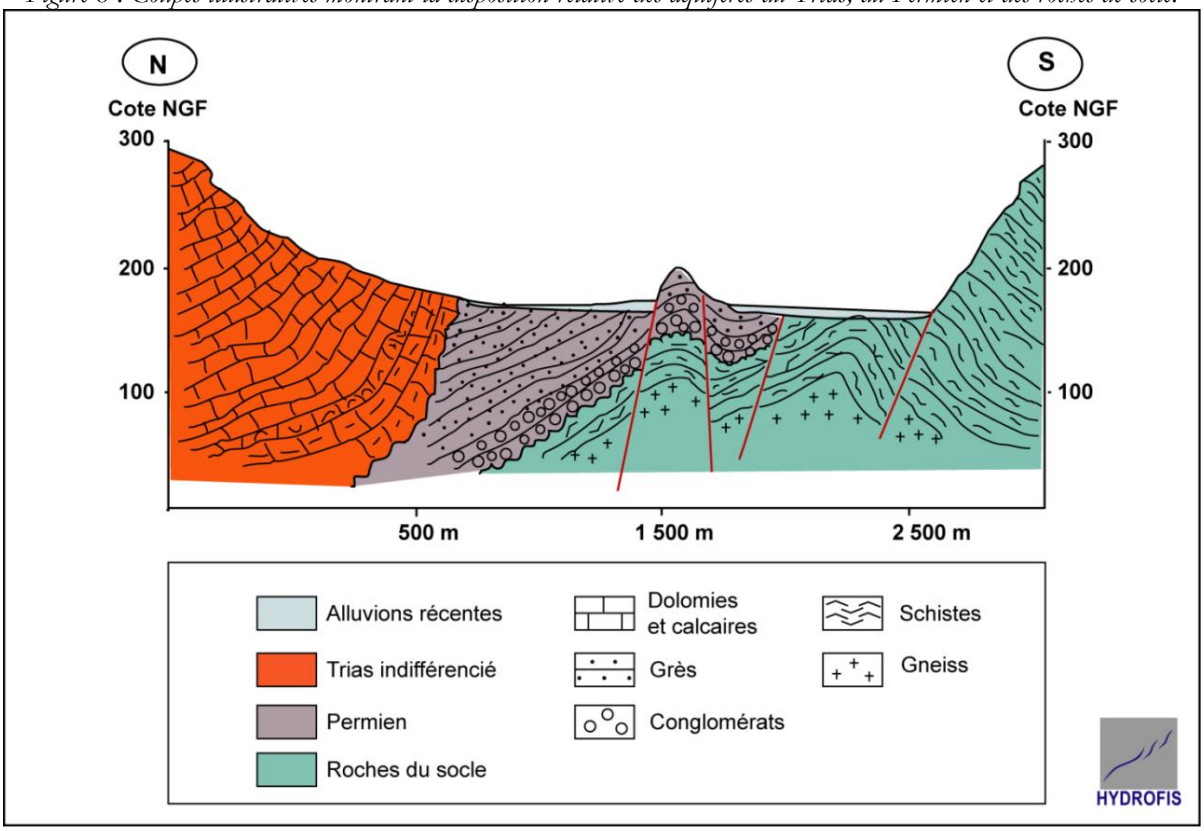
LES GRES ET PELITES DU PERMIEN (FRDG520)

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Les formations géologiques de la dépression permienne sont essentiellement détritiques, constituées principalement de grès et d'argilites ou pélites (roches détritiques à grains fins, argileuses). L'épaisseur de l'ensemble du Permien serait localement supérieure à 1000 m. Notons que l'on a regroupé les séries du Permien avec les grès bigarrés du Trias qui sont difficiles à distinguer du Permien. Ils sont constitués par des argiles schisteuses rouges, et des grès, d'une épaisseur moyenne d'environ 60 mètres. Les grès rouges ou grisâtres, plus ou moins grossiers, dominent à la base. Ces formations sont recouvertes des formations quaternaires. Il s'agit essentiellement des alluvions récentes et/ou anciennes déposées par les cours d'eau. Leur épaisseur est souvent de l'ordre de 10 m.

Il s'agit de faciès peu perméables. Les grès et pélites du Permien, ainsi que les séries du Trias inférieur, sont en position basse dans la plaine et elles sont au contact des alluvions quaternaires qui les drainent. Elles sont en partie alimentées par les séries carbonatées du Muschelkalk.

Figure 8 : Coupes illustratives montrant la disposition relative des aquifères du Trias, du Permien et des roches de socle.



Les pélites constituent des formations peu perméables, avec des perméables variant de 10^{-5} à 10^{-7} m/s. Le Permien est considéré comme un ensemble peu perméable, vis-à-vis des formations alluviales, ou des calcaires et dolomies du Muschelkalk en bordure nord de la masse d'eau. De nombreuses émergences issues de l'aquifère karstique du Muschelkalk, apparaissent au contact du Permien et/ou du Trias inférieur. Ces sources peuvent présenter un débit considérable (10 à 100 l/s) et sont parfois captées pour l'alimentation en eau potable (AEP) : Gonfaron, Le Luc, Les Arcs… Toutefois, plusieurs niveaux aquifères d'intérêt local peuvent apparaître au sein des formations permiennes. La zone d'altération superficielle des formations permiennes peut être le siège d'écoulements de sub-surface, captés par de nombreux puits. Par ailleurs, les niveaux gréseux ou

conglomératiques intercalés dans les argilites peuvent présenter un intérêt aquifère localement, notamment à la faveur de fractures orientées Nord – Sud ; les nappes associées peuvent localement être captives. Les eaux peuvent être très minéralisées avec des teneurs en sulfates et en chlorures qui indiquent alors une alimentation par les eaux de Muschelkalk inférieur.

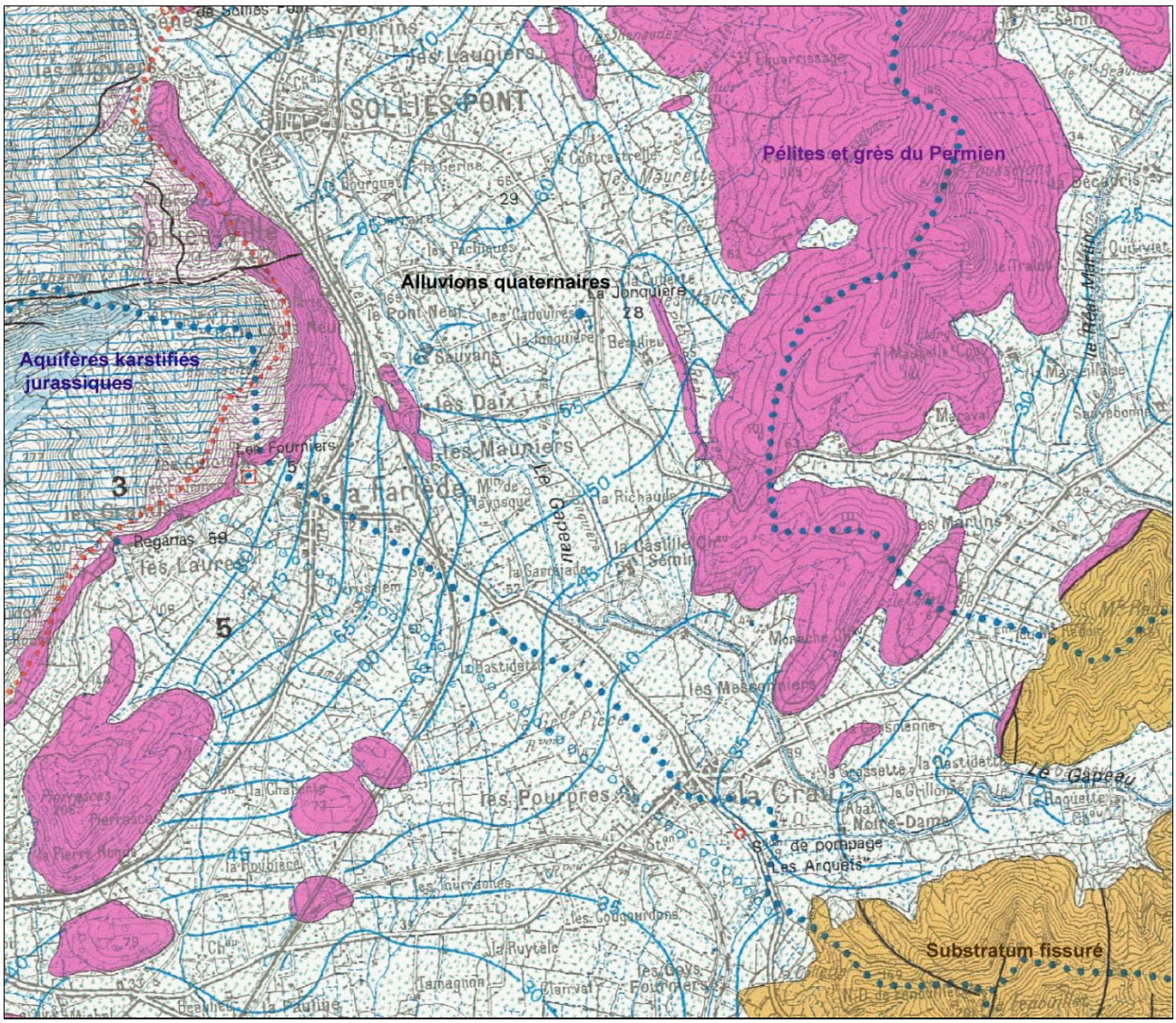
RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Les relations avec les cours d'eau sont mal connues car peu étudiées.

Il est évident que les cours d'eau (et leurs alluvions associées) qui sillonnent la dépression permienne (Réal Martin, Petit Réal, Meige Pan, Farembert,…) sont les exutoires de ces nappes. C'est d'ailleurs ce que montre de façon indiscutable la carte hydrogéologique de Toulon : les isopièzes indiquent clairement une alimentation des recouvrements quaternaires par les sables et grès du Permien ; et ces recouvrements alimentent le réseau de cours d'eau superficielle. C'est un avis partagé par Travi (1976).

Cependant nous ne disposons pas de mesures détaillées permettant d'estimer ces apports et leur variabilité dans le temps.

Figure 8 : Extrait de la carte hydrogéologique de Toulon (document BRGM) : relations entre Permien et Quaternaire.



ETAT QUANTITATIF

Nous ne disposons pas d'information sur les réserves statiques et dynamiques des nappes abritées par les grès et pélites du Permien.

Il n'y a pas de suivi patrimonial des niveaux de nappe dans les aquifères permiens. Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état quantitatif.

USAGES

Cette masse d'eau fait l'objet de plusieurs prélèvements.

Pour l'AEP :

- Forage du Haut Ruol.
- Forage de la Foux.

Pour l'industrie :

- Forage de la cave du Domaine de Listel..
- Forage du Redouron (<10 000 m^3/an).

ETAT QUALITATIF

Il s'agit de formations peu aquifères, ce qui implique des coefficients d'infiltration faibles. Elles sont souvent recouvertes d'un manteau pluri-métriques de sols récents, peu ou pas perméables, qui correspond soit aux horizons d'altération de ces formations, soit à des colluvions en provenance des coteaux.

On peut qualifier les masses d'eau de peu vulnérables aux sources de pollution en sub surface.

Il n'y a pas de station de suivi patrimonial de la qualité de cette masse d'eau. Cette masse d'eau est considérée par défaut comme étant en bon état chimique.

Cependant, nous disposons de quelques champs captant AEP avec des mesures régulières de qualité des eaux dans la base de données ADES :

- Forage du Haut Ruol (10458X0051/FEX1), commune de Puget Ville avec 5 prélèvements entre 2006 et 2014.
- Forage de la Foux (10458X0089/F), commune de Cuers avec 10 prélèvements entre 1999 et 2013.

Les eaux sont bicarbonatées calciques.

On observe des contaminations bactériennes relativement fréquentes. Les teneurs en nitrate sont faibles (< 10 mg/l) mais on note la présence épisodique de pesticides (terbuthylazine désethyl, atrazine déisopropyl), sous la norme de potabilité.

Un point remarquable est la teneur élevée en sulfates (de 30 à 150 mg/l) et en chlorures (de 10 à 40 mg/l), expliquée des alimentations en provenance des calcaires jurassiques sur les coteurs Nord, qui se font au travers des horizons gypseux du Trias.

LES ROCHES FISSURES DU MASSIF DES MAURES (FRDG609)

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Le massif des Maures est limité au Nord par la dépression permienne qui va de Fréjus à Hyères, en passant par Gonfaron. Il est limité au Sud par la Mer. L'altitude du massif est généralement comprise entre 200 et 600 m, avec un point culminant à 780 m (la Sauvette).

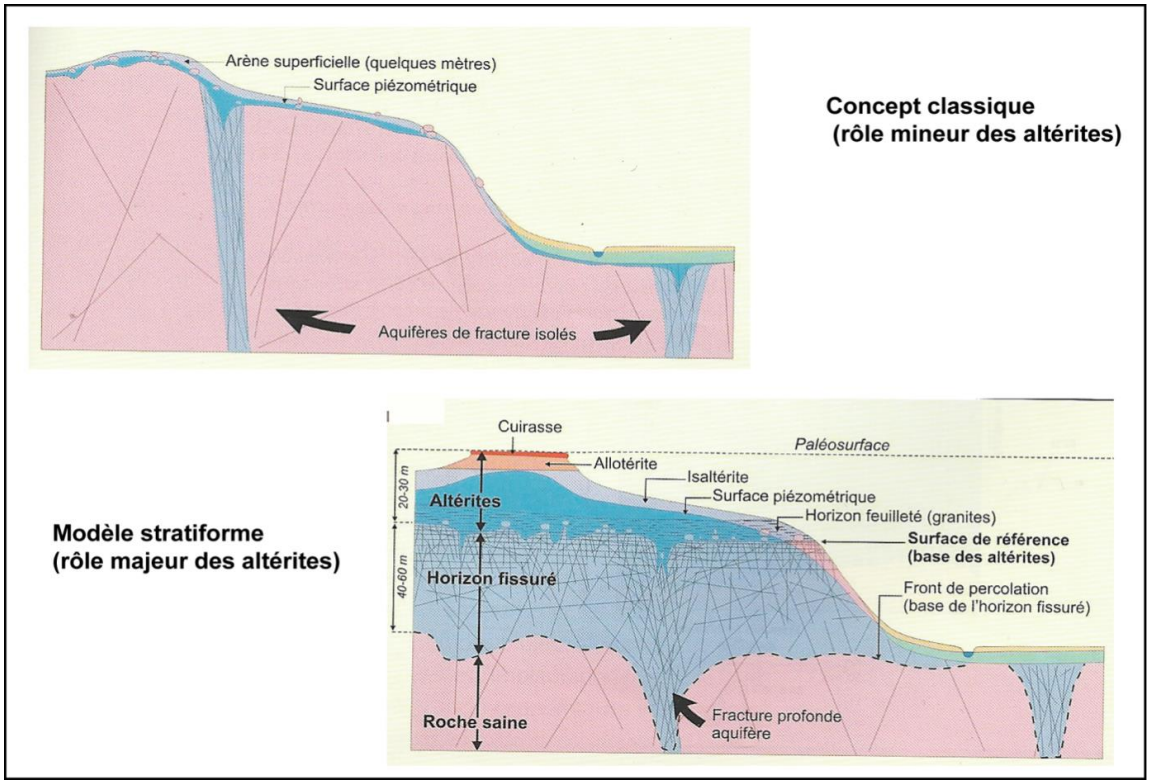
Les massifs sont constitués essentiellement de terrain cristallins et métamorphiques (granite, gneiss), volcaniques (rhyolites, brèches et tufs) et parfois sédimentaires : pélites et arkoses d'âge permien. Il s'agit donc d'aquifères de type fissuré. Dans le massif des Maures, les terrains sont parfois recouverts d'alluvions.

Ces formations de socle sont des ensembles géologiques dépourvus d'aquifère majeur reconnu. Les principaux écoulements d'eaux souterraines, sont des écoulements peu profonds, qui se produisent généralement dans la partie superficielle altérée.

Des ressources en eau, relativement superficielles, locales et discontinues peuvent toutefois exister : elles dépendent du degré de connectivité du réseau de discontinuités ouvertes et donc du degré de compartimentation des roches de socle. Dans les gneiss ou les niveaux amphibolitiques intercalés dans les micaschistes, des zones d'écoulements préférentiels s'établissent ainsi au profit de fractures. Elles peuvent alimenter de petites sources. La ressource reste essentiellement superficielle car les fissures ouvertes sont majoritairement situées dans les parties décomprimées des massifs. Il existe aussi cependant des réseaux aquifères profonds mais ils sont difficiles à identifier.

Les aquifères sont principalement rechargés par infiltration des eaux météoriques. Dans l'ensemble, la ressource est très faible, très sensible à la sècheresse en raison de son caractère superficiel.

Figure 9 : Modèles conceptuels des aquifères de socle (d'après Lachassagne et Wyns, 2005).



Une des clés du comportement hydrogéologique est le rapport entre perméabilité des altérites et perméabilité de l'horizon fissuré :

- Si les altérites présentent des perméabilités très supérieures à celles de l'horizon fissuré sous-jacent, il y aura développement de nappe dans les altérites avec des sources au contact socle/altérite (cas supposé du plateau de Méginant). On peut alors avoir un stockage dans les altérites et donc un soutien au cours d'eau à l'étiage.

- Si l'horizon fissuré présente des perméabilités équivalentes ou supérieures à celles des altérites, alors on observera un drainage des altérites vers une nappe plus profonde avec des niveaux piézométriques guidés par les rivières qui bordent les plateaux. Les sources sont alors majoritairement situées dans le socle et en position basse dans les parois qui limitent les plateaux (cas de la bordure Sud du plateau de Craponne). Il se peut que localement, dans des secteurs caractérisés par un horizon fissuré moins perméable, des nappes soient perchées ; elles présenteront alors de faible volume d'eau stockée.

Une autre caractéristique très importante de l'hydrogéologie des aquifères fissurés est le degré de compartimentation des eaux souterraines liés à la connectivité du réseau de discontinuités. Si le réseau est dense et étendu, on aura alors une nappe de grande extension ; dans le cas inverse, on observera une multitude de petites nappes, isolées les unes des autres.

RELATIONS AVEC LES COURS D'EAU

Les sources sont nombreuses et disséminées sur toute la surface de la masse d'eau. En général, les débits sont faibles (<10 l/s à l'étiage). On trouve dans la littérature mentions de quelques sources remarquables sans que leur débit d'étiage soit précisé :

- Source de Rouve Gavot à Collobrières.
- Source de l'Obavie à Collobrières.
- Source Notre Dame des Anges à Pierrefeu.

Localement, certains exutoires peuvent correspondre à des venues sous alluviales dans les séries quaternaires en recouvrement.

Ces aquifères fournissent donc un débit de soutien d'étiage assez limité aux cours d'eau.

ETAT QUANTITATIF

L'état des connaissances est faible. De par la faible productivité supposée des aquifères, peu d'études se sont intéressées à cette masse d'eau. Il n'y a pas non plus de cartographie de synthèse sur les sources.

Il n'y a pas d'estimation fiable des réserves statiques et renouvelables.

Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état quantitatif.

USAGES

Cette ressource en eau est prélevée sur les seules sources de Collobrières (AEP).

ETAT QUALITATIF

C'est une ressource relativement superficielle caractérisée par une faible épaisseur de zone non saturée. La ressource est donc très vulnérable.

C'est la source de Rouve Gavot qui sert de référentiel du suivi patrimonial de la qualité des eaux. Cette masse d'eau est classée comme étant en bon état chimique.

Dans le secteur, on dispose de quatre champs captant AEP, tous situés sur la commune de Collobrières, avec des mesures régulières de qualité des eaux souterraines dans la base de données ADES :

- Sources du Rouve Gavot (10467x0016/hy), avec 39 prélèvements de 2001 à 2015.
- Source dite des Maures (10467x0017/source), avec un prélèvement en 2010.
- Source de l'Obavie (10467x0018/hy), avec 5 prélèvements de 2000 à 2010.
- Puits du Greou (10467x0026/puits), avec 2 prélèvements en 2009 et 2014.

Les analyses montrent des eaux de bonne qualité, conformes aux normes de potabilité.

2.4 LES ALLUVIONS DU GAPEAU

GENERALITES

GEOLOGIE

La masse d'eau souterraine des alluvions du Gapeau se situe dans le département du Var, au nord-est de Toulon. Elle s'étend de Solliès-Pont en amont à la mer en aval, en passant successivement dans les plaines de la Crau et d'Hyères. L'altitude diminue progressivement d'amont en aval : elle est de 75 m NGF environ à Solliès-Pont, de 40 m NGF à La Crau et varie de 0 à 10 m NGF en plaine d'Hyères.

Les alluvions du Gapeau se sont mises en place à la suite de changements d'axes du cours d'eau au cours des derniers millénaires, en liaison avec les variations climatiques et le niveau de la mer. Leur structure est complexe, liée en grande partie à l'existence de sillons, correspondant à d'anciens cours du Gapeau. Les alluvions récentes du Gapeau reposent sur le substratum permien des Maures : grès, pélites et argilites. Dans la zone littorale, ce substratum est très profond (-90 m d'après des sondages).

Les alluvions récentes du Gapeau sont développées à l'aval de Solliès-Pont. Elles sont datées du Würm, et sont caractérisées par leur hétérogénéité : graviers, sables, sables argileux et argiles. Leur épaisseur varie de 5 à 25 m. Près du littoral, dans la plaine d'Hyères, le faciès alluvial devient marin (sables fins) et une couche de limons, d'une épaisseur supérieure à 4 m, constitue la partie supérieure des alluvions.

HYDROGEOLOGIE

Cette masse d'eau se caractérise donc par une alternance de niveaux perméables aquifères discontinus (lentilles sableuses et caillouteuses), et de niveaux imperméables (argiles et limons).

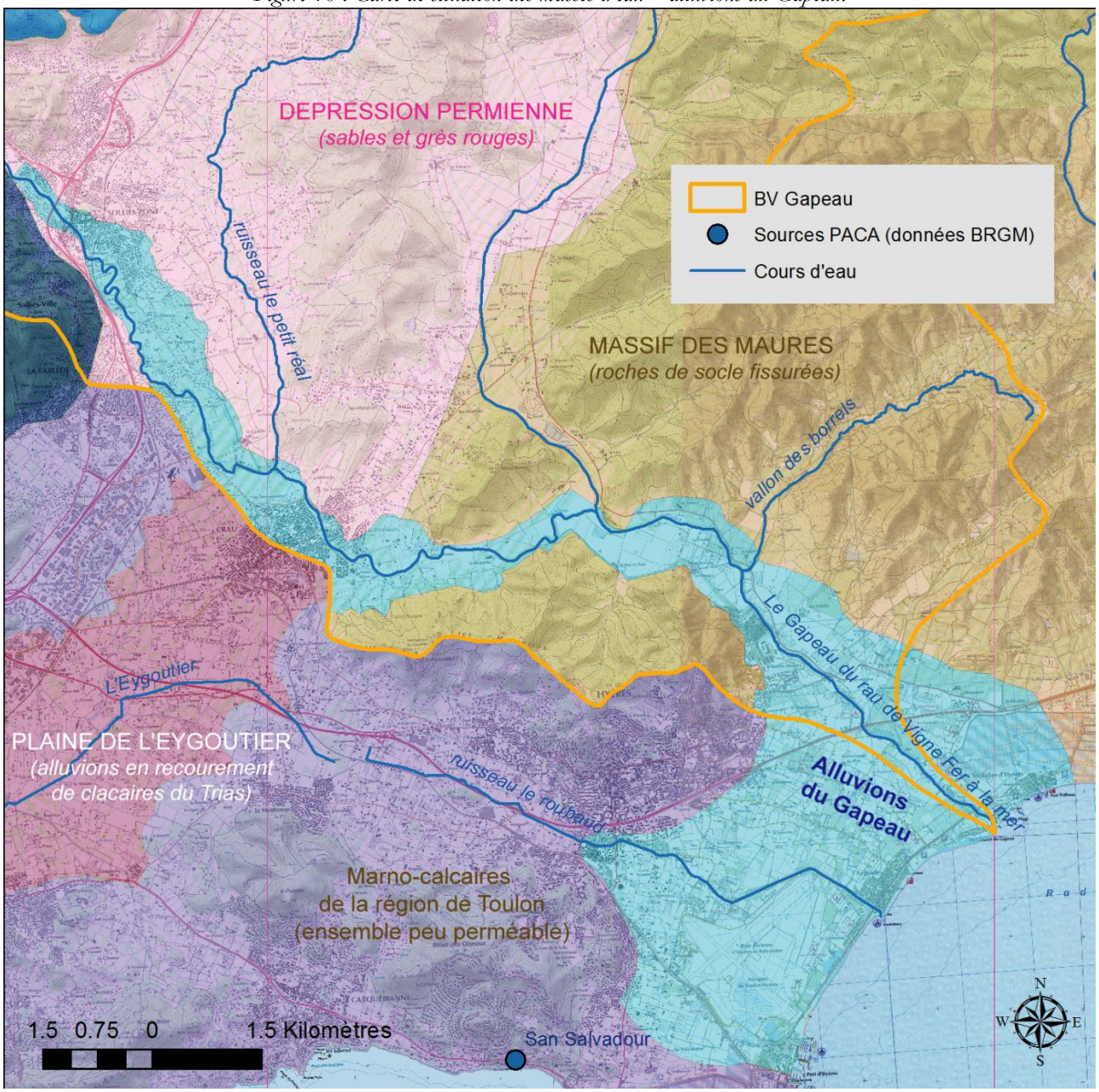
Au sein des alluvions récentes du Gapeau, l'hétérogénéité des formations et la présence de lentilles argileuses provoque localement l'isolement de plusieurs nappes superposées, notamment dans la plaine d'Hyères. La ressource en eau est ainsi compartimentée, localisée au sein des passées perméables (perméabilité de l'ordre de 10^{-2} m/s).

La recharge de l'aquifère s'effectue par les précipitations, par les apports des coteaux et de l'encaissant, et localement par les eaux de surface (Gapeau et affluents, canaux).

Les nappes sont libres, excepté dans la partie littorale (plaine d'Hyères) où la nappe est captive sous les limons de surface. Les niveaux piézométriques sont très proches de la surface : ils varient entre 2 et 5 m de profondeur. A titre d'exemple, le niveau piézométrique se situe à une profondeur moyenne de -5 m à La Crau. Les fluctuations saisonnières dans la basse plaine alluviale sont directement liées aux sollicitations de la nappe : hautes eaux au printemps, basses eaux en été. Les amplitudes sont comprises entre 1 et 2 m en moyenne, et sont décroissantes vers l'aval (0,2 à 0,5 m). Des axes d'écoulements préférentiels suivent les paléo chenaux creusés par les divagations du lit du cours d'eau.

Les eaux souterraines s'écoulent globalement du nord-ouest vers le sud-est, suivant le sens d'écoulement du Gapeau, car elles sont étroitement liées à celui-ci. Globalement, le Gapeau draine la nappe alluviale. En période d'étiage, et en relation avec les prélèvements en nappe, cet échange peut localement s'inverser. Ces relations sont détaillées ci-après.

Figure 10 : Carte de situation des masses d'eau – alluvions du Gapeau.



SECTORISATION

L'examen attentif des cartes géologiques et des reconnaissances de terrain, permettent de proposer une sectorisation de la masse d'eau en deux parties :

- Gapeau amont confluence Réal Martin.
- Gapeau aval confluence.

En effet, cette zone de confluence est caractérisée par un développement alluvial très faible (quelques mètres au plus), avec les cours d'eau qui coulent sur le substratum rocheux (roches fissurées).

Cela signifie qu'il **y a une déconnexion hydraulique entre la nappe située en amont du verrou rocheux et celle située à l'aval**. C'est un point important pour la suite de cette étude : il faudra discuter des enjeux des volumes prélevables secteur par secteur.

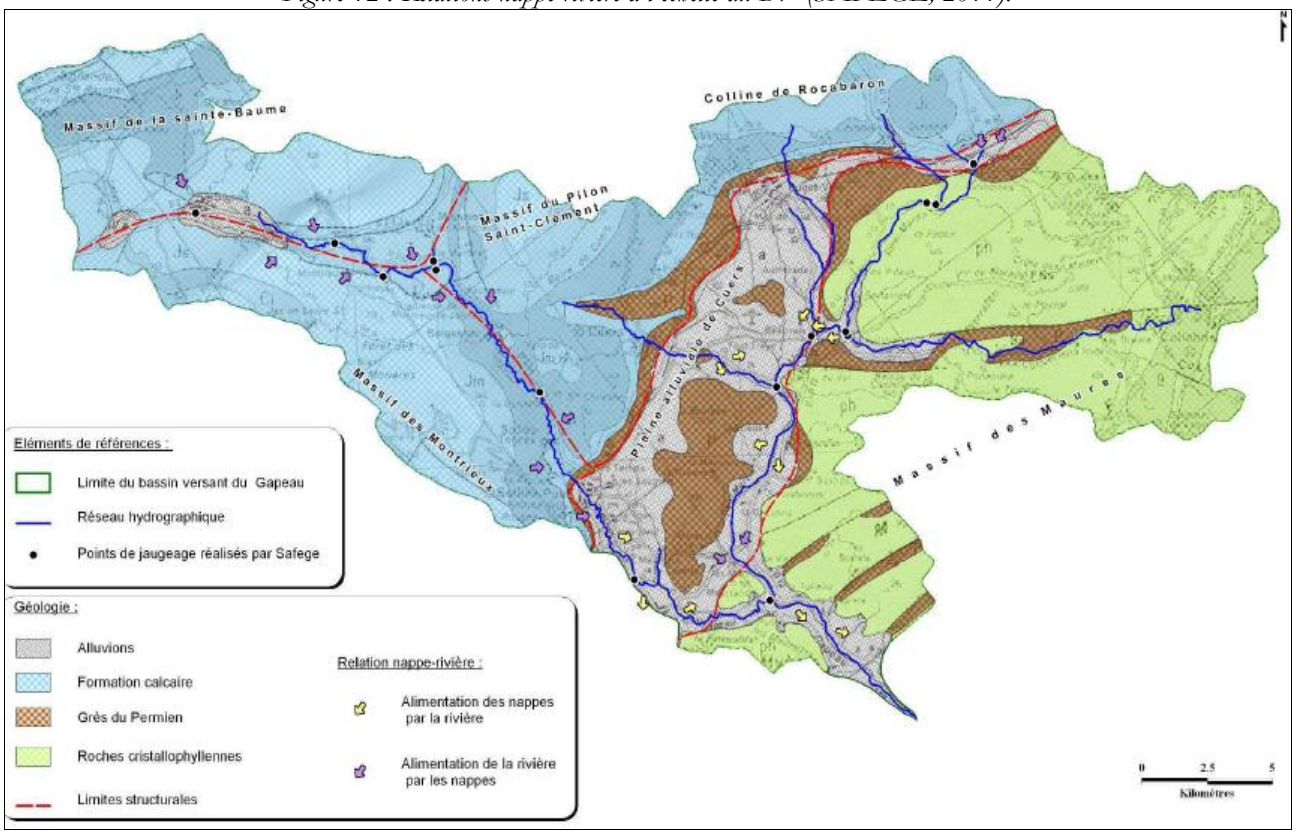
Figure 11 : Zone de confluence Gapeau- Réal Martin.

RELATIONS ENTRE LA NAPPE ET LE COURS D'EAU

Le schéma le plus complet des relations entre la rivière et sa nappe alluviale est proposé par SAFEGE (2011).

Dans ce schéma, on note une contribution importante des eaux souterraines au débit du Gapeau et du Real Martin en tête de bassin versant. Il s'agit d'alimentation directe, via des sources, ou indirecte, via des écoulements sous-alluviaux en provenance des aquifères karstiques du Jurassique supérieur, du Jurassique moyen et inférieur, et des aquifères carbonatés du Trias (Muschelkalk).

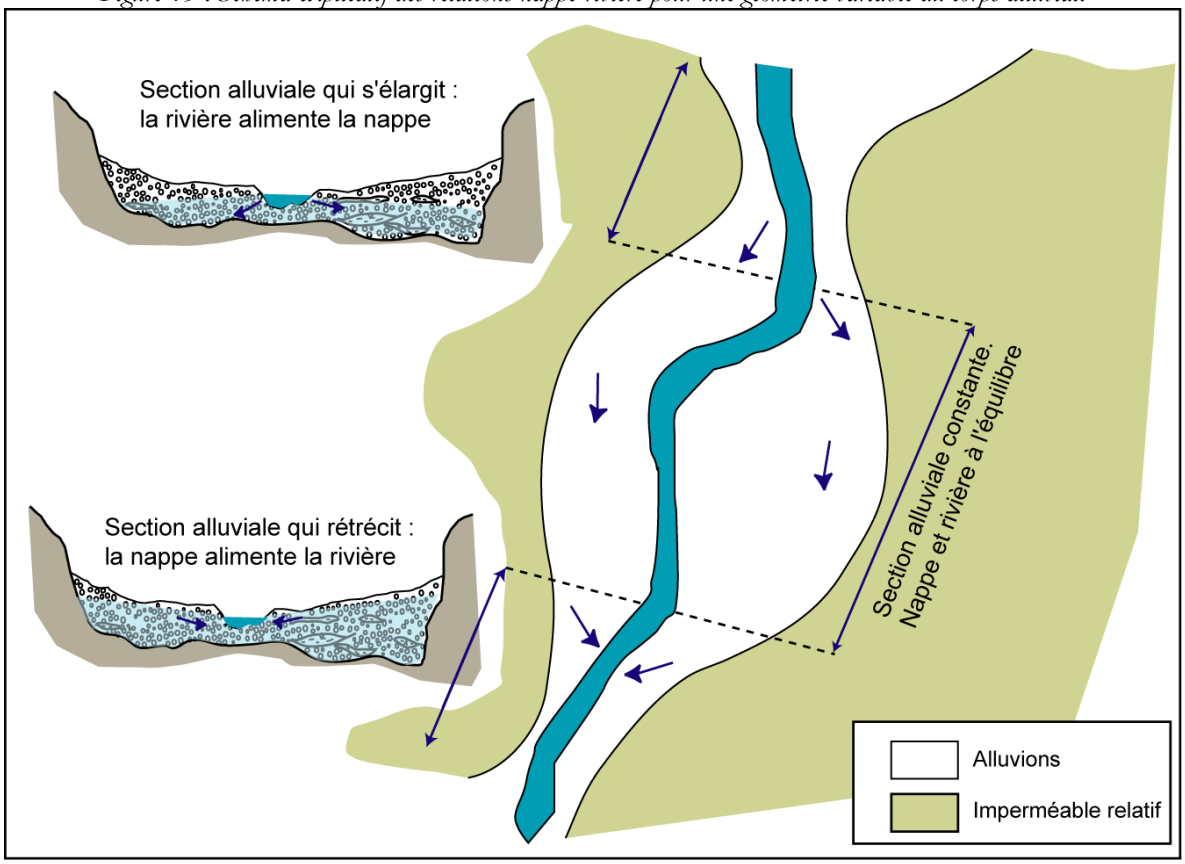
Figure 12 : Relations nappe rivière à l'échelle du BV (SAFEGE, 2011).



Par contre, SAFEGE (2011) indique que dans la plaine centrale (dépression permienne) et dans sa partie aval, globalement, les cours d'eau perdent de l'eau au profit des nappes alluviales. Une telle observation peut s'expliquer de plusieurs manières :

- Un impact des forages qui prélèvent en nappe et qui localement peuvent amener à une suralimentation de la nappe par la rivière (cas de la partie aval du Gapeau, au niveau des prélèvements de la ville d'Hyères).
- Une situation hydrogéologique particulière au niveau de la Crau avec un flux souterrain en provenance de la nappe alluviale du Gapeau vers la nappe de l'Eygoutier. Ce flux conduit à une alimentation forcée de la nappe par le Gapeau sur ce secteur.
- Des effets de géométrie des corps alluviaux qui peuvent conduire en tête de bassin à une perte du cours d'eau au profit de la nappe, et en fermeture du même bassin à une suralimentation du cours d'eau par la nappe (cf. schéma explicatif ci-dessous).

Figure 13 : Schéma explicatif des relations nappe-rivière pour une géométrie variable du corps alluvial.



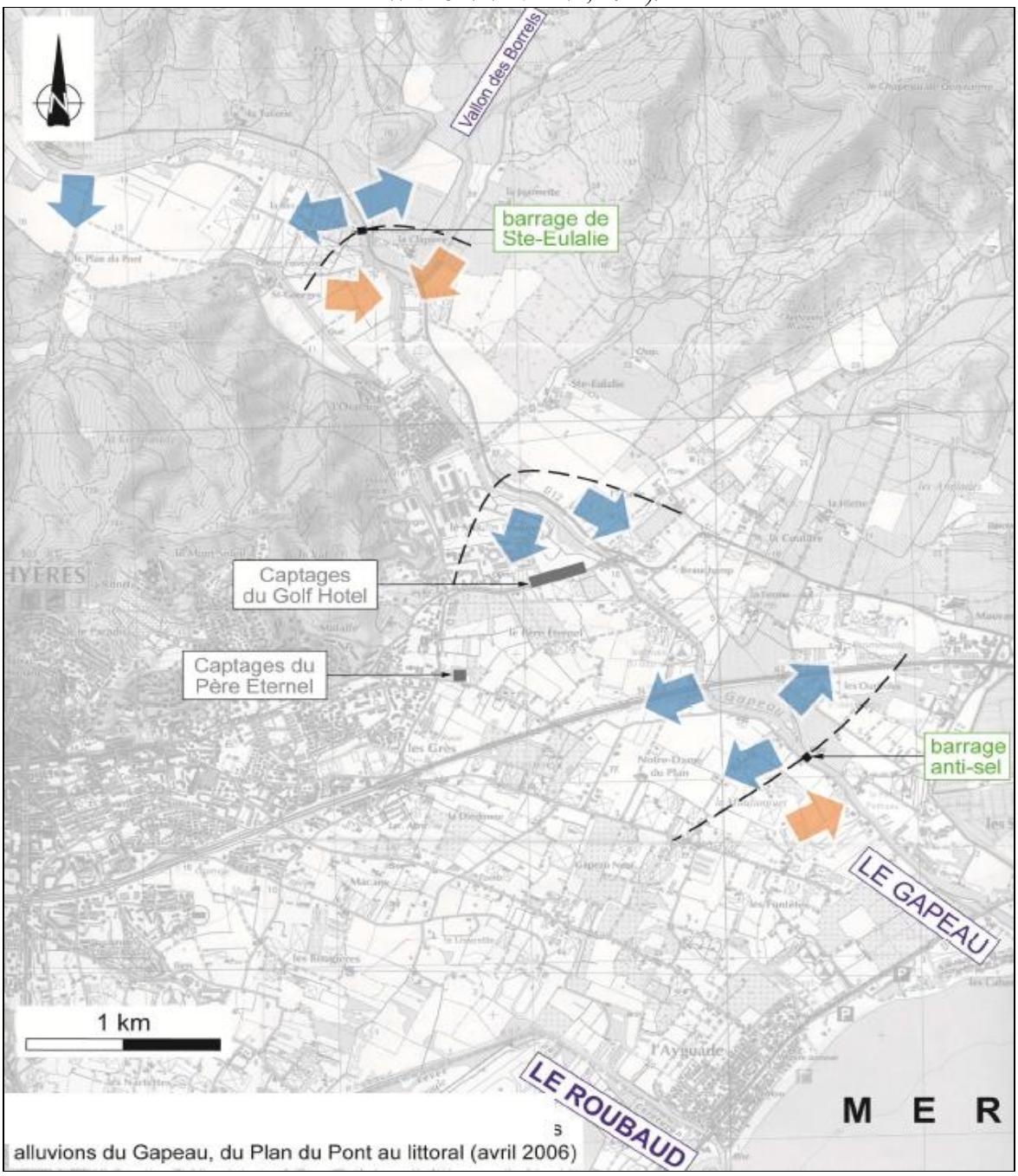
C'est clairement le cas du Real Martin entre l'aval immédiat de Pierrefeu et la confluence avec le Gapeau.

Le seul secteur qui pose un problème d'interprétation est le secteur d'alluvions situé dans l'amont immédiat de Pierrefeu. Les cours d'eau seraient perdants au profit des nappes ; il a même été observé des assecs complets du Réal Martin. Une des explications possibles serait la conjonction d'une géométrie défavorable couplée à des prélèvements en nappe importants. Cette hypothèse demande à être validée par une étude adaptée.

Ajoutons que localement, les seuils et/barrages perturbent ces grands équilibres. Dans leur amont immédiat, la rivière se trouve « forcée » à alimenter la nappe (sous réserve d'absence de colmatage), et en aval immédiat, c'est le cours d'eau qui draine la nappe.

C'est notamment le cas du secteur aval de la nappe des alluvions du Gapeau, marquée par une grande complexité. Les seuils induisent une alternance des sections en alimentation et en drainance. Le schéma le plus abouti pour ce secteur est proposé par GRONTMIJ et RIVAGES ENVIRONNEMENT (2014) :

Figure 14 : Schéma explicatif des relations nappe-rivière pour les alluvions aval du Gapeau (GRONTMIJ et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014).



Ce schéma peut localement être discuté : les aménagements successifs du fleuve pour se protéger des crues ont abouti, aujourd'hui, à l'imperméabilisation quasi-complète des berges (enrochements, béton) à l'aval du Golf Hôtel, du pont de la RN98 à l'embouchure, au contraire des berges en amont de la RN98 qui sont restées naturelles. Ces aménagements limitent fortement les possibilités d'échanges nappe-rivière dans les zones en l'aval de la RN98 ; le fond du lit semble colmaté et la nappe est supposée captive. La question d'un retour vers le Gapeau à l'aval du barrage anti-sel reste entière.

Pour finir, notons que dans leur partie littorale, les alluvions dits du Gapeau sont aussi en interaction avec le Roubaud selon un schéma proche de celui du Gapeau : interaction nappe-rivière en amont des alluvions vaseuses et limoneuses puis déconnexion entre les deux hydro systèmes dans la partie captive de la nappe.

ETAT QUANTITATIF

Cette masse d'eau présente un intérêt économique certain.

Cet intérêt est lié à la présence de prélèvements pour l'alimentation en eau potable. La nappe alluviale du Gapeau constitue une des ressources en eau souterraine les plus importantes de cette partie du département, essentiellement dans sa partie aval. Elle sert notamment à l'alimentation en eau potable des communes d'Hyères et de La Crau.

A ce titre, cette masse d'eau a été classée comme ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable et comme ressource patrimoniale.

D'un point de vue quantitatif, la nappe alluviale du Gapeau est fragile et ce pour deux raisons :

- Elle est en forte interaction avec le Gapeau. Toute modification significative du débit du cours d'eau va impacter l'hydrodynamique de la nappe et tout prélèvement en nappe est susceptible d'influencer le débit du fleuve.

- Dans sa partie à l'aval de la confluence avec le Réal Martin, plus précisément à l'aval du seuil de St Eulalie, toute surexploitation des ressources peut provoquer une remontée de la salinité dans la nappe, ce qui peut rendre l'eau impropre à la consommation ; cela est arrivé deux fois par le passé.

Il en résulte que selon le référentiel de la DCE, cette masse d'eau présente un mauvais état quantitatif.

Pour faire face à ce problème, la Commune d'Hyères a équipé le Gapeau d'un barrage anti-sel, réalisé une modélisation du fonctionnement de la nappe et mis en place en coopération avec son délégataire une politique de gestion pro-active de la nappe.

Cette gestion s'appuie sur plusieurs axes :

1. La réalisation de mesures d'économie d'eau (amélioration du rendement de réseau, sensibilisation des consommateurs par la mise en place de télé-relève des compteurs d'eau). Nous ne disposons pas d'un rapport technique qui présente un état des lieux actualisé et les objectifs de cette politique.

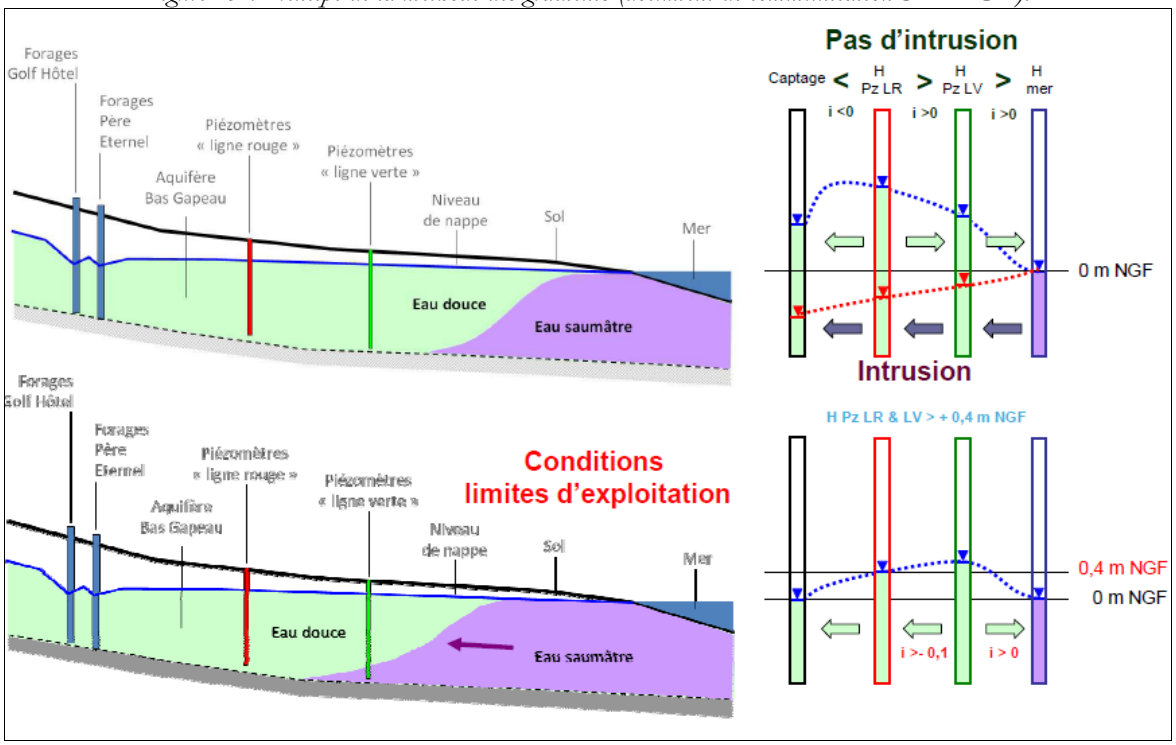
2. La mise en place d'une surveillance automatique des niveaux de nappe sur plusieurs lignes de piézomètres avec un système d'alerte pour anticiper sur la remontée du biseau salé (méthode dite des gradients). Cette méthode a été conçue à partir d'une rétro-analyse des données historiques de piézométrie et de salinité. L'idée directrice est de définir des seuils en côtes et en gradients qui témoignent d'une menace d'intrusion afin de limiter alors les prélèvements. Le suivi en piézométrie peut intéresser 20 piézomètres et le suivi de conductivité se ferait sur 13 piézomètres, selon les renseignements oraux que l'on nous a donnés. En effet, nous ne disposons pas d'un rapport technique qui détaille la position des piézomètres, les modalités de suivi et les règles de gestion associées. Cette méthode a été mise en place depuis 2012 par le délégataire et elle semble donner satisfaction. Elle permet d'optimiser les prélèvements en assurant la surveillance du biseau salé, et donc de réduire les achats d'eau ; le volume prélevé en 2012 a été de 4,9 Mm^3 et de en 2013 de 5,2 Mm^3.

3. Le projet AQUARENOVA qui vise à une recharge hivernale de la nappe en injectant de l'eau à proximité des champs captant. Le dispositif autorisé prévoit une prise d'eau dans le Roubaud, un débit maximum de 50 l/s et une zone d'infiltration à environ 500 m au Sud du forage du Père Eternel. Ce site sera complété dans un second temps par la création d'un bassin de réalimentation complémentaire permettant la réalimentation des 100 l/s restant à partir d'un site en cours d'identification plus à l'est du premier. Ce deuxième site fera l'objet d'une nouvelle demande d'autorisation. Le projet est destiné à fonctionner entre novembre et avril, en-dehors des périodes d'irrigation. Il n'aura donc pas d'impact sur les irrigants usagers du canal Jean Natte. Le projet permet ainsi de stocker l'eau douce en période hivernale dans la nappe, période pendant laquelle la ressource est en excédent. Cela permettra de protéger l'aquifère contre les intrusions par déstockage en période estivale du volume infiltré grâce à l'inertie du système. Ce système a commencé à fonctionner à l'automne 2015.

Pour justifier le projet, des simulations hydrodynamiques ont été réalisées. Elles montrent qu'à un débit de réalimentation de 50 l/s, le système devrait permettre de faire face à un épisode de sécheresse exceptionnelle tel

que celui observé en 2003-2006, et qu'à 150 l/s, débit du projet avec deux sites de réalimentation, l'aquifère serait théoriquement prémuni contre un événement plus important.

Figure 15 : Principe de la méthode des gradients (document de communication SAFEGE).

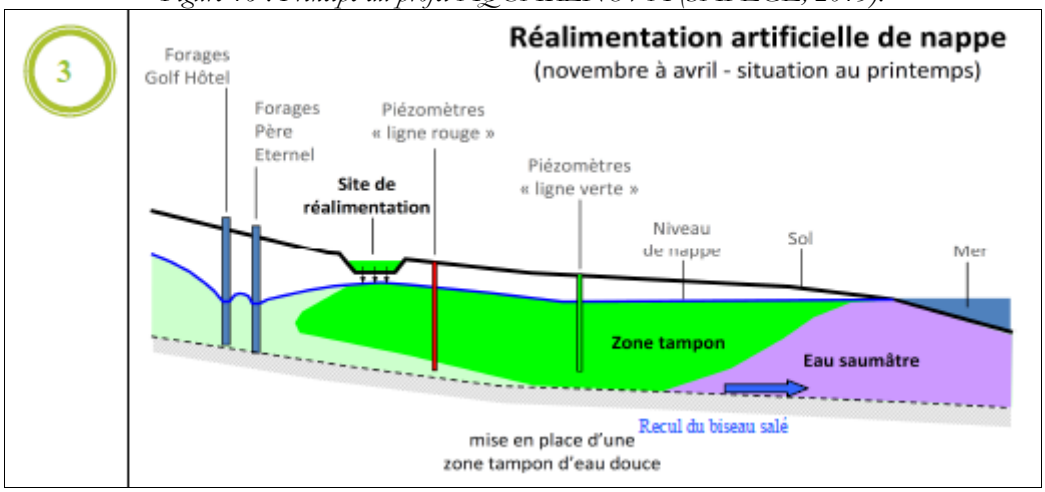


Plusieurs dispositifs de surveillance et de contrôle sont prévus pour garantir un fonctionnement optimal et sans risque du projet. Citons (SAFEGE, 2013) :

- *« Dispositifs destinés à la surveillance quantitative (débits entrants, débits réservés, piézométrie) afin de maintenir les débits réservés dans le canal Jean Natte, puis dans le Roubaud, et de maîtriser les impacts sur la nappe du Gapeau ;*

- *Dispositifs destinés à la surveillance qualitative (qualité des eaux de surface, qualité des eaux souterraines), dans le but de prévenir une éventuelle pollution de l'eau prélevée et donc éviter une propagation de la pollution aux bassins via le projet et de garantir la non contamination des captages dits du « Père Eternel ».*

Figure 16 : Principe du projet AQUARENOVA (SAFEGE, 2013).



USAGES

Quatre captages ont sollicité les alluvions du Gapeau pour l'AEP sur la période 2001–2011 :

Nom du captage	Maître d'ouvrage	Volume prélevé*
Champ captant du Golf Club	Commune de HYERES	3 673 000 m3/an
Puits des Sénès	Commune de SOLLIES - PONT	656 000 m3/an
Champ captant du Père Eternel	Commune de HYERES	512 000 m3/an
Puits des Arquets	Commune de LA CRAU	319 000 m3/an

Soit un prélèvement total moyen sur la période 2001-2011 de 5,2 Mm^3 / an. La production sur le puits des Arquets a été abandonnée en 2012.

Les champs captant du Golf Club et du Père Eternel sont situés sur la partie aval de la nappe tandis que les puits de Sénès et des Arquets impactent la partie amont.

ETAT QUALITATIF

Etant donné l'existence de passées peu perméables au sein des alluvions, les eaux souterraines sont moyennement vulnérables aux éventuelles pollutions de surface. Ceci étant, les secteurs d'alimentation de la nappe par le Gapeau induisent une vulnérabilité supplémentaire en permettant aux eaux de surface de pénétrer dans la nappe.

Dans le secteur aval, les nappes sont protégées par la couverture limoneuse et deviennent ainsi peu vulnérables.

Les eaux de la nappe alluviale présentent une contamination par les nitrates et les pesticides. Les suivis des teneurs en nitrates, menés depuis de nombreuses années sur les plaines alluviales du Gapeau et de l'Eygoutier, ont en effet montré des teneurs en nitrates variant de 1 à 386 mg/l.

Par Arrêté du 15 novembre 1999, une zone vulnérable aux pollutions nitratées d'origine agricole a été définie dans le département du Var. Cette zone vulnérable, qui concerne les territoires des communes de Carqueiranne, La Crau, La Garde, Hyères-les-Palmiers (sans les îles) et le Pradet, se situe au sein des Plaines du Bas-Gapeau et de l'Eygoutier.

Selon le référentiel de la DCE, cette masse d'eau présente un mauvais état chimique. Par le passé, la qualité de l'eau a été dégradée par la présence de substances prioritaires (HAP), une contamination bactériologique due aux rejets d'eaux usées par les installations d'assainissement, des teneurs en métaux lourds (arsénic, cuivre, nickel), les pesticides liés à des pollutions diffuses d'origine agricole et non agricole.

Dans le détail, c'est les mesures de qualité sur le puits des Arquets qui ont conduit au déclassement de la masse d'eau pour les années 2010, 2011 et 2013 (secteur dit amont). Les eaux des forages de la commune d'Hyères présentent un bon état chimique depuis 2010.

Dans le secteur dit des alluvions du Gapeau amont, la base de données propose des analyses récentes (5 analyses en 2014 et 2015) sur un point de prélèvement à Solliès Pont (10644X0127/P). Les eaux sont bicarbonatées calciques ; on observe des teneurs en nitrate variable (de 2 à 25 mg/l) et une absence de détection des pesticides.

Dans le secteur de nappe dit des alluvions du Gapeau aval, les données de qualité (ADES) proviennent des champs captants du Père Eternel (10651X0292/F, 10651X0297/P) et des forages du Golf Hôtel (10651X0289/G1TER). Elles attestent d'une qualité dégradée, avec une variabilité notable entre les points de prélèvements et une variabilité temporelle significative : présence de concentration élevée de nitrates (parfois supérieures à 50 mg/l), nombreuses et répétitives traces de pesticides, pollutions chimiques temporaires (1,2,3,4,6,7,8,9-Octachlorodibenzo-p-dioxine ; 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzo-p-dioxine ; Benzo(a)pyrène ; Benzo(b)fluoranthène), teneurs en sulfates et en chlorures élevées.

3 . DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES

3.1 PREAMBULE

ETENDUE DES CONNAISSANCES

Notre mission vise à définir des volumes prélevables à l'échelle des nappes ou de secteurs homogènes de nappe, à des échelles de temps pertinentes vis-à-vis de la réactivité des aquifères étudiés.

Elle fait suite à différentes approches passées qui avaient peu ou prou le même objectif :

- Détermination des Volumes Maximums Prélevables phases 1 à 4 (hors volet agricole) (SAFEGE 2010).
- Etude de détermination des Volumes Maximums Prélevables (volet agricole) (CEREG 2014).
- Identification et préservation des ressources majeures en eau souterraine pour l'AEP (GRONTMIJ et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014)

Précisons les éléments suivants :

- Les études SAFEGE et CEREG ne font aucune proposition de volumes prélevables sur les masses d'eau souterraines.
- L'étude GRONTMIJ/RIVAGES ENVIRONNEMENT propose une réflexion sur les volumes prélevables, qui a été réalisée par M. Bello hydrogéologue. Cette analyse est restreinte aux seules alluvions du Gapeau et l'argumentation scientifique proposée se limite au seul secteur aval et sous la seule contrainte de non propagation du biseau salé.

On peut donc juger ces études comme lacunaires. Nous avons donc dû reprendre la problématique en totalité. Il est en effet nécessaire d'étendre la définition de volumes prélevables à l'ensemble des masses d'eau du bassin versant, quand elles sont en interactions fortes avec les eaux superficielles.

C'est le cas des masses d'eau suivantes :

- Les calcaires de la Sainte-Baume, du Mont Aurélien et Agnis (FRDG167).
- Les calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques (FRDG168).
- Les calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal (FRDG169).
- Les massifs calcaires jurassiques du Centre Var (FRDG170).
- Les formations gréseuses et marno-calcaires de l'avant-Pays provençal (FRDG520).
- Le socle des massifs de l'Esterel, des Maures et Iles d'Hyères (FRDG609).
- Les alluvions du Gapeau (FRDG343).

Concernant les contraintes qui conduisent à définir des volumes prélevables, rappelons les évidences suivantes :

1. Le premier critère est l'influence du débit des cours d'eau (principalement le Gapeau, secondairement le Réal Martin) qui affronte des étiages marqués et répétés. La question qui se pose alors est celle de l'impact des prélèvements sur le débit des cours d'eau : quelle règle de proportionnalité ? Quelle inertie entre le prélèvement et la diminution de l'apport au cours d'eau ? In fine, l'objectif est de «laisser » un certain débit dans le cours d'eau au regard d'une ambition concertée en termes de bon état écologique du cours d'eau.

2. Le second critère, spécifique à cette étude, est la non propagation du biseau salé, qui peut conduire à rendre impropre tout prélèvement en nappe pour des usages AEP, industriels ou agricoles. Ce second critère intéresse le seul secteur aval de la nappe alluviale du Gapeau (FRDG343)

IMPLICATIONS METHODOLOGIQUES

DOMAINE SPATIAL A REGLEMENTER

Excepté pour les alluvions du Gapeau, les masses d'eau objet de l'étude ne sont pas strictement incluses dans le bassin versant du Gapeau. La première question est celle donc celle du domaine à réglementer : sur quelles surfaces d'impluvium doit-on considérer qu'un prélèvement d'eaux souterraines est susceptible de venir impacter les eaux superficielles ?

Pour les masses d'eau suivantes :

- Les calcaires de la Sainte-Baume, du Mont Aurélien et Agnis (FRDG167).
- Les calcaires du Bassin du Beausset et du massif des Calanques (FRDG168).
- Les calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-Pays provençal (FRDG169).
- Les massifs calcaires jurassiques du Centre Var (FRDG170).

Il s'agit pour partie de nappes karstiques, caractérisées par une forte diffusivité et des vitesses d'écoulement élevées. Il est donc difficile de déterminer a priori, sans étude dédiée (avec notamment des expériences de traçage), les bassins d'alimentation des sources, exutoires de ces nappes, qui soutiennent les cours d'eau en tête de bassin versant. Sans informations fiables, nous sommes donc contraints de faire l'hypothèse simplificatrice que les bassins d'alimentation hydrogéologiques qui alimentent les sources en tête de bassin se superposent au bassin versant hydrologique ; c'est ce que montre peu ou prou la carte hydrogéologique du Var au 1 : 200 000, document de référence. Ainsi, toute règle ici recommandée intéressera tout prélèvement en nappe sous réserve qu'il soit inclus dans le bassin versant.

Pour les nappes des grès et pélites du Permien, ainsi que des aquifères de socle, il s'agit d'hydro systèmes relativement inertiels et relativement localisés ; on peut donc supposer que l'aire d'influence des forages est incluse dans le bassin versant hydrologique. Dit autrement, il est peu probable qu'un prélèvement dans ces nappes hors bassin versant ait une quelconque influence sur les cours d'eau du bassin versant du Gapeau.

Pour les alluvions du Gapeau, rappelons que nous proposons de sectoriser la nappe en nappe amont (amont de la confluence avec le Réal Martin) et nappe aval. Il s'agira donc de définir des volumes prélevables pour chaque secteur de nappe.

TEMPORALITE DES PHENOMENES EN JEU

Il est d'usage de définir les volumes prélevables à une échelle de temps mensuelle.

Concernant l'inertie d'un prélèvement en nappe en termes d'influence sur un cours d'eau en interrelation avec une nappe, rappelons les éléments suivants :

- Concernant les nappes karstiques de tête de bassin versant, nous avons vu qu'elles sont caractérisées par une forte diffusivité et une grande vitesse d'écoulement. On peut donc considérer comme acceptable l'approximation suivante : tout prélèvement en nappe par forage dans ces aquifères implique une perte de débit équivalente aux exutoires naturels dans un délai inférieur au mois. Le cas des sources est moins problématique : tout débit prélevé sur une source est instantanément perdu pour le cours d'eau qu'elle alimente.

- Concernant les alluvions du Gapeau, il faut distinguer le cas des alluvions du Gapeau amont de ceux du Gapeau aval. Pour les alluvions du Gapeau amont, on observe des développements alluvionnaires de taille réduite : au mieux 200 m de part et d'autre du cours d'eau. Avec une telle géométrie, et au vu de la nature des alluvions relativement transmissives, on peut accepter que tout prélèvement en nappe par forage dans ces alluvions implique une perte de débit équivalente dans le Gapeau dans un délai inférieur au mois. Le cas des alluvions aval est plus complexe. Une telle approximation est acceptable jusqu'au seuil de St Eulalie. Plus à l'aval, les épanchements alluvionnaires deviennent importants et s'étendent sur le littoral sur près de 7 km ; de plus, la partie occidentale des alluvions est connectée avec le Roubaud et non avec le Gapeau. Il est évident que l'influence des prélèvements en nappe peut être très variable en fonction de la position des points de prélèvement. Ne disposant d'aucun élément d'analyse nous permettant de déterminer ces relations d'influence, nous prendrons les hypothèses simplificatrices suivantes : (1) tout prélèvement en nappe par forage dans ces

alluvions implique une perte de débit équivalente dans le Gapeau ou le Roubaud dans un délai inférieur au mois (2) le débit « perdu » sera affecté soit au Roubaud, soit au Gapeau sur une la seule règle de la proximité.

- Concernant les nappes des grès et pélites du Permien, ainsi que les aquifères de socle, il s'agit d'aquifères hétérogènes par nature dont les comportements hydrogéologiques peuvent être très variables. On peut avoir des inerties très importantes. Ceci étant, ne disposant d'aucunes données techniques sur l'inertie des nappes, nous ferons l'hypothèse simplificatrice que tout prélèvement en nappe par forage dans ces formations implique une perte de débit équivalente dans les cours d'eau qu'elles alimentent directement ou indirectement dans un délai inférieur au mois.

Notons qu'à ce jour, cette question de l'inertie des hydro systèmes souterrains est avant tout théorique : les prélèvements sont majoritairement destinés à l'alimentation en eau potable, ce qui implique une quasi-régularité des débits prélevés sur un cycle hydrologique.

Pour la problématique des forages agricoles, avec des prélèvements concentrés sur la période estivale, nous disposons d'éléments théoriques applicables aux prélèvements en nappe alluviale.

(1) Pour estimer l'influence des prélèvements sur le débit naturel des cours d'eau, une première étude de référence a été réalisée (CAILLE, 2008) pour aider à réglementer les prélèvements agricoles en Bourgogne, sous supervision des services compétents de l'Etat. Sous réserve d'accepter les hypothèses de la démarche de modélisation, cette étude définit une influence directe des prélèvements de l'ordre de 300 mètres pour les nappes alluviales de perméabilité équivalente à celle de Gapeau. Ce qui signifie en première approximation qu'un prélèvement situé à moins de 300 m peut être considéré comme un prélèvement dans ce cours d'eau à l'échelle de la période de pompage (en général, environ 100 jours en été).

(2) Dans la même logique, une étude plus détaillée a été produite dans le cadre de l'étude de définitions des volumes prélevables dans le système Rhône (BRLi & HYDROFIS, 2013). Le tableau ci-dessous présente le pourcentage de débit "perdu" pendant la durée du pompage en fonction de la distance entre le point de prélèvement et le cours d'eau, dans un cas de nappe « simple » (peu de colmatage, pas de seuils, pas d'apports latéraux,….), toujours pour une concentration des prélèvements sur 100 jours.

Figure 17 : Impact des pompages agricoles en fonction de la distance et de la transmissivité pour les nappes alluviales dans le système Rhône (BRLi & HYDROFIS, 2013).

		Distance puits-Rivière (m)								
	T	1-250	250-500	500-750	750-1000	1000-1500	1500-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000
Nappe TP	1.E-01	100%	100%	100%	75%	70%	60%	50%	35%	25%
Nappe P	1.E-02	100%	70%	55%	45%	30%	20%	10%	0%	0%
Nappe PP	1.E-03	70%	35%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Par exemple, pour une nappe productive, un forage agricole situé à environ 400 m d'une rivière soutirera à la rivière un volume de l'ordre de 70% du débit prélevé à la fin des 100 jours de pompage. Ainsi, si ce débit est d'environ 100 m^3/jour, le volume total perdu pour la rivière est de l'ordre de 0.7*100*100 soit 7 000 m^3. Si on fait l'hypothèse d'un impact pseudo constant dans le temps, le débit fictif retiré à la rivière sera ainsi de l'ordre de 0,8 l/s.

La nappe du Gapeau peut être classée comme productive avec une perméabilité supposée de 10^{-3} m/s et une épaisseur mouillée de l'ordre de 10 m. On peut en déduire que tout prélèvement agricole à moins de 250 m des cours d'eau peut être considéré comme un prélèvement équivalent en eaux superficielles. Pour les prélèvements plus éloignés, on pourra appliquer la règle de proportionnalité proposée dans le tableau ci-dessus.

3.2 APPLICATION AUX MASSES D'EAU

REGLE GENERALE POUR LES NAPPES EN INTER-RELATION AVEC LES COURS D'EAU

Pour les masses d'eau suivante, la contrainte de détermination des volumes prélevables est celle de l'impact sur le débit des cours d'eau, à une échelle de temps mensuelle :

- La bordure Sud du massif calcaire de l'Agnis (FRDG167).
- Les massifs calcaires de la bordure Nord du bassin du Beausset (FRDG168).
- Les massifs calcaires jurassiques de Cuers, Néoules et Rocbaron (FRDG170).
- Le massif triasique de Flassans (FRDG169).
- Les grès et pélites du Permien (FRDG520).
- Les roches fissurées du massif des Maures (FRDG609).
- Les alluvions du Gapeau amont.

Au vu des arguments développés ci-avant, on peut considérer que tout prélèvement en nappe, temporaire ou permanent, induira une baisse de débit équivalente, quasi-instantanée (pas de décalage temporel supérieur au mois, donc impact de la moyenne mensuelle) dans l'hydro système superficiel qu'il alimente in fine (Gapeau et ses affluents, Real Martin et ses affluents).

Ces prélèvements doivent donc être pris en compte lors de la définition des volumes prélevables sur le fleuve Gapeau et pourront faire l'objet de préconisations au même titre que les prélèvements en eau superficielle.

CAS PARTICULIER DES ALLUVIONS DU GAPEAU AVAL

QUELLE CONTRAINTE POUR DETERMINER LES VOLUMES PRELEVABLES ?

Le cas des alluvions du Gapeau aval est plus complexe.

Rappelons les éléments suivants :

1. Le corps alluvial est étendu et il est difficile de statuer sur l'inertie de l'impact d'un prélèvement sur le débit des cours d'eau. Sans simulations numériques adaptées pour définir le régime non influencé des relations nappe-rivière, il est difficile de statuer sur les impacts réels des prélèvements sur le cours d'eau. Dans la gestion et la configuration actuelles de la nappe, il est évident et reconnu que les prélèvements du Golf Hôtel et du Père Eternel sont soutenus par des pertes importantes du Gapeau au profit de la nappe, en amont du barrage anti-sel. Ceci étant, la « naturalité » des échanges reste à être déterminée : l'impact des seuils est mal appréhendé et il existe d'autres exutoires que le Gapeau (pertes en mer par drainance ou par des pertes sous-marines). Il est donc difficile de dire quelle serait la valeur du débit d'alimentation de la nappe par le Gapeau sans prélèvements (en amont du barrage anti-sel) et, surtout, quelle serait la valeur du débit de retour vers le cours d'eau en aval du barrage anti-sel sans prélèvements.

- A priori, la valeur écologique du cours dans sa partie la plus aval (en aval du seuil de St Eulalie) est faible. Citons (SAFEGE, 2011) : « *La station G8 est la seule située en aval de la confluence avec le Réal Martin. Elle est en outre située très à l'aval du bassin versant, dans un secteur où la pente est quasi nulle. Le gabarit du Gapeau y est donc nettement supérieur à celui des autres stations. Les écoulements sont exclusivement lentiques et le faciès constitué d'un chenal lentique sur la totalité du linéaire prospecté. La station se situe donc en dehors des limites de validité de la méthode. Les inventaires effectués notamment lors du suivi effectué après le curage du Gapeau à Hyères montrent d'ailleurs une domination des espèces de plan d'eau et de l'anguille. Les espèces de rivière ne sont présentes que marginalement. Les caractéristiques du cours d'eau à ce niveau sont telles que les peuplements ne sont pas dépendants des débits. En raison de l'homogénéité des écoulements et du lit, elles resteraient d'ailleurs stables même pour des débits très faibles. Aucun débit minimum biologique ne peut être proposé sur cette station* ». L'absence de valeur écologique est une considération à nuancer : elle résulte d'observations sur le régime influencé du cours d'eau.

- A ce jour, il n'y a pas conflit d'usage entre différents préleveurs sur ce secteur de nappe (pas d'autres usages préleveurs déclarés). A ce sujet, nous partageons les analyses de différents experts qui concluent en première approximation en l'absence d'interrelations fortes entre la nappe des alluvions du Gapeau et les eaux superficielles au droit de la base aérienne.

La seule contrainte étudiée et étudiable à ce jour pour la détermination des volumes prélevables est donc celle de la non propagation du biseau salé.

ESTIMATIONS PASSEES DES VOLUMES PRELEVABLES

Par le passé, il a été proposé une détermination des volumes prélevables en étudiant les conditions hydrauliques (équilibre prélèvement-recharges), qui avaient pu conduire à une propagation du biseau salé (GRONTMIJ & RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014).

Cette étude est basée sur les analyses suivantes :

1. Analyse des corrélations sur les chroniques passées entre niveaux piézométriques et conductivité (approche de la dynamique de propagation du biseau salé).

2. Analyse des historiques de crise pour mettre en évidence le seuil de production pour lequel des crises ont été rencontrées par le passé. Il est ainsi montré que « *le maintien de la nappe au-dessus du 0 m NGF, en particulier dans les environs du Golf Hôtel, n'est possible qu'avec une exploitation maximum de 250 000 m3/mois au Golf Hôtel et de 30 000 m³/mois au Père Eternel, soit 3 000 000 m³/an au Golf Hôtel et 360 000 m³/an au Père Eternel, pour un total de 3 360 000 m³/an.* » Dans un souci d'exactitude, il faudrait compléter la phrase par « en période de déficit de recharge climatique (sécheresse sévère observée avec une récurrence d'environ 10 ans) ».

Ces analyses constituent un exercice difficile mais les données présentées semblent conforter le principal résultat, à savoir que pour éviter une intrusion marine 8 année sur 10, dans les conditions passées d'alimentation naturelle de la nappe, il faut limiter le volume prélevable à environ 3,2 Mm³/an.

L'extrait ci-dessous illustre cette logique :

« *L'analyse des chroniques des volumes pompés mensuels sur la période 1989-2009 montre que l'aquifère est en équilibre quantitatif pour des productions mensuelles entre 300 000 et 400 000 m³/mois sur les captages d'Hyères, pour des années à pluviométrie excédentaire (1993-1997). On peut alors faire l'hypothèse que la valeur basse, soit 300 000 m³/mois, est valable pour des années à pluviométrie plus faible. La stabilisation de l'état critique de 1989-1993 et le début du retour de la nappe à l'équilibre en 1994 a été favorisé par le maintien d'une production mensuelle à 280 000 m³. Le retour de la nappe à l'équilibre en 2010 a été favorisé, lors d'années de pluie moyenne (2008-2010) à déficitaire 3 à 5 ans (2010-2012), par le maintien d'une production mensuelle de 220 000 m³ à 360 000 m³.* »

Au vu de ces considérations, cette étude propose des volumes maximums prélevables suivants pour ce secteur de nappe :

- **volume annuel : 3,2 Mm³/an**
- **volume mensuel : 280 000 m³**
- **volume journalier : 12 000 m³**
- **débit instantané : 140 l/s**

Comme nous l'avons expliqué, les volumes annuels, mensuels et journaliers maximum sont déduits des grands équilibres de la nappe (rétro-analyse des chroniques disponibles) et leur estimation peut être jugée robuste.

La définition du débit instantané maximal a fait l'objet d'approches complémentaires spécifiques (définition des rabattements, de rayons d'action, approche par la modélisation numérique). Les auteurs reconnaissent la difficulté de l'exercice : la propagation du biseau salé ne dépend pas que du débit instantané des forages mais aussi de l'équilibre hydrodynamique de la nappe, qui dépend lui-même des variations à moyen terme des conditions aux limites. Sans argument décisif, ils proposent un débit instantané maximal de 140 l/s. Conscients de la faiblesse de cette estimation, il rappelle qu'idéalement le débit instantané devrait être calculé de façon à respecter un débit biologique d'objectif dans le Gapeau. Ils proposent comme valeur objectif une valeur de 85 l/s que nous n'avons pas retrouvée dans le rapport SAFEGE 2011 ; c'est une question clé : la définition d'un débit instantané pour les prélèvements en nappe nécessite de définir un débit objectif à maintenir dans le cours

d'eau sur sa partie aval. Une fois cette étape passée, il faudra estimer l'impact des pompages sur le débit du fleuve. Cette relation doit aussi être considérée comme inconnue à ce jour. Comme ils le proposent, la meilleure méthode pour déterminer cette relation est de réaliser « *des mesures régulières de débit du fleuve aux extrémités amont et aval du tronçon concerné par les pompages AEP, ainsi qu'à l'aval du vallon des Borrels. Une fréquence mensuelle pendant plusieurs années semble un minimum pour suivre ce paramètre. Une différence [….] entre l'aval et l'amont du tronçon implique une modulation à la baisse du débit instantané jusqu'à stabilisation de cette différence.* »

Pour finir, cette étude recommande de rendre exclusif l'usage AEP à la seule vue des enjeux forts pour cet usage.

A noter qu'elle propose aussi un volume prélevable de 1 Mm³/an pour le secteur des alluvions du Gapeau amont. Concernant cette modulation spatiale (3,2 Mm³/an pour le Gapeau aval et 1 Mm³/an pour le Gapeau amont), on notera l'absence d'arguments explicites. Nous recommandons donc d'abandonner cette modulation qui repose sur une logique floue et de dissocier les enjeux entre secteur amont et aval, comme nous l'avons explicité ci-avant.

ETAT DES LIEUX DES USAGES ACTUELS

Les prélèvements actuels autorisés se limitent à deux champs captants AEP :

1. Champ captant du Golf Hôtel exploité par la commune de Hyères: autorisation en 1969 ; DUP des périmètres de protection en 1982. Prélèvement majoritaire sur la ressource (73%) ; près de 55 000 personnes desservies à 65% par l'eau du forage, mélangée à l'eau prélevée au Père Eternel et à l'eau achetée au SIAE La Valette – La Garde – Le Pradet.

2. Champ captant du Père Eternel (2 puits) exploité par la commune d'Hyères : autorisation en 1969, DUP des périmètres de protection en 1982. Près de 55 000 personnes desservies à 5% par l'eau du forage, mélangée à l'eau prélevée au Golf Hôtel et à l'eau achetée au SIAE La Valette – La Garde – Le Pradet.

Les besoins futurs de la commune d'Hyères sont estimés entre 6 à 6,3 Mm³/an en 2030 (+6,3 à 10% selon hypothèse de rendement) pour alimenter plus de 60 000 personnes.

L'arrêté préfectoral de 1969 fixe les modalités d'exploitation suivantes :

- lorsque le barrage anti-sel déverse : 20 000 m³/jour :

1. GH : 12 000 m³/jour, au débit maximum de 170 l/s ;
2. PE : 8 000 m³/jour, au débit maximum de 110 l/s ;

- lorsque le barrage anti-sel ne déverse pas : 15 000 m³/jour :

1. GH : 9 000 m³/jour, débit maximum non précisé ;
2. PE : 6 000 m³/jour, débit maximum non précisé.

RECOMMANDATIONS POUR UNE DETERMINATION DES VOLUMES PRELEVABLES

Les estimations antérieures montrent ainsi que dans les conditions passées, un volume prélevable de 3,2 Mm³/an assurerait la non propagation du biseau salé 8 années sur 10. Conformément à la façon dont est défini le concept de « volume maximum prélevable » les volumes proposés sont limités à une valeur dont on sait qu'elle permet d'éviter les situations de crise 8 années sur 10 (les deux années restantes, des restrictions de prélèvements seront nécessaires). Cependant, parmi ces 8 années, certaines sont plus humides et le prélèvement de volumes supplémentaires ne provoquerait pas pour autant de situation problématique (propagation du biseau salé). On est alors dans une définition de gestion passive de la nappe

Or, on remarquera que la situation a depuis fortement évoluée :

1. Un système de surveillance a été mis en place assurant ainsi une gestion active de la nappe (depuis 2012). Cette surveillance permet à la ville de suivre la propagation du biseau salé de façon dynamique et d'adapter ses prélèvements en fonction des conditions d'hydraulicité de l'année en cours. Ce mode de gestion revêt pour la commune une importance particulière en raison des enjeux économiques qu'il représente : les années humides, toute eau potable supplémentaire produite à partir de la nappe du Gapeau permet de diminuer d'autant les achats d'eau à la Société du Canal de Provence.

2. Un système de ré-injection d'eaux superficielles a aussi été installé (en 2015) pour diminuer la vulnérabilité de la nappe au biseau salé. La ville a investi des sommes importantes, avec le soutien financier de l'Agence de l'eau, pour la mise en place du projet AQUA RENOVA, décrit au paragraphe 2.4. L'ampleur des bénéfices à attendre mérite cependant d'être confirmée par un retour d'expérience suite aux premières années d'exploitations,

On peut ajouter que cette situation va probablement évoluer à moyen terme. En effet, il est possible que la révision des autorisations de prélèvement qui fera suite à l'étude des volumes prélevables sur le fleuve Gapeau conduise à modifier certaines pratiques dans les parties amont et centrales du bassin versant. Il est donc possible et probable que le débit du Gapeau dans sa partie aval soit plus important dans les années à venir, notamment en période d'étiage. Cette augmentation de débit devrait théoriquement avoir des impacts positifs sur la nappe. Ceci étant, à ce jour, sans modélisation adaptée, il n'est pas possible de quantifier l'impact de cette variation attendue du débit du Gapeau sur la nappe et donc de proposer une modulation des volumes prélevables.

On peut donc conclure de la façon suivante :

1. **Si on ne tient compte ni du système de ré-injection en nappe, ni des possibilités de gestion active de la nappe**, tous deux mis en place par le délégataire de la Ville d'Hyères, ni de l'évolution attendue du débit du Gapeau et si on accepte que le volume prélevable est déterminé par la seule contrainte de non propagation du biseau salé, dans la configuration actuelle des prélèvements, alors **les volumes prélevables annuels et mensuels tels qu'ils ont été définis par RIVAGE ENVIRONNEMENT(2014) sont ceux qu'il convient de retenir**. La proposition d'une valeur de débit instantané maximum pour les prélèvements en nappe ne nous semble pas assez robuste et devra faire l'objet d'investigations préalables pour obtenir une estimation sérieuse au regard d'enjeux clairement identifiés.

2. Dans le cas contraire, différentes questions sont à discuter

   - ✓ Est-il possible et acceptable d'assouplir la notion de volume maximum prélevable étant donné le contexte particulier sur la partie aval de la nappe du Gapeau (unique préleveur AEP, système de gestion dynamique pour le suivi de la propagation du biseau salé) ?
   - ✓ Quel est l'impact effectif sur la recharge de la nappe du projet AQUA RENOVA ?

Les enjeux réglementaires et économiques de cet arbitrage sont importants.

Si cette option était choisie, il sera nécessaire de temporiser dans la définition du volume prélevable. En effet, des systèmes susceptibles d'affecter l'équilibre hydrodynamique de la nappe ont été mis en place récemment et il semble raisonnable d'attendre au moins 5 ans pour qu'un retour d'expérience fiable et objectif soit produit ; il est difficile en effet de considérer des résultats de simulations prévisionnelles comme des éléments certains. Bien évidemment, nous recommandons de faire réaliser ce retour d'expérience par un tiers indépendant sans relations contractuelles avec la Ville d'Hyères ou la société qui produit le complément d'eau acheté par la commune les années déficitaires.

Au vu de ce retour d'expérience, il sera alors possible de proposer des règles de gestion plus adaptées ; **un des enjeux sera de passer d'une définition a minima des volumes prélevables de façon à ce qu'ils respectent la règle d'équilibre de 8 années sur 10 à une définition plus souple, avec une adaptation aux variations climatiques qui peuvent assurer et des volumes exploitables supérieurs à 3,2 Mm³/an certaines années humides, et des volumes inférieurs à 3,2 Mm³/an d'autres années particulièrement sèches.**

Un des autres avantages d'une temporisation serait de permettre une réflexion sur des quotas alloués à d'autres usages que l'AEP en engageant une prospective multi-sectorielle.

Précisons que si la configuration des prélèvements venait à évoluer (migration des champs captants au Nord du seuil de St Eulalie), la contrainte du biseau salé viendrait de facto à disparaître et il faudrait produire une nouvelle expertise pour définir les volumes prélevables. La contrainte serait alors celle de l'influence des prélèvements sur le débit du Gapeau et donc de la valeur écologique du Gapeau entre la confluence avec le Réal Martin et le seuil de St Eulalie.

De même, si un quota de prélèvement venait être réservé pour un usage agricole, avec une concentration des prélèvements sur la période estivale, il serait alors nécessaire de réglementer les prélèvements au regard des impacts attendus sur le débit du cours d'eau.

Rappelons les relations d'impact explicitées plus avant pour une nappe classée comme productive comme celle du Gapeau :

- Tout forage à moins de 250 m des cours d'eau a un impact intégral sur le débit des cours d'eau en période estivale.

- Entre 250 et 750 m, l'impact reste significatif avec un impact significatif sur le débit du cours d'eau en période estivale (perte de débit entre 50 et 70% du prélèvement).

- Au-delà de 750 m, une majeure partie du prélèvement viendra impacter le débit du cours d'eau après la période estivale.

Dans le cas de la plaine littorale du Gapeau, cette règle peut être jugée comme simpliste ; elle ne donne que des ordres de grandeur. En effet, la présence de seuils, la captivité de la nappe mais surtout la présence d'autres exutoires (sources sous-marines, drainance) compliquent passablement ce modèle. Seule la réalisation de simulations numériques pourra permettre d'affronter cette complexité.

Nous recommandons donc la réalisation d'études d'impact systématiques sur la base de modélisation numériques de qualité pour appréhender les impacts de tout prélèvement à usage agricole de débit significatif.

UN IMPERATIF DE GESTION DES NIVEAUX PEIZOMETRIQUES

Ceci étant, il nous semble que les critères de gestion pertinents pour cette nappe alluviale relève plus de la gestion des niveaux piézométriques que de celle des volumes prélevés.

En effet, que l'on soit en année sèche ou en année humide, le sous-passement de certains niveaux piézométriques seuils s'accompagnera systématiquement d'une propagation du biseau salé. Il est donc indispensable d'adopter des critères de gestion autour de niveaux piézométriques d'alerte et crise.

Notons que l'étude RIVAGE ENVIRONNEMENT(2014) propose une analyse sur ces niveaux piézométriques de gestion. Comme pour les volumes prélevables, il est présenté une rétro analyse des niveaux piézométriques associés aux phénomènes de propagation du biseau salé qui conduit à sélectionner quatre piézomètres pour une surveillance optimale de la nappe :

- Pz5 : apports versants Nord-ouest / extrémité amont de l'intrusion d'eau salée ;
- Pz7 : à la limite de l'inversion de gradient / partie intermédiaire de l'intrusion d'eau salée
- Pz4 : dôme piézométrique aval / extrémité aval Sud-ouest de l'intrusion d'eau salée ;
- Pz15 : zone d'échanges nappe - fleuve / extrémité aval Sud-est de l'intrusion d'eau salée.

Selon l'hydrogéologue mandaté, les données de 1989-1994 montrent que la stabilisation de la conductivité à des niveaux élevés a été permise par le maintien de la nappe à des niveaux entre 0 m NGF (près des captages) et 0,25 m NGF (loin des captages) à l'échelle de la nappe.

Les données de 1995-2007 permettent ainsi de préciser, pour les points de contrôle et de gestion de la nappe (piézomètres Pz4, PZ5, Pz7, Pz15) : les niveaux piézométriques d'alerte et de crise et les valeurs de conductivité d'alerte et de crise. Elles sont rappelées dans le tableau ci-dessous.

Pour ce qui est des règles de gestion, citons :

« La gestion de l'aquifère en équilibre quantitatif implique d'être :

- *supérieur aux niveaux piézométriques d'alerte ;*
- *inférieur aux niveaux de conductivité d'alerte.*

L'atteinte des niveaux d'alerte entraine une modulation des pompages permettant la stabilisation de ces niveaux (persistance de l'alerte) ou la remontée de la piézométrie et/ou la baisse de la conductivité (sortie de l'alerte) impliquant :

- *la baisse des débits instantanés (arrêt permanent d'un ou plusieurs forages) ;*
- *la baisse des volumes journaliers/hebdomadaires/mensuels.*

Dans les conditions de bonne gestion avec respect des niveaux d'alerte, l'atteinte des niveaux de crise ne peut être que brutale et due à des facteurs externes à l'exploitation (sècheresse persistante, tarissement des zones d'alimentation de l'aquifère, colmatage des berges du Gapeau alimentant les alluvions). Elle entraine une modulation plus importante des pompages, par l'arrêt horaire de tout ou partie des pompages. »

Figure 18 : Seuils d'alerte et de crise pour la nappe du Gapeau aval (RIVAGE ENVIRONNEMENT, 2014).

Point de contrôle	Alerte		Crise	
	Piézométrie	Conductivité	Piézométrie	Conductivité
Pz4	0,15	3000	0,05	5000
Pz5	0,15	800	0,00	1200
Pz7	0,30	1200	0,20	1600
Pz15	0,25	1000	0,15	1500

Nous proposons de conserver ces valeurs de piézométrie pour une gestion raisonnée de la nappe.

Elles impliquent de conserver une charge d'eau douce significative bien à l'aval des champs captants, ce qui est prudent et raisonnable. Notons cependant que sans les données de base qui ont servi à estimer ces seuils, nous ne sommes pas en mesure de les critiquer plus sérieusement. Il serait intéressant de les confronter avec les données de suivi réalisées depuis quelques années par le délégataire de la Ville d'Hyères.

Les valeurs de conductivité sont plus problématiques. Il n'est pas indiqué à quelle profondeur doit être réalisée la mesure de contrôle ; il nous semble donc que le protocole de suivi sur ce paramètre pourrait être affiné.

4 . BIBLIOGRAPHIE

Archambault, 1948 - Etude hydrogéologique détaillée de la région de Carnoules et Besse sur Issole. Pour le compte du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme; Rapport d'étude BURGEAP. 28 p. + annexes, coupes et plan.

Blanc J.J, Caron J.P., Gouvernet C., Guieu G., Masse J.P., Philip J., Rouire J., Rousset C., Tempier C., Damiani L., Durozoy G., 1974 - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Cuers. Document BRGM, 28 p.

Blanc J.J.; 1995 - Etapes et facteurs de la spéléogenèse dans le Sud-Est de la France. Kartologia n°26. p. 13-26.

Bouillin O., Durozoy G.; 1972 - Evaluation des ressources hydrauliques des bassins du Caramy et de l'Issole – Campagnes de jaugeages et essai de bilan ; Rapport BRGM n°72 SGN 101 PRC.

Bordet P. Mennessier G.;, 1969 - Notice explicative de la carte géologique au 1 : 50 000 de Collobrières. Document BRGM, 12 p.

Bordet P., Blanc J., Jeudy de Grissac A., Chamley H., Durozoy G., 1976 - Notice explicative de la carte géologique au 1 :50 000 de Hyères-Porquerolles. Document BRGM, 21 p.

BRLi et HYDROFIS, 2013 - Etude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de « basses eaux ». Phase 2 : estimation des impacts des prélèvements en nappes sur le débit du Rhône. Rapport technique pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 146 p.

CAILLE BE, 2008 - Evaluation de la distance d'incidence des prélèvements souterrains sur les cours d'eau du Département de la Côte d'or. Rapport d'étude 24 p.

CEREG Ingénierie, 2014 - Etude de détermination des Volumes maximums prélevables. Etude du volet agricole (phase 2). Etude technique pour le compte de la Chambre d'Agriculture du Var. 134 p.

Choquet M.; 1970 - Etude hydrogéologique de la plaine de Signes.Etude réalisée par la Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la région provençale.

Coulier C.; 1986 - Le karst de la St Baume. Structures et évolution : l'approche hydrogéologique. Karstologia n°8, p. 7-12.

Cova R., Durozoy G.; 1983 - Notice explicative de la carte hydrogéologique du département du Var à 1/200 000. Document BRGM, 38 p.

Cova R., Tapoul J.F.; 1990 - Régime hydrogéologique de l'Issole. Conséquences de la sécheresse 1989-1990; Rapport Cellule géologique départementale. 8 p. + annexes.

Durozoy G.; 1972 - Evaluation des ressources hydrauliques. Carte hydrogéologique des Bouches du Rhône - échelle 1 : 200 000. Notice explicative; Rapport BRGM, 72 SGN 394 PRC, 46 p. + carte.

Durozoy G., Gouvernet Cl.; 1971 - Etude des ressources hydrauliques des bassins du Caramy et de l'Issole – Hydrogéologie; Rapport BRGM n°71 SGN 404 PRC. Avec carte hydrogéologique au 1 : 50 000.

GROMJIT et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2013 - Identification et préservation des ressources Majeures en eau souterraine pour l'AEP. Lot n°4 : Etude des alluvions du Gapeau, et des alluvions et formations du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier. Phase 1. Etude technique pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 149 p.

GROMJIT et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014 - Identification et préservation des ressources Majeures en eau souterraine pour l'AEP. Lot n°4 : Etude des alluvions du Gapeau, et des alluvions et formations du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier. Phase 2 : Etape 1 – Caractérisation des zones préidentifiées comme stratégiques. Etape 2 – Définition des bassins d'alimentation et vulnérabilité des captages prioritaires. Etude technique pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 129 p.

GROMJIT et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014 - Identification et préservation des ressources Majeures en eau souterraine pour l'AEP. Lot n°4 : Etude des alluvions du Gapeau, et des alluvions et formations

du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier. Phase 2 : Etape 3 – Complément à l'étude des volumes maximums prélevables des alluvions du Gapeau. Etude technique pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 64 p.

GROMJIT et RIVAGES ENVIRONNEMENT, 2014 - Identification et préservation des ressources Majeures en eau souterraine pour l'AEP. Lot n°4 : Etude des alluvions du Gapeau, et des alluvions et formations du Muschelkalk de la plaine de l'Eygoutier. RAPPORT DE PHASE 3 : Proposition d'actions de préservation des zones stratégiques pour l'AEP actuelle et future. Etude technique pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 128 p.

Fénart P., Berthalon Y., Blanchoin N., Cadilhac L., Chazot S., Desagher E., Emily A., Mahé M., Mangan C., Mayen V., Monière C., Moulin M., Pothin A., Tennevin G., 2012 - Révision du référentiel des masses d'eau souterraine de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. Lot n°3 : Région PACA. Rapport d'étude collectif, sous la direction de P. Fénart, du groupement HYDROFIS-ANTEA, pour le compte de l'Agence de l'Eau RMC, 932 p.

Glintzboeckel.c., Durozoy.g., 1969 – Etude des ressources hydrologiques et hydrogéologiques du Sud-est de la France. Fascicule 7 : Bassins du Gapeau, de l'Eygoutier et du Roubaud. Rapport BRGM n°69 SGN 084 PRC.

Lachassagne P., Wyns R., 2005 - Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et à la gestion de la ressource en eau. Géosciences n°2, édition BRGM, p. 32-37.

Monteau R.; 1971 - Le karst des formations turoniennes du bassin du Beausset. Thèse à l'université de **Marseille-Luminy.**

Moulin M., Gourcy L., 2006 - Plaines du Bas-Gapeau et de l'Eygoutier (département du Var) : Contribution à la détermination de l'origine des contaminations nitratées des eaux souterraines par l'approche hydrochimique. Rapport BRGM/RP-54515-FR.

Rousset C. ; 2006 - Aquifères et eaux souterraines en France. Tome 2 : Provence ; BRGM Editions, Ouvrage Collectif sous la Direction de J.C. Roux, p. 694-717.

SAFEGE, 2010 – Définition du débit minimum biologique du Gapeau et de ses affluents. Choix des stations. Rapport d'étude pour le compte du Syndicat Mixte du Bassin versant du Gapeau. 24 p.

SAFEGE, 2011 – Détermination des volumes prélevables. Phase 1 à 4 (hors volet agricole). Rapport d'étude pour le compte du Syndicat Mixte du Bassin versant du Gapeau. 169 p.

SAFEGE, 2013 - Projet de ré-infiltration en nappe Hyères-les-Palmiers. Dossier d'autorisation loi sur l'eau. 566 p.

SEERC, 2014 – Eléments de réponse pour justifier les subventions de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. 15 p.

Travi Y., 1976 – Géologie et hydrogéologie du bassin versant du Réal Martin entre Cuers, Carnoules et Pierrefeu (Var). Doctorat de l'Université de Nice, 165 p. + cartes et annexes.