Présentation du site d'étude et caractérisation des écoulements

II.1 L'hydrosystème de Fontaine de Vaucluse

II.1.1 Localisation géographique

La zone d'étude (Figure II-1) s'étend sur trois départements (Vaucluse, Alpes de Hautes Provence et Drôme). Elle correspond à la partie nord-ouest de la Provence et recouvre essentiellement le Nord du département du Vaucluse. Elle est limitée au Nord par la vallée du Toulourenc, la chaîne Ventoux – Lure, à l'Ouest par le bassin de Carpentras (plaine du Comtat Venaissin), au Sud par le bassin d'Apt et à l'Est par le bassin de Forcalquier et la plaine de la Durance [Puig (1987)]. Cette région est essentiellement caractérisée par des reliefs calcaires et présente une morphologie très contrastée. En effet, le secteur nord (Chaîne Ventoux – Lure), dont l'altitude moyenne dépasse 1000 m, présente des reliefs très accidentés et des dénivelés atteignant 1600 m entre le sommet du massif et les gorges du Toulourenc. Au Sud, les reliefs des Monts de Vaucluse et du Plateau d'Albion présente une topographie beaucoup plus douce avec une altitude comprise entre 600 et 1000 m pour les monts et oscillant entre 100 (au Sud-Ouest) et 500 m (au Sud-Est) en périphérie d'Apt.

II.1.2 <u>Contexte géologique</u>

La géologie de la région a été décrite dans de nombreux travaux géologiques et hydrogéologiques : Masse (1968,1972) ; Villeger (1984) ; Malzieu (1987) ; Puig (1987) et Couturaud (1993).

II.1.2.1 Géologie structurale

D'après Puig (1987), cette région peut se diviser en plusieurs zones d'allongement est / ouest suivant des contrastes topographiques qui sont eux-mêmes dus à des contrastes géologiques. Ainsi, nous distinguons du Nord au Sud : la chaîne septentrionale (Chaîne Ventoux – Montagne d'Albion – Lure), le flanc sud de la chaîne, le synclinal d'Apt et le Luberon. Les deux coupes (Figure II-2) permettent de visualiser ces structures.



Figure II-1 : Présentation géographique de la région étudiée [Puig (1987)]

• *La chaîne septentrionale* est formée par des écailles chevauchant vers le Nord les Baronnies. L'écaille, constituant le flanc nord de la chaîne, amène une structure anticlinale sur une structure synclinale. Ces deux plis sont en dévers vers le Nord. C'est dans cette région qu'affleurent les terrains les plus anciens : le Jurassique Supérieur et le Néocomien.

• *Le flanc sud de la chaîne* correspond à une grande dalle pseudo-monoclinale chevauchant les écailles du flanc nord. Ce monoclinal est constitué par les terrains du Crétacé. Plusieurs structures tectoniques affectant cette dalle sont à prendre en compte :

◊ *les failles de Saint-Gens et Fontaine de Vaucluse* abaissent la terminaison périclinale occidentale du plateau de Vaucluse sous le bassin tertiaire de Carpentras.

◊ *le fossé de Sault* d'orientation NNE-SSO sépare le Mont Ventoux et la Montagne d'Albion. Il s'agit d'un fossé d'effondrement.

• *Le synclinal d'Apt* est dans la continuité du monoclinal. Son cœur est rempli par les terrains de l'Albien-Cénomanien et du Tertiaire. L'Albien-Cénomanien est constitué par les fameux sables ocreux dont les anciennes carrières de Roussillon et de Rustrel ont été transformées aujourd'hui en d'importants sites touristiques.

• *Le Luberon* est une structure anticlinale déversée vers le Sud et qui chevauche vers le Sud les terrains tertiaires. Il est coupé en deux par la « combe » de Lourmarin qui est une zone de fractures limitée au Nord et au Sud par les accidents chevauchants.



Figure II-2 : Coupes géologiques (a) du Petit Luberon au Mont Ventoux et (b) du Grand Luberon à la Montagne de Lure [Puig (1987)]

II.1.2.2 Unités lithologiques

Classiquement, trois grands ensembles sont distingués à savoir d'une part le Valanginien – Hauterivien Inférieur, d'autre part l'Hauterivien Supérieur – Barrémien – Bédoulien, et enfin le Gargasien – Crétacé Supérieur (Figure II-3 et Figure II-4).

• Valanginien – Hauterivien Inférieur :

Le Valanginien, dont l'épaisseur est variable (environ 200 m), est essentiellement marneux voire marno-calcaire et se caractérise par la présence de fossiles pyriteux. L'Hauterivien présente une série puissante formée à sa base par des alternances de marnes et de marno-calcaires pour finir dans la partie supérieure par des calcaires. Cette dernière série atteint une épaisseur de 670 m sur le versant nord du Ventoux [Puig (1987)].

Cette formation caractérise le mur de l'aquifère karstique de la région. Toutefois, la fracturation observée à l'intérieur de ces séries ne permet pas de localiser avec précision la limite étanche.

• Hauterivien Supérieur – Barrémien – Bédoulien :

Cet ensemble de séries, à forte dominante calcaire (avec de rares intercalations marneuses pouvant entraîner localement la formation de nappes perchées), constitue l'ossature de la région. Ces dépôts peuvent atteindre une épaisseur de 1500 m.

L'Urgonien, appartenant dans notre secteur à ces étages géologiques, est un des faciès caractéristique de ces calcaires et se compose de calcaires bioclastiques inférieurs (U1), de calcaires à Rudistes (U2) et de calcaires bioclastiques supérieurs à silex (U3). Ces dépôts forment un ensemble diachronique qui s'étend de l'Hauterivien Inférieur à l'Aptien Inférieur (Bédoulien).

Dès son émersion au Crétacé, cette puissante formation calcaire fera l'objet d'une intense karstification, conduisant à la formation du système karstique de la Fontaine de Vaucluse. [Puig (1987)].

• Gargasien – Crétacé Supérieur :

Ces formations, que l'on trouve principalement sur les pourtours des reliefs ou dans les zones effondrées, sont représentées par des marnes dont l'épaisseur varie de 50 à 200 m. Elles constituent le toit de l'aquifère et jouent un rôle très important car elles permettent notamment dans le synclinal du Toulourenc, où les marnes du Gargasien surmontent le Bédoulien, de mettre en charge une partie de l'aquifère karstique (forage artésien de Veaux).

Au Crétacé Supérieur, la sédimentation devient terrigène annonçant l'émersion de la région. Cette unité, d'une épaisseur variant de quelques mètres à 800 m, est de nature sablo-marneuse.

Dans la région d'Apt, cette formation est réduite à quelques dizaines de mètres et montre des phénomènes d'altération consécutifs à l'émersion de la région à partir du Cénomanien Moyen [Puig (1987)] qui ont permis la formation des ocres.



Figure II-3 : Contexte géologique [Couturaud (1993)]



Figure II-4 : Coupe lithostratigraphique [Puig (1987)]

II.1.3 L'aquifère du système de Fontaine de Vaucluse

II.1.3.1 **Contexte hydrogéologique**

Situé dans le Sud-Est de la France, à 30 km à l'Est d'Avignon, l'aquifère karstique de la Fontaine de Vaucluse, exutoire principal de la grande zone karstique comprenant notamment le Plateau d'Albion, le Mont Ventoux et la Montagne de Lure, possède un bassin d'alimentation d'environ 1 115 km² [Puig (1987)]. L'altitude de son bassin d'alimentation varie de 84 m pour l'exutoire à 1 912 m pour le Mont Ventoux avec une moyenne pondérée pour la zone d'infiltration de 870 m. Les précipitations moyennes annuelles s'échelonnent de 700 mm pour Gordes (370 m) à 1 300 mm pour la crête du Ventoux et les températures moyennes annuelles de 12,6 °C pour Gordes à 6 °C au Chalet Reynard sur le Mont Ventoux (1440 m).

Du point de vue géologique, ce karst s'est développé comme nous l'avons vu précédemment dans les calcaires Hauterivien et Urgonien (Barrémo-Bédoulien) pouvant atteindre une épaisseur de 1 500 m. La zone d'infiltration de ce système présente la particularité d'être très épaisse avec une moyenne de 800 m [Puig (1987)]. La structure de cet aquifère peut être considérée comme une vaste dalle monoclinale avec un pendage de 15° vers le SW, affectée par de nombreux accidents N-S et NE-SO.



Figure II-5 : Courbe des débits moyens journaliers sur la période « janvier 2003 – juin 2008 »

Les débits de la Fontaine de Vaucluse (23 m³/s en moyenne [Cognard-Plancq *et al.* (2006)]), suivis régulièrement depuis plus de 130 ans (de janvier 1877 à aujourd'hui), et la surface de son bassin d'alimentation font de cette source karstique l'une des plus remarquables d'Europe. En valeurs journalières entre le 1^{er} janvier 2003 et le 30 juin 2008 (Figure II-5), le débit minimum moyen journalier mesuré est de 2.74 m³/s le 18 novembre 2007 (débit minimum historique) contre 79.7 m³/s le 3 décembre 2003. Par ailleurs, sur cette même période, les débits moyens enregistrés à la Fontaine de Vaucluse sont de 12.32 m³/s. Nous sommes donc, au vu de la différence des débits moyens, dans une période très déficitaire, due elle-même à un déficit des précipitations (cf. II.1.5).

L'émergence de la Fontaine de Vaucluse (Figure II-6) se fait à la faveur de la grande faille subméridienne, séparant la terminaison ouest des Monts de Vaucluse du bassin tertiaire de Carpentras. Elle se présente au pied d'un escarpement calcaire de 200 m sous la forme d'une large vasque qui s'ouvre à l'amont d'un talweg chaotique, dans lequel des griffons s'échelonnent sur plusieurs centaines de mètres, en rive droite. Au-dessous de la cote 83 m, les émergences sont pérennes. Pour des débits supérieurs au débit minimum observé, des sorties étagées entre la cote 83 m et le seuil de débordement de la vasque, 105.5 m, entrent successivement en action. Le débordement se produit pour des débits supérieurs à 20 m³/s. En basses eaux, le plan d'eau de la vasque atteint parfois la cote de 84 m. Un certain nombre de reconnaissances par plongées humaines ou par des appareils ont permis d'explorer le conduit noyé jusqu'à une profondeur de 308 m soit environ 224 m sous le niveau de la mer [Staigre (1983)].



Figure II-6 : Coupe géologique passant par la Fontaine de Vaucluse[Puig (1987)]

II.1.3.2 Synthèse des études scientifiques

Les études hydrogéologiques effectuées sur Fontaine de Vaucluse ont permis de déterminer les limites de son bassin d'alimentation [Puig (1987)] et de caractériser son fonctionnement général [Blavoux *et al.* (1992a,b)] en liaison avec la fracturation [Couturaud (1993)]. Ces études ont toutes montré la difficulté de compréhension d'un aquifère karstique aussi vaste (Figure II-7).



Figure II-7 : L'aquifère de Fontaine de Vaucluse et localisation du LSBB

Les approches hydrodynamiques permettent d'approcher le fonctionnement du système. Ainsi, l'étude des courbes de récession à la Fontaine de Vaucluse montre une forte variabilité des coefficients de tarissement, laissant supposer que la Fontaine de Vaucluse serait l'exutoire de plusieurs systèmes [Mangin (1975)]. Puig (1987) propose d'assimiler cette variabilité à la variation des volumes d'eau dans la zone non saturée. En effet, la présence aléatoire de lentilles marneuses imperméables, retenant de petits aquifères « suspendus » dans la zone non saturée, permet la circulation d'eau dans des drains en périodes sèches (exemple de la rivière d'Albion, rivière perchée dans la zone non saturée environ 200 m au-dessus de la zone noyée, qui coule 600 m sous la surface de la terre avec un débit à l'étiage de 100 l/s). Ces observations suggèrent donc une participation notable [Puig (1987) ; Emblanch *et al.* (2003) ; Garry (2007)] de la zone non saturée aux débits à l'exutoire même pendant les périodes de basses eaux.

D'un point de vue hydrochimique, l'étude des concentrations en magnésium réalisée par Blavoux & Mudry (1983) a débouché sur la conception d'un schéma de fonctionnement du système karstique de la Fontaine de Vaucluse. Elle se divise en quatre étapes distinctes sur une année hydrologique, qui s'expliquent par des proportions variables des écoulements de la zone noyée se mélangeant soit avec des eaux chassées par transfert de pression, soit avec des eaux ayant transité dans la zone non saturée. Ceci démontre bien le caractère inertiel du système.

II.1.4 Contexte pédologique simplifié

Les variations d'altitude observées sur cette région montagneuse et l'exposition très différente suivant les versants d'orientation est-ouest sont à l'origine d'une caractérisation par étagement de différents groupements végétaux de façon altitudinale et climatique. Quatre étages se distinguent, à savoir l'étage méditerranéen, le subméditerranéen, le montagnard et le subalpin [Barbero *et al.* (1978)].

• *L'étage méditerranéen* occupe essentiellement les versants sud des Monts de Vaucluse, et du Mont Ventoux jusqu'à 800 m et les versants nord du Grand Luberon jusqu'à 600 m. Il correspond à l'association de chênes verts, de pins d'Alep, de chênes Kermès, de romarin, de genêts Scorpion, de genévriers et de garrigues avec du thym et du sparte.

• *L'étage subméditerranéen* occupe une grande partie des plateaux de Vaucluse et d'Albion audessus de 500 m et le versant sud de la chaîne Ventoux – Lure jusqu'à 1300 m. Il correspond à l'association de landes (buis, lavandes et genêts cendrés), de chênes verts et de pins Sylvestre.

• *L'étage montagnard* occupe la crête du Grand Luberon et la chaîne du Ventoux – Lure au dessus de 1000 m d'altitude. Il regroupe hêtres, pins Sylvestre et essences de type buis et lavande. Les

versants nord des crêtes de la chaîne Ventoux – Lure montrent des colonies de sapins associés aux hêtres.

• *L'étage subalpin* occupe le sommet du Mont Ventoux et est constitué de l'association pins à crochet – pelouse éparpillée. Cette faible végétation est due aux conditions climatiques rudes régnant sur le massif (vent, gel, orages, ...) provocant une érosion considérable sur les parties hautes où le sol et la végétation sont quasiment inexistants.

La Figure II-8 et le Tableau II-1 nous montrent que les activités agricoles ne se font que sur les plateaux et les fossés d'effondrement au niveau du bassin d'alimentation du système de Fontaine de Vaucluse. On y cultive principalement de la vigne, de la lavande, des vergers, des oliviers, des céréales et des fourrages. Ces territoires agricoles représentent 14.8 % de la surface. D'autre part, cette région reste peu peuplée, les terrains anthropisés ne représentant que 1 % de la surface. Ainsi, l'occupation des sols par les forêts et les milieux semi-naturels reste majoritaire (84.2 %). Certaines parties de cette zone peuvent être le siège d'exploitations forestières et/ou d'élevage d'ovins.



Figure II-8 : Carte d'occupation des sols sur l'aquifère de Fontaine de Vaucluse

Grands ensembles	Codes Niveau 3 (CRIGE PACA 2006)	Intitulés	Code couleur RBV	Couleurs	Surface (km²)	Proportion de surface / Surface du BV
	111	Tissu urbain continu	180 000 000		0.478	0.0427%
	112	Tissu urbain discontinu	255 000 000		4.222	0.3775%
	113	Bâti diffus	255 100 000		3.782	0.3382%
Territoires	121	Zones industrielles ou commerciales	204 077 242		1.612	0.1441%
artificialisés	124	Aéroports	255 077 255		0.571	0.0511%
	131	Extraction de matériaux	166 000 204		0.871	0.0779%
	141	Espaces verts urbains	255 128 128		0.004	0.0004%
	142	Equipements sportifs et de loisirs	255 102 102		0.114	0.0102%
	212	Terres arables hors périmètres d'irrigation	255 255 000		130.296	11.6510%
	221	Vignobles	242 204 166		3.227	0.2886%
	222	Vergers et petits fruits	242 166 077		2.701	0.2415%
	223	Oliveraies	230 166 000		1.473	0.1317%
Territoires	224	Lavandins	255 124 080		6.286	0.5621%
agricoles	231	Prairies	205 205 102		0.670	0.0599%
	241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	255 230 166		0.700	0.0626%
	243	Territoires principalement occupés par l'agriculture avec présence de végétation naturelle	230 166 000		20.077	1.7953%
	311	Forêts de feuillus	076 230 000		510.013	45.6051%
Forêts et milieux semi-naturels	312	Forêts de conifères	028 099 000		88.020	7.8707%
	313	Forêts mélangées	112 171 000		65.029	5.8149%
	321	Pelouses et pâturages naturels	204 242 077		54.407	4.8650%
	323	Maquis et garrigues	144 144 000		106.307	9.5059%
	324	Forêt et végétation arbustive en mutation	115 192 000		79.119	7.0748%
	332	Roches nues	224 224 224		8.248	0.7375%
	333	Végétation clairsemée	204 255 204		30.092	2.6908%
Surfaces en eau	512	Plans d'eau	096 202 255		0.005	0.0004%

Tableau II-1 : Légende de l'occupation des sols (chartre graphique du CRIGE PACA, 2006)

La végétation naturelles et l'occupation des sols dépendent étroitement des sols qui les portent. Ceux-ci présentent, dans notre secteur d'étude, des épaisseurs variables, généralement faibles. Ils se développent le plus souvent sur un substratum calcaire excepté dans les fossés d'effondrement où il existe une couverture quaternaire. Ainsi, les types de sol les plus communément rencontrés sont les lithosols, les rendosols et les fersialsols.

• *Les lithosols* sont des sols azonaux (caractérisés par un solum incomplet) et consistants en matériaux rocheux fraîchement et imparfaitement altérés. Ils sont limités en profondeur par le substratum calcaire à moins de 10 cm de profondeur.

• *Les rendosols (ou rendzines)* sont ici des sols intrazonaux calcimorphes constitués d'un horizon A mollique, riche en matières organiques et en carbonates, peu épais, de couleur foncée et de structure grumeleuse ; directement posé sur le substratum calcaire.

• *Les fersialsols* sont des sols caractérisés par une coloration rougeâtre, une décarbonatation en surface, une saturation en base supérieure à 65 % et une altération des minéraux primaires ayant libéré des quantités importantes d'oxydes et hydroxydes de fer. De tels sols sont couramment rencontrés dans les situations géomorphologiques stables ayant permis le développement de sols sur de longues durées en climat méditerranéen contrasté. On les trouve le plus souvent dans les dolines ou les fossés d'effondrement.

II.1.5 <u>Contexte climatique</u>

II.1.5.1 Stations de mesure et méthode de calcul de l'évapotranspiration

La zone du bassin d'alimentation du système de Fontaine de Vaucluse est assez bien équipée du point de vue des stations météorologiques (Figure II-9). Afin d'avoir des données météorologiques moyennes sur l'ensemble du secteur, nous avons choisi de suivre deux stations (Saint-Saturnin-lès-Apt et Sault) respectivement situées à une altitude de 354 m et 676 m. Elles sont dites de type 3, c'est-àdire qu'elles sont automatiques et qu'elles font l'objet d'une exploitation en différé. Ainsi, ce choix nous permet d'avoir accès à 10 ans de chroniques de précipitations et de températures (1998 – 2007) horaires et quotidiennes complètes. Par la suite, nous avons utilisé la moyenne des données journalières de ces deux stations afin d'obtenir une base de données météorologiques moyennes de notre site d'étude.



Figure II-9 : Répartition des stations « Météo-France » sur le bassin de Fontaine de Vaucluse

Pour notre problématique, il est intéressant de travailler sur la lame d'eau réellement infiltrée dans l'aquifère et donc d'obtenir une valeur même empirique de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Riou (1980) a introduit une formule empirique simple en prenant compte du déphasage entre le rayonnement solaire global et la température maximale pour estimer l'ETP en région méditerranéenne. Il a ainsi présenté une formule permettant de calculer pour un mois n la valeur moyenne de ETP mensuelle dans la région avignonnaise :

$$ETP_{n} = 0.31 \cdot \theta_{n}^{*} - (7.1 - 0.1 \cdot \Phi)$$

avec ETP_n, l'évapotranspiration potentielle en mm/j pour le mois n

$$\theta_n^* = \frac{(\theta_n^{\max} + 2 \cdot \theta_{n+1}^{\max})}{3}$$
, la température déphasée du mois n

 θ_n^{\max} , la température maximale du mois n et Φ , latitude d'Avignon soit 44°

II.1.5.2 Bilan climatique de la région entre 1998 et 2007

Notre zone d'étude présente un diagramme climatique fortement soumis à l'influence méditerranéenne (Figure II-10), caractérisé par deux saisons humides (avril – mai et septembre – novembre) fournissant l'essentiel des hauteurs d'eau précipitées. Celles-ci sont séparées par des saisons sèches (décembre – mars et juin – août). En effet, septembre et octobre sont, en moyenne depuis 1998, les mois les plus pluvieux avec une lame d'eau précipitée autour de 101 mm. Par opposition, juin et juillet sont, pour cette même période, les mois les plus secs avec des pluviométries de 29 mm environ.



Figure II-10 : Diagramme climatique « Pluie – ETP » sur la période 1998 – 2007

L'étagement altitudinal du secteur étudié, allant de 84 m pour l'exutoire (Fontaine de Vaucluse) à 1912 m pour le sommet du Mont Ventoux, implique l'existence de gradients altimétriques en température et précipitations [Puig (1987)]. De plus, notre secteur présente un fort contraste en précipitations entre les versants Nord et Sud du Mont Ventoux et ce notamment pendant les orages estivaux. En effet, lors de certains orages localisés, les précipitations peuvent dépasser les 400 mm en quelques heures. Par exemple, la commune de Vaison-la-Romaine a reçu, lors des orages de septembre 1992, des précipitations de plus de 350 mm en moins de quatre heures. Cette région présente donc des variabilités climatiques importantes dues en partie aux caractéristiques du climat méditerranéen, mais aussi à sa taille (impluvium de 1115 km²), l'orientation des versants et enfin à son étagement altitudinal. Lastennet *et al.* (1995) démontrent par une étude statistique des précipitations à la station de Carpentras sur une période de 1964 à 1992, « qu'il y a une certaine stabilité du signal annuel des



précipitations et un cycle saisonnier de la pluviométrie reproductible et bien contrasté. Par contre, le régime pluviométrique peut être très variable au cours de l'année ».

Figure II-11 : Différence moyenne « Pluie – ETP » des stations de Sault et de St Saturnin

Intéressons nous, maintenant, au contexte hydrologique de notre période d'étude. En effet, nous devons préciser l'état hydrique du système afin d'ajuster nos réflexions selon que l'on est dans une période humide (où les réserves sont importantes) ou dans une période sèche (où les réserves sont minimales). La Figure II-11 nous montre, sur une période allant de 1998 à 2007, le bilan hydrique de la région. Nous remarquons que, depuis 2003, nous nous trouvons dans une période fortement déficitaire, regroupant une succession d'années sèches avec un système dont les réserves ne se sont pas reconstituées, voire continuent de se vidanger.

II.2 Le LSBB, un accès privilégié sur la zone non saturée

II.2.1 <u>Description de la galerie</u>

II.2.1.1 **Historique et morphologie**

Le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) est implanté au Nord de Rustrel, petit village provençal d'environ 800 habitants. La galerie a été creusée dans le massif rocheux de la Grande Montagne, qui constitue une partie de la bordure Sud du Plateau d'Albion.

Le LSBB de Rustrel faisait partie, il y a quelques années à peine, d'un site militaire occupant le Plateau d'Albion, où était postée de 1966 à 1998 la force de dissuasion nucléaire française. Le site comportait une base support à Saint Christol, des sites de transmission Vestale sur les contreforts du Mont Ventoux, deux Postes de Conduite de Tir (PCT1 à Rustrel et PCT2 au Nord de Sault) tous deux rattachés respectivement à 9 Zones de Lancement (ZL) de missiles Sol/Sol Balistiques Stratégiques disséminées sur l'ensemble du Plateau d'Albion.

L'ensemble du site a été démantelé sur décision présidentielle en 1998. Les têtes nucléaires ont été démontées et évacuées des ZL, le PCT2 a été complètement vidé puis bouché. Certaines installations sont maintenant réutilisées, mais dans un tout autre but : une des ZL a été convertie en observatoire astronomique et le PCT1 en Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel - Pays d'Apt.

La galerie du PCT1 (Figure II-12) a été creusée dans le massif calcaire de la Grande Montagne, au Nord du village de Rustrel. L'entrée se trouve au Sud de la Grande Combe. Le tunnel s'enfonce sous le massif pour atteindre une profondeur maximum sous roche de 519 m au niveau de la capsule, puis en ressort par le puits de secours. Il s'étend sur une longueur de 3,3 km soit 1560 m de long sur 3.7 m de large pour la galerie principale et 1760 m de long sur 1.7 m de large pour la galerie de secours. L'ensemble des parois de la galerie est constitué d'une épaisseur d'environ 70 cm de béton armé avec par endroit des zones cintrées.

L'alvéole (ou capsule) se situe à 500 m sous roche. Ses caractéristiques sont données sur le site Internet du LSBB (<u>http://lsbb.unice.fr</u>). Il s'agit d'une cavité dont les parois sont en béton armé de 2,1 m d'épaisseur minimum et dont le volume intérieur forme un cylindre de 28 m de longueur totale, à extrémités hémisphériques de 8 m de diamètre. Un blindage en contact avec le béton constitue une cage de Faraday assurant la protection contre les effets électromagnétiques. Dans la partie supérieure, des éléments métalliques sont noyés dans le béton pour la fixation des suspentes de la capsule, et dans la partie inférieure, d'autres éléments servent à la fixation des amortisseurs.

Ainsi, la cellule de tir est surmontée par 500 m de zone non saturée. On observe des venues d'eau significatives et pérennes en quatre points de la galerie de secours (drainant donc cette zone non

saturée). Il existe également des suintements temporaires sur les parois de la galerie, notamment à l'entrée de la Galerie Anti-Souffle.



Figure II-12 : Schéma de la galerie du LSBB (<u>http://lsbb.unice.fr</u>)

II.2.1.2 Intérêt scientifique du site

La conversion du Poste de Conduite de Tir n°1 du Plateau d'Albion en LSBB a commencé à l'été 1997 et peut aujourd'hui être considérée comme achevée. Scientifiquement, la galerie présente un intérêt multidisciplinaire du fait de ses caractéristiques particulières qui sont :

• Facilité d'accès unique au tunnel recoupant de façon aléatoire la zone non saturée du karst

- Calme sismique, gravimétrique, mécanique et acoustique dans les 3 km de la galerie
- Pas de trafic routier à 2 km à la ronde
- Surface du massif à l'aplomb du tunnel entièrement accessible
- Protection radioactive correspondant à 1500 m d'épaisseur équivalente en eau
- Blindage électromagnétique dans la capsule pour un volume de 1250 m³
- Ensemble des galeries entièrement équipé (téléphonie, électricité, Intranet, fibres optiques).

L'activité expérimentale s'articule actuellement autour de trois thématiques principales : la sismologie, l'hydrogéologie et la physique des astroparticules. Une collaboration (35 laboratoires) existe déjà avec des laboratoires notamment en Italie, au Portugal et au Canada. Les interactions croisées (« pluridisciplinaires ») qui se sont créées au LSBB sont tout particulièrement à souligner. La combinaison des trois disciplines « magnétisme – hydrogéologie – sismologie » peut sembler expérimentalement surprenante. Pourtant, la possibilité de mettre pour la première fois en relation des mesures de bruit électromagnétique avec des analyses hydrogéologiques et des mesures sismologiques, loin de tout volcan ou autre source de variations du champ magnétique, est enfin possible. Il s'agit aussi de créer un couplage étroit entre le développement de sismomètres très sensibles et l'adaptation de systèmes SQUID (aux magnétomètres à 3 axes) pouvant fonctionner en continu au maximum de leur sensibilité dans la capsule blindée. Ceci ouvre des perspectives pour l'étude de ces phénomènes, pour des développements instrumentaux et pour évaluer expérimentalement des développements théoriques récents. Le LSBB offre un potentiel exceptionnel de mesures conjointes en sismométrie, hydrogéologie, magnétisme et hydromécanique pour l'enregistrement de séries temporelles longues qui permettront le développement de méthodes d'analyses transversales qui pourront être transposées à d'autres systèmes.

II.2.2 <u>Contexte hydrogéologique et pédologique</u>

La galerie se trouve sur le versant Sud des Monts de Vaucluse, creusée dans un monoclinal de pente Sud-Ouest, affecté par des failles Nord / Sud et Nord-Est / Sud-Ouest. Le LSBB se trouve au sein de la zone non saturée du système de Fontaine de Vaucluse et offre ainsi un intéressant point d'accès. En effet, jusque là, cette partie du karst n'était accessible que par de rares exutoires ou par des avens. Ici, la galerie recoupe de manière aléatoire le réseau karstique d'une formation calcaire

compacte, ayant un faciès à Rudistes (Urgonien au sens strict) du Bédoulien. Elle permet ainsi d'accéder à des eaux de fractures plus ou moins bien karstifiées.

On observe (Figure II-12 et Figure II-13) des venues d'eau significatives et pérennes en quatre points dispersés le long de la galerie de secours, au dessus desquelles l'épaisseur de roche est différente : A : 440 m ; B : 418 m ; C : 363 m ; D : 30 m. Ces arrivées d'eau coïncident avec des suintements de la paroi rocheuse révélés par les géologues lors du creusement de la galerie [Thiébaud (2003)], laissant supposer une faible circulation de l'eau à l'interface roche / paroi (béton) de la galerie. Afin d'éviter tout problème éventuel sur la présence de « poches d'eau » accumulée derrière la paroi, qui pourraient fausser l'interprétation des données hydrogéochimiques, cette dernière a été percée fin décembre 2003 au niveau de chaque écoulement prélevé. Il existe également un écoulement temporaire via une fracture ouverte très bien karstifiée à l'entrée de la galerie anti-souffle (GAS : 249 m).

Le secteur de la Grande Montagne (Figure II-13), à l'aplomb du LSBB, possède une couverture végétale globalement uniforme : une forêt de chênes verts sur le plateau et une végétation un peu plus clairsemée de type garrigue (faisant apparaître des îlots de chênes verts associés à des buissons, disséminés dans une couverture de type herbacé) sur les pentes. Les différents types de sol rencontrés sont un rendosol sur le plateau (PE2) et un lithosol sur les pentes (PA et PE1), tous deux très peu épais. D'autre part, la formation calcaire dans laquelle est creusée la galerie du LSBB ne contient aucune matière organique (cf. II.1.2.2). Ainsi, les sols sont la seule source de MOD du système. Enfin, il n'y a pas d'activités susceptibles d'apporter de la matière organique anthropique de façon significative telles que l'agriculture, l'élevage ou l'assainissement.



Figure II-13 : Schéma hydrogéologique et pédologique du site du LSBB

II.2.3 <u>Matériels et périodicité d'échantillonnage</u>

L'intérêt du LSBB est de nous offrir un accès privilégié et facile à des écoulements non hiérarchisés de la zone non saturée du système de Fontaine de Vaucluse. De ce fait, il est aisé de d'installer du matériel de mesure à un pas de temps assez fin, d'aller relever ces données et de prélever des échantillons relativement souvent et sans aucun équipement de spéléologie.

Ainsi, les points B et D ont été équipés, depuis février 2005, d'un multimètre mesurant la conductivité et la température à un pas de temps de 1 heure, et de deux capteurs de pression (sondes « diver »), nous donnant par soustraction de l'une par rapport à l'autre le débit de l'écoulement à un pas de temps de 5 minutes. Nous avons aussi à disposition un fluorimètre de terrain du type GGUN-FL30 d'®Albilla SARL (cf. Annexe 1), prêté par le département Géosciences de l'Université de Franche-Comté depuis novembre 2002, mesurant la fluorescence du couple « excitation-emission » (350 nm ; 427 nm), If₍₃₅₀₋₄₂₇₎, de la matière organique naturelle, à un pas de temps de 15 minutes (Figure II-14).



Figure II-14 : Schématisation des installations au niveau des points B et D

En surface, nous avons placé trois plaques lysimétriques, d'une surface d'environ 850 cm², nous permettant de récolter le percolat des trois types de sol rencontrés sur le secteur d'étude (à savoir le rendosol (PE2), le lithosol sous un « îlot » de végétation arbustive (PA) et le lithosol sous couvert herbacé (PE1)). Le percolat est obtenu grâce à un arrosage artificiel d'eau distillée, présentant une conductivité de 2.5 μ S/cm et un COT inférieur à 0.1 mg/L, jusqu'à l'obtention d'un échantillon de 500 mL.

Notre suivi de terrain s'est donc effectué sur près de deux ans et demi de décembre 2005 à avril 2008. D'une manière générale, la fréquence des prélèvements est bimensuelle pour les écoulements souterrains et Fontaine de Vaucluse, et mensuelle pour les percolations de sol.

II.3 Caractérisation hydrogéochimique des écoulements du LSBB

Afin de faire du LSBB un site test pour le traçage naturel, il nous est indispensable de bien connaître les différents types d'écoulement rencontrés, ainsi que leur temps de séjour moyen.

II.3.1 <u>Méthodes d'analyses hydrogéochimiques</u>

II.3.1.1 **Paramètres physico-chimiques**

Les paramètres physico-chimiques sont mesurés sur le terrain lors de l'échantillonnage. Le matériel utilisé est un pH-conductimètre WTW MultiLine P3, mesurant le pH, la température et la conductivité (température de référence à 25 °C). Les valeurs de conductivité ont une précision de ± 1 µS/cm. Les mesures de températures sont à $\pm 0,1$ °C, et les valeurs de pH sont données à $\pm 0,05$ unités pH.

II.3.1.2 Anions

L'échantillonnage pour l'analyse des anions a été effectué dans des flacons en polyéthylène de 150 mL et conservés à 4 °C. Pour tous les échantillons, l'alcalinité totale (AlcT) a été mesurée dans un premier temps sur le terrain par dosage volumétrique (trousse Hach) puis vérifiée en laboratoire par dosage à l'acide sulfurique H_2SO_4 , à N/50 et calculée à partir de la méthode de Gran (Michard, 1989). Nous supposerons dans cette étude que l'alcalinité totale et l'alcalinité carbonatée (équivalente à [HCO₃⁻] pour des pH proches de 7) sont équivalentes, et donc que l'alcalinité non carbonatée (déterminée par un dosage inverse à la soude NaOH N/50) est négligeable. Cette hypothèse a été vérifiée sur quelques échantillons où l'alcalinité non carbonatée représente moins de 3 % de l'alcalinité totale. Pour des échantillons présentant des concentrations en bicarbonates de 200 mg/L, cela représente tout de même prés de 6 mg/L. Les autres anions (principalement Cl⁻, NO₃⁻ et SO₄²⁻) ont été analysés par chromatographie ionique en phase liquide à l'aide d'un appareil DIONEX DX120.

Les erreurs sur les mesures, établies par Garry (2007) (Tableau II-2), ont été obtenues par répétition de n = 43 étalons. L'erreur $E_{90\%}$ retenue pour chaque élément correspond à l'intervalle de confiance à 90 % suivant une loi de Student à (n-1) degré de liberté.

Elément	mg/L	E _{90%} (mg/L)	E _{90%} (%)	n
F-	8	0.3	4	43
Cŀ	20	1.2	б	43
NO2	8	0.3	4	43
Br	4	0.1	4	43
NO3.	20	0.8	4	43
PO4 ³⁻	20	0.9	5	43
SO4 ²⁻	20	1.0	5	43

Tableau II-2 : Erreurs de mesure sur les anions [Garry (2007)]

En ce qui concerne nos échantillons, aucun ne contient de F⁻, de NO₂⁻, de Br⁻ ou de PO₄³⁻. Nous ne discuterons donc pas de l'impact de ces analyses sur nos échantillons. Par contre, pour les analyses en ions chlorures, dans l'ensemble nos systèmes présentent des concentrations moyennes autour de 4 mg/L, nos mesures auront donc une incertitude de \pm 0.25 mg/L. Pour les nitrates, les écoulements de la zone non saturée ont une moyenne globale située autour de 1.3 mg/L, la précision des mesures sera donc de \pm 0.05 mg/L (4.3 mg/L pour la Fontaine de Vaucluse soit une précision de \pm 0.2 mg/L). Enfin pour les sulfates, les données moyennes variant de 2.5 mg/L à 12 mg/L, les incertitudes oscilleront entre 0.12 et 0.6 mg/L. Les erreurs dont nous parlons sont du type analytique, toutefois d'autres sources potentielles d'erreurs ne sont pas à exclure comme au moment de l'échantillonnage, cependant nous ne pouvons la quantifier.

II.3.1.3 Cations

Les cations ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 50 mL et conservés à 4 °C. Les analyses en cations (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+) ont été effectuées par absorption atomique de flamme avec un spectromètre type VARIAN 640.

Les erreurs sur les mesures, établies par Garry (2007) (Tableau II-3), ont été obtenues par répétition de n = 35 étalons, avec les concentrations suivantes : $[Na^+] = 2 \text{ mg/L}$, $[K^+] = 5 \text{ mg/L}$, $[Ca^{2+}] = 10 \text{ mg/L}$ et $[Mg^{2+}] = 10 \text{ mg/L}$. L'erreur $E_{90\%}$ retenue pour chaque élément correspond à l'intervalle de confiance à 90 % suivant une loi de Student à (n-1) degré de liberté.

Elément	mg/L	E _{90%} (mg/L)	E _{90%} (%)	n
Na+	2	0.1	5	35
K+	5	0.1	2	35
Ca ²⁺	10	0.2	2	35
Mg ²⁺	10	0.2	2	35

Tableau II-3 : Erre	eurs de mesure sur	les cations [Garry	y (2007)]
---------------------	--------------------	--------------------	-----------

Comme pour les anions, nous allons regarder l'impact des incertitudes des mesures pour des eaux dont les concentrations sont équivalentes à celles analysées sur nos échantillons. Pour des eaux dont la concentration en calcium est d'environ 80 mg/L, les incertitudes appliquées de 2 %, représentent moins de 2 mg/L. En ce qui concerne le magnésium dont les concentrations oscillent entre 0.7 et 6 mg/l, les incertitudes varient donc de 0.01 à 0.12 mg/L. Pour le sodium, les concentrations oscillent autour de 2 mg/L avec une incertitude de 0.04 mg/L, et enfin pour le potassium présentant des valeurs de 0.3 mg/L, les incertitudes qui lui sont associées, oscillent autour de 0.006 mg/L (ce qui n'est pas détectable par nos appareils).

II.3.1.4 Carbone Organique Total (COT)

Les échantillons pour l'analyse en COT ont été prélevés dans des échantillons en verre brun de 30 ml, stabilisés avec du chlorure mercurique et conservés à 4 °C. Ces flacons et les bouchons avec pastille de bakélite ont été préalablement nettoyés à l'acide nitrique N/10 et rincés trois fois à l'eau distillée avant d'être chauffés à 550 °C pendant 6 heures [Batiot (2002)].

Le COT a été mesuré à l'aide du TOC Analyser Model 700 de BIORITECH. L'analyse se fait en deux phases à haute température (\approx 180 °C). Le carbone minéral est éliminé par ajout d'un acide fort et le carbone organique transformé en CO₂ gazeux par ajout d'un oxydant. Le CO₂ est ensuite analysé par un détecteur infrarouge non dispersif, qui convertit la masse de CO₂ en masse de COT. La précision est de ± 0.05 mg/L [Batiot (2002)].

II.3.2 Synthèse de l'étude des écoulements de la zone non saturée

II.3.2.1 Description et caractérisation des différents écoulements du LSBB

Une première distinction peut être faite par la position des écoulements dans le système karstique. En effet, les études géophysiques et géomorphologiques, menées par Maufroy *et al.* (2008), ont montré une fracturation gravitaire ou karstique due à l'érosion de surface à une profondeur variant de 10 à 40 m. En effet, au niveau du profil sismique de la Figure II-15, la roche en surface présente des zones d'éboulis, et de la terre/argile est visible entre les dalles de roche compacte. L'aspect du terrain, typiquement du calcaire remanié sur une forte pente, est compatible avec une vitesse réduite des ondes P en surface, sur les quelques premiers mètres de profondeur. Le point D, situé à 35 m de profondeur, se trouve donc à la base de cette zone très remaniée du système, ce qui explique la difficulté d'interprétation des données hydrochimiques.



Figure II-15 : Profil géophysique de la galerie principale du LSBB [Maufroy et al. (2008)]

L'étude des relations magnésium – carbone organique total [Garry et al. (2008)], faisant intervenir deux traceurs du temps de transit de l'eau au sein de l'encaissant [Batiot et al. (2003a)], a permis de différencier trois grands types d'écoulements parmi ceux suivis dans la galerie, le premier comprenant les écoulements A et B, le deuxième l'écoulement GAS et le troisième étant défini par les écoulements C et D. Le premier groupe défini par de fortes concentrations en magnésium et de faibles concentrations en COT caractérise des eaux à long temps de séjour, assimilables à des écoulements de type « capacitifs ». Le deuxième groupe est quant à lui défini par des eaux à forte concentration en matière organique et très faible en magnésium, caractérisant des eaux récentes, donc des écoulements de type « transmissifs ». Ceci est corroboré par le fait que le point GAS est situé à l'intersection d'une faille principale et d'une galerie du LSBB. Et pour finir, le troisième groupe, composé des écoulements C et D, correspond plus à un intermédiaire entre les deux autres, possédant à la fois de faibles concentrations en magnésium et des concentrations en matières organiques comprises entre 1 et 2 mg/l, caractérisant des eaux infiltrées depuis environ deux mois (Figure II-16). Ce troisième ensemble est à prendre de manière tout à fait relative. En effet, ces deux points C et D présentent des fonctionnements hydrodynamiques très différents. L'écoulement C présente des concentrations qui tendent à se rapprocher de celles de l'écoulement GAS et montre une dynamique assez impulsive en réponse aux phénomènes pluvieux, le rapprochant davantage d'un fonctionnement transmissif. Quant à D, son caractère inertiel le rapproche plus d'un comportement de type capacitif et ce malgré ses faibles concentrations en magnésium. Il faut rappeler qu'il s'agit d'un écoulement issu de fracturation de surface, et donc ayant un temps de séjour plus court que des écoulements capacitifs de la zone non saturée au sens strict.



Figure II-16 : Classification des écoulements suivis au LSBB [Garry (2007)]

Il est maintenant intéressant de connaître le fonctionnement hydrodynamique des points du type « capacitif » (les points A et B). La Figure II-17 nous montre l'évolution de la conductivité par rapport à la pluie efficace. Nous pouvons remarquer une variation sinusoïdale de ce paramètre hydrochimique ayant une augmentation simultanée avec l'arrivée d'une période humide. Le fait d'observer ce même phénomène en phase sur la chronique du magnésium nous indique une arrivée d'eau ancienne, poussée par l'onde hydrodynamique des eaux météoritiques nouvellement arrivées, sans qu'il n'y ait un important mélange. Par conséquent, au vu de cette analyse, nous pouvons dire que les écoulements captifs (A et B) ont un fonctionnement se rapprochant d'un type « piston ».



Figure II-17 : Evolution de la conductivité et du magnésium par rapport à la pluie efficace des points A (a)

et B (b)

Le LSBB, en recoupant le réseau karstique de façon aléatoire, nous offre donc la possibilité d'étudier un certain nombre d'écoulements élémentaires [Garry *et al.* (2008)] ayant des comportements très différents (Figure II-18). En effet, nous avons tout d'abord un écoulement « épikarstique » (D), correspondant à la vidange diffuse d'un réservoir situé à l'interface de la zone non saturée au sens strict et d'une zone fortement remaniée. Ce type de fonctionnement a été décrit par Trček (2007). Ensuite, nous avons un écoulement purement transmissif (GAS), à l'intersection d'un plan de faille et d'une galerie du laboratoire, répondant de façon impulsionnelle aux précipitations. Il s'agit donc d'un écoulement de type « drain », que l'on retrouve souvent dans les galeries naturelles, représentant l'exutoire d'un réseau très bien karstifié. Puis, nous avons un autre écoulement du même type que le précédent (C), avec toujours une réponse impulsionnelle aux pluies, mais fonctionnant de manière plus diffuse, attestant d'un réseau moins bien karstifié. Enfin, nous avons des écoulements beaucoup plus capacitifs (A et B) de type « fracture », correspondant à une vidange diffuse d'un réservoir perché et ayant un fonctionnement de type « piston », chassant quasiment sans mélange des eaux plus anciennes à l'arrivée de l'onde des eaux météoriques nouvelles.



Figure II-18 : Schéma conceptuel des écoulements rencontrés dans les galeries du LSBB

II.3.2.2 Estimations des temps de séjour par l'évolution du COT

Batiot (2002) a essayé de quantifier les cinétiques de dégradation du COT en milieu carbonaté, tout d'abord à l'aide d'une expérience en laboratoire Batiot *et al.* (2000), puis en transposant les résultats sur des systèmes karstiques du Plateau de Vaucluse. Elle a pu ainsi donner une bonne approximation du temps de séjour (Tds) grâce à une formule liant ce dernier à la concentration en $COT : [COT] = a \cdot (Tds)^{-b}$. Ce type de relation montre bien une forte décroissance des teneurs en matière organique total (correspondant pour les eaux souterraines aux matières organiques dissoutes) pour arriver à une minéralisation d'environ 70 % en trois mois.

Ainsi, à l'aide de différentes valeurs prises dans l'aquifères de Vaucluse, Batiot (2002) a déterminé les coefficients « a » et « b » de la précédente relation en se basant sur un signal d'entrée moyen de 18 mg/L en COT. Cette valeur correspond, en effet, à la valeur moyenne mesurée sur les lixiviats des plaques lysimétriques PA, PE1 et PE2. Il en résulte donc l'équation suivante :

$$[COT] = 15.104 \cdot (Tds)^{-0.6067} \Leftrightarrow Tds = \left(\frac{[COT]}{15.104}\right)^{-\frac{1}{0.6067}}, \text{ avec } r = 0.989 \text{ et } n = 4$$

A l'aide de cette relation, Garry (2007) a déterminé les temps de séjour moyens des différents écoulements suivis dans la galerie du LSBB. Les résultats sont résumés dans le Tableau II-4 :

	[COT] (en mg/L)			Tds (en j)			[Mg ²⁺] (en mg/L)		
	Min	Moyen	Max	Min	Moyen	Max	Min	Moyen	Max
A	0.63	0.97	1.56	42	92	188	2.93	3.79	4.69
В	0.60	0.93	1.74	35	99	203	4.49	5.39	6.33
С	1.06	1.55	2.62	17	42	80	0.36	0.70	1.01
D	0.78	1.14	2.24	23	70	132	0.44	0.79	1.13
GAS	1.39	2.15	4.21	8	25	51	0.70	0.80	0.96

Tableau II-4 : Estimation des temps de séjour moyens des écoulements suivis au LSBB [Garry (2007)]

Lorsque l'on compare les temps de séjour à la concentration en Mg^{2+} , déjà connue comme marqueur des longs temps de résidence [Mudry (1982)], on remarque tout d'abord une certaine complémentarité entre ces deux traceurs, déjà notée par Batiot *et al.* (2003a). D'autre part, les valeurs fortes en Mg^{2+} correspondent bien aux eaux ayant un plus long temps de séjour ; ce qui corrobore encore plus la validité de la relation et l'intérêt que représentent les matières organiques dissoutes pour le traçage hydrogéologique.