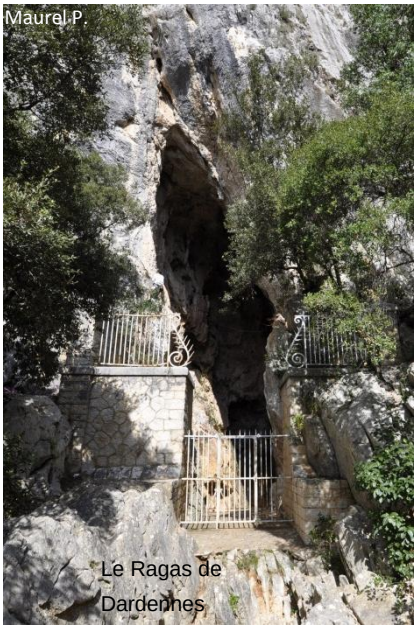
Synthèse hydrogéologique de l'Unité du Beausset



Le Ragas de Dardennes

Port Miou

Arnaud Fournillon

Novembre 2012

Document extrait de la thèse de doctorat "Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset", 425 pages, A. Fournillon, soutenue le 28 septembre 2012 à l'Université Aix-Marseille.

Réalisé dans le cadre du projet KarstEAU, avec le soutien de :

Synthèse hydrogéologique de l'Unité du Beausset

Cette note présente de manière synthétique l'hydrogéologie de l'unité du Beausset, mise à jour dans le cadre de la thèse « Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset » (Fournillon, 2012). Le secteur s'étend de Marseille à Toulon (SE de la France), dans les formations carbonatées du Trias au Crétacé supérieur.

Contexte général

L'Unité géologique du Beausset se situe entre Marseille et Toulon. Elle s'étend sur 650 km². Elle est limitée au Nord par la Plaine de l'Huveaune et les massifs de la Sainte Baume et d'Agnis, et au Sud par la Mer Méditerranée et l'Unité de Bandol. Ses limites ouest et est sont respectivement le Massif des Calanques et le fleuve Gapeau. Sa topographie est contrastée. La Sainte Baume au Nord culmine à 1044 m et les reliefs descendent progressivement jusqu'à un grand plateau, le Plateau du Camp, d'orientation ouest-est et culminant à 450 m. L'Ouest comprend le massif côtier des Calanques culminant à plus de 600 m. L'Est est occupé par d'imposants massifs pouvant culminer à plus de 800 m comme le Massif de Siou-Blanc. Le cœur de l'unité est constitué d'une série de cuestas, dont la plus haute est la falaise maritime de Soubeyran atteignant presque 400 m, qui deviennent en leur centre des plaines côtières.

D'un point de vue géologique, l'Unité du Beausset est un synclinal très dissymétrique chevauchant la Sainte Baume au Nord et étant chevauché par l'Unité de Bandol au Sud. Elle est constituée de plus de 3000 m de roches sédimentaires s'étageant du Trias au Campanien. L'unité est typique des zones calcaires méditerranéennes avec des sols peu épais, excepté en son centre, et des paysages karstiques étendus. Son climat est contrasté avec des précipitations concentrées en peu de jours. L'effet conjugué de la mer et du relief provoque une répartition hétérogène de précipitations avec des totaux annuels allant de 600 mm/an sur la zone côtière à plus de 1000 mm/an dans les terres en 2010. L'hydrographie de ce secteur se limite à un fleuve pérenne, le Gapeau, et trois fleuves temporaires à l'échelle pluriannuelle qui sont d'Ouest en Est : le Grand Vallat, la Reppe et le Las.

Un aquifère multicouche

Les roches ont des lithologies et des épaisseurs variées, liées aux conditions de dépôts dans l'ancien bassin sédimentaire Sud-Provençal, comprenant évaporites, calcaires, dolomies, marnes et grès. Sept unités lithostratigraphiques sont individualisées. Celles-ci sont recoupées par des failles qui s'expriment en surface, ainsi que d'autres plus anciennes ou syn-sédimentaires masquées par le Crétacé supérieur. Ces terrains sont des plus anciens aux plus récents (Figure 2):

- l'Hettangien – Aalénien calcaréo-dolomitique,
- le Bajocien – Bathonien argilo-calcaire,

- le Callovien – Berriasien inférieur calcaréo-dolomitique,
- le Berriasien moyen – Barrémien calcaire,
- l'Aptien – Albien marno-calcaire,
-le Cénomanien – Coniacien inférieur calcaire, gréseux et argileux,
- et le Coniacien moyen – Campanien calcaire, gréseux et argileux.

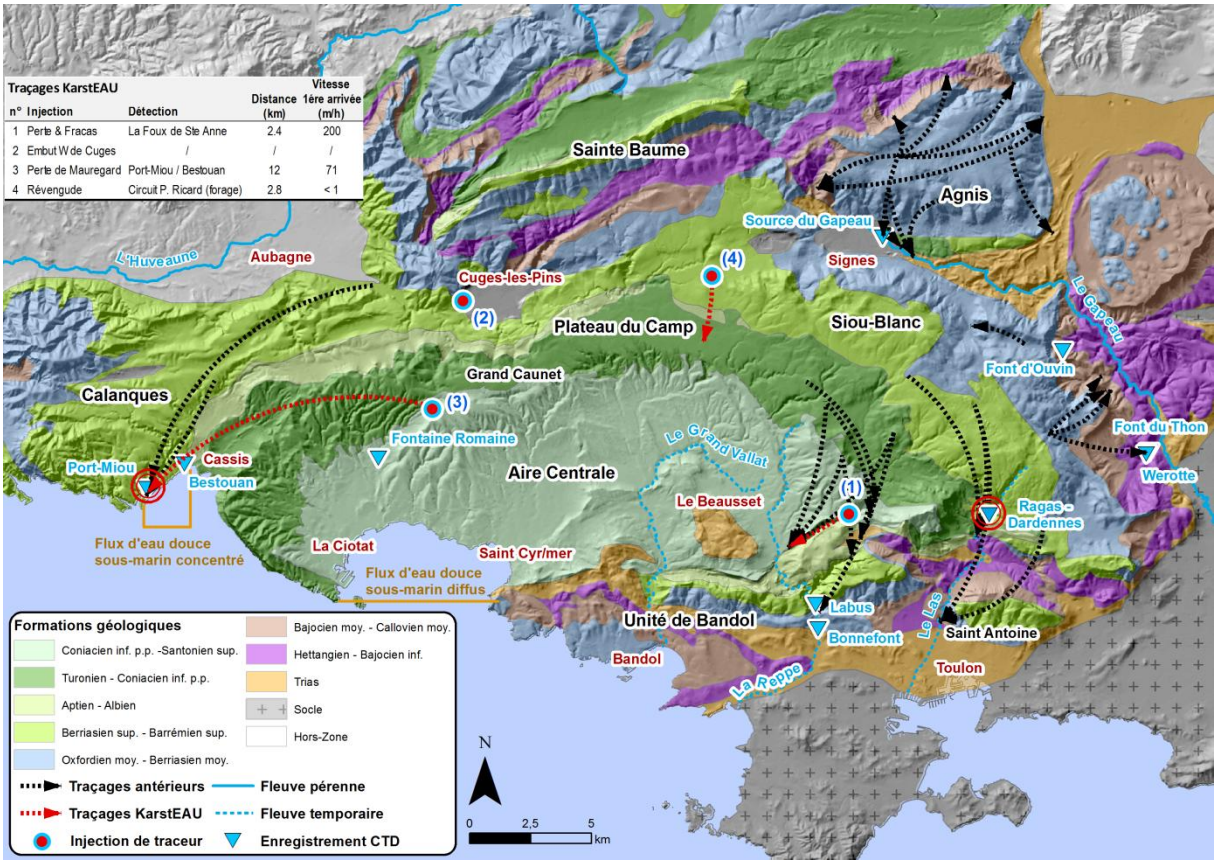


Figure 1: Cadre géographique, hydrogéologique et géologique de l'Unité du Beausset.

Les différentes lithologies engendrent des contrastes de perméabilité, comme par exemple la présence de marnes ou de calcarénites entre les horizons calcaires. Cependant, la position des sources, les analyses hydrochimiques et les traçages artificiels (comme celui du Mauregard) montrent que l'unité peut être considérée comme un seul aquifère multicouche depuis les terrains à l'affleurement jusqu'au Trias situé à plus de 3000 m de la surface. Le Keuper évaporitique et argileux y joue le rôle d'imperméable. Le Nord et le Sud de l'unité sont des limites non étanches, soulignant ainsi la continuité hydrogéologique entre la Sainte-Baume au Nord, et la mer et l'Unité de Bandol au Sud. Excepté le secteur de Signes où le contact structural entre le Trias et le Jurassique supérieur peut être considéré comme une limite à flux nul, la bordure est est caractérisée par la communication directe entre l'unité du Beausset et le Gapeau, formant ainsi une limite à potentiel imposé dans ce secteur. En limite nord-ouest, la plaine d'Aubagne étudiée dans les années 1970 est drainée à travers le crétacé inférieur vers le sud.

L'interpolation des niveaux d'eau mesurés dans de nombreux forages et l'altitude des sources pérennes a permis d'établir une surface piézométrique en régime permanent. Celle-ci atteint plus de 400 m NGF sur le flanc sud de la Sainte Baume avant de chuter rapidement jusqu'à 100 m au niveau de l'axe Cuges – Signes. L'altitude de la nappe décroît ensuite en pente douce jusqu'à la mer, tandis que le massif de Siou-blanc est drainé à sa périphérie dans les vallées incisées par le Gapeau,

la Reppe et le Las, entre 300 m et 80 mètres d'altitude. La différence entre cette surface piézométrique et la topographie révèle une zone non-saturée conséquente, de plusieurs centaines de mètres (jusqu'à 500 m sous le Massif de Siou-Blanc).

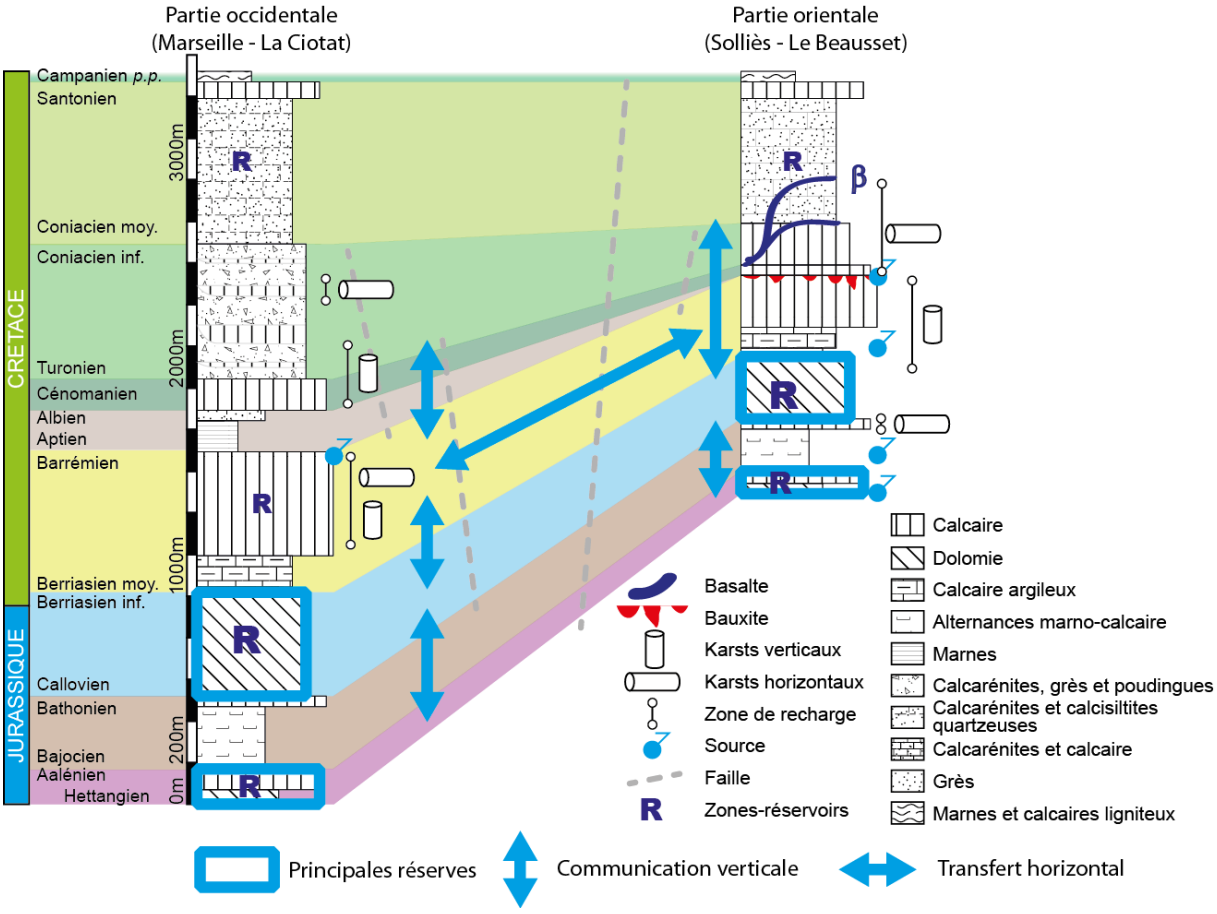


Figure 2 : Synthèse stratigraphique, hydrogéologique et karstologique de l'Unité du Beausset.

Les zones de drainage de l'unité du Beausset

Les zones de drainage souterrain de l'unité du Beausset ont été étudiées par des campagnes hydrochimiques et des campagnes de mesure de débit sur les principales zones d'émergences, et par un suivi en continu de la pression, de la température et de la conductivité électrique (CTD) de l'eau de neuf sources (Figure 1). L'eau de pluie infiltrée sur ce territoire carbonaté est drainée, par ordre d'importance en terme de débit, par : (1) les sources sous-marines de la baie de Cassis (Port Miou et Bestouan), (2) Les sources de Dardennes (et son exutoire de trop plein, le Ragas), ainsi que les principaux cours d'eau (Grand Vallat, Reppe, Las et Gapeau) drainant les massifs orientaux et leurs sources bordières, (3) les sources et les sorties sous-marines de l'Aire Centrale de l'unité. Les venues d'eau en mer ont été cartographiées par des mesures de salinité de surface de l'eau de mer. Elles apparaissent sous deux formes : concentrées au débouché des aquifères karstiques comme dans la zone de Port Miou et Bestouan, et diffuses au débouché des zones de perméabilité matricielle comme la Baie de La Ciotat. Le suivi des sources et des cours d'eau aboutit à la conclusion que l'unité du Beausset est drainée principalement, d'une part par l'écoulement temporaire dans les cours d'eau du cœur et de l'est de l'unité, et d'autre part par les sources vauclusiennes de la baie de Cassis et de Dardennes. Le Gapeau présente la particularité d'être le seul cours d'eau pérenne, alimenté aussi

bien en rive droite qu'en rive gauche par les sources bordières. Il draine également les eaux souterraines par des arrivées occultes qui sourdent au fond de son lit.

Les sources et le mode d'écoulement de l'eau souterraine

Les neuf sources suivies permettent de caractériser le mode d'écoulement de l'eau souterraine au sein de l'unité du Beausset. Les sources peuvent être classées en cinq types :

(1) Les sources les plus communes sont les sources karstiques de drainage peu profond, "jurassiennes", suivies sur le pourtour des massifs orientaux. Elles sont présentes le long du Gapeau et de la Reppe dans les Gorges d'Ollioules. Les débits mesurés à l'étiage varient de quelques litres à quelques dizaines de litres par seconde. Cinq des sources équipées (Gapeau, Werotte, Font du Thon, Font d'Ouvin et Bonnefont, Figure 1) sont caractéristiques de ces drainages peu profonds. Leur température varie de quelques degrés autour des valeurs atmosphériques moyennes annuelles et leur conductivité électrique varie autour de 500 µS/cm (Tableau 1). La source du Gapeau se distingue par la faible variabilité de ses caractéristiques physico-chimique, signe d'un écoulement dans un milieu plus inertiel. La source de Bonnefont montre des conductivités électriques plus élevées, en lien avec le Trias proche.

(2) Le deuxième type est celui des sources "vauclusiennes", où l'eau émerge d'un conduit karstique développé en profondeur sous l'exutoire. Les deux principales sources drainant l'unité appartiennent à cette catégorie : Port-Miou (explorée sur 223 m de profondeur en spéléoplongée) et le Ragas (exploré sur 150 m de profondeur). Ce type de source présente généralement de fortes réserves en eau, comme l'attestent les exemples des plus grandes sources françaises : la Fontaine de Vaucluse, le Lez ou la Touvre. Le drainage profond de l'aquifère est assuré par un ou des conduits karstiques très transmissifs, et les sources sont caractérisées par des fortes variations de débit (de quelques centaines de litre par seconde à plusieurs dizaines de mètres cubes par seconde). La crue la plus forte enregistrée à Port-Miou depuis 2003 a eu lieu en décembre 2008, avec débordement du barrage souterrain et un débit de 50 m^3/s. Le Ragas présente des mises en charge spectaculaires de 40 mètres, avec des vitesses de montée de niveau de plus de 5 mètres par heure (crue de mai 2012). Ses valeurs de température et de conductivité électrique sont dans une gamme similaire à celles du groupe (1).

(3) Les sources sous-marines sont présentes sur la frange littorale de l'unité du Beausset. L'eau est saumâtre, mélange entre l'eau douce d'infiltration dans les terres, et l'eau de mer entrée dans l'aquifère en profondeur. La source de Port-Miou et ses sorties annexes dans la calanque, mais également celle du Bestouan, sont saumâtres toute l'année. La conductivité électrique est inversement proportionnelle au débit, et proportionnelle à la température.

(4) De manière plus anecdotique, il existe dans le Beausset une source d'origine hydrothermale confirmée, la source du Labus. Elle est caractérisée par des valeurs élevées de température (de 16 à 25°C) et de conductivité électrique (généralement > 1000 µS/cm). Son origine est mixte, influencée par l'arrivée d'eau peu profonde durant les hautes eaux (du type 1).

(5) Enfin, un dernier type de source a pu être défini sur l'exemple de la source de la Fontaine Romaine. Il s'agit des sources du centre de l'unité, issues d'un milieu fracturé ou peu karstique. Ces sources ont la particularité d'avoir une salinité et une température plus élevées que les autres types de source, dont l'origine reste indéfinie (réaction exothermique d'oxydation du soufre ou circulation profonde).

Source et commune	Période de mesure	Température (°C) [min – max]	Conductivité électrique (µS/cm) [min – max]	Type
Gapeau (Signes)	03/2009 au 04/2011	13.2 - 15.0	345 - 467	(1) Source jurassienne
Werotte (Solliès)	01/2009 au 03/2011	11.4 - 16.0	243 - 678	(1) Source jurassienne
Font du Thon (Solliès)	02/2009 au 03/2011	14.3 - 15.7	469 - 674	(1) Source jurassienne
Font d'Ouvin (Belgentier)	03/2009 au 08/2010	12.8 - 13.3	432 - 644	(1) Source jurassienne
Bonnefont (Ollioules)	05/2009 au 03/2011	13.4 - 16.1	519 - 892	(1) Source jurassienne
Ragas (Le Revest)	02/2012 au 10/2012	13.3 - 14.3	400 - 490	(2) Source vauclusienne
Port-Miou (Cassis)	2005 à 2012	14.9 - 17.7	4350 - 23260	(3) Source vauclusienne sous-marine
Labus (Ollioules)	04/2009 au 03/2011	16.0 - 25.1	619 - 2113	(4) Source hydrothermale
Font. Romaine (Ceyreste)	08/2009 au 03/2011	15.5 - 19.8	830 - 1640	(5) Source fissurale

Tableau 1 : Synthèse des paramètres physicochimiques enregistrés sur les sources suivies de l'Unité du Beausset.

Ces résultats montrent l'importance des différents compartiments de l'hydrosystème karstique : les conduits transmissifs, la matrice calcaire fracturée, le développement profond du karst, la zone non saturée, et la zone d'infiltration. Les observations de terrain montrent que cet aquifère peut être considéré comme un massif karstique unaire. La recharge y est majoritairement autochtone et concentrée sur les grands massifs : la Sainte-Baume et le poljé de Cuges, les Calanques, le Plateau du Camp et la zone orientale (massifs de Siou-Blanc, des Morières et de Rouca-Trouca). L'infitlration se fait d'une part de manière diffuse à travers un épikarst formé par la roche fracturée décompactée, et d'autre part de manière plus concentrée à travers des pertes absorbant une part du ruissellement. Le Plateau du Camp est caractéristique dans le paysage, par sa surface plane qui tronque les formations du Crétacé, signe d'une évolution karstique intense, où les nombreuses dolines et les cavités sous-jacentes sont colmatées par des argiles (le traçage à la fluorescéine de la perte de la Revengude montre un écoulement lent et une forte dilution).

Influence de la karstification sur les écoulements

Le fait que les deux grandes sources vauclusiennes dominent les écoulements et l'importance des sources karstiques dans les zones d'émergence dénotent du rôle prépondérant de la karstification sur les écoulements. Le karst de ce secteur provient de la conjonction entre de très nombreuses phases structurales qui remontent au Silurien et de nombreuses phases d'émersion dont les premières sont contemporaines des premiers dépôts de l'Unité du Beausset. Il faut ajouter à cela la karstification verticale qui a eu lieu pendant la période messinienne où de grands réseaux profonds ont pu se développer. Le karst se développe à travers l'ensemble des roches carbonatées de l'unité, comme le montrent les observations à l'affleurement ou spéléologiques, et les traçages artificiels (Perte du Mauregard – Port Miou à travers les marno-calcaires aptien, Perte et Fracas – La Foux de Sainte Anne d'Evenos à travers les calcarénites du Coniacien).

La karstification joue donc sur plusieurs niveaux : sur le stockage par la présence de microkarsts et sur les écoulements en créant des réseaux de conduits. Cette dernière influence est d'autant plus forte que la roche est peu poreuse au moment de la karstification. Ainsi, le karst accentue la compartimentation lithostratigraphique. Les formations les plus poreuses, comme le

Jurassique supérieur et inférieur, ont développé un karst diffus et probablement isotrope, où l'influence majeure sur les écoulements est le fait des grands traits structuraux. A l'opposé, les formations les moins poreuses, comme le Jurassique moyen, le Crétacé inférieur et le Crétacé supérieur ont développé un karst concentré complexe qui se répartit selon de nombreuses directions structurales et selon les anciens niveaux de bases. Ces derniers ont grandement varié, en particulier depuis le Miocène. Quant à l'épisode messinien, la profondeur du karst de Port-Miou (au moins -223 m NGF) montre que ce dernier a pu jouer un rôle de concentration des écoulements. Ce point expliquerait la prédominance des deux sources vauclusiennes dans les bilans hydriques. L'Unité du Beausset est donc caractérisée par un découplage entre les zones d'écoulement et celle de stockage, découplage augmenté par le karst.

Il résulte de la karstification et des propriétés pétrophysiques que les principales zones réservoirs sont les formations dolomitiques du Jurassique supérieur et du Jurassique inférieur (Figure 2). Dans une moindre mesure, les formations du Crétacé inférieur et du Coniacien-Santonien peuvent également représenter des zones de réserves. Ces zones de réserves sont connectées verticalement aux autres formations sur l'intégralité de la colonne stratigraphique que ce soit par des grands conduits verticaux ou des failles. Les réserves sont drainées vers les exutoires principaux (sources vauclusiennes), par des zones de transferts essentiellement concentrées dans les grands réseaux noyés du Crétacé inférieur.

Ressources en eau souterraine

L'unité du Beausset constitue un véritable réservoir d'eau souterraine, stratégiquement placé entre les grandes agglomérations de Marseille et Toulon. Ce réservoir géologique atteint plusieurs milliers de mètres de profondeur. Il est alimenté par l'eau d'infiltration rapide à travers le karst, et l'eau d'infiltration diffuse à travers l'épikarst et la zone non saturée. La ressource est localisée dans les calcaires et dolomies fracturés et karstifiés. Les niveaux aquifères sont par ordre décroissant de productivité : (1) le Jurassique supérieur dolomitique, poreux, fracturé et karstifié ; (2) le Jurassique inférieur qui a des propriétés semblables au précédent, mais qui est d'une épaisseur moindre ; (3) le Crétacé inférieur calcaire, non poreux mais intensément fracturé et karstifié, la ressource y est difficile d'accès du fait de la concentration des écoulements dans de grands vides karstiques ; (4) le Jurassique moyen marno-calcaire et peu poreux, il se révèle fracturé et karstifié au Sud et à l'Est de l'Unité ; (5) le Crétacé supérieur très complexe du point de vue lithologique, il renferme de nombreuses lentilles d'eau exploitables mais qui ne sont pas toujours connectées entre elles ; (6) le Crétacé moyen essentiellement aquiclude, il peut former localement de petits aquifères.

Le modèle géologique numérique élaboré permet d'estimer le volume d'eau contenue dans ce réservoir multicouche, entre 16 et 44 milliards de m^3, soit environ 100 fois plus que le volume moyen renouvelé annuellement (approximation de $12m^3/s$ ou 0,4 milliards de m^3 par an d'eau souterraine écoulée). Toutefois, sur une large partie du territoire, l'eau souterraine est difficilement accessible à faible profondeur (quelques centaines de mètres) car les niveaux aquifères productifs sont situés généralement à des profondeurs supérieures à 500 mètres, et la surface piézométrique est peu élevée au dessus du niveau marin. Seules les sources vauclusiennes connectent les niveaux les plus profonds jusqu'à la surface du sol. Les difficultés et limitations d'exploitation de l'eau de cet aquifère sont principalement de deux ordres, liées à sa position côtière, et à ses propriétés karstiques et fissurées. La qualité de l'eau peut ainsi être affectée par l'intrusion saline dans les zones côtières, et jusqu'à plusieurs kilomètres en amont (exemple de la baie de Cassis). La quantité d'eau produite par

forage est quant à elle directement liée à la connectivité des horizons lithostratigraphiques superposés par des failles ou des conduits karstiques.

Les nouvelles ressources exploitables sont de quatre types selon les potentialités hydrogéologiques locales et les besoins.

- Mise en valeur de l'aquifère Crétacé supérieur superficiel pour répondre au besoin de sécurisation des communes de l'Aire Centrale de l'unité. L'exploitation par forages ou galeries drainantes doit être adaptée à cet aquifère de type poreux fracturé semi-perméable. Cette ressource peut localement connaître des problèmes de qualité liés aux pollutions agricoles.
- Modification et diversification des ressources locales au niveau de sources déjà exploitées. Cette étude a montré que les sources de type "jurasiennes" ne présentent qu'un faible débit naturel à l'exutoire en étiage. L'exploitation passe par le développement des forages peu profonds à proximité des exutoires mais n'offre qu'une augmentation limitée du débit.
- Surexploitation des sources vauclusiennes avec un plan de gestion durable. Ce type d'exploitation s'applique à priori bien aux sources de Dardennes et au puits du Ragas. Les sources de Cassis, bien que drainant le plus fort débit de toute l'unité du Beausset, ne sont pas exploitables en raison de leur salinité. Des investigations complémentaires restent nécessaires pour localiser la zone de transit de l'eau douce d'infiltration rapide.
- Mise en place de forages profonds visant à capter l'eau stockée dans le jurassique ou transitant dans le crétacé inférieur. L'unité du Beausset représente à ce titre un aquifère patrimonial pour la sécurisation de l'AEP. Ces ressources sont, du point de vue géographique, concentrées en bordure de l'Unité du Beausset au contact avec la Sainte-Baume, dans l'axe Aubagne-Signes, et autour des massifs nord-toulonnais (Siou-Blanc et alentours)

Une bibliographie exhaustive est donnée dans la thèse Fournillon (2012), disponible sur www.karsteau.fr