

Document public

*Caractérisation du fonctionnement des
systèmes karstiques nord-montpelliérains*

Volume I

Contexte géologique et hydrogéologique

Juillet 1999
R 40747

Document public

*Caractérisation du fonctionnement des
systèmes karstiques nord-montpelliérains*

Volume I

Contexte géologique et hydrogéologique

M. Bakalowicz, R. Schoen, B. Ladouche, L. Aquilina et E. Petelet

Juillet 1999

R 40747

Mots clés : Géologie, Hydrogéologie, Systèmes karstiques, Hérault, Fontanilles, Cent-Fonts.

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

M. Bakalowicz, R. Schoen, B. Ladouche, L. Aquilina, E. Petelet (1999) - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Rap. BRGM R 40747 volume 1, 75 p., 23 fig., 1 annexe.

© BRGM, 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En partenariat avec les collectivités locales concernées, le Conseil Général de l'Hérault souhaite développer la connaissance des systèmes karstiques de la région nord-montpelliéraine. Cette action s'inscrit dans la perspective de satisfaire les demandes en eau à l'horizon 2010 mais également dans celle d'une gestion patrimoniale représentée par le projet SAGE Hérault.

Le Conseil Général 34 s'est associé pour ce faire au BRGM, qui développe depuis plusieurs années un large programme d'étude et de recherche sur le fonctionnement et la gestion des aquifères karstiques. Le BRGM vient ainsi en appui scientifique à la politique de l'eau du Conseil Général 34 dans le cadre de sa mission de service public et de recherche.

La source des Fontanilles, située dans la vallée de l'Hérault sur la commune de Puéchabon, et celle des Cent-Fonts, située dans la même vallée sur la commune de Causse-de-la-Selle, ont été retenues comme sites d'étude. Sur ces sites ont été mises en œuvre les différentes méthodes d'étude permettant de caractériser les ressources et les réserves en eau des systèmes karstiques, ainsi que leur vulnérabilité et les possibilités d'exploitation et de protection.

L'un des objectifs de l'étude réalisée par le BRGM est de développer les outils nécessaires à une gestion rationnelle des ressources en eau à l'échelle du département, à partir d'une exploitation et d'une gestion optimisée de la ressource en eau des systèmes karstiques. Il s'agit donc d'une démarche de recherche dont l'ampleur va au-delà des deux sites étudiés.

Le programme d'actions s'est déroulé de 1996 à 1999. Il a compris une instrumentation des sites et le suivi hydrologique des sources, ainsi que le suivi hydrochimique de l'ensemble du système. L'ensemble de ces données a fait l'objet de différents traitements dont l'interprétation conduit à un schéma de fonctionnement des systèmes karstiques étudiés.

L'ensemble de ces résultats est présenté à travers une série de cinq rapports :

- **Volume I : « Contexte géologique et hydrogéologique »**
- Volume II : « Moyens mis en œuvre »
- Volume III : « Interprétation des données hydrologiques »
- Volume IV : « Interprétation des données hydrochimiques »
- Volume de « Synthèse Générale »

Le présent rapport (Volume I) présente les résultats de l'étude préliminaire du cadre géographique, géologique et hydrogéologique des hydrosystèmes karstiques des Fontailles et des Cent-Fonts. Une délimitation préliminaire des réservoirs potentiellement aquifères est effectuée ; les zones d'étude sont ainsi définies pour les différents programmes d'actions.

Sommaire

1. Système des Fontanilles.....	9
1.1. Etude préliminaire de la géométrie du réservoir	9
1.1.1. Situation géographique.....	9
1.1.2. Cadre géologique.....	11
1.1.3. Caractères stratigraphiques	13
1.1.4. Contexte structural	15
1.1.5. Contexte hydrogéologique	20
1.1.6. Inventaire général des phénomènes Karstique des Fontanilles	21
1.2. Géométrie du réservoir de la source des Fontanilles.....	24
1.2.1. Limites du système karstique	24
1.2.2. Géomorphologie du système karstique des Fontanilles.....	28
2. Système des cent-fonts.....	31
2.1. Introduction	31
2.2. Etude préliminaire de la géométrie du réservoir	31
2.2.1. Situation géographique.....	31
2.2.2. Cadre géologique.....	33
2.2.3. Caractères stratigraphiques	35
2.2.4. Contexte structural	37
2.2.5. Contexte hydrogéologique	40
2.2.6. Géométrie présumée du réservoir de la source des Cent-Fonts.....	41
2.2.7. Géomorphologie du système karstique des Cent-Fonts.....	44
2.2.8. Inventaire des phénomènes karstiques des Cent-Fonts	47
2.3. Hydrogéologie du système karstique des Cent-Fonts	54
2.3.1. Caractères hydrogéologiques des formations	54
2.3.2. Zone d'infiltration	55
2.3.3. Schéma interprétatif des circulations souterraines	55

3. Analyse microstructurale.....	57
3.1. Introduction à l'analyse de la fracturation dans les aquifères karstiques.....	57
3.1.1. <i>Les méthodes proposées.....</i>	<i>57</i>
3.1.2. <i>Méthode d'analyse retenue.....</i>	<i>59</i>
3.2. Application aux systèmes karstiques nord-montpelliérains.....	61
3.2.1. <i>La démarche.....</i>	<i>61</i>
3.2.2. <i>L'interprétation.....</i>	<i>62</i>
Annexe	67

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique et délimitation de la zone d'étude des Fontanilles (extrait de la carte IGN).....	10
Figure 2 : Schéma structural régional.	11
Figure 3 : Coupe géologique de la zone d'étude.....	12
Figure 4 : Log lithostratigraphique	16
Figure 5 : Schéma structural du système des Fontanilles	17
Figure 6 : Coupes géologiques du système aquifère de la source des Fontanilles. La localisation des coupes est présentée figure 5.....	19
Figure 7 : Carte de localisation des cavités du système Fontanilles, par classes de nature.	25
Figure 8 : Carte de localisation des cavités du système Fontanilles, par classes de profondeur.	26
Figure 9 : Carte de localisation des cavités du système Fontanilles, par classes de développement.....	27
Figure 10 : Carte des phénomènes karstiques du système des Fontanilles.	29
Figure 11 : Situation géographique et délimitation de la zone d'étude des Cent-Fonts (extrait de la carte IGN au 1/100).....	32
Figure 12 : Carte géologique schématique de la zone d'étude des Cent-Fonts.	34
Figure 13 : Coupe lithostratigraphique du système des Cent-Fonts	36
Figure 14 : Schéma structural du système des Cent-Fonts	38
Figure 15 : Coupe géologique régionale (en partie d'après Gottis, 1957).....	39
Figure 16 : Limites présumées du système aquifère de la source des Cent-Fonts (extrait de la carte au 1/100).....	42
Figure 17 : Coupes géologiques du système aquifère de la source des Cent-Fonts (la localisation des coupes est présentée figure 12)	43

Figure 18 : Carte hydrogéomorphique du système aquifère de la source des Cent-Fonts.	45
Figure 18bis : Légende de la carte hydrogéomorphique figure 8.....	46
Figure 19 : Topo de l'aven de la Combe-du-Buis.....	50
Figure 20 : Carte des cavités du système des Cent-Fonts, par classes de profondeur	51
Figure 21 : Carte des cavités du système des Cent-Fonts, par classes de développement.....	52
Figure 22 : Carte des cavités hydrologiquement actives du système des Cent-Fonts.....	53
Figure 23 : Carte de localisation des stations de mesures microstructurales.	65

1. Système des Fontanilles

1.1. ETUDE PRÉLIMINAIRE DE LA GÉOMÉTRIE DU RÉSERVOIR

1.1.1. Situation géographique

Le système aquifère karstique des Fontanilles, s'insère dans la région des Garrigues nord-montpelliéraine, composée des massifs calcaires situés entre Montpellier et les Cévennes. Cette région de collines et de bas plateaux est drainée par le fleuve Hérault et ses affluents, notamment le Lamalou. Les limites de la région étudiée sont les suivantes (cf. fig. 1) :

- au nord : la rivière du Lamalou,
- à l'ouest : le fleuve côtier de l'Hérault,
- à l'est : le bassin de Saint-Martin-de-Londres et le causse de l'Hortus,
- au sud : les structures du Pic Saint-Loup et de l'anticlinal de Viols-le-Fort.

La région ainsi définie forme un triangle d'une vingtaine de kilomètres de long et d'une largeur maximale de 10 km côté englobant plusieurs massifs ou parties de massifs calcaires notamment : la Montagne de la Sellette et le nord du Causse de Viols-le-Fort.

Sa morphologie, constituée par des plateaux peu accidentés, est fortement entaillée à l'ouest par les gorges de l'Hérault et dans une plus faible mesure par celles du Lamalou. Les plateaux y présentent des altitudes régulières, témoins d'anciennes surfaces d'érosion, étagées entre 200 et 500 m. Le point culminant est la montagne de la Sellette (530 m) située au sud-ouest de la région.

Comme la limite méridionale de la région est constituée par les structures du Pic Saint-Loup et de Viols-le-Fort, le bassin hydrologique de la source du Lez, situé au sud, n'est pas rattaché à la région d'étude.

Le climat de cette région est de type méditerranéen mais avec des influences provenant des Cévennes qui se traduisent par une pluviométrie moyenne supérieure à 1 000 mm par an et par des températures hivernales plus basses que sur la plaine littorale.

La distribution pluviométrique moyenne présentant des maxima en mars et octobre à laquelle se surimpose une forte irrégularité tant annuelle que mensuelle due au régime pluviométrique méditerranéen.

La végétation de ces garrigues est typiquement méditerranéenne. Dans les zones sauvages, elle est dominée par un couvert arbustif dense constitué par le chêne vert, le chêne kermès, le genévrier, le buis et l'alaterne tandis que la plaine est essentiellement cultivée pour la vigne.

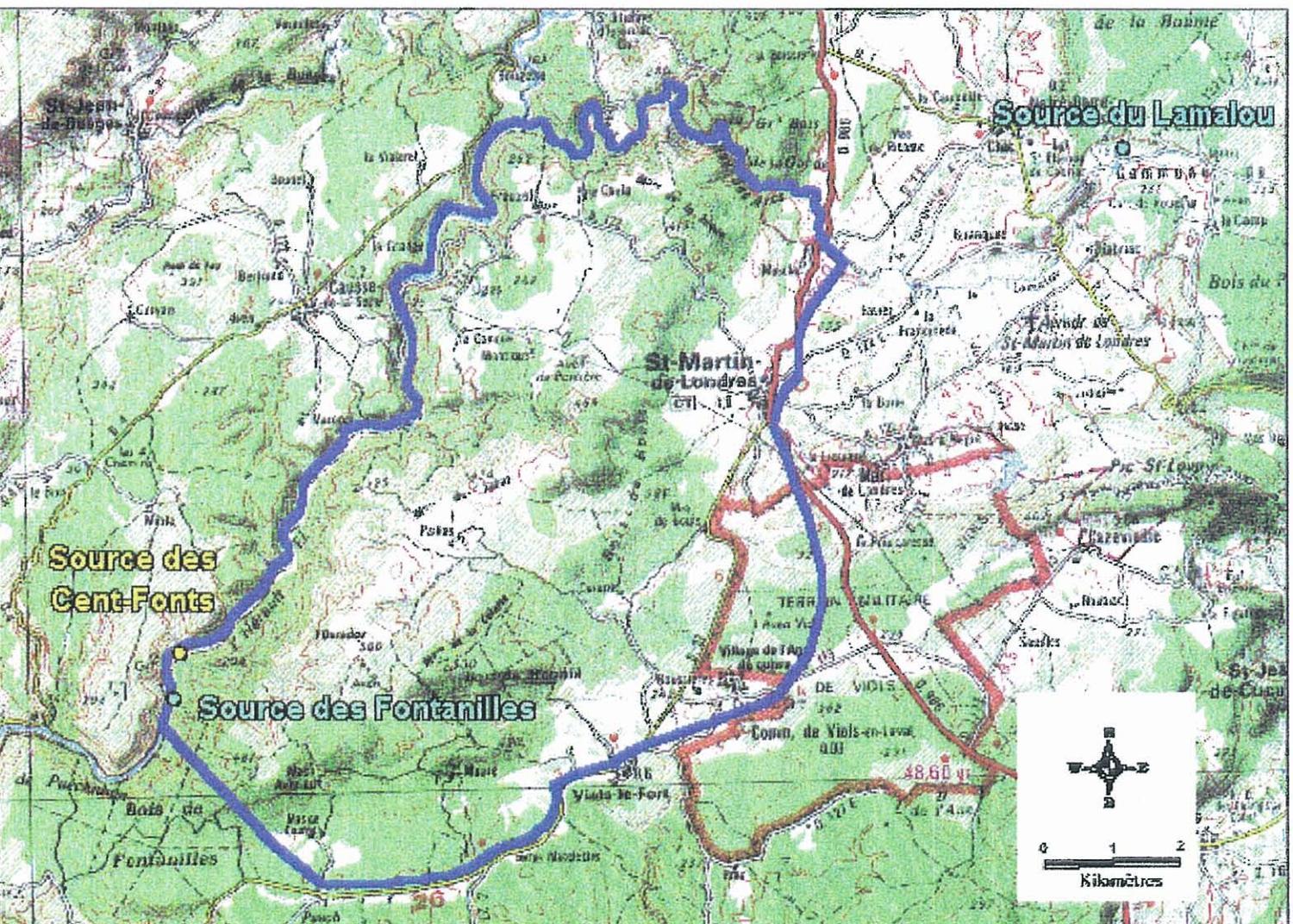


Fig. 1 : Situation géographique et délimitation de la zone d'étude des Fontanilles (extrait de la carte IGN au 1/100).

1.1.2. Cadre géologique

Cette région est constituée d'une importante série sédimentaire d'âge secondaire et tertiaire dont la structure générale, très faiblement inclinée vers le SSE, est affectée par quelques plissements et failles produites par la surrection pyrénéenne à l'Éocène moyen (40 à 50 Ma).

La surface de ces massifs a été arasée à l'Oligocène lors d'une phase tectonique majeure, puis a été fortement entaillée lors de la surrection villafranchienne qui a imposé sur ces massifs les gorges du Lamalou et de l'Hérault ainsi que les profondes vallées sèches s'y raccordant.

La limite ouest de la région étudiée, constituée par les gorges de l'Hérault, est géologiquement marquée par l'anticlinal faillé de l'Hérault (cf. fig. 2 et 3), tandis que le plateau crétacé de l'Hortus et la dépression tertiaire de Saint-Martin-de-Londres constituent sa frontière est.

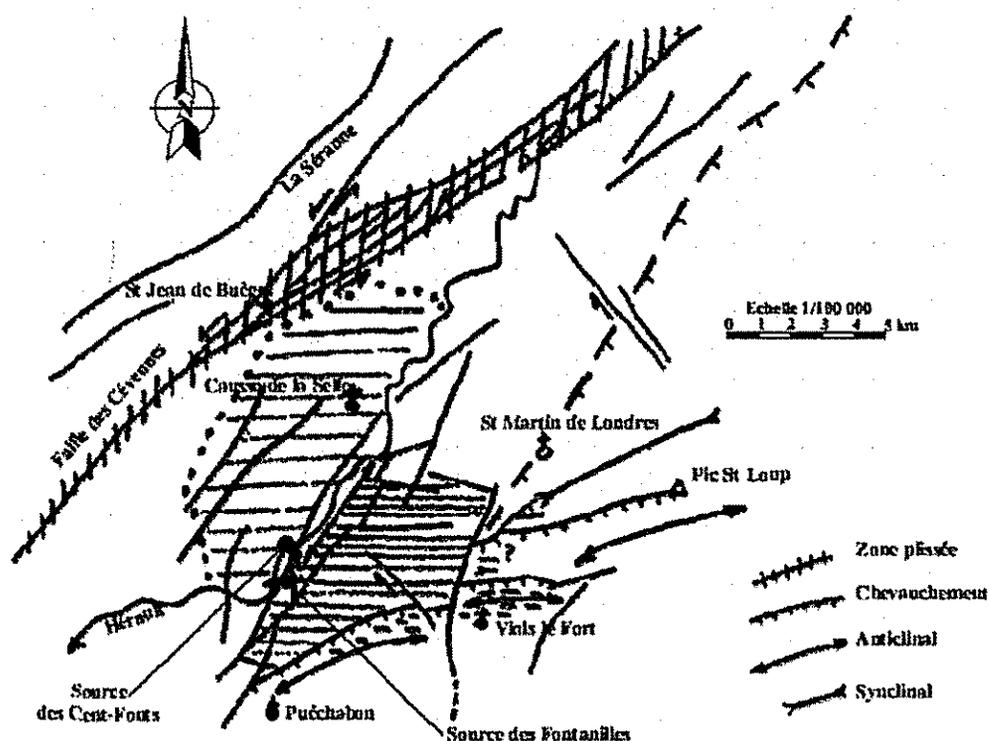
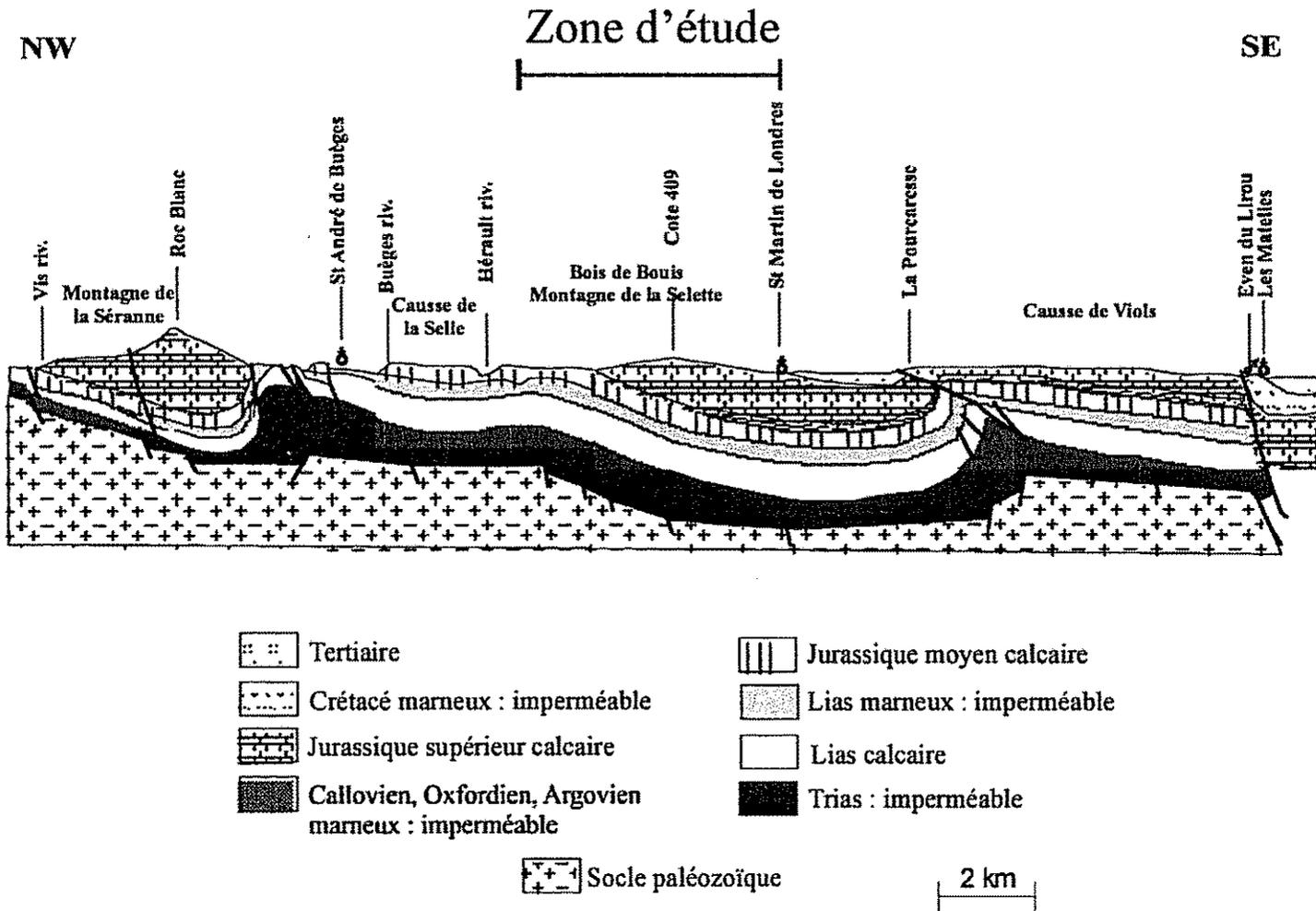


Fig. 2 : Schéma structural régional.

Le Nord de la région a volontairement été limité à la rivière du Lamalou qui, comme l'Hérault, correspond à un niveau de base hydrogéologique souligné par une source pérenne de faible importance et de nombreuses sources temporaires. La frontière sud de la zone étudiée est occupée par un ensemble de petites dépressions localisées sur l'accident anticlinal de Viols-le-Fort.



Coupe schématique des Cévennes aux Garrigues selon une direction NW-SE
(en partie d'après Gottis, 1957)

Fig. 3 : Coupe géologique de la zone d'étude.

En se limitant aux terrains affleurants, trois unités lithostratigraphiques peuvent être individualisées (des plus anciennes aux plus récentes) :

- un soubassement carbonaté correspondant aux dépôts jurassiques (du *Bathonien* au *Portlandien*). Cet ensemble est particulièrement bien visible dans l'entaille des gorges de l'Hérault. C'est dans les faciès dolomitiques (*Bathonien*) que se développe le réseau spéléologique de la source des Fontailles ;
- une couverture partielle par des faciès calcaires et marno-calcaires de la base du Crétacé (*Néocomien*). L'ensemble est uniquement représenté dans le bassin amont du Lamalou et au droit du Causse de l'Hortus ;
- le bassin tertiaire de Saint-Martin-de-Londres dont le remplissage essentiellement argilo-détritique est armé à la base par des bancs de calcaires palustres. Ces formations discordantes sont venues combler les dépressions et le fossé d'effondrement créés lors de phénomènes tectoniques antérieurs.

1.1.3. Caractères stratigraphiques

Les caractéristiques stratigraphiques des différentes formations géologiques constituant les garrigues nord-montpelliéraines sont synthétisées sur la colonne stratigraphique de la figure 16. Elles mettent en évidence deux formations carbonatées majeures : les calcaires du Jurassique supérieur et les calcaires dolomitiques du Jurassique moyen.

Les dépôts jurassiques

Sur la région étudiée, la puissance des séries du Jurassique moyen et supérieur est d'environ 600 à 700 m. Cet ensemble sédimentaire, présent à l'affleurement, est constitué par une puissante base dolomitique (*Bathonien*) séparée des calcaires sommitaux (*Kimméridgien-Portlandien*) par des niveaux calcaro-marneux peu développés (*Callovien-Oxfordien*).

La formation dolomitique (*Bathonien*) est constituée en grande partie par des dolomies vacuolaires grises présentant quelques strates de calcaires oolithiques blanchâtres. Son épaisseur, relativement variable dans la région, peut atteindre 250 m dans les gorges de l'Hérault où les dolomies sont particulièrement bien visibles puisqu'elles forment à la base un niveau de falaises et de versants escarpés aux formes de surface parfois ruiniformes.

Les niveaux marneux et marno-calcaires (*Callovien* et *Oxfordien inférieur et moyen*) sont de faible puissance (de l'ordre d'une cinquantaine de mètres) et ne se retrouvent qu'en liseré en haut des gorges de l'Hérault. Ils présentent des faciès variés allant des marno-calcaires en bancs décimétriques à des marnes feuilletées localement glauconieuses. Le dénominateur commun de l'ensemble de ces faciès est la présence d'un pourcentage variable d'argile.

La formation sus-jacente (*Oxfordien supérieur*) puissante d'une centaine de mètres, est constituée par des calcaires fins (mudstones) pouvant localement passer à des faciès

récifaux (packstones à boundstones). Il se marque dans le paysage par des reliefs de falaises ou de talus fortement redressés.

La partie sommitale de la série jurassique (*Oxfordien supérieur* à *Portlandien*) est constituée par de puissants ensembles calcaires formant une grande partie des affleurements des plateaux calcaires de la zone étudiée. Ces niveaux sont les plus complets et les mieux représentés dans le sud-ouest de la zone étudiée à savoir dans le massif de la Sellette où leur puissance avoisine les 250 à 300 m.

Le *Kimméridgien* beaucoup plus uniforme se traduit à la base par des alternances de bancs décimétriques de calcaires fins (mudstones) et de petits niveaux d'argiles en plaquettes et évolue au sommet vers des niveaux plus massifs pouvant localement être d'origine récifale. Les calcaires de la partie terminale du Jurassique (le *Portlandien*) sont de nature extrêmement variable sur la zone des garrigues nord-montpelliéraines, passant d'environnement de dépôt de faible profondeur à l'Ouest à des milieux pélagiques à l'Est.

Les formations crétacées

Le Crétacé se limite aux formations néocomiennes qui affleurent essentiellement dans la partie est des plateaux étudiés et notamment sur les bords du cours supérieur du Lamalou et sur le Causse de l'Hortus.

Elles sont constituées d'une base calcaire difficilement discernable de l'ensemble du Jurassique supérieur (*Berriasien inférieur*), suivi d'un complexe marneux qui débute des calcaires à interlits argileux pour évoluer progressivement vers des horizons plus marneux et finalement vers une formation de marno-calcaires affectée de nombreux glissements syn-sédimentaires. Cette formation peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

Ces séries marneuses sont chapeautées par une dalle de calcaires bioclastiques dont l'épaisseur évolue entre 20 et 150 m.

Les formations paléogènes

Les séries tertiaires sont présentes uniquement dans le bassin de Saint-Martin-de-Londres.

Ces dépôts, discordants sur le *Néocomien*, sont constitués par une semelle d'argile d'âge paléocène surmontée d'un ensemble carbonaté palustre pouvant atteindre une centaine de mètres d'épaisseur et daté du *Lutétien*. Les faciès de ces calcaires peuvent être extrêmement variables (calcaires massifs à planorbes, calcaires crayeux, calcaires à chailles,...). L'ensemble de ces formations de base est recouvert par l'*Eocène moyen* à *supérieur*, formées de sédiments argileux intercalés avec quelques passées détritiques. L'épaisseur de l'ensemble dépasse largement la centaine de mètres. A l'*Oligocène*, la tendance détritique s'affirme et se traduit par de puissants niveaux conglomératiques et gréseux au dépens d'horizons argileux plus réduits.

1.1.4. Contexte structural

L'ensemble de la région des garrigues nord-montpelliéraines s'inscrit dans le couloir structural compris entre la faille des Cévennes et la faille de Corconne. Ce domaine tectonique se caractérise par une couverture sédimentaire épaisse (entre 2 000 et 4 000 m) qui est affectée par des accidents verticaux et, localement, par des faisceaux de plis est-ouest séparant des structures sub-tabulaires.

Âge des déformations

L'essentiel des déformations de cette région est attribuée à l'orogénèse pyrénéenne (*Éocène terminal*, -35 à 40 Ma). L'âge de ces déformations a été défini à partir de critères de sédimentation syn-tectoniques dans le bassin de Saint-Martin-de-Londres.

La distension oligocène qui a suivi cette phase compressive n'a pas affecté le domaine étudié. Sa manifestation la plus proche, l'ouverture du fossé d'effondrement de Montoulieu, est située à 5 km au Nord des gorges du Lamalou.

Failles

La phase compressive liée à l'orogénèse pyrénéenne s'est manifestée, dans le secteur étudié, par la mise en place ou la réactivation de deux types de failles principales, ayant une importance pluri-kilométrique (cf. fig. 5) :

- une série d'accidents verticaux (N030°, N070°), représentés notamment par le faisceau de failles de l'Hérault et les accidents conjugués, qui sont nombreux sur le versant de gauche des gorges et compartimentent en maille serrée les structures géologiques. Le jeu décrochant de ces failles a permis d'amortir vers le Nord le déplacement de la couverture sédimentaire afin d'obtenir une déformation nulle ou très faible au pied des Cévennes ;
- une deuxième famille de failles orientées globalement E-O à NO-SE, inclinées vers le SSE et représentées par l'accident de Viols-le-Fort - Pic Saint-Loup. Ces accidents délimitent le Sud du bassin tertiaire de Saint-Martin-de-Londres.

En marge de ces deux familles principales il faut noter l'existence d'un important décrochement senestre d'orientation méridienne qui décale de plus de 500 mètres l'accident majeur de Viols-le-Fort et délimite deux panneaux structuraux distincts.

A ces accidents tectoniques de premier ordre s'ajoutent de nombreuses fractures d'extension limitées (quelques mètres à une centaine de mètres) qui découpent les calcaires à petite échelle et sont parfois associées à des plis locaux.

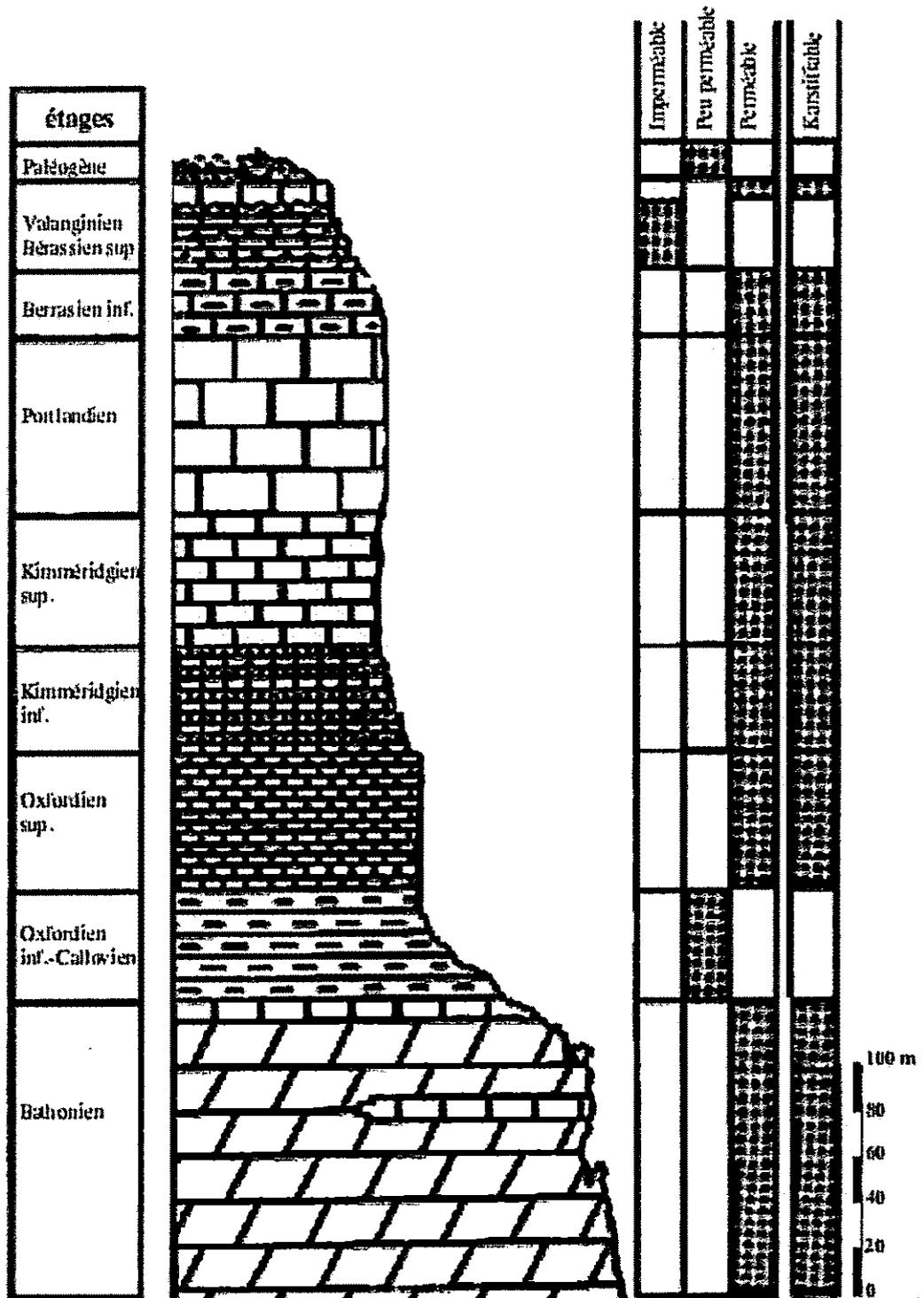


Fig. 4 : Log lithostratigraphique.

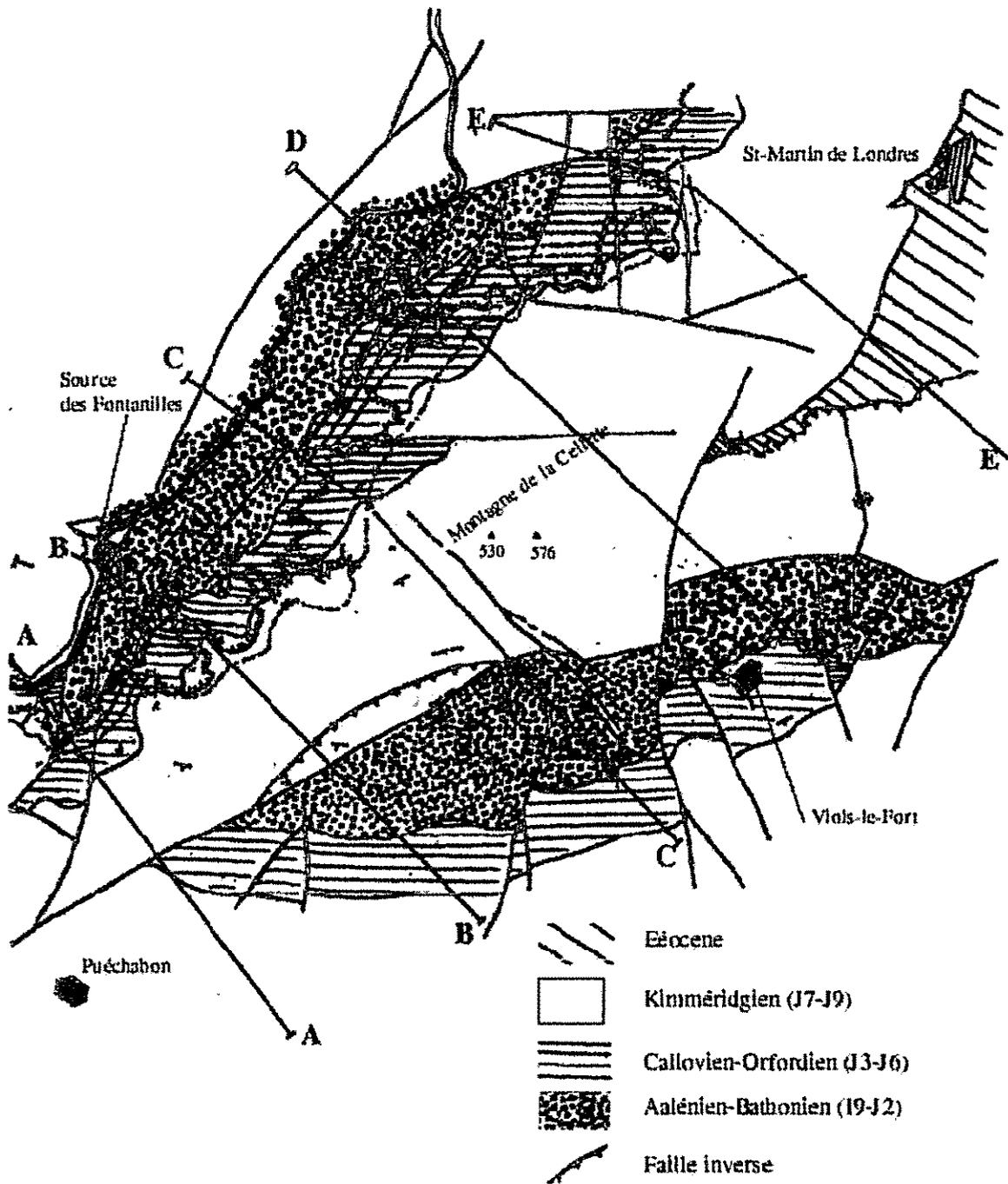


Fig. 5 : Schéma structural du système des Fontanilles.

Plis

La déformation essentiellement cassante des Garrigues nord-montpelliéraines, liée à l'orogénèse, pyrénéenne s'accompagne tout de même par la mise en place de quelques plis à grand rayon de courbure fréquemment déversés vers le Nord.

Sur la zone d'étude, cette tectonique souple se traduit essentiellement par deux structures majeures :

- l'anticlinal déversé de Viols-le-Fort et du Pic Saint-Loup, qui constitue l'accident majeur des Garrigues nord-montpelliéraines, et dont la structure provoque la remontée du Lias à l'Ouest de Viols-le-Fort,
- l'anticlinal faillé de l'Hérault, parallèle aux gorges du même nom, qui impose l'affleurement des dolomies du Bathonien tout au long de la partie supérieure des gorges et génère le panneau monoclinale de la Montagne de la Sellette.

A ces plis majeurs s'ajoutent des plis d'importance décamétrique situés en bordure de faille ou de zone broyée.

Coupes interprétatives

Afin d'illustrer la structure géologique de ce massif, des reconnaissances de terrain ont été menées pour réaliser une carte géologique synthétique (cf. fig. 5) ainsi qu'une série de cinq coupes sériées, orientées nord-ouest/sud-est, c'est-à-dire perpendiculaires aux structures du système (cf. fig. 6). Celles-ci fournissent une « image » de la géologie de ce plateau et non une représentation rigoureuse qui aurait nécessité des investigations beaucoup plus lourdes.

Ces coupes permettent de souligner les quelques points importants suivants :

le pendage général faible est dirigé vers le sud-est,

- les limites structurales à l'Ouest, au Sud et au sud-est sont nettement définies par l'anticlinal faillé de l'Hérault et le plis-faille de Viols-le-Fort,
- la présence possible d'un grand synclinal à plongement axial en direction du nord-est, prolongeant la structuration visible de la dépression de Saint-Martin-de-Londres et du Causse de l'Hortus. Dans le secteur étudié cette forme synclinale est affectée par un décrochement sénestre méridien dont le mouvement dépasse le demi-kilomètre.

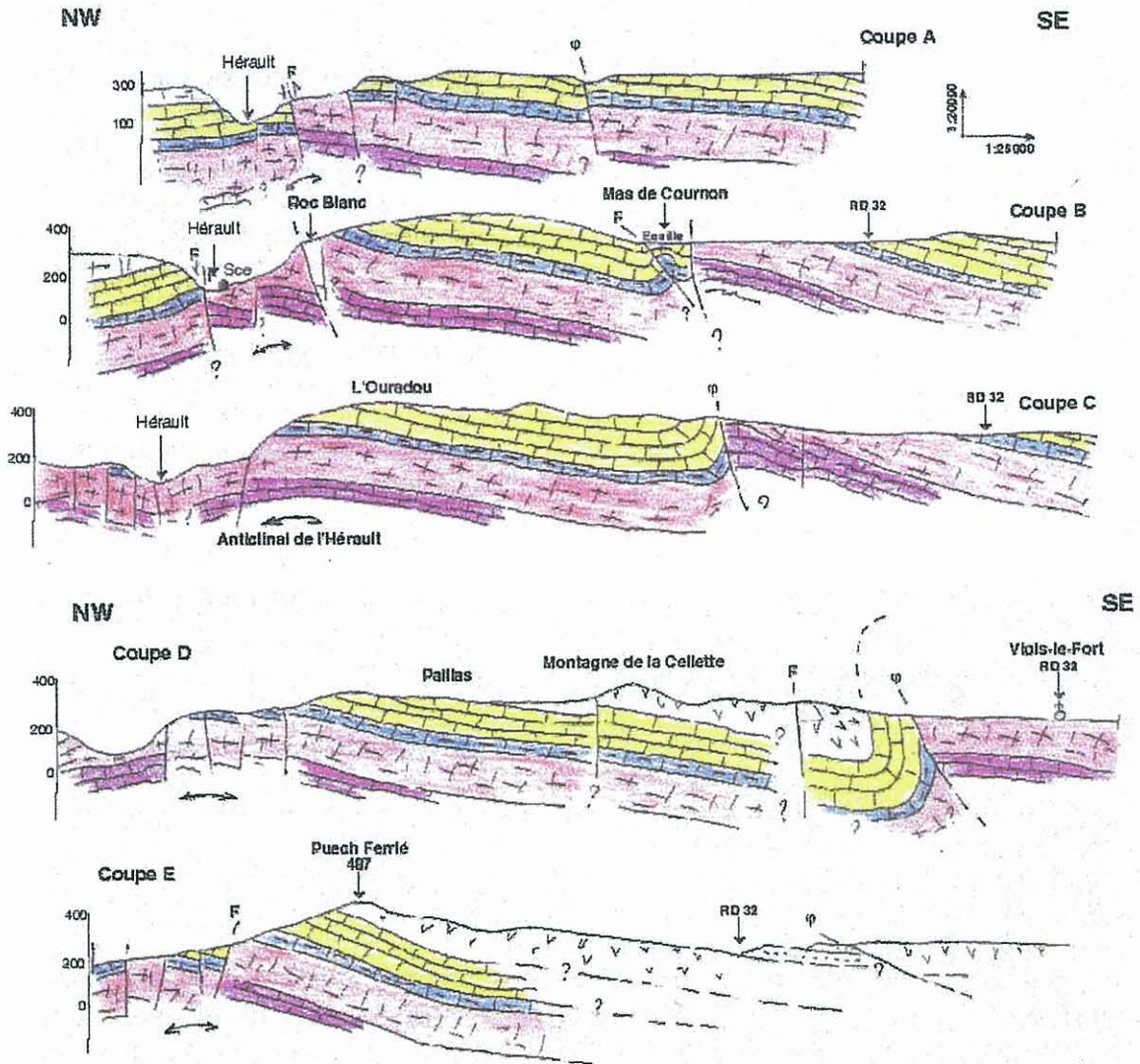


Fig. 6 : Coupes géologiques du système aquifère de la source des Fontanilles. La localisation des coupes est présentée figure 5.

1.1.5. Contexte hydrogéologique

Sur le plan hydrogéologique, les formations carbonatées présentes à l'affleurement peuvent se subdiviser stratigraphiquement en 4 grands ensembles potentiellement aquifères isolés imparfaitement les uns des autres par des niveaux marneux plus ou moins imperméables. Cette distribution est résumée dans le log de la figure 4 et dans le tableau suivant :

	Formations peu perméables ou imperméables	Formations carbonatées perméables (Potentiellement aquifères)
<i>Tertiaire</i> (<i>Paléogène</i>)	Éocène supérieur- Oligocène : argiles et conglomérats	
	Paléocène : argiles	Éocène moyen : calcaires palustres
<i>Crétacé inf.</i> (<i>Néocomien</i>)	Berriasien sup.-Valangien inf. : marnes et marno-calcaires	Valanginien sup. : calcaires marins bioclastiques
<i>Jurassique</i>	Callovien-Oxfordien : marnes et marno-calcaires	Kimméridgien-Portlandien-Berriasien-inf. : calcaires marins
	Toarcien : argiles	Bajocien-Bathonien : dolomies

Les formations *jurassiques* du *Toarcien* et du *Bajocien* ne sont pas visibles à l'affleurement dans la région étudiée.

Les dolomies du *Jurassique moyen* (*Bathonien*) constituent un ensemble aquifère basal important en raison de leur puissance (jusqu'à 200 mètres d'épaisseur). Plusieurs sources pérennes à fort débit émergent dans les gorges de l'Hérault au niveau de cet étage. Par ailleurs cet ensemble possède une porosité non négligeable.

Les niveaux marneux et marno-calcaires du *Jurassique* (*Callovien* et *Oxfordien inférieur* et *moyen*) jouent un rôle hydrogéologique peu connu et vraisemblablement complexe. En effet, en raison de leur teneur importante en argiles, ces formations peuvent localement constituer un niveau imperméable sous les formations carbonatées du *Jurassique supérieur*. Cependant, il existe tout de même une cavité recensée dans ces formations. De plus, l'abondance des failles et l'absence d'émergences à la base du *Jurassique supérieur* laissent présager qu'elles ne jouent pas un rôle d'écran imperméable régional.

Le *Jurassique supérieur*, auquel il faut associer la base du *Berriasien*, constitue lui aussi, de par sa nature karstifiable, sa grande épaisseur et sa large zone d'affleurement, un lieu privilégié pour les écoulements souterrains. Cette caractéristique est vérifiée par

l'existence de nombreuses cavités et phénomènes karstiques de surface dans les massifs constitués par cette formation (Montagne de la Sellette ou Puech Coubiou).

Les niveaux du *Crétacé inférieur* (*Berriasien supérieur* et *Valanginien inférieur*) sont représentés par des formations à faciès marneux ou marno-calcaire. Ces formations qui, au gré des variations de faciès, contiennent parfois de petits aquifères isolés et sans importance régionale, peuvent globalement être considérées comme imperméables. Seule la dalle calcaire sommitale du *Valanginien*, qui constitue le Causse de l'Hortus, représente un aquifère karstique important comme en témoignent les sources et les cavités nombreuses de ce causse. Il faut noter qu'en étiage, la totalité des écoulements provenant des sources périphériques Ouest et Sud de ce massif (source de Gornières, source du Lamalou, source du Crès) se perdent au passage des barres calcaires tertiaires (*Lutétien*) du bassin de Saint-Martin-de-Londres (cf. fig. 5).

Les calcaires palustres tertiaires *éocènes* (*Lutétien*), qui reposent sur les argiles du *Paléocène*, présentent un nombre réduit de phénomènes karstiques de surface. Toutefois ils sont le siège d'importantes pertes de la rivière du Lamalou ou de ses affluents (pertes du Moulin de Rouet, pertes de St-Martin, pertes du Pont du Renard). Ces pertes, qui sont en fait des zones d'absorption longues de plusieurs dizaines de mètres, alimentent l'aquifère jurassique localement en connexion avec les calcaires *lutétiens*.

1.1.6. Inventaire général des phénomènes Karstique des Fontanilles

Cavités

Le système karstique des Fontanilles présente un nombre important de cavités et de réseaux souterrains explorés par les spéléologues. Cette abondance de phénomènes karstiques reconnus est liée à deux facteurs : la nature fortement karstifiable des calcaires jurassiques constituant la surface de ce massif et sa proximité de Montpellier favorisant les explorations.

Un inventaire des cavités souterraines de l'ensemble du massif de la Sellette dans lequel s'inscrit le système karstique des Fontanilles a été réalisé en 1982 par le club spéléologique CLPA de Montpellier (Explokarst n° 1). Le nombre de cavités était alors de 332. Depuis cette date, ce travail a été repris et complété par le Conseil Général de l'Hérault et 628 cavités ont été inventoriées en 1998.

Pour percevoir les caractéristiques des cavités connues sur le massif un classement par classe de développement ou de longueur a été réalisé sur la base de l'inventaire et est fourni dans les tableaux suivants.

Développement des cavités	Nombre de cavités
entre 0 et 50 m	553
entre 50 et 100 m	30
entre 100 et 250 m	31
entre 250 et 1 000 m	11
supérieur à 1 000 m	3

Profondeur des cavités	Nombre de cavités
entre 0 et 50 m	589
entre 50 et 100 m	33
entre 100 et 150 m	4
supérieure à 150 m	2

Ce tri fait met en évidence que les cavités du massif de la Selette sont en général peu importantes, tant par leur dénivelé que par leur développement. Ainsi seuls 4 avens dépassent 100 m de profondeur, et trois cavités dépassent 1 000 m de développement.

Un report sur carte de ces différentes classes dimensionnelles (cf. fig. 7, 8 et 9) montre que les cavités majeures inventoriées sur le massif de la Selette (longueur et profondeur supérieure à 50 m) sont relativement bien réparties sur la superficie avec toutefois une faible concentration sur une bande d'environ 1 km de large en rive gauche de l'Hérault.

Il faut remarquer qu'à la surface de la zone définie comme étant le système karstique de la source des Fontanilles, la densité d'aven de plus de 50 m de profondeur est importante (23 avens de plus de 50 m de profondeur pour 18 km² de superficie) et que cette zone recèle les avens les plus profonds de l'ensemble du massif. Cette densité forte va dans le sens d'une infiltration rapide des précipitations.

Sur l'ensemble du massif les cavités les plus importantes en développement et en profondeur sont les suivantes :

- La grotte Véronique, située en rive gauche de l'Hérault légèrement en amont du barrage du Moulin de Bertrand, se développe sur plus de 4 000 m.
- L'aven de la Potence, s'ouvrant au centre du massif à proximité du Mas du Paillas, présente une dénivellation totale de 178 m.

Des reconnaissances de terrain, réalisées sur la base de cet inventaire, ont permis de recenser et de localiser les cavités actives (pertes, exutoires, cavités avec écoulement pérenne ou saisonnier) et les phénomènes karstiques de surface, ainsi que d'en apprécier les conditions géologiques.

Inventaire des pertes actives pérennes ou temporaires

Un total de 24 pertes a été recensé sur le système karstique des Fontanilles. Ces pertes, qui sont toutes temporaires, sont de deux types :

- soit des zones ou des points d'absorption localisés le long des gorges du Lamalou ou de ruisseaux temporaires, captant une partie ou la totalité du flux lors des hautes eaux,
- soit des avens, situés dans un creux topographique, absorbant les écoulements de surface lors de fortes pluies.

Parmi l'ensemble de ces pertes, il faut noter que deux ont fait l'objet de traçages positifs vers la source des Fontanilles :

- l'aven-grotte du Trou qui Fume situé à 1 700 m à l'Est de la source des Fontanilles,
- l'aven Vidal situé à 9 000 à l'Est de la source des Fontanilles.

Inventaires des sources pérennes ou temporaires

La reconnaissance de terrain réalisée sur la base des publications spéléologiques a permis de recenser 24 sources temporaires et 2 sources pérennes se répartissant ainsi :

- rive gauche du Lamalou : 1 source pérenne et 9 sources temporaires,
- rive gauche de l'Hérault : 1 source pérenne (source des Fontanilles) et 9 sources temporaires,
- bordure du bassin de Saint-Martin de Londres : 6 sources temporaires.

Ce grand nombre d'exutoires temporaires est probablement lié à l'évolution géomorphologique régionale. Il existe en effet une karstification poussée liée à des niveaux de base anciens perchés au-dessus du niveau actuel constitué par l'Hérault. La descente du niveau de base au cours des derniers millions d'années (*Plio-quatenaire*) n'a pas été suivie d'un développement assez poussé du drainage karstique vers les Fontanilles. Aussi, les périodes de hautes eaux provoquent une réactivation temporaire de ces anciens drainages.

1.2. GÉOMÉTRIE DU RÉSERVOIR DE LA SOURCE DES FONTANILLES

1.2.1. Limites du système karstique

La délimitation du système drainé par la source des Fontanilles a été réalisée à partir des éléments suivants (cf. fig. 9) :

- l'étude géologique de la région,
- l'analyse bibliographique de l'hydrogéologie régionale,
- le résultat du traçage réalisé dans le cadre de cette étude.

Seule la limite Ouest est bien définie car elle correspond à une frontière naturelle visible dans le paysage et matérialisée par les gorges de l'Hérault. Le fleuve sert en effet de niveau de base aux écoulements souterrains, comme en témoignent les nombreuses sources temporaires jalonnant ses berges.

La bordure sud est vraisemblablement délimitée par les anticlinaux de Viols-le-Fort et du Pic Saint-Loup. Ces structures, qui sont ancrées sur des accidents profonds, présentent des formations très redressées, voire déversées, associées à des plans de failles inverses multiples. En l'absence d'arguments contraires, on peut considérer que ces structures présentent de nombreux éléments en faveur d'un rôle de barrière hydrogéologique étanche.

Les frontières est et nord ne correspondent pas à des limites naturelles précises.

La frontière est du réservoir a été délimitée sur la base de la coloration réalisée à l'aven Vidal est correspond à peu près au méridien passant par Saint-Martin-de-Londres.

La limite Nord du système karstique de la source des Fontanilles a été définie à partir des résultats du traçage réalisé, dans le cadre de cette étude, à l'aven Valette à proximité du Mas de Bouis et dont le traceur est ressorti à la source de la Combe de Rastel. Cette limite passerait approximativement entre le sommet de l'Ouradou et la montagne de Labau et serait orientée est-ouest (cf. fig. 10). La partie Est de cette limite, entre le système de la Combe de Rastel et celui des Fontanilles, est relativement précise grâce à la proximité des points d'injection des deux traçages, aven Vidal et aven Valette, dont l'un est ressorti aux Fontanilles et l'autre à la Combe de Rastel.

Le système karstique des Fontanilles présente donc une forme trapézoïdale d'environ 8 km de long pour une largeur maximum de 3 km en bordure de l'Hérault (cf. fig. 9). Il correspond à la partie Sud de la montagne de la Selette. L'impluvium de ce système représente une superficie d'environ 18 km².

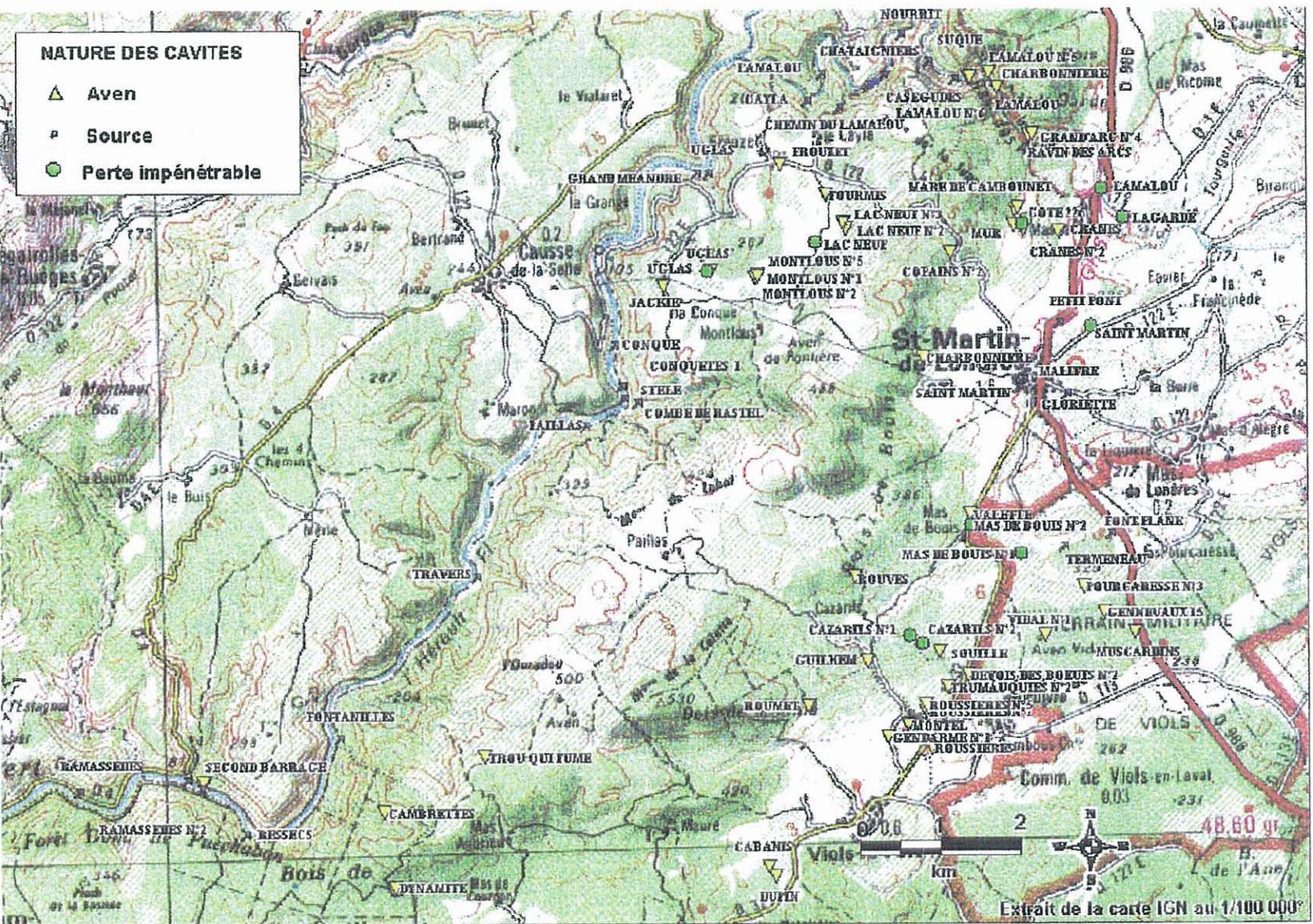


Fig. 7 : Carte de localisation des cavités du système Fontanilles, par classes de nature.

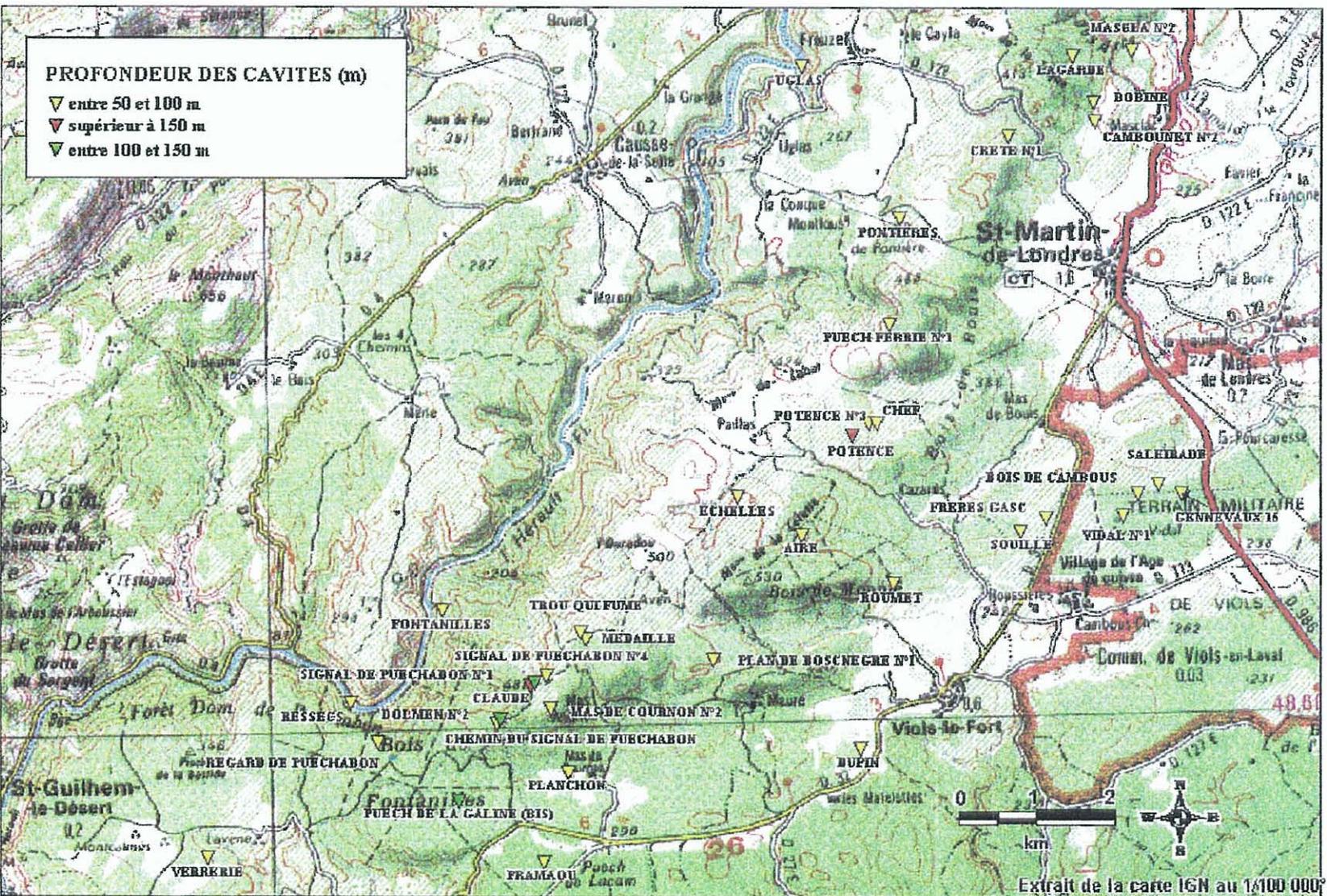


Fig. 8 : Carte de localisation des cavités du système Fontanilles, par classes de profondeur.

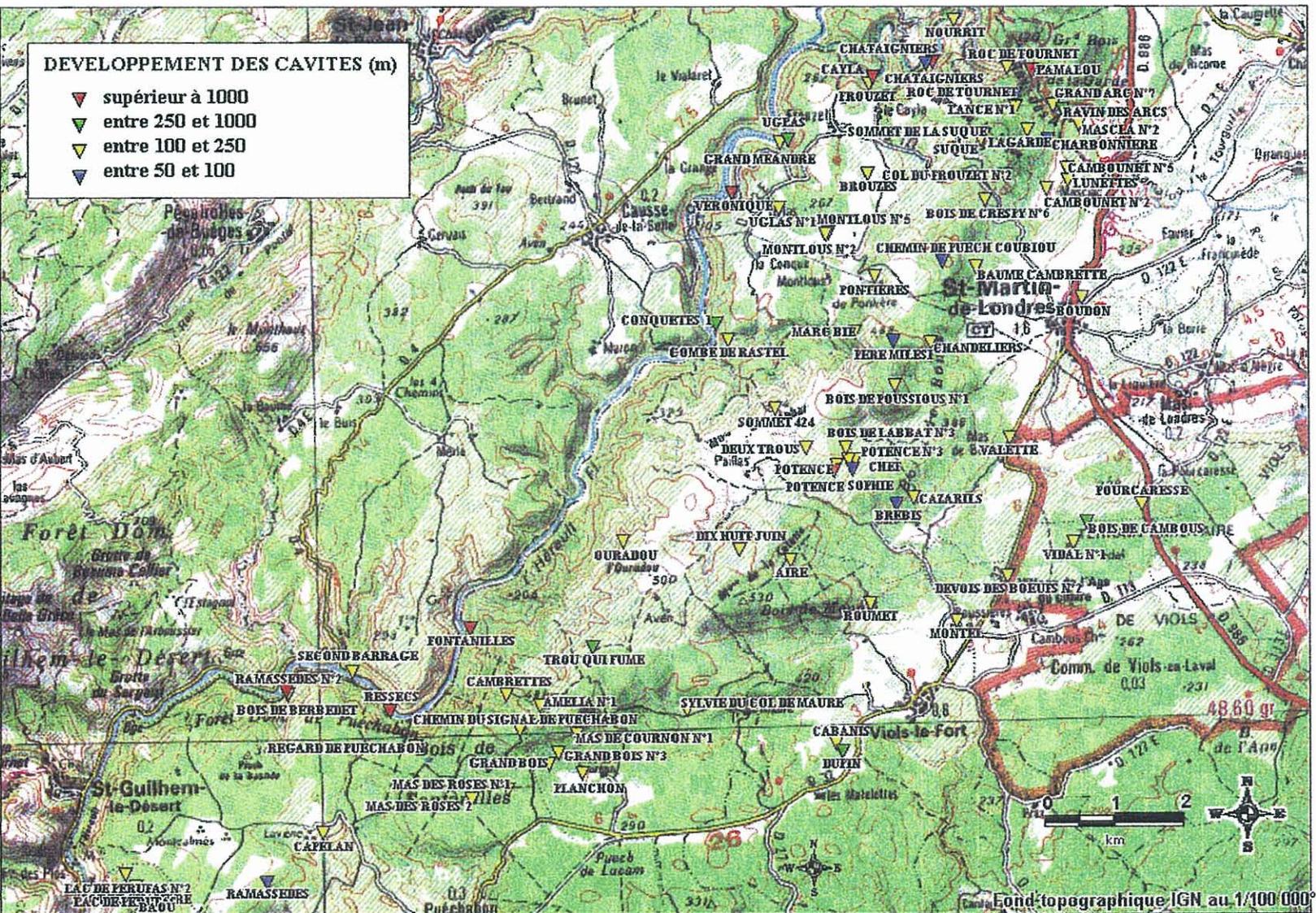


Fig. 9 : Carte de localisation des cavités du système Fontanilles, par classes de développement.

1.2.2. Géomorphologie du système karstique des Fontanilles

Formes d'érosion de surface

La zone sud du plateau calcaire de la Montagne de la Sellette présente peut de surfaces planes. L'ancienne pénélaine oligocène est morcelée par de nombreuses vallées sèches délimitant de petites unités au sommets arrondis. L'altitude générale de ce massif décroît de l'Ouest vers l'Est, entre la cime de l'Ouradou (500 m NGF) point culminant du massif et la dépression de l'aven Vidal (250 m NGF).

Les différentes formes d'érosion karstiques inventoriées sur le système des Fontanilles ont été reportées sur la figure 10. Dans le détail, les formes d'érosion karstiques suivantes ont été relevées :

Reliefs ruiniformes

Les reliefs ruiniformes et chaotiques ne sont visibles, dans le système des Fontanilles, que sur la rive gauche des gorges de l'Hérault.

Dolines et dépressions

Ces creux topographiques ont des dimensions variant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. ils sont concentrés sur deux zones :

l'est du système karstique, entre Viols-le-Fort et Saint-Martin-de-Londres qui présente une dizaine de dolines assez régulières, de forme globalement circulaire et dont la taille ne dépasse pas quelques dizaines de mètres de diamètre. C'est au fond de l'une de ces dolines que s'ouvre l'aven Vidal, qui a servi de point d'injection pour un des traçages ressorti à la source des Fontanilles.

la bordure sud du système entre Viols-le-Fort et Puechabon où de grandes dépressions fermées sont visibles. Ces dépressions dont la taille excède par endroit plusieurs centaines de mètres sont souvent de forme complexe. Leur profondeur n'excède pas 5 à 10 m et le fond est comblé par des produits d'altération argileux, des sables dolomitiques et des fragments calcaires.

Lapiaz

Le relief ciselé et crevassé qui caractérise le lapiaz ne se rencontre que dans les formations calcaires du jurassique supérieur et est relativement peu présent à la surface de ce système où il est souvent masqué par des éboulis ou des manteaux de cailloutis.

Thalwegs et vallons secs

Le réseau hydrographique ancien qui s'est développé sur la surface de ce système présente d'important vestiges qui favorisent la concentration des eaux de surface et leur infiltration.

Ces talwegs présentent une morphologie relativement ouverte parsemés d'éboulis et parfois comblés par des produits d'érosion. Leurs débouchés s'effectuent soit vers la vallée de l'Hérault (ravin des Chambrette, ravin des Fontanilles) soit les dépressions de la zone sud (ravin des Rabassiès, ravins du Mas Andrieu).

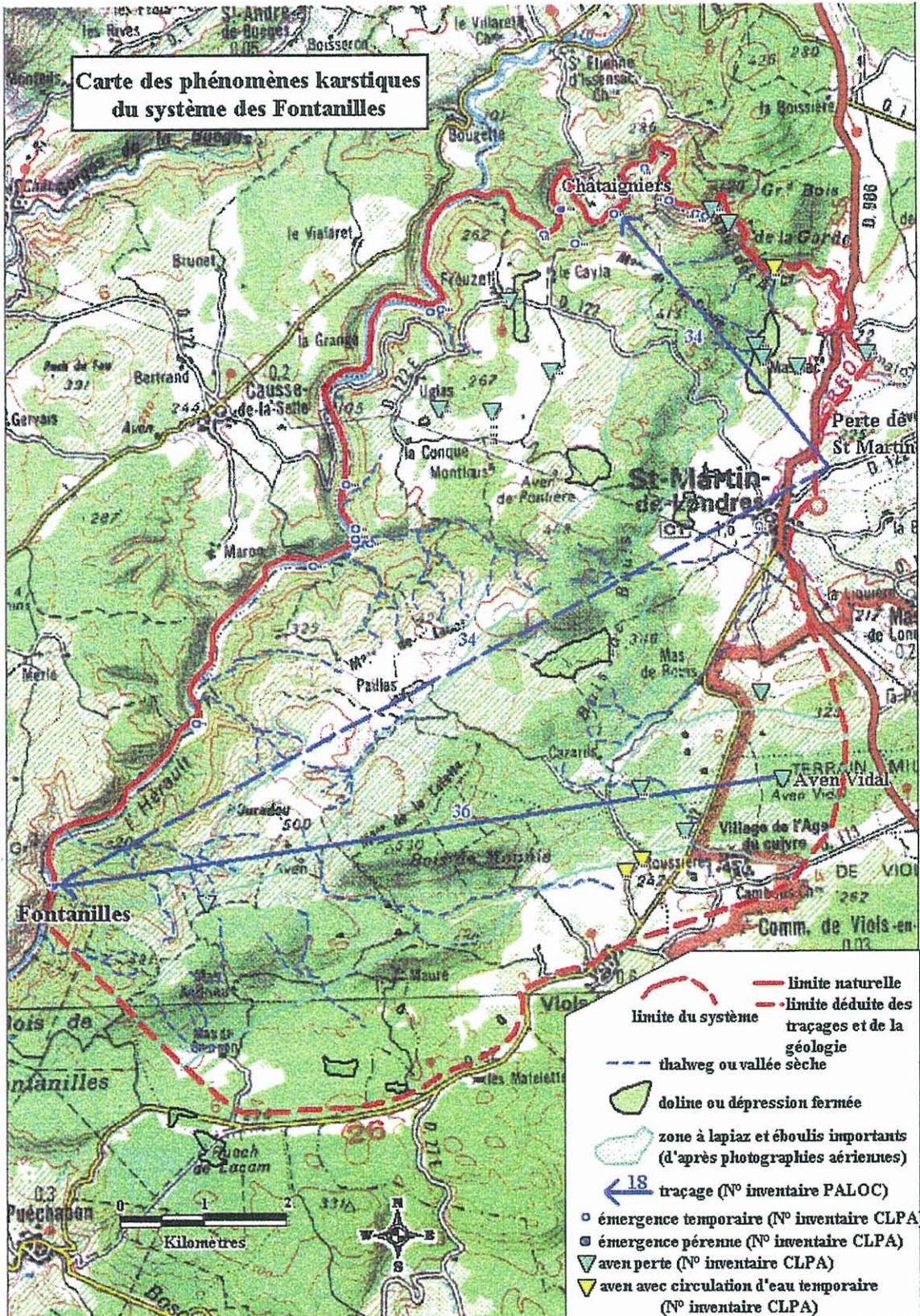


Fig. 10 : Carte des phénomènes karstiques du système des Fontanilles.

2. Système des Cent-Fonts

2.1. INTRODUCTION

La source des Cent-Fonts, située en rive droite de l'Hérault sur la commune de Causse-de-la-Selle, a été retenue comme un des seconds sites pour mettre en œuvre les études et reconnaissances nécessaires pour conduire à une exploitation et à une gestion optimisée de la ressource d'un aquifère karstique. Ce site est situé à 800 m en amont de la source des Fontanilles.

La source des Cent-Fonts est une des deux principales émergences karstiques de la rive droite de l'Hérault (l'autre étant la source de la Clamouse, à quelques kilomètres en aval). Elle est en fait composée de huit griffons pérennes et trois exutoires temporaires dont le débit global varie entre 200 l/s lors des étiages prononcés de l'automne 1998 et plus de 10 m³/s en crue.

Actuellement cette source n'est pas exploitée mais un forage de gros diamètre, recoupant les galeries noyées en profondeur, a été réalisé par la Compagnie Générale des Eaux en 1990. Des pompages d'essai ont été effectués à cette époque.

L'objectif de cette étude est de mieux connaître le fonctionnement du système karstique afin de pouvoir éventuellement l'exploiter grâce à des aménagements adaptés. Le débit d'exploitation visé est de plusieurs centaines de m³/h.

2.2. ETUDE PRÉLIMINAIRE DE LA GÉOMÉTRIE DU RÉSERVOIR

2.2.1. Situation géographique

Le système karstique de la source des Cent-Fonts s'inscrit dans la partie ouest des garrigues nord-montpelliéraines, formées par les massifs calcaires et dolomitiques situés entre Montpellier et les Cévennes.

Cette zone, de forme allongée, est limitée par les éléments géographiques suivants :

- au nord-ouest : la vallée du Pontel et de la Buèges,
- au sud-est : la vallée de l'Hérault,
- au sud la plaine de l'Hérault.

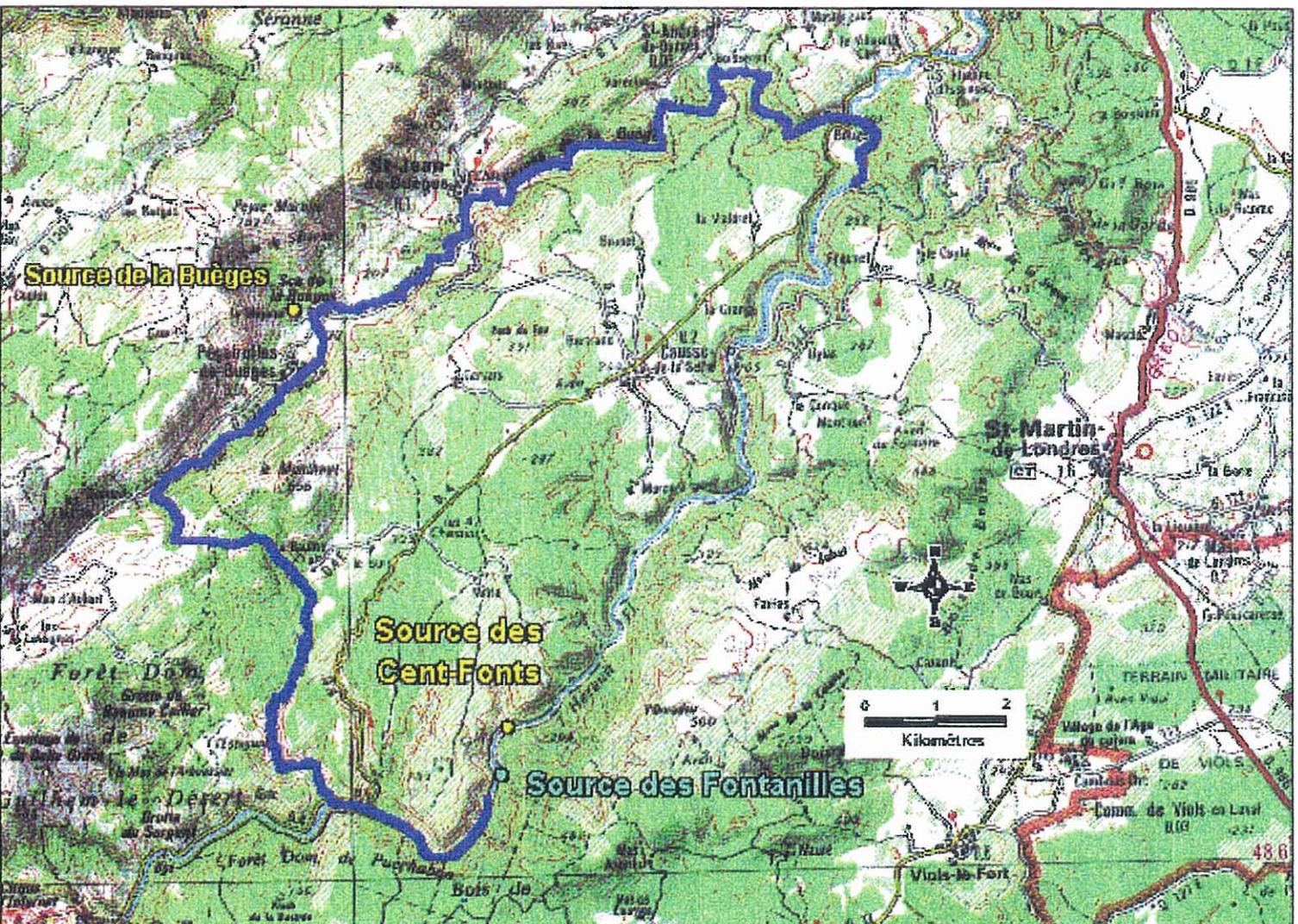


Fig. 11 : Situation géographique et délimitation de la zone d'étude des Cent-Fonts (extrait de la carte IGN au 1/100).

La zone étudiée ainsi définie forme un trapèze allongé est orienté nord-est/sud-ouest d'environ 18 km de long pour une largeur moyenne de 5 km (cf. fig. 1). Elle représente une superficie d'environ 90 km² et comporte deux unités géographiques distinctes : les calcaires et dolomies des monts de St-Guilhem et ceux du Causse-de-la-Selle.

Cette région présente trois morphologies différentes (fig. 11) :

- au nord-est : une morphologie de plateau à déclivité orientée vers le nord-est et fortement entaillé par quelques vallées sèches dont les altitudes générales varient entre 200 et 300 m ;
- au Nord-Ouest : un relief plus accentué dont le point culminant est marqué par la butte témoin du Monthaut qui atteint 656 m d'altitude ;
- au Sud : un relief morcelé par de nombreuses combes sinueuses isolant de petits massifs aux aspects parfois ruiniformes. Le point culminant de la région (Roc de la Vigne, 709 m) appartient à cette zone.

Le climat de ce secteur est méditerranéen, mais il subit aussi les influences montagnardes des Cévennes, notamment en hiver. La pluviométrie moyenne est d'environ 1 200 mm par an avec une distribution moyenne annuelle présentant des maximums en mars et octobre à laquelle se surimpose une forte irrégularité tant annuelle que mensuelle due au régime pluviométrique méditerranéen.

La végétation de cette région est dominée par la garrigue arbustive dont les espèces majeures sont le chêne vert, le chêne kermès et l'alaterne à l'exception des alentours du village du Causse-de-la-Selle dont les espaces déboisés sont occupés par la culture de la vigne.

2.2.2. Cadre géologique

Le massif du Cause-de-la-Selle est formé essentiellement par les épaisses séries carbonatées du *Dogger* (*Jurassique moyen*) et du *Malm* (*Jurassique supérieur*) en dépôts tabulaires ou légèrement plissés. Ces séries ont été intensément fracturées, principalement suivant la direction du décrochement de la faille des Cévennes (N040°-N050°) lors de l'orogénèse pyrénéenne (40 à 50 Ma) (cf. fig. 12).

Ce plateau est bordé au nord-ouest par la faille des Cévennes et l'important massif carbonaté de la Séranne (épaisse série coralligène de type barrière) et au Sud par la structure anticlinale faillée du Pic Saint-Loup – Viols-le-Fort et la plaine tertiaire de l'Hérault. La limite orientale est beaucoup moins marquée, le massif s'inscrivant dans une unité tectonique plus large se prolongeant jusqu'à la faille de Corconne. Cette région d'étude est volontairement limitée à l'Est par les gorges de l'Hérault qui constituent une frontière géomorphologique et hydrogéologique reconnue.

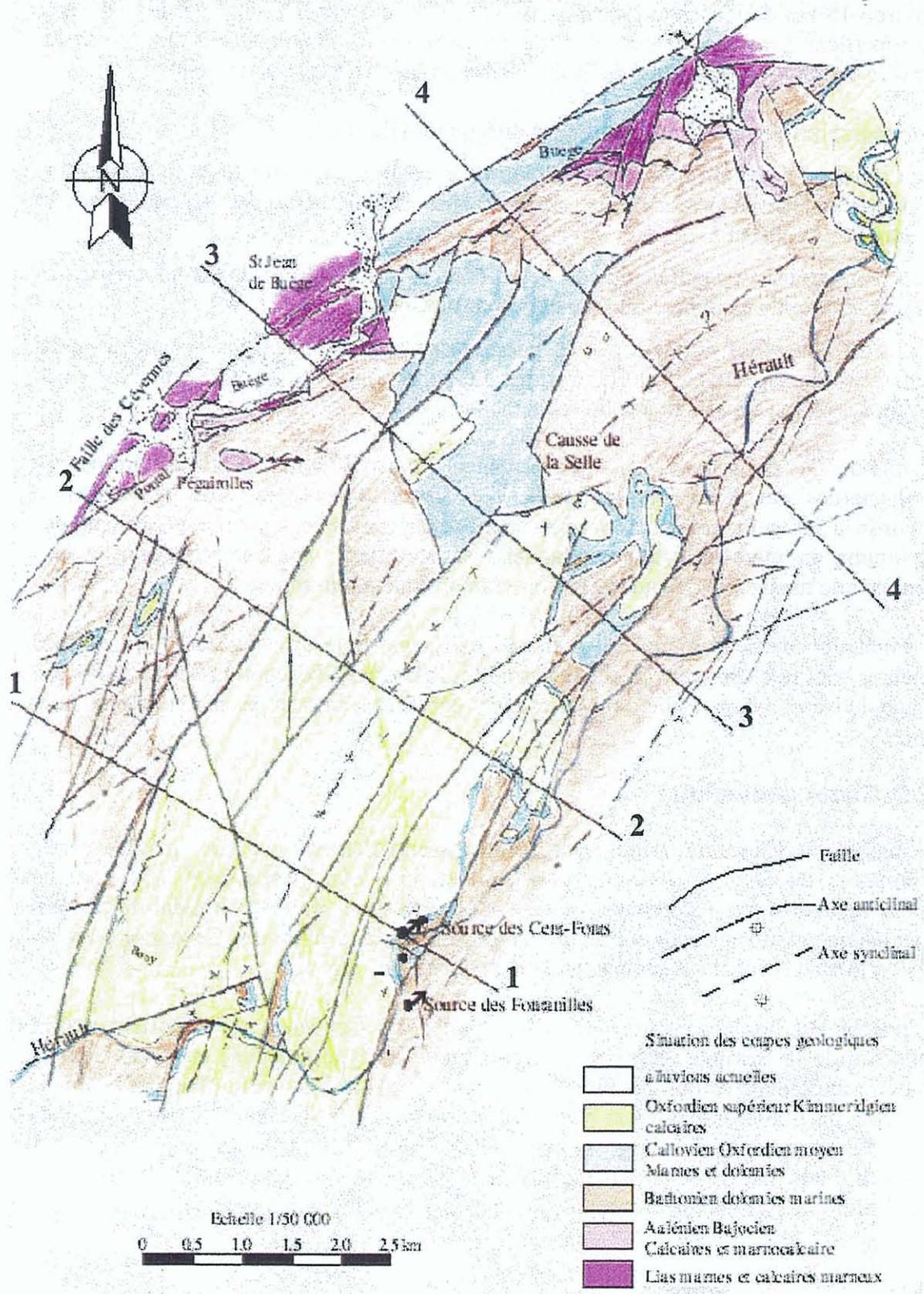


Fig. 12 : Carte géologique schématique de la zone d'étude des Cent-Fonts.

La surface de ce massif a subi une érosion et un nivellement importants lors de la phase tectonique distensive de l'*Oligocène*. L'ensemble des structures plissées et faillées a alors été arasé en une surface dont le soulèvement, au *Villafranchien*, s'est traduit par l'entaille des gorges de l'Hérault, profondes d'environ 200 m et les multiples combes des Monts de Saint-Guilhem.

2.2.3. Caractères stratigraphiques

Les caractéristiques stratigraphiques des différentes formations géologiques affleurant sur la partie ouest des garrigues nord-montpelliéraines sont synthétisées sur la colonne stratigraphique de la figure 13.

Les formations affleurantes appartiennent toutes au Jurassique et représentent quasiment l'intégralité de cet étage. Leur puissance totale est d'environ 1 000 m.

La base de cet ensemble sédimentaire est représentée par une série marno-calcaire (*Lias moyen* : *Sinémurien-Carixien*) puis franchement marneuse (*Lias supérieur* : *Domérien-Toarcien*). Ces horizons servent de soubassement à une série de transition passant des marnes aux dolomies (*Aalénien-Bajocien*) et annonçant une puissante barre dolomitique (*Bathonien*). Celle-ci est isolée des calcaires sommitaux (*Kimméridgien-Portlandien*) par des niveaux calcaro-marneux (*Callovien-Oxfordien*).

La lithostratigraphie de ces différents étages ou groupe d'étages est succinctement décrite ci-dessous de bas en haut :

Lias calcaire (Sinémurien-Carixien) : dans la zone étudiée, ces dépôts de calcaires bioclastiques, passant progressivement à des calcaires argileux puis à des marno-calcaires, ne sont visibles que très ponctuellement dans la vallée de la Buèges. Leur épaisseur, difficile à estimer, est de l'ordre d'une centaine de mètres.

Lias marneux (Domérien-Toarcien) : de par sa nature franchement argileuse, cet horizon marque une rupture dans la série sédimentaire carbonatée du *Jurassique*. Il est constitué à la base par quelques niveaux carbonatés passant rapidement à une épaisse série marneuse dont la partie inférieure présente le faciès des *schistes cartons*. Sa puissance est de l'ordre de la centaine de mètres.

Aalénien-Bajocien : cet ensemble se démarque clairement de la topographie douce des niveaux marneux sous-jacents. Il est constitué à la base par des bancs calcaires décimétriques intercalés de feuillets marneux passant après quelques épisodes plus marneux à des faciès sommitaux de calcaires gréseux avec lits de chailles. L'épaisseur de cet ensemble a été estimée entre 130 et 160 m.

Bathonien : la série dolomitique du *Bathonien* forme un niveau de falaises et de versants escarpés aux formes de surface parfois ruiniformes. Cette série est présente à l'affleurement sur plus de la moitié du massif étudié. Elle est constituée en grande partie par des dolomies vacuolaires grises présentant quelques strates de calcaires oolithiques

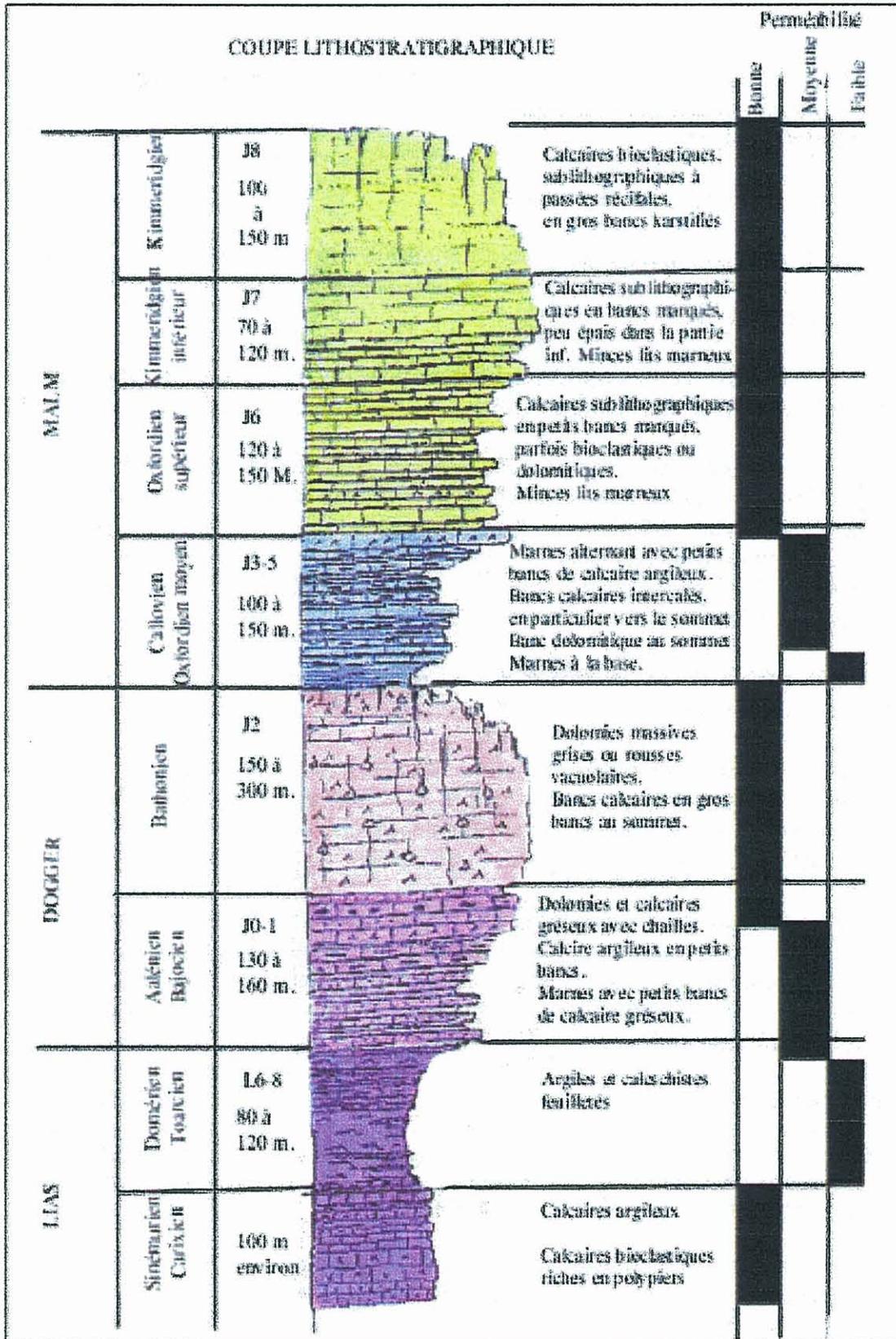


Fig. 13 : Coupe lithostratigraphique du système des Cent-Fonts.

en gros bancs dans la partie sommitale. Son épaisseur, relativement variable dans la région étudiée, est comprise entre 150 et 300 m.

Callovien-Oxfordien moyen : cet ensemble est constitué d'une base marneuse passant vers le haut à des intercalations de marnes et de petits bancs de calcaires argileux pour se terminer au sommet par un épais banc dolomitique. Le dénominateur commun de l'ensemble de ces faciès, qui totalise une puissance de 100 à 150 m, réside dans l'importance des horizons marneux. **Oxfordien supérieur** : cette série carbonatée, d'environ 120 à 150 m d'épaisseur, marque une transition par rapport à la série précédente. Elle est en effet entièrement constituée par des strates décimétriques de calcaires fins avec quelques interlits marneux, ce qui se traduit fréquemment par un talus dans la morphologie des versants.

Kimméridgien : les calcaires sommitaux du *Kimméridgien* forment un ensemble puissant d'environ 200 à 250 m d'épaisseur. Cette série est constituée à la base de calcaires fins, parfois bioclastiques, disposés en bancs bien individualisés. Elle passe progressivement dans sa moitié supérieure à des bancs massifs aux faciès récifaux qui forment fréquemment les falaises sommitales des escarpements de la zone étudiée.

2.2.4. Contexte structural

La zone étudiée, correspondant à l'Ouest des garrigues nord-montpelliéraines, s'inscrit dans le couloir structural compris entre la faille des Cévennes et la faille de Corconne située au nord Est (non visible sur la fig. 14). Ce domaine tectonique se caractérise par une couverture sédimentaire épaisse (entre 2 000 et 4 000 m) affectée localement par des faisceaux de plis séparant des structures sub-tabulaires morcelées par des failles verticales (cf. schéma structural fig. 14 et coupe géologique régionale fig. 15).

L'essentiel des déformations de cette région est due à l'orogénèse pyrénéenne survenue à l'*Eocène* terminal, (35 à 40 Ma). Cette tectonique compressive s'est manifestée par la mise en place ou la réactivation des structures suivantes, d'orientation générale nord-est/sud-ouest.

Failles

Les principales failles sont de directions cévenoles (N040°) et ont une continuité pluri-kilométrique. Elles sont associées aux plis et découpent des panneaux qui ont joué en « touches de piano ». Les principaux accidents sont représentés par les faisceaux de failles de l'Hérault et des Cévennes. Quelques fractures transversales obliques (N135° à N160° et plus rarement N070°), d'extension inférieure aux failles cévenoles, découpent des compartiments sur le Nord de la région étudiée.

Plis

Le plissement de l'épaisse couverture mésozoïque de l'ouest des garrigues nord-montpelliéraines se traduit par trois grandes structures plissées et faillées :

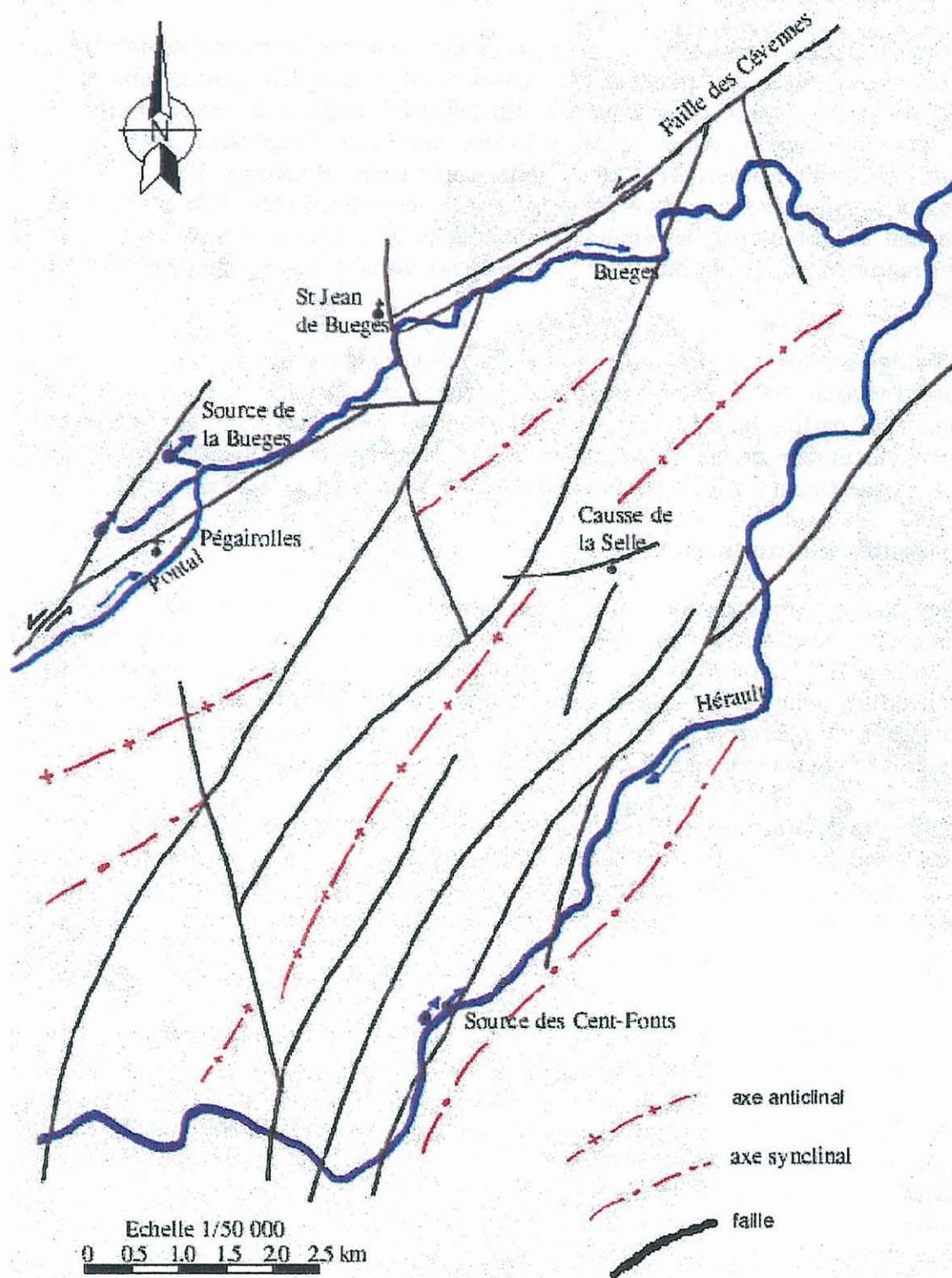


Fig. 14 : Schéma structural du système des Cent-Fons.

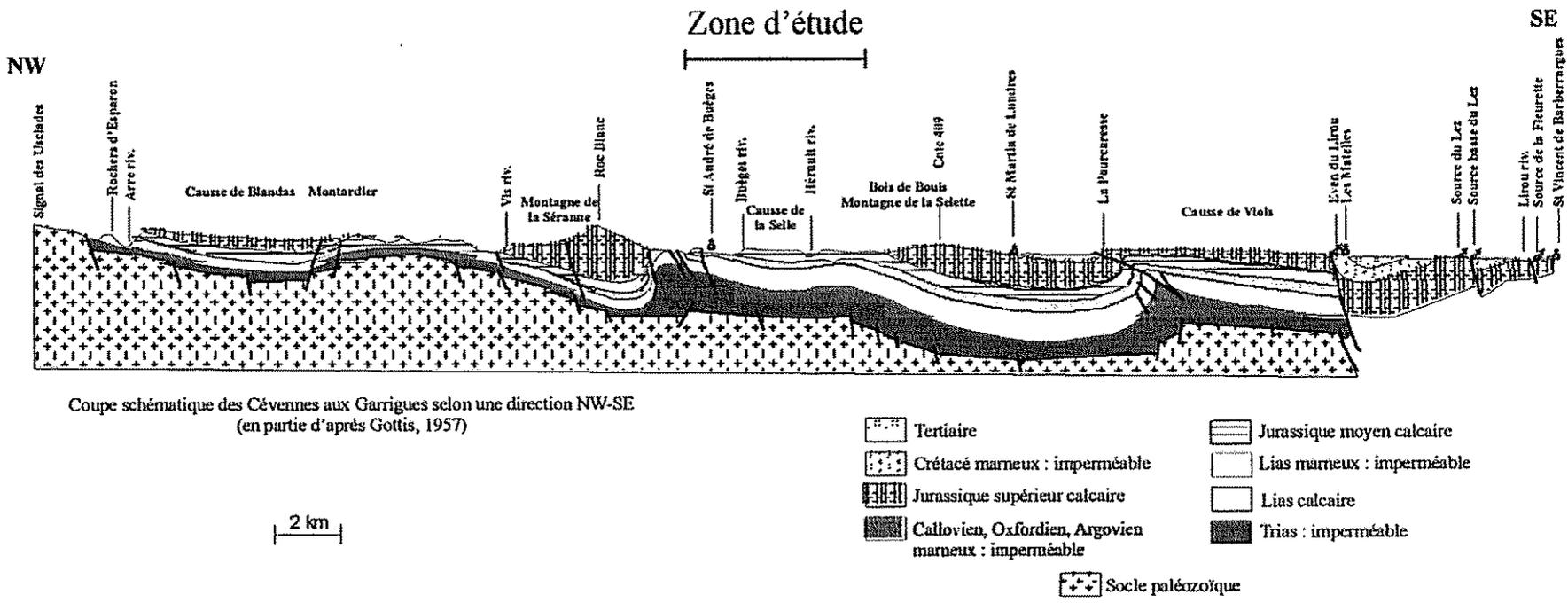


Fig. 15 : Coupe géologique régionale (en partie d'après Gottis, 1957).

- anticlinal du Pic Saint-Loup/Viols-le-Fort,
- anticlinal de l'Hérault,
- anticlinal de la Buèges.

Ces déformations sont complétées par des structures de moindre importance comme la gouttière synclinale du Cause-de-la-Selle.

2.2.5. Contexte hydrogéologique

Sur le plan hydrogéologique, les formations carbonatées du *Jurassique* présentes à l'affleurement peuvent se subdiviser stratigraphiquement en trois grands ensembles potentiellement aquifères isolés les uns des autres par des niveaux marneux ou argileux plus ou moins imperméables. Les séparations sont imparfaites du fait des épaisseurs modestes et de la structure géologique mettant en contact les formations carbonatées. Cette distribution est résumée dans le log de la figure 3 et dans le tableau suivant :

<i>Formations peu perméables ou imperméables</i>		<i>Formations carbonatées potentiellement aquifères</i>
Malm		Oxfordien sup.-Kimméridgien. : calcaires lithographiques et récifaux
	Callovien-Oxfordien inf. : marnes et marno-calcaires	
Dogger		Bathonien : dolomies
	Aalénien-Bajocien : marnes avec bancs calcaires	
Lias	Domérien-Toarcién : argiles et calcschistes	
		Sinemurien-Carixien : calcaires

Les formations du *Lias* calcaire (*Sinemurien-Carixien*) n'affleurent que très localement dans la région étudiée et leur potentiel aquifère est peu connu dans ce secteur.

Les argiles et calcschistes du *Lias* marneux (*Domérien-Toarcién*) affleurent localement dans la vallée de la Buèges et servent vraisemblablement de mur (ou substratum) à l'aquifère du *Dogger*.

La fracturation des séries de l'*Aalénien-Bajocien* permet certainement une continuité hydraulique entre ces formations et l'aquifère principal du *Dogger* constitué par les dolomies du *Bathonien*, mais, la nature marno-calcaire de la base de cet étage en fait vraisemblablement un aquifère de qualité médiocre.

Les dolomies du *Jurassique moyen* (*Bathonien*) sont en général considérés comme étant l'aquifère majeur de la zone étudiée en raison de leur nature poreuse et karstifiable, de leur puissance (jusqu'à 300 m d'épaisseur) et de leur étendue. C'est à leur niveau que plusieurs sources pérennes à fort débit émergent, notamment dans les gorges de l'Hérault.

Les niveaux marneux et marno-calcaires du *Jurassique moyen* (*Callovien* et *Oxfordien inférieur et moyen*) jouent un rôle hydrogéologique complexe. En effet, en raison de leur teneur en argiles, ces formations peuvent localement constituer un niveau imperméable, mais l'abondance des failles et l'absence d'émergences à la base du *Jurassique supérieur* laissent présager qu'elles ne jouent pas un rôle d'écran imperméable régional, entre ces formations carbonatées et les dolomies du *Bathonien*.

Le *Jurassique supérieur* (*Oxfordien supérieur* et *Kimméridgien*) constitue, par sa nature karstifiable, sa grande épaisseur et sa large zone d'affleurement, notamment dans la partie nord de la zone d'étude, un lieu privilégié pour les écoulements souterrains de type karstique. Cette caractéristique est vérifiée par l'existence de nombreuses cavités et phénomènes karstiques de surface dans les massifs constitués par cette formation.

2.2.6. Géométrie présumée du réservoir de la source des Cent-Fonts

La délimitation présumée du système drainé par la source des Cent-Fonts a été réalisée sur la base d'une reconnaissance géologique de terrain de la région et à partir d'une analyse bibliographique (cf. fig. 16).

La limite nord-ouest a été placée au droit des vallées du Pontel et de la Buèges qui servent de niveau de base aux écoulements souterrains provenant du Nord (massif de la Séranne). Néanmoins des circulations profondes venant de la Séranne et traversant cette limite pour alimenter la source des Cent-Fonts ne peuvent géologiquement être totalement exclues.

La bordure sud-est correspond aux gorges de l'Hérault, qui constituent le niveau de base régional des écoulements souterrains, comme en témoignent les nombreuses sources tant en rive droite qu'en rive gauche.

La limite sud-ouest a été inscrite au droit de la vallée de la Combe-du-Buis en raison de l'importance géomorphologique de cette vallée et des résultats des traçages réalisés au Sud de cette limite qui s'écoulent vers les sources de Noué, du Cabrier et de la Clamouse.

Les contours présumés du système aquifère karstique des Cent-Fonts forment donc grossièrement un triangle d'environ 10 km de long pour une largeur moyenne de 5 km. Il correspond au massif calcaire du Cause-de-la-Selle. La surface de ce système serait d'environ 50 km².

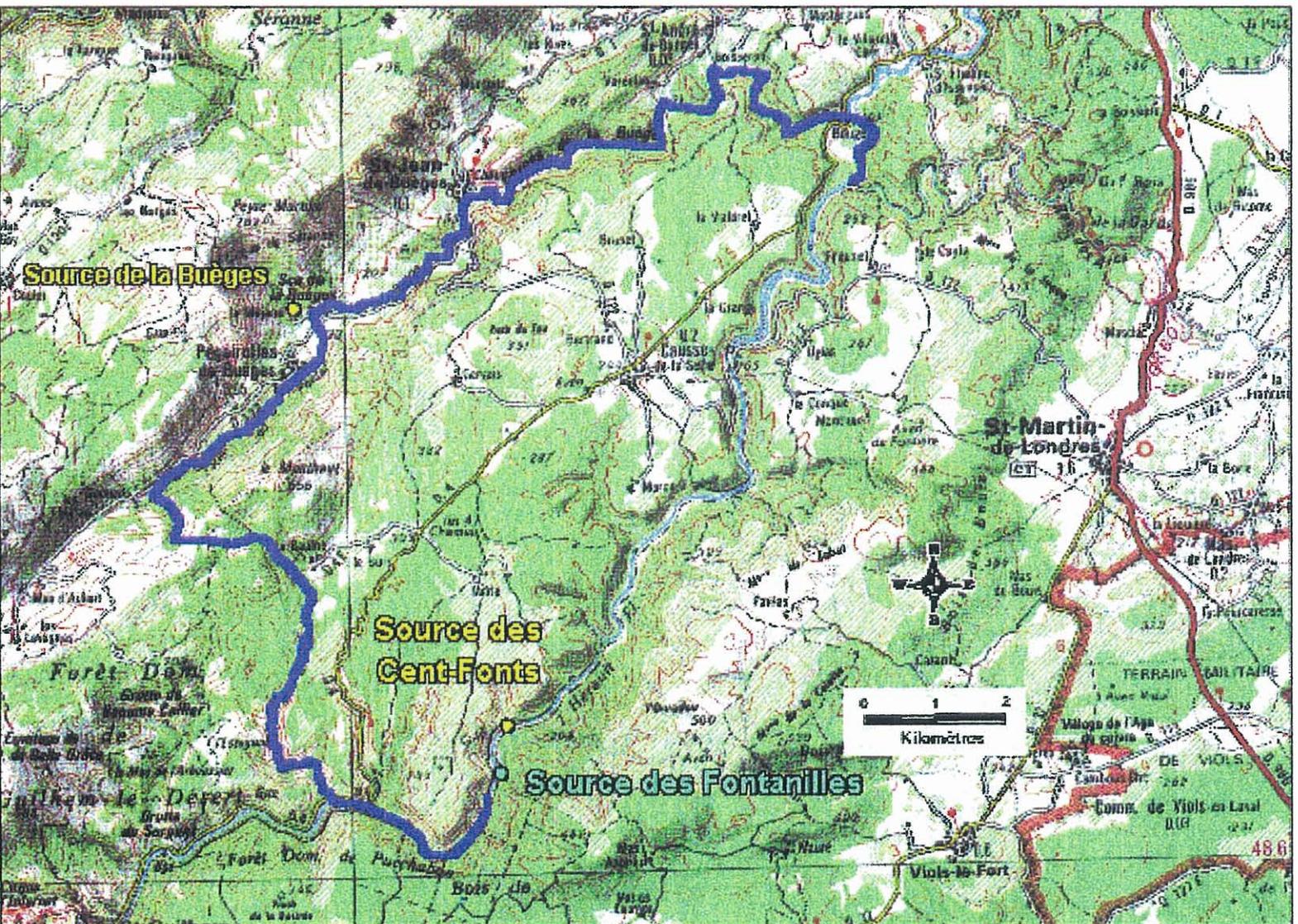


Fig. 16 : Limites présumées du système aquifère de la source des Cent-Fonts (extrait de la carte IGN au 1/100).

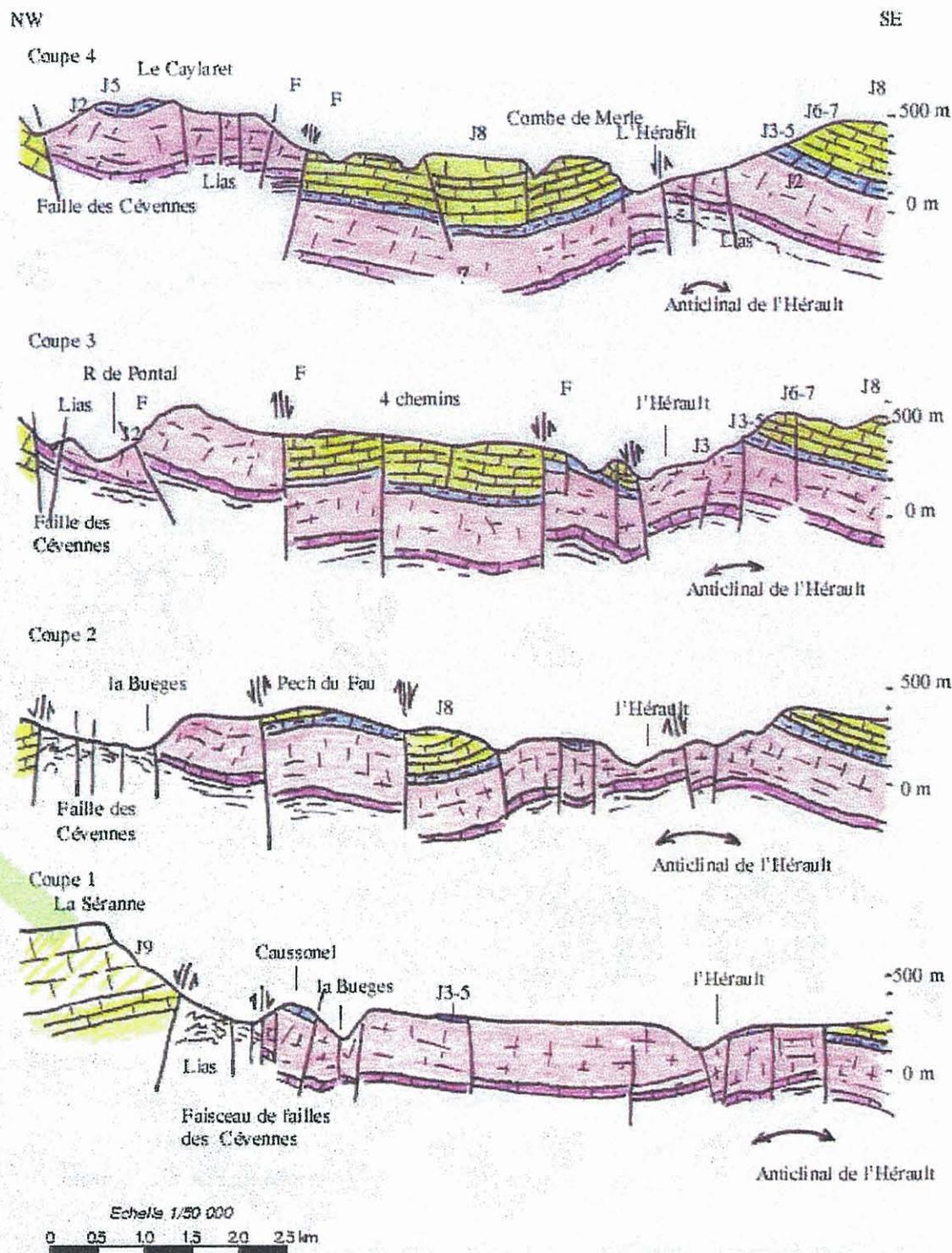


Fig. 17 : Coupes géologiques du système aquifère de la source des Cent-Fonts (la localisation des coupes est présentée figure 12).

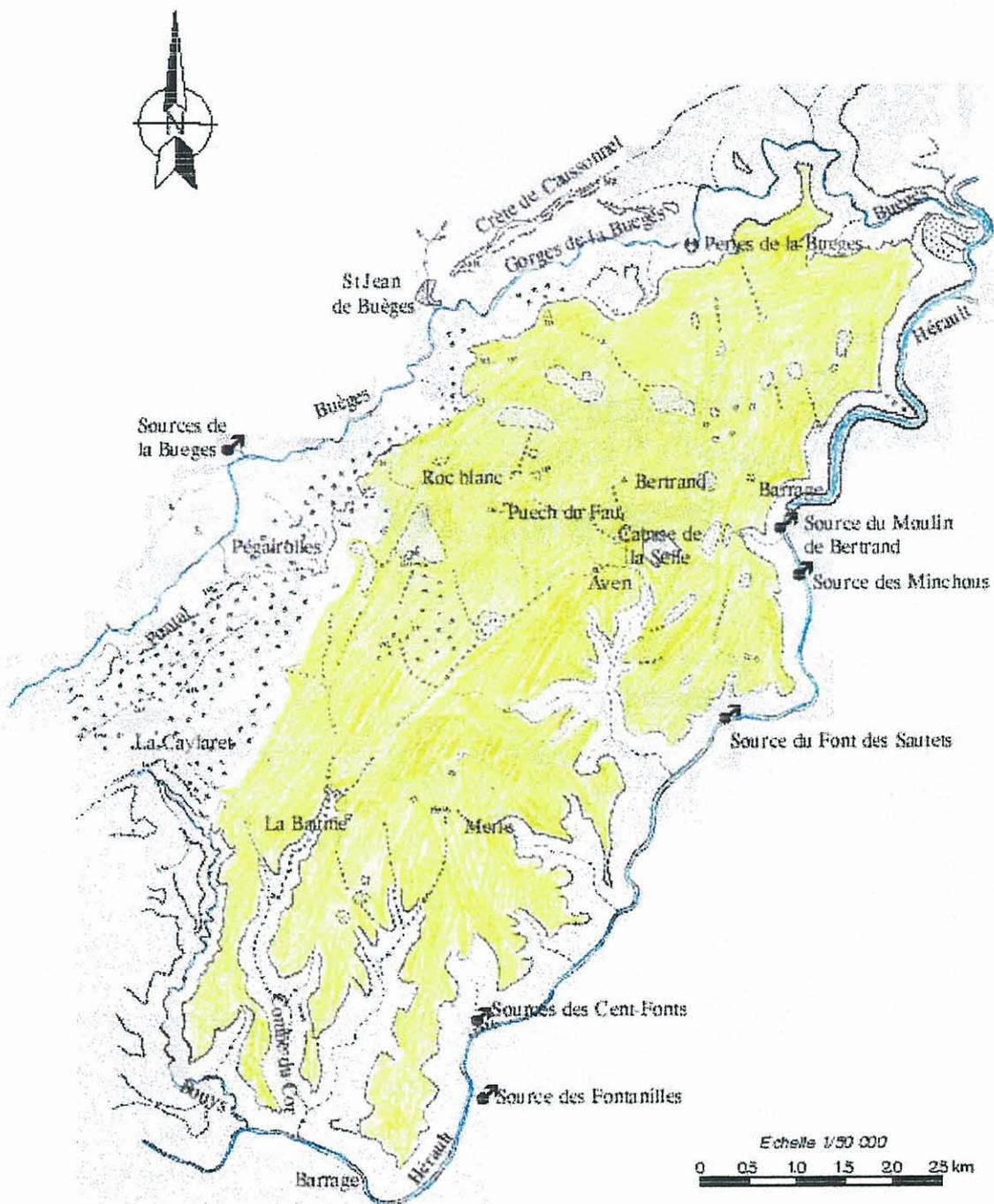


Fig. 18 : Carte hydrogéomorphique du système aquifère de la source des Cent-Fonts.

Légende

Hydrologie

	Rivière de l'Hérault
	Cours d'eau principal
	Cours d'eau temporaire
	Source importante

Géomorphologie

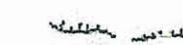
	Plateau du Causse de la Selle
	Ravin encaissé
	Falaise
	Crête élevée
	Relief chaotique
	Axe de valon sec
	Dépression comblée par des produit d'érosion
	Petite dépression ou doline

Fig. 18bis : Légende de la carte hydrogéomorphique figure 18.

Le système karstique de la source des Cent-Fonts est également en partie alimenté par les pertes de la Buèges, rivière qui draine le versant sud de la Séranne.

Afin d'illustrer la structure géologique de ce système, des reconnaissances de terrain ont été menées pour réaliser une carte géologique synthétique (cf. fig. 12) ainsi que quatre coupes sériées, orientées nord-ouest/sud-est, c'est-à-dire perpendiculaires aux structures du système (cf. fig. 17, la localisation des coupes étant représentée sur la fig. 12). Ces coupes fournissent une image de la géologie du massif et non une représentation rigoureuse qui aurait nécessité des investigations beaucoup plus longues.

Le secteur de l'Est du massif présente deux structures plissées majeures :

- un anticlinal qui longe la vallée de l'Hérault et dont le rayon de courbure augmente vers le Sud. Il faut souligner la fracturation axiale qui affecte intensément ce pli ;
- une structure synclinale parallèle à l'anticlinal précédent, mais située sur le plateau dans l'axe du village de Causse-de-la-Selle. Cette structure à faible rayon de courbure présente un plongement axial vers le Sud en direction de la Combe-du-Buis : le toit des dolomies du *Bathonien* passant de la cote + 250 m NGF (au Nord sur la coupe 1) à une cote inférieure à 0 m NGF (au Sud sur la coupe 4).

Elles mettent en évidence quelques points importants de la géologie structurale du massif du Cause-de-la-Selle :

La partie ouest du massif est dominée par la structure anticlinale de la Buèges qui sert de limite occidentale.

En surimposition à ces structures plissées, l'ensemble du massif est affecté par des failles pluri-kilométriques d'orientation cévenole (N030°/N040°) qui morcellent le massif en lambeaux de largeur kilométrique. Ces bandes, parallèles aux frontières naturelles constituées par l'Hérault et la Buèges, présentent des décalages verticaux pouvant dépasser la centaine de mètres. Elles sont localement recoupées par des accidents de second ordre en général d'orientation méridienne.

2.2.7. Géomorphologie du système karstique des Cent-Fonts

Formes d'érosion de surface

Le plateau du Cause-de-la-Selle, bien délimité par les entailles des cours d'eau de l'Hérault et de la Buèges, présente une morphologie générale de pénéplaine relevée vers le sud-ouest, aux cotes 300-350 m, contre 200-220 m vers le nord-est.

Les différents phénomènes karstiques inventoriés sur le système des Cent-Fonts ont été reportés sur la figure 18.

Dans le détail, les phénomènes karstiques suivants ont été relevés :

Reliefs ruiniformes

Les calcaires dolomitiques présentent des reliefs ruiniformes, chaotiques sur les versants qui les distinguent des calcaires plus massifs. Entre les masses rocheuses saillantes, les espaces sont souvent comblés par des produits d'altération sablo-argileux.

Ces reliefs ruiniformes sont particulièrement développés au sud-ouest du système karstique à proximité de Pégairolles de Buèges

Dolines et dépressions

Ces creux topographiques ont des dimensions variant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. Ils sont essentiellement concentrés dans la partie nord du massif entre l'Hérault et St-Jean-de-Buèges. Leurs formes sont souvent circulaires ou allongées. Leur profondeur n'excède pas 5 à 10 m. Ils sont comblés de produits d'altération argileux et de fragments calcaires, certains pouvant être volumineux.

Lapiaz

Le relief ciselé et crevassé qui caractérise le lapiaz ne se rencontre que dans les formations calcaires du *Jurassique supérieur*. Il apparaît ancien, souvent masqué par des éboulis ou en partie démantelé. Les zones de lapiaz bien dégagé sont peu étendues et souvent en relief (ressauts, cuestas).

Thalwegs et vallons secs

Le réseau hydrographique ancien qui s'est développé sur la surface aplanie présente des vestiges qui favorisent la concentration des eaux de surface et leur infiltration.

Ils présentent une morphologie de ravins peu encaissés et parsemés d'éboulis et de petits vallons secs à fond large souvent comblés par des produits d'érosion. Leurs débouchés s'effectuent fréquemment dans des dépressions parsemant le plateau.

Certains thalwegs sont organisés et suivent la ligne de pente générale du plateau pour se raccorder à l'Hérault dans des ravins secs et encaissés. La partie supérieure de ces ravins comporte de nombreux points d'infiltration.

2.2.8. Inventaire des phénomènes karstiques des Cent-Fonts

Inventaire général des cavités

Un inventaire des cavités souterraines de ce massif a été réalisé en 1998 par le Comité Départemental de Spéléologie de l'Hérault. Le nombre de cavités répertoriées était alors de 243 (cf. annexe I).

Afin de mieux percevoir les caractéristiques des cavités connues sur le massif un classement en fonction du développement ou de la profondeur a été réalisé sur la base de l'inventaire ; il est fourni dans les tableaux suivants.

Développement des cavités	Nombre de cavités
entre 0 et 50 m	222
entre 50 et 100 m	7
entre 100 et 250 m	7
entre 250 et 1 000 m	5
supérieur à 1 000 m	2

Profondeur des cavités	Nombre de cavités
entre 0 et 50 m	228
entre 50 et 100 m	12
entre 100 et 150 m	2
supérieure à 150 m	1

Cette statistique sommaire met en évidence que les cavités de ce massif sont en général peu importantes, tant par profondeur que par leur développement. Ainsi seuls trois avens dépassent 100 m de profondeur, et deux cavités dépassent 1 000 m de développement. Ces conclusions rappellent celles formulées pour le massif des Fontanilles situé en vis-à-vis de l'autre côté des gorges de l'Hérault.

Un report sur carte de ces différentes classes dimensionnelles (cf. fig. 20 et 21) montre que la vingtaine de cavités majeures inventoriées sur le système (longueur et profondeur supérieure à 50 m) est concentrée dans la moitié est du massif karstique et essentiellement au droit des séries carbonatées du *Jurassique supérieur*.

Les cavités les plus importantes en développement et en profondeur sont les suivantes :

- La grotte du Tunnel sous la Route, située en rive droite de la vallée de l'Hérault à proximité de la confluence avec la Combe-du-Buis, se développe sur 1 850 m.
- L'aven de la Combe-du-Buis, s'ouvrant à l'extrémité sud-ouest du massif sur le versant de la combe du même nom, présente une dénivellation totale de 202 m dont 55 m noyé et un développement de 1 250 m dont près de 700 m de siphon. Cet aven représente en l'état actuel des explorations, la cavité majeure du système (cf. fig. 19).

Inventaire des cavités actives pérennes ou temporaires

Les cavités actives inventoriées sur le domaine d'extension probable du système aquifère karstique des Cent-Fonts sont reportées sur la carte de la figure 22.

Inventaire des pertes actives pérennes ou temporaires

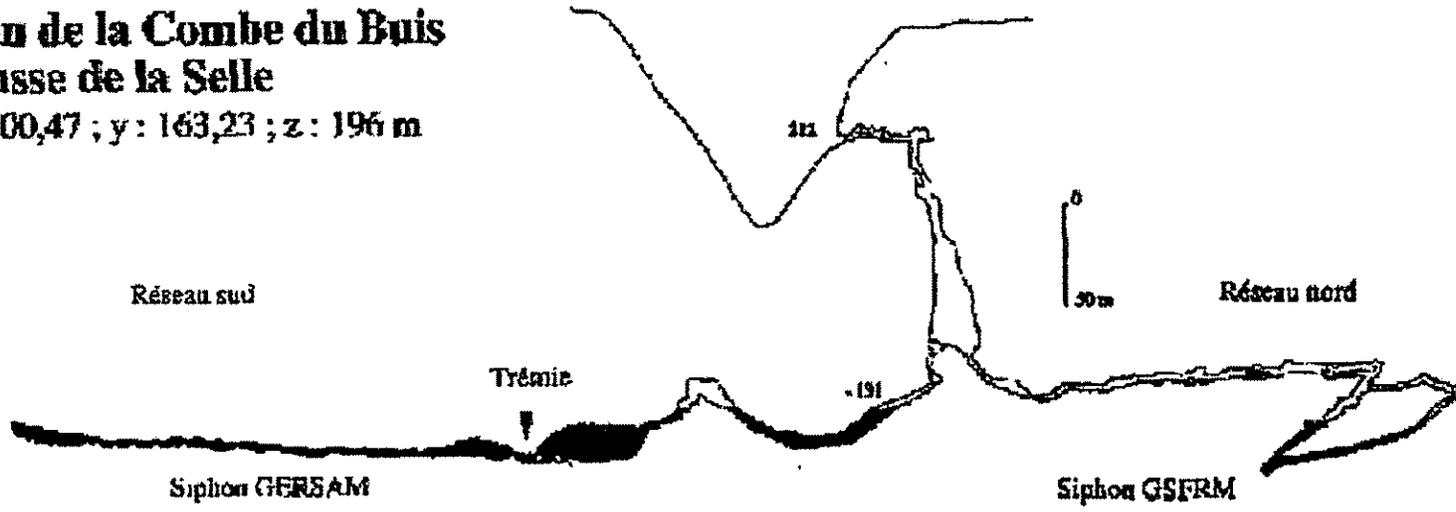
Trois pertes ont été recensées sur le domaine d'extension probable du système karstique des Cent-Fonts.

La perte de la Buèges est localisée dans le lit même de la rivière de la Buèges à environ 3 km à l'Est de St-Jean-de-Buèges. Cette perte pérenne n'est pas ponctuelle dans l'espace, et le point de disparition totale des eaux n'est pas stable dans le temps, se déplaçant sur une distance d'environ 1 km suivant le débit d'étiage de la rivière. La relation entre cette perte et la source des Cent-Fonts a été validée par un traçage quantitatif réalisé en 1997 au cours de cette étude.

La perte de Boisseron est elle aussi située dans le lit de la Buèges à environ 1 km au sud-est de St-André-de-Buèges. Cette perte n'est active qu'en moyennes et hautes eaux lorsque la rivière n'est pas totalement absorbée au droit de la perte de la Buèges. A notre connaissance aucun traçage n'a été réalisé à ce jour à partir de cette perte.

La perte des Colons est localisée dans le thalweg visible au sud-ouest du village de Causse-de-la-Selle. Son activité est temporaire mais lorsqu'elle fonctionne elle draine une partie des eaux ayant transité sur l'ancien dépôt d'ordures du village qui occupe une partie de ce thalweg. Une coloration réalisée en 1966 aurait montré une relation entre ce point d'absorption et la source de la Combe-de-Marrou.

Aven de la Combe du Buis
Causse de la Selle
 x : 700,47 ; y : 163,23 ; z : 196 m



Topo. d'après GSFRM et GERSAM 91, plan croquis de plongée St. Coupiat

Fig. 19 : Topo de l'aven de la Combe-du-Buis.

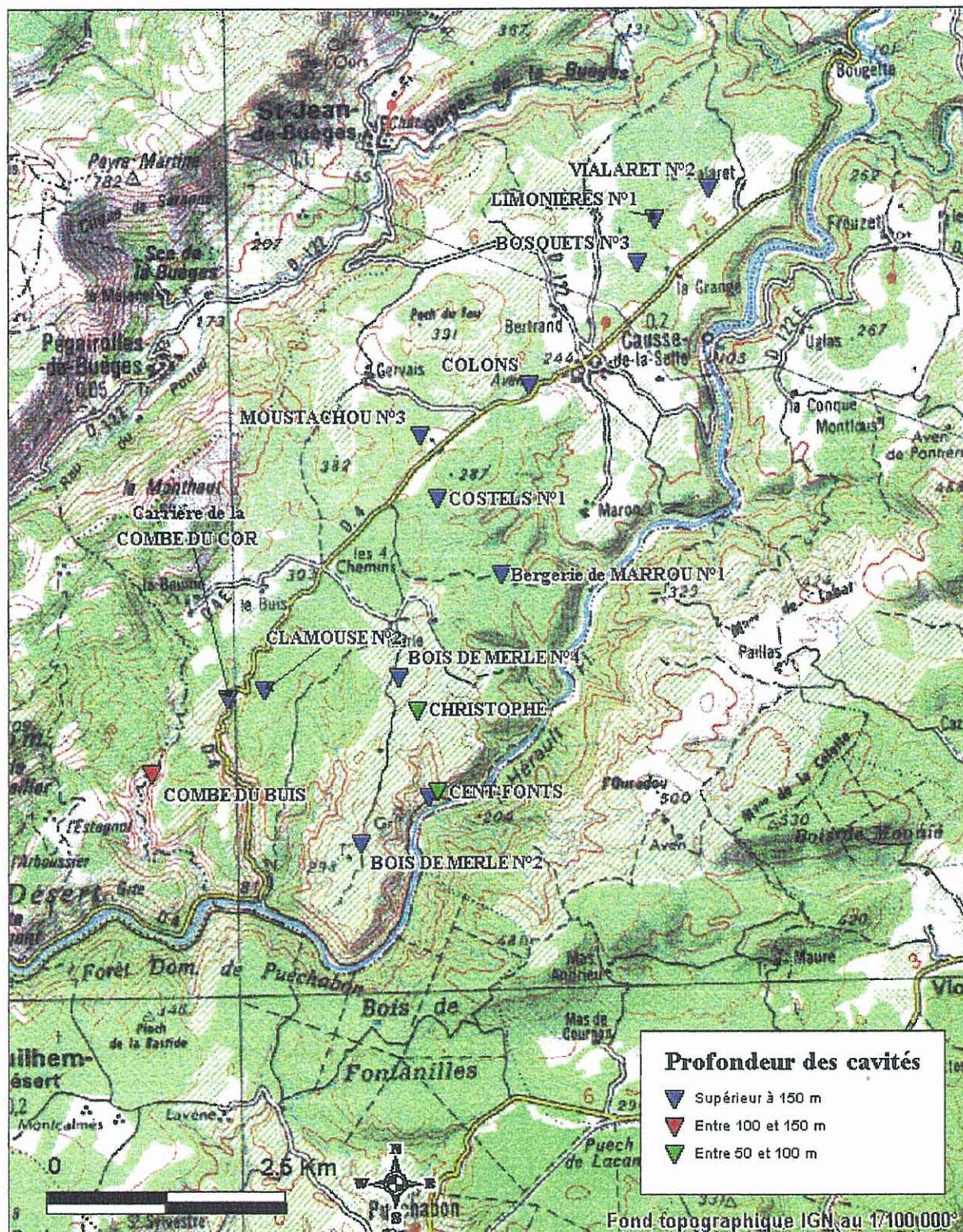


Fig. 20 : Carte des cavités du système des Cent-Fonts, par classes de profondeur.

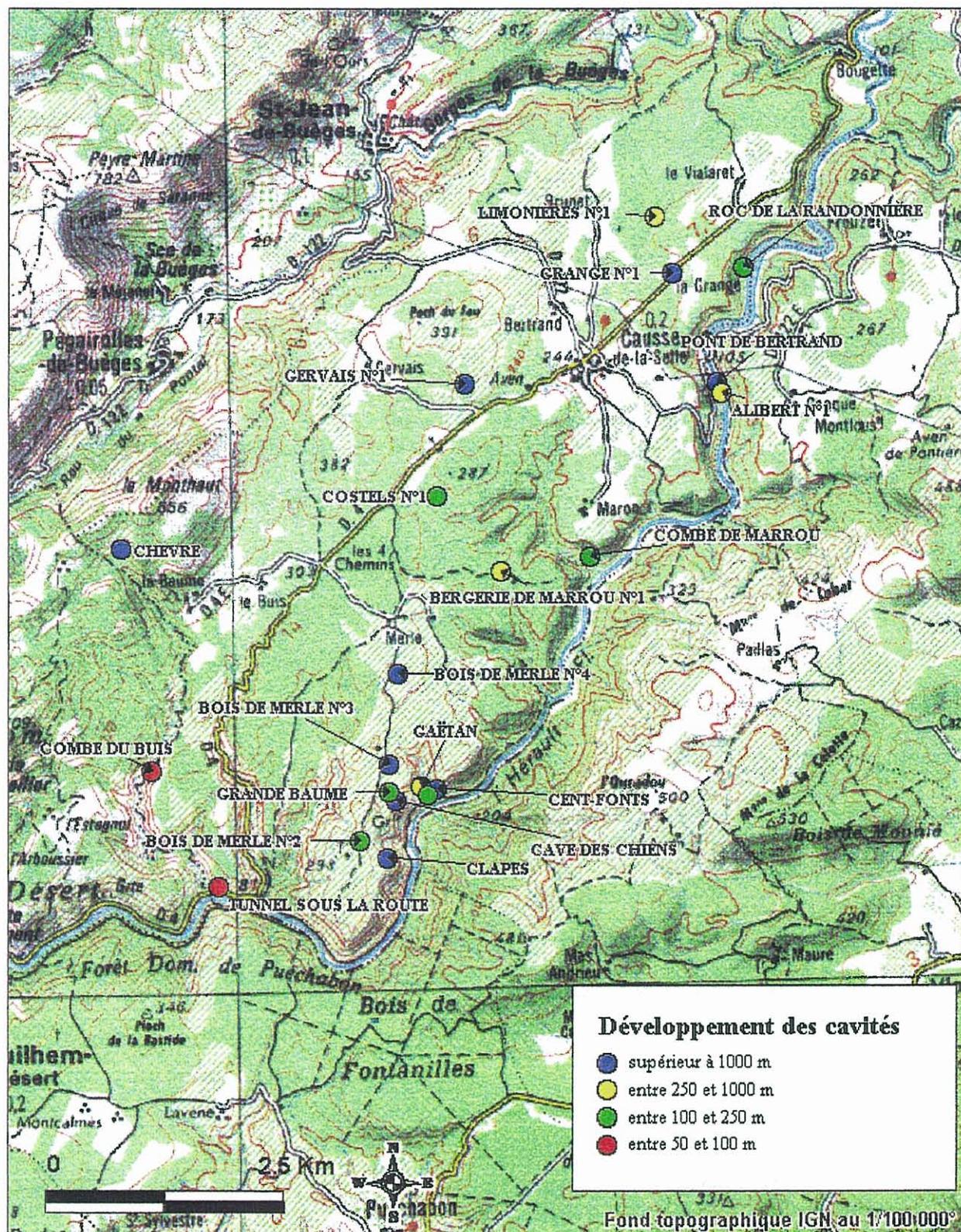


Fig. 21 : Carte des cavités du système des Cent-Fonts, par classes de développement.

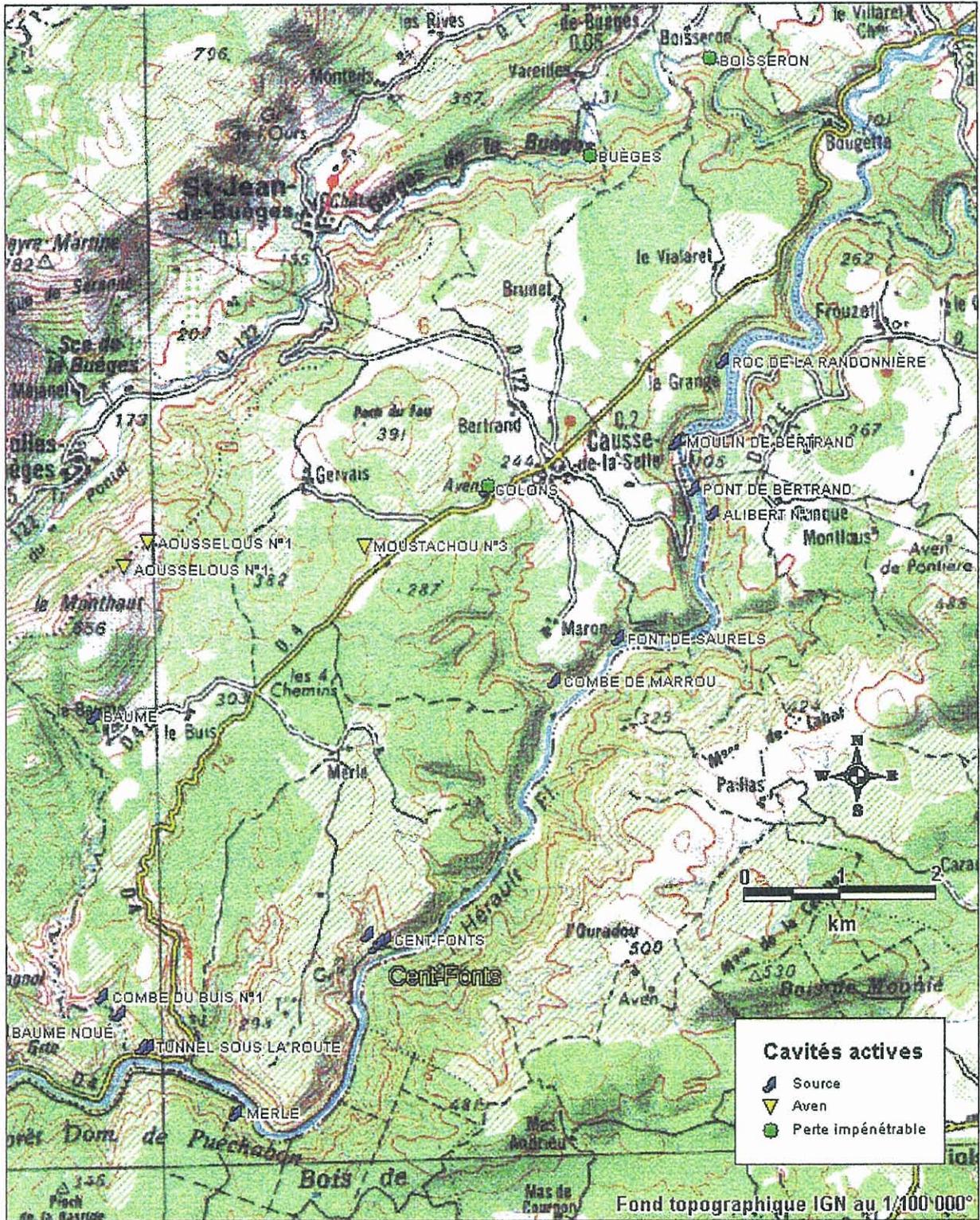


Fig. 22 : Carte des cavités hydrologiquement actives du système des Cent-Fonts.

Inventaires des sources pérennes ou temporaires

La reconnaissance de terrain réalisée sur la base des publications spéléologiques a permis de recenser 13 sources dans le secteur étudié, dont 5 pérennes et 8 temporaires :

- en rive droite de l'Hérault : 5 sources pérennes (Moulin de Bertrand, Pont de Bertrand, Saurel, Cent-Fonts, Tunnel sous la Route) et 5 sources temporaires (Roc de la Randonnière, Alibert, Combe-de-Marrou, Gaëtan, Merle)
- dans la Combe-du-Buis : 3 sources temporaires (Combe-du-Buis N° 1, Combe-du-Buis N° 2, Baume).

Hormis la source des Cent-Fonts, dont le débit d'étiage est de l'ordre de 200 l/s, aucune chronique de débit n'existe pour ces émergences, mais le débit d'étiage de ces sources secondaires est faible, de l'ordre de quelques l/s au maximum.

L'existence de ces sources temporaires ou pérennes de faible débit est essentiellement liée à des particularités locales (drainage en périphérie du massif au droit des gorges) ou à la réactivation temporaire, lors des hautes eaux, d'anciens drains karstiques perchés au-dessus du niveau de base de l'Hérault.

2.3. HYDROGÉOLOGIE DU SYSTÈME KARSTIQUE DES CENT-FONTS

2.3.1. Caractères hydrogéologiques des formations

Deux formations carbonatées épaisses sont présentes au droit du système des Cent-Fonts. Elles se distinguent par des caractéristiques aquifères différentes :

- Le *Jurassique supérieur* (*Malm*, 300 à 400 m d'épaisseur) présente des calcaires francs, massifs et fortement fracturés. L'absence de sources issues de cette formation atteste que, par leur situation topographique, morphologique et structurale, ces calcaires constituent un réservoir unique avec les dolomies du *Jurassique inférieur*, à la faveur de nombreux accidents.
- Le *Jurassique inférieur* (*Lias*, 200 à 250 m d'épaisseur) avec des calcaires dolomitiques vacuolaires, altérés en surface, présente une perméabilité d'interstices et localement de chenaux. Cette puissante formation dolomitique constitue, avec la précédente, l'aquifère principal du système.

Les autres formations présentent des propriétés aquifères beaucoup plus faibles, voire nulles en raison de la présence de niveaux marneux très peu perméables. Il s'agit :

- du *Jurassique moyen* (*Dogger*, épaisseur : 100 m), ensemble de marno-calcaires comportant des bancs calcaires isolés et une base marneuse qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres ; cette formation semble présenter des caractéristiques hydrauliques médiocres mais ne joue vraisemblablement pas un rôle d'écran étanche entre les calcaires et les dolomies étant donné l'absence d'exutoire à la base du *Jurassique supérieur* ;

- du substratum de l'aquifère constitué par le lias (épaisseur : 150 m) comprenant le *Bajocien inférieur*, l'*Aalénien* et le *Toarcién* ; ces formations marno-calcaires avec des bancs gréseux et des niveaux marno-schisteux épais constituent le soubassement imperméable du réservoir et une probable limite étanche au Nord-Ouest du réservoir dans la zone où ces formations affleurent (anticlinal de la vallée de la Buèges).

2.3.2. Zone d'infiltration

Plusieurs types d'infiltration peuvent être distingués à la surface du système :

- infiltration directe sur les surfaces rocheuses lapiazées calcaires ou chaotiques dolomitiques,
- infiltration concentrée d'écoulements temporaires superficiels (ravins, vallons, dépressions) par des cavités situées dans des dépressions (comme par exemple la perte des Colons située dans la combe au sud-ouest de Causse-de-la-Selle).
- infiltration concentrée par pertes de cours d'eau permanents, la plus connue étant celle de la Buèges à l'est de St-Jean-de-Buèges.

2.3.3. Schéma interprétatif des circulations souterraines

Suite aux différentes investigations réalisées, et après analyse des documents de synthèse qui en sont issus (cartes géologique et structurale, inventaire des cavités...), l'hypothèse suivante concernant l'organisation des circulations souterraines dans le système karstique des Cents-Fonts peut être proposée.

Les grandes failles cévenoles visibles sur le schéma structural (cf. fig. 14) découpent le secteur en rubans parallèles à l'Hérault. Elles sont orientées, pour la plupart, vers l'importante Combe-du-Buis (limite ouest du système), où elles convergent avec plusieurs structures faillées secondaires, orientées N 070° et N 170°. Ces failles déterminent une large lanière, constituant l'essentiel du probable bassin d'alimentation de la source des Cent-Fonts.

L'évolution géomorphologique de la région, depuis la surrection de la région, a permis le développement d'écoulements souterrains se raccordant aux niveaux de base successifs, commandés par l'Hérault.

Ainsi, jusqu'au Quaternaire ancien, les circulations souterraines devaient aboutir à des émergences en rive gauche de la Combe-du-Buis qui devait constituer le niveau de base du système. Ces anciens cheminements souterrains sont attestés par les phénomènes suivants :

- trois sources temporaires dont l'important réseau du Tunnel sous la Route, exploré sur 1 800 m de développement, sont visibles dans la partie basse de la combe ;
- la plus importante cavité du système (aven de la Combe-du-Buis), actuellement en position de regard sur la zone noyée, et présente d'imposantes galeries temporairement actives.

A la suite de l'enfoncement rapide de l'Hérault, au Quaternaire, le gradient hydraulique s'est accru ; les combes latérales sont restées légèrement suspendues au-dessus du niveau du fleuve. Cette nouvelle disposition hydraulique a forcé l'ensemble des écoulements souterrains vers l'Hérault au détriment de la Combe-du-Buis. La position actuelle de l'exutoire principal (sources des Cent-Fonts) paraît liée à une structure ancienne transversale, sur laquelle paraissent buter les écoulements.

Les autres sources en rive droite de l'Hérault apparaissent comme des émergences locales drainant la bordure du causse à proximité du versant abrupt des gorges de l'Hérault.

La continuité apparente du réservoir carbonaté vers le Sud pourrait être responsable d'écoulements passant sous le causse ; l'eau transitant plus vers le Sud en passant sous les combes du Cor et du Buis. Toutefois, aucune preuve d'une telle continuité hydraulique n'a jusqu'à présent été apportée.

3. Analyse microstructurale

3.1. INTRODUCTION À L'ANALYSE DE LA FRACTURATION DANS LES AQUIFÈRES KARSTIQUES

Dans les roches indurées, les fractures et les fissures jouent le même rôle vis-à-vis de l'eau souterraine que la porosité d'interstices dans les roches non consolidées. C'est pourquoi on considère généralement que la connaissance de la distribution spatiale de toutes les discontinuités (fractures, fissures, joints de bancs) est nécessaire pour déterminer les zones les plus favorables aux écoulements souterrains et, donc, pour positionner des forages d'exploitation de l'eau souterraine circulant dans ces vides.

La distribution de la fracturation d'un massif rocheux peut être décrite et analysée soit par une étude directe (terrain, cartes géologiques, photogéologie), soit par une étude indirecte (géophysique). C'est pourquoi de nombreux travaux d'hydrogéologie karstique analysent la fracturation des massifs carbonatés (voir notamment les travaux de Razack, Grillot, Drogue et de leurs étudiants, ceux de Rossier, à Neuchâtel). Ils partent tous du postulat que la karstification se produit aux dépens des fractures existantes en respectant, dans l'ensemble, leur distribution et leurs caractéristiques initiales.

3.1.1. Les méthodes proposées

Cependant, les processus de karstification modifient les caractéristiques initiales de la fracturation par un élargissement de certains des vides préexistants. Le résultat de cette karstification est un réseau de drainage karstique (ou réseau de conduits), qui parcourt l'ensemble de l'aquifère, dans sa zone d'infiltration et dans sa zone noyée. La question se pose alors de savoir si la structure de ce réseau de drainage et l'organisation du stockage dans la zone noyée se calque ou non sur celle de la fracturation initiale. C'est pour cette raison que plusieurs approches sont proposées, conduisant à des méthodes d'analyse et d'interprétation différentes :

- i) Les discontinuités de la roche (fracturation, joints de bancs) s'imposent à la karstification qui, en quelque sorte, se calque dessus, à toutes les échelles. Analyser la fracturation revient à déterminer la structure du réseau de conduits karstiques. Il s'agit de **l'approche structurelle**.
- ii) Les discontinuités de la roche sont élargies lors de la karstification en fonction du *potentiel de karstification*, défini par la capacité des eaux souterraines à dissoudre la roche et à évacuer les produits de dissolution (pouvoir dissolvant de l'eau et gradient hydraulique). Ce sont leurs caractéristiques (ouverture et connectivité) et leur orientation par rapport au gradient hydraulique régional qui font que seules certaines d'entre elles sont utilisées. De ce fait il n'existe de relation entre fracturation et conduits karstiques qu'à l'échelle de l'unité de drainage, le système karstique. C'est le fonctionnement de l'aquifère karstique qui est responsable de la sélection de

certaines discontinuités pour produire le réseau de drainage. Selon cette conception, l'approche à mettre en œuvre doit s'appuyer sur la connaissance du fonctionnement : il s'agit de **l'approche fonctionnelle de la karstification**.

L'approche structurelle de la karstification

Selon certains spécialistes (Drogue et son école, Rossier), la structure fissurale initiale dans son ensemble favorise la pénétration et la circulation des eaux dans les aquifères fissurés. Plusieurs stades successifs de déformation sont en général à l'origine du réseau fissural : la distribution directionnelle des fractures est un marqueur tectonique de ces stades. La karstification élargit ces fractures, en sorte que la distribution de la fracturation à l'échelle photogéologique et celle des conduits karstiques connus présentent une remarquable concordance (voir par exemple l'étude faite par Grilloit sur le sud du causse du Larzac, 1979). Les changements observés dans la distribution des directions des conduits karstiques pour des réseaux d'âges différents (réseaux spéléologiques superposés) sont attribués à des stades tectoniques successifs, induisant une distribution nouvelle de la fracturation.

Pourtant, ces auteurs remarquent que globalement le champ des contraintes est resté le même depuis le Paléozoïque, ce qui est contradictoire avec les modifications supposées. Dans ce schéma, les fractures semblent être utilisées par la karstification en fonction de leurs caractéristiques : longueur, nombre, dimension de la maille, « jeux mécaniques » (ou « écartement latéral des joints »), cette dernière caractéristique paraissant la plus importante.

Une modélisation globale du karst (Drogue, 1974) prend en compte schématiquement l'hétérogénéité de l'aquifère karstique en chenaux et en fines fissures : elle décrit le milieu karstique comme la juxtaposition de blocs (« les blocs capacitifs ») assimilés à des domaines peu perméables et peu ou finement fissurés, connectés à des conduits à écoulement rapide, constituant un réseau aboutissant aux exutoires. Selon cette théorie, il y aurait identité non seulement entre la distribution des fractures et celle des conduits karstiques, mais aussi entre leurs niveaux d'échelle : les discontinuités d'extension régionale (1^{er} ordre) coïncideraient avec les conduits majeurs et ainsi de suite. Finalement, la karstification se calquerait plus ou moins bien sur la distribution des fractures pour constituer le réseau de conduits. Ainsi, de la connaissance de l'organisation de la fracturation pourrait être directement déduite celle de la karstification : la hiérarchisation des vides karstiques (ou des conduits) serait imposée dès l'origine par celle de la fracturation, ce qui signifie que l'architecture géologique du milieu déterminerait l'organisation des écoulements et par conséquent, la structure de drainage karstique. La littérature fournit quelques exemples spectaculaires de cette identité entre architecture et structure du drainage karstique.

L'approche fonctionnelle de la karstification

Cependant, la plupart des exemples connus de réseaux karstiques ne montre pas de relation évidente entre architecture et structure. Pourtant, ce sont bien les discontinuités

au sein des roches carbonatées qui permettent les écoulements d'eau souterraine et la création du réseau de drainage. Tout se passe comme si les écoulements avaient « choisi » certaines discontinuités plutôt que d'autres. C'est pourquoi Eraso (1985) a entrepris une étude systématique consistant à comparer les directions des conduits karstiques à celles des discontinuités, ainsi que leurs fréquences respectives. Mais à la différence de Droque, Grillot et Rossier, il s'appuie sur le postulat, proposé par Arthaud et Choukroune (1972) et admis maintenant, que **les écoulements souterrains utilisent exclusivement les plans en distension**. Les autres plans de discontinuités ne seraient jamais utilisés par les écoulements souterrains.

Or, les caractéristiques de ces plans peuvent être déterminées par l'analyse microstructurale. Ainsi, s'il est possible de reconstituer l'ellipsoïde des déformations, les directions de ces plans en distension peuvent être déterminées : elles contiennent les directions principales maximale et moyenne (σ_1 et σ_2) et sont perpendiculaires à la direction principale minimale (σ_3). Eraso appelle ces plans « plans de drainage », dans la mesure où ils favorisent l'écoulement. Cette notion est totalement différente de la notion de « réseau de drainage ». Le réseau de drainage (ou de conduits) est en effet l'organisation de formes karstiques qui, dans la zone noyée de l'aquifère karstique, permet des écoulements rapides. Les plans de drainage peuvent être utilisés par la karstification pour que s'y développent des conduits.

Eraso a analysé un grand nombre d'exemples, dans le karst surtout, mais aussi dans les cavités naturelles de glaciers ou de calottes glaciaires. Il constate que, systématiquement, **les histogrammes de distribution de fréquence des directions des conduits et des plans de drainage sont semblables à l'échelle du massif**. Il constate aussi que, selon la direction du gradient hydraulique par rapport à celle dominante des plans de drainage, le système karstique présente une forme différente. Si les deux directions coïncident, le drainage karstique est plutôt linéaire et le système allongé ; au contraire, si elles sont perpendiculaires, le réseau de drainage est plus complexe et le système plus compact.

Par conséquent, les discontinuités en ouverture sont globalement parcourues par les eaux souterraines et élargies et organisées en un réseau de conduits par les processus karstiques, dans la mesure où leur degré de connexion et l'orientation régionale du gradient hydraulique le permettent.

3.1.2. Méthode d'analyse retenue

Dans la première approche, la fracturation de l'ensemble du massif est analysée et cartographiée. Le champ des fractures est utilisé pour décrire le milieu aquifère et pour définir les zones favorables aux circulations souterraines de type karstique ou les zones de blocs capacitifs. La seconde approche cherche à définir uniquement la direction et la fréquence des plans de drainage à l'échelle du massif ou du système, c'est-à-dire des directions susceptibles d'avoir été utilisées par les écoulements souterrains et éventuellement karstifiées en fonction des paramètres environnementaux responsables de la karstification : le gradient hydraulique et le pouvoir dissolvant de l'eau, exprimés par

le potentiel de karstification. C'est cette seconde approche que nous avons mise en œuvre.

L'analyse microstructurale

L'objectif de la méthode est d'établir la loi de distribution des plans de drainage, c'est-à-dire la loi de distribution des directions utilisées par l'écoulement, avant karstification. Cette méthode a été testée sur de nombreux exemples, par comparaison de l'histogramme obtenu avec la loi de distribution des galeries karstiques d'un réseau spéléologique ; elle a montré une bonne concordance entre les deux.

L'ellipsoïde des déformations, avec les trois directions de contraintes σ_1 , σ_2 et σ_3 , est déterminée à partir de relevés de tectoglyphes sur le terrain. Ces tectoglyphes sont : les microfailles, les fentes de traction ou veines et les joints stylolithiques. En général, les veines, si elles sont continues, appartiennent au plan σ_1 - σ_2 . La conjonction des veines avec les stylolithes ou avec les microfailles, ou la conjonction des microfailles entre elles ou des microfailles avec les stylolithes, permet d'établir les positions relatives des trois directions principales de déformation, pour déterminer la direction du plan σ_1 - σ_2 .

Le travail consiste donc à relever sur le terrain les tectoglyphes. Le traitement est ensuite réalisé au moyen d'un logiciel (GEODRE) conçu par Eraso. Ce traitement ne retient que les conjonctions compatibles avec un angle de 90° entre les trois directions, avec une tolérance de $\pm 10^\circ$, compte tenu des incertitudes de mesure ou au fait que les plans analysés ne sont pas parfaits.

L'analyse s'appuie sur l'hypothèse, généralement réaliste, d'une déformation bidimensionnelle. L'analyse faite par GEODRE est « artisanale » : elle permet de rechercher les conjonctions entre les tectoglyphes, pour la direction de σ_1 la plus conforme. En effet, selon Eraso, toutes les directions passées se retrouvent, et non pas seulement les tectoglyphes de la dernière phase.

Ceci contraint donc de connaître les différentes phases tectoniques et oblige à faire la part de chacune d'elles. Ainsi, on cherche si une famille de veines correspond à une famille de stylolithes donné. Si une conjonction apparaît, elles appartiennent toutes deux au même système et à la même phase de distension. Sinon, ces familles appartiennent à deux phases différentes.

Les relevés sont effectués sur des coupes, en bordure de routes ou en carrières. On regroupe ensuite certains sites de mesures. Il faut, dans la mesure du possible, analyser des coupes sur les différentes formations carbonatées susceptibles d'être karstifiées (dans ce cas-ci, dolomies, calcaires jurassiques, calcaires *éocènes*, etc.).

Pour le traitement statistique, une pondération est affectée lors du relevé des veines ; lorsqu'elles sont rares : 1, fréquentes : 2, et très nombreuses : 3. Par ailleurs, l'expérience a montré qu'il faut environ 300 à 400 mesures sur 10 à 20 sites répartis sur

l'ensemble d'un massif karstique donné, à condition que ces mesures soient bien réparties spatialement.

Interprétation des résultats

Il ne faut pas assimiler les plans de drainage à la direction générale des écoulements. Cette dernière est totalement déterminée par la direction du maximum de gradient hydraulique, lié à la position de la surface de recharge de l'aquifère par rapport à celle du niveau de base, c'est-à-dire du point le plus bas de l'ensemble karstifié. Le gradient hydraulique impose la trajectoire générale des eaux souterraines jusqu'à leur émergence : il s'impose donc à l'aquifère karstique dans son ensemble. Les plans de drainage définissent la forme de cette trajectoire générale, car le cheminement de l'eau respecte la loi de probabilité des directions suivies, en rendant compte des effets locaux. Ainsi, les deux directions peuvent être confondues, ou colinéaires. L'écoulement est alors aisé et rapide ; le système karstique tend à être allongé et étroit. Le réseau de drainage tend à être linéaire et plutôt de type jurassien, c'est-à-dire avec un réseau de drainage développé plutôt au voisinage de la surface piézométrique d'étiage.

Si elles sont au contraire perpendiculaires, et donc indépendantes, l'écoulement est difficile, avec de fortes pertes de charge. Le réseau de drainage peut tendre, en fonction de l'importance de la charge imposée par le gradient et par le flux disponible, vers le type vaclusien, c'est-à-dire avec un réseau de drainage enfoncé profondément sous le niveau piézométrique d'étiage.

Ces données doivent ensuite être replacées dans l'ensemble des informations définissant la géométrie du réservoir, la distribution spatiale du gradient hydraulique supposé, la répartition, l'extension des formes karstiques de surface et souterraines et la présence éventuelle, et alors la position, d'écoulements superficiels générant une infiltration concentrées dans des pertes (karst binaire). De cette façon, il devrait être possible de définir les zones de plus forte probabilité de développement de drainage souterrain.

La méthode a été appliquée avec succès dans un certain nombre d'études d'hydrogéologie karstique, en Espagne et en France, notamment dans les Pyrénées et le Larzac.

3.2. APPLICATION AUX SYSTÈMES KARSTIQUES NORD-MONTPELLIÉRAINS

3.2.1. La démarche

Sur et autour de chacun des deux systèmes karstiques, des sites appropriés aux mesures microstructurales ont été recherchés dans les principaux faciès carbonatés constituant le réservoir, de façon à ce qu'ils soient assez bien répartis sur la zone d'étude. Tous ces sites sont positionnés sur la carte (fig. 23). Les relevés ont été réalisés par R. Schoen et P. Le Strat.

Neuf stations ont permis ainsi de faire 280 mesures, nombre suffisant pour établir une statistique valable. Le tableau 1 en annexe rassemble toutes les données recueillies sur le terrain. Sont notés :

- la nature du tectoglyphe (diaclyse, fente, faille, stylolithe, plan de stratification),
- la direction, mesurée à la boussole (azimut),
- l'inclinaison du plan,
- le pitch, ou direction de l'orientation des stries d'un plan de faille par rapport à l'horizontale,
- le sens du déplacement (normal, inverse, dextre, sénestre),
- le type de remplissage,
- le nombre d'objets de mêmes caractéristiques,
- des remarques.

3.2.2. L'interprétation

Lors des premiers essais de traitement de ces données selon la méthode d'Eraso, des difficultés sont apparues au cours du calage manuel. En effet, lorsque les tectoglyphes mesurés appartiennent à une seule et même phase, ou bien que la distribution des contraintes n'a pas varié d'une phase à l'autre, il est possible de retrouver la géométrie du champ de contraintes sans disposer de toutes les informations. Par exemple, le pitch n'est que rarement observable, mais les autres données permettent de s'en passer. C'est ce que permet la méthode d'Eraso.

Dans le cas du karst nord montpelliérain, le calage manuel n'a pas été possible. Après discussions avec les spécialistes d'analyse microstructurale, il est apparu que sans la connaissance du pitch pour chaque faille, cette analyse ne peut pas être conduite.

En effet, la région a été soumise, depuis au moins 30 millions d'années, à une succession de phases tectoniques ; or, le champ des contraintes au cours de chacune d'elles a été très différent des autres. Ces fortes variations ont fait que chaque phase a fait rejouer les structures et microstructures anciennes, mais dans un contexte souvent différent.

La méthode d'Eraso est donc inopérante, dans un contexte tectonique complexe comme celui du Languedoc, en particulier au voisinage des grands accidents à fonctionnement complexe comme la faille des Cévennes et celle de la Séranne. Cette méthode ne permet donc pas d'obtenir une information statistique valable sur la direction principale d'ouverture des discontinuités lithologiques.

La compression régionale, étudiée à l'échelle du Languedoc par Arthaud et Laurent (1995), s'inscrit dans une grande régularité des contraintes régionales. Elle est orientée le plus souvent N15E. Les auteurs soulignent toutefois qu'il existe des perturbations

locales « dans des zones relativement étroites centrées sur des accidents importants du socle et de la couverture ».

Dans une première approche, il apparaît que la direction d'ouverture la plus probable (N105) pour le *système karstique des Fontanilles* est à peu près perpendiculaire à la direction de compression régionale. Or, cette direction est grossièrement perpendiculaire à l'axe de la vallée de l'Hérault. Dans ce cas précis, la direction générale du gradient hydraulique et celle de l'ouverture des fractures sont à peu près colinéaires. Par conséquent, le réseau de drainage du système karstique des Fontanilles est très probablement développé selon cette direction générale (N105), en donnant naissance à un réseau plutôt linéaire et au voisinage de la surface piézométrique. Le système karstique des Fontanilles est donc probablement développé selon un grand axe SE-NW.

Dans le cas du *système karstique des Cent-Fonts*, il n'est pas possible de faire une telle analyse sommaire, du fait de la dispersion des données. Cette situation est très certainement due au fait que ce système prend place dans un compartiment très fortement tectonisé, limité par des failles importantes, appartenant au faisceau de failles de la Séranne. Ce sont donc plutôt les directions de ces grandes failles, découpant ce secteur en lanières, qui commandent les contours du système des Cent-Fonts. Dans ce cas, la direction d'ouverture et celle du gradient hydraulique ne sont plus en coïncidence : la karstification est probablement mal développée et risque de se produire nettement sous le niveau piézométrique général.

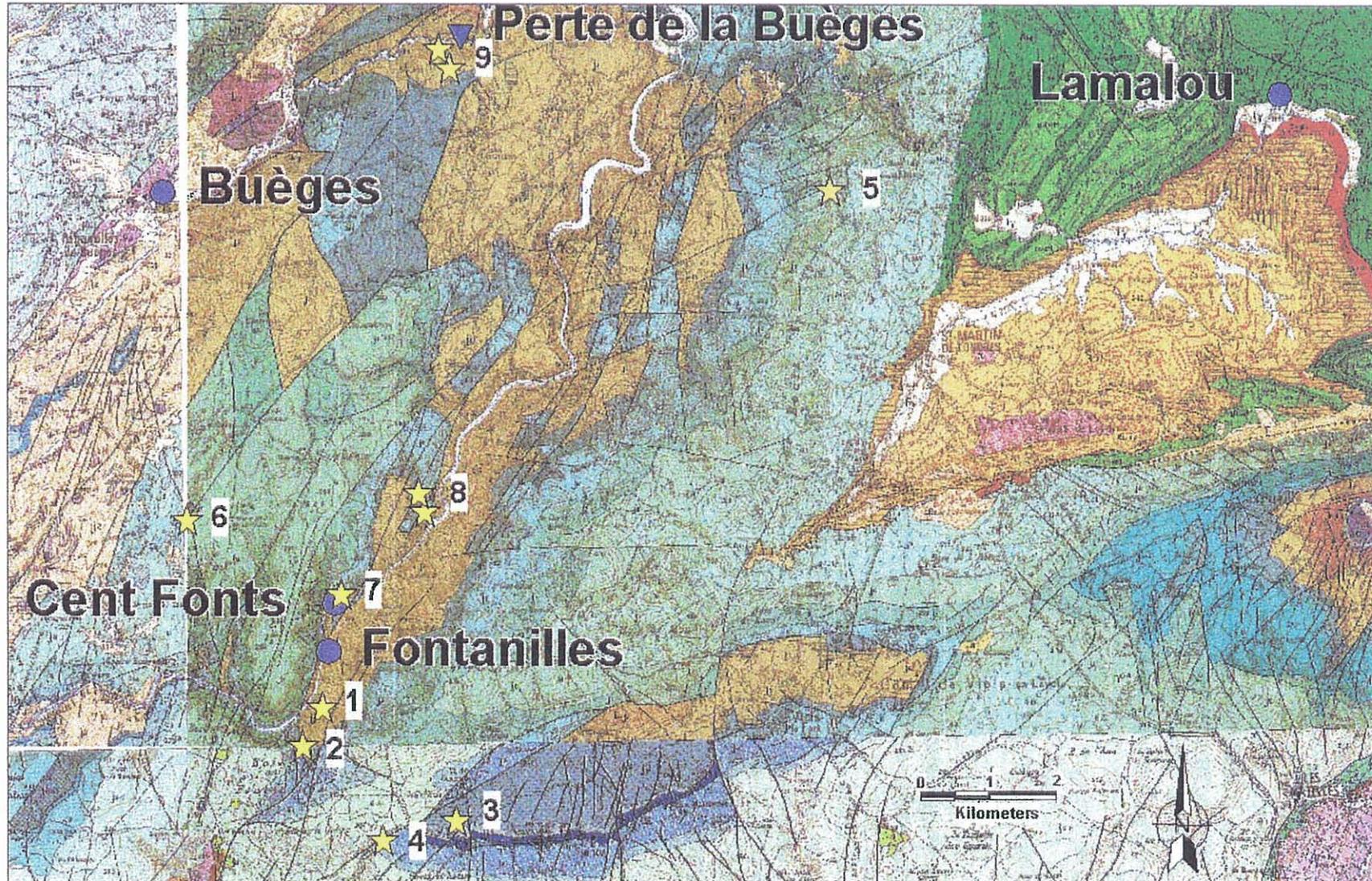


Fig. 23 : Carte de localisation des stations de mesures microstructurales.

Annexe 1

Tableau 1 : tableaux des relevés microstructuraux

Relevés structuraux					type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification					
					sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre					
					remplissage : O = ouvert, F = fermé					
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
1	1	So	80	S 10						
1	2	So	80	S 15						
1	3	D	55	W 75				10	direction de diaclasage majeure	
1	4	F	75	N 80			calcite géodique			
1	5	D	155	SW 60			sable dolomitique		petite faille possible	
1	6	D	155	SW 60			F	3		
1	7	D	0	W 55			sable dolomitique		légèrement sinueuse	
1	8	D ou So	120	S 15			F			
1	9	Fa	160	W 55		I ?				
1	10	So	155	SW 15						
1	11	D	35	SE 60			O	3		
1	12	D	55	90			F	4		
1	13	F	40	NW 75			calcite			
1	14	D	35	90						
1	15	D	25	90			sable dolomitique			
1	16	F	45	NW 75			calcite			
1	17	D	0	W 80			F	8		
1	18	D	40	NW 75			dolomitique	4		
1	19	F	20	E 30			calcite			
1	20	D	75	S 80					20 décale 19	
1	21	D	45	90				3		
1	22	Fa	30	NW 80		N			faille cartographique karstifiée	
1b	23	Fa	165	W 55	50	N			faille cartographique	
1b	24	Fa	170	W 60	65	N			brèche associée	
2	1	So	20	W 35						
2	2	F	130	E 75			calcite		fente de tension rectiligne	
2	3	F	135	E 75				7	fentes de tension en échelon	
2	4	S	70	S 75					semble contemporain de 2 et 3	
2	5	D	60	SE 55			O		postérieure à 2 et 3	
2	6	Fa	30	E 45		N	brèche colmatée à ciment argileux			
2	7	So	60	N 35						
2	8	F	160	90			calcite	5	fente de tension	

Relevés structuraux					type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification						
					sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre						
					remplissage : O = ouvert, F = fermé						
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison	inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
2	41	So	35	W	35	75				décollement banc sur banc	
2	42	F	155	E	60				5	réseau en échelon	
2	43	S	75	S	70				10	associé à 42	
2	44	D	70	S	65			O			
2	45	So	20	W	20				5/m ²		
2	46	Fa	170		90					avec brèche associée	
2	47	Fa	175	W	60		N			avec brèche associée	
3	1	So	125	E	25						
3	2	Fa	0		90					brèche de faille	
3	3	Fa	155	E	75					brèche de faille	
3	4	D	130		90				6	famille de fractures	
3	5	Fa	160	E	70			caisson karstifié et colmaté			
3	6	Fa	130	E	55			caisson karstifié et colmaté			
3	7	D	75		90			O	3		
3	8	D	40		90			O	3		
3	9	Fa	115	S	75					avec brèche associée	
3	10	D	95	N	60				4	associées à 9	
3	11	So	95	S	30						
3	12	Fa	115	N	80			karstifié et colmaté			
3	13	Fa	45	NW	80			karstifié et colmaté			
3	14	Fa	150	W	70			karstifié et colmaté			
3	15	Fa	10	W	60			karstifié et colmaté		largeur du caisson 1 m	
3	16	Fa	30	W	80			karstifié et colmaté		largeur du caisson 30 cm	
3	17	D	40	SW	85			O	10/m ²	famille liée à 16, diaclasage de toute la série	
3	18	D	145	NE	50			O		2e famille de la même série, liée à 16	
3	19	D	170	E	75			karstifié et colmaté		largeur du caisson 30 cm	
3	20	D	120	E	65				10/m ²	liée à 16	
3	21	Fa	150	E	55					petite faille	
3	22	Fa	150	E	75						
3	23	D	90		90						
3	24	Fa	130	E	75		N	karstifié et colmaté		petite faille	
3	25	So	120	S	30					So de toute la partie W de la carrière	

Relevés structuraux						type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification				
						sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre				
						remplissage : O = ouvert, F = fermé				
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
3	26	Fa	55	90			karstifié et colmaté			
3	27	Fa	130	NE 75			karstifié et colmaté			
3	28	Fa	110	NE 70			karstifié et colmaté			
3	29	So	130	SW 20					glissement plan sur plan	
3	30	D	65	90			karstifié et colmaté			
3	31	Fa	140	90						
4	1	So	130	SW 35						
4	2	F	0	E 75					réseau de fentes de tension important	
4	3	D	100	N 60					jeu de fractures, décale 2	
4	4	D	0	E 60			calcaire à ciment argilo-carbonaté		décale 3	
4	5	D	40	90					décale 3, conjuguée avec 4	
4	6	Fa	110	SW 60		N				
4	7	Fa	0	E 45	20	D			décrochement	
4	8	S	0	W 60					parallèle à So (10), lié à 10	
4	9	S	80	N 45				7	7 sur 30 cm, lié à 7	
4	10	So	140	SW 40						
4	11	Fa	0	E 30	15	D				
4	12	So	90	N 45						
4	13	Fa	60	SE 80			karstifié, + ou - colmaté		réseau de failles sinueuses cartographiques	
4	14	Fa	70	90		N	karstifié, + ou - colmaté		réseau de failles sinueuses cartographiques	
4	15	Fa	80	90			karstifié, + ou - colmaté		réseau de failles sinueuses cartographiques	
4	16	pli (axe)	90	N 75	90					
4	17	pli (axe)	70	N 85	65					
4b	18	Fa	70	N 75			caisson + ou - dolomitisé		faille cartographique sinueuse	
4b	19	Fa	95	S 45			caisson dolomitisé		faille cartographique	
4b	20	Fa	85	90						
4b	21	Fa	80	90			karstifié et colmaté			
4b	22	Fa	60	SE 60		S			fait partie de la faille cartographique sinueuse	
4b	23	Fa	50	SE 75	20	S			suite de 22	
4b	24	Fa	40	NW 85	20	S			suite de 22	
4b	25	Fa	20	W 80			karstifié et colmaté		largeur 60 cm	
4b	26	D	20	E 60			calcite		fente de tension ?	

Relevés structuraux								type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification			
								sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre			
								remplissage : O = ouvert, F = fermé			
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison	inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
4b	27	Fa	60	SE	60					sinueuse	
5	1	So	145	E	30						
5	2	D	150	SW	70			enduit ferrugineux peu karstifié	13	dominante de fracturation	
5	3	Fa	150	SW	80	0	S	brèche calcaire zone d'ombre		stries dans la zone de frottement	
5	4	Fa	150	SW	80	65	N (!?)			même accident que 3, mais 2 jeux différents	
5	5	Fa	150	SW	80		S			même accident que 3, mais 2 jeux différents	
5	6	D	50		90			karstifié et colmaté	7		
5	7	So, S	20	SE	10				7		
5	8	D	140	SW	80			O	5		
5	9	D	155	W	75			O	4		
5	10	Fa	160	E	75		N			petite faille, conjuguée de 9	
5	11	Fa	165	W	75						
5	12	F	90	S	85			argilo-carbonaté	9/m ²	fentes de tension nombreuses	
5	13	F	150	W	70				15/m ²	fin réseau de fentes de tension	
5	14	So	110	E	15						
5	15	D	80		90					direction de diaclasage générale du niveau 21	
5	16	So	10	E	15					azimuth 10 ou 140	
5	17	D	75		90					direction omniprésente	
5	18	D	70	N	80			karstifié et colmaté, terra rossa		omniprésent, 18 et 19 forment des polyèdres	
5	19	D	160		90			karstifié et colmaté		omniprésent, 18 et 19 forment des polyèdres	
5	20	Fa	55	N	80	10	D				
5	21	F	70		90			brèches à ciment calcitique	10/m ²	réseau	
5	22	Fa	95		90	15	S				
5	23	Fa	60	N	70	20	D				
5	24	F	155	SW	?			calcite		réseau mineur	
5	25	F	60	N	65					réseau de fente de tension, majeur	
6	1	Fa ? D	145	E	70		?			Fa tournante	dolomies
6	2	Fa	0	E	35			F		Fa courbe	dolomies
6	3	So	135	SW	25						dolomies
6	4	Fa	115	E	80		S			conjuguée de 2	dolomies
6	5	F	0		90			calcite	4	dans extradors du pli pas forcément lié au sigma 1 & 2	dolomies

Relevés structuraux					type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification					
					sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre					
					remplissage : O = ouvert, F = fermé					
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
6	6	F	150	E 75			calcite		dans extrados du pli pas forcément lié au sigma 1 & 2	dolomies
6	7	Fa	35	SE 70		N,D,S	géode liée au jeu S		D décimétrique S centimétrique N jeu centimétrique (= compliquée)	dolomies
6	8	F	165	W 80			fente à calcite		"= le sigma 1 sigma 2 significatif"	dolomies
6	9	F	170	W 75			calcite		"= le sigma 1 sigma 2 significatif"	dolomies
6	10	F	160	90			calcite argile FeOX			dolomies
6	11	So	95	S 10					Plan de cisaillement, banc sur banc, lié à voussure extrados ou intrados	dolomies
6	12	Fa	40	W 85		D	calcite limoniteuse			dolomies
6	13	So	110	S 5		D			cisaillement banc sur banc	dolomies
6	14	F	140	W 85		N	O argile		tendance générale débit réseau	dolomies
6	15	D	35	W 85			O		F de tension	dolomies
6	16	F	165	90			O calcitique		F de tension associée à 16	dolomies
6	17	F	170	E 80			O calcitique		cisaillement lié à extension	dolomies
6	18	So	170	W 10		D			décale les F N-S ?	dolomies
6	19	F	60	W 85			calcitique		F tension	dolomies
6	20	F	180	90			ferrugineux		épaisseur millimétrique	dolomies
6	21	F	60	90			calcitique		décale la F E-W 21	dolomies
6	22	F	165	90			ferrugineux		faille majeure (la 3 ^{ème})	dolomies
6	23	Fa	40	SE 40		N			cisaillement	dolomies
6	24	Fa	95	90		S			cisaillement	dolomies
6	25	Fa	90	90		S			débit moins important que 15	dolomies
6	26	D	160	90			O	5-6	réseau de fractures anastomosées	dolomies
7	1	D	40	SE 75					réseau de fractures conjuguées à 1	dolomies
7	2	D	155	90					en gros le plan de faille	dolomies
7	3	Fa	70	N 80					faille à calcite striée	dolomies
7	4	Fa	90	S 75		?			réseau de fractures conjuguées	dolomies
7	5	D	160	E 65					réseau de fractures conjuguées	dolomies
7	6	D	170	E 75					fentes de tension à calcite ; associées ?	dolomies
7	7	F	50	90			calcite	3		dolomies

Relevés structuraux							type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification			
							sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre			
					remplissage : O = ouvert, F = fermé					
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
7	8	F	20	E 70					réseau fractures à calcite	dolomies
7	9	F	40	E 80					réseau fractures à calcite	dolomies
7	10	D	110	SW 75				45	réseau de fractures, débit général	calcaire
7	11	D	20	E 60				45	réseau de fractures, débit général	calcaire
7	12	So	30	NW 45						calcaire
7	13	F	25	SE 30			calcite		1er réseau fentes tension	calcaire
7	14	F	150	90			calcite		2ème réseau fentes tension	calcaire
7	15	F	110	90			calcite		fente de tension plus fine	calcaire
7	16	F	155	E 80			calcite		fente de tension plus fine	calcaire
7	17	F	165	E 70			calcite		réseau de fractures	calcaire
7	18	D	155	E 70					réseau de fractures	calcaire
7	19	F	130	E 80			calcite		fente à calcite	calcaire
7	20	F	130	SW 80			calcite		géodique à calcite, vides possibles	calcaire
7	21	F	160	E 45			calcite			calcaire
7	22	F	95	90			calcite		dolomies	calcaire
7	23	F	0	90			calcite		dolomies	calcaire
7	24	D	0	90					grosse fracture ouverte	calcaire
8	1	So	5	E 30						calcaire
8	2	F	140	W 75					réseau	calcaire
8	3	F	25	W 45					réseau	calcaire
8	4	D	50	NW 70					débit général	calcaire
8	5	D	90	90					débit général	calcaire
8	6	F	130	SW 65					décalée par 7	calcaire
8	7	D	35	NW 65			O			calcaire
8	8	D	110	S 50			calcite			calcaire
8	9	D	125	SW 65			calcite			calcaire
8	10	F	130	SW 55			calcite			calcaire
8	11	F,D	115	SW 75			calcite, argile calcaire		remplissage polyphasé	calcaire
8	12	So	170	E 50						calcaire
8	12 bis	So	155	E 62						calcaire

Relevés structuraux								type : D = diaclase, F = fente, Fa = faille, S = stylolithe, So = stratification			
								sens : N = normale, I = inverse, D = dextre, S = senestre			
								remplissage : O = ouvert, F = fermé			
n° station	n° mesure	type	azimuth	inclinaison	inclinaison	pitch (°)	sens	remplissage	nb d'objets	remarques 1	remarques 2
8	13	F	0	W	80					réseau	calcaire
8	14	F	130		90					réseau	calcaire
8	15	F	0	W	80			calcite ; pluricentimétrique		plurimétrique grosse fente en relais, sigma 1 sigma 2 pyrénéen (sur le chemin)	calcaire
8	16	D	140	SW	80					grosse fracture	dolomies (mi-chemin entre épingle et Hérault)
8	17	D	20		90			O		réseau de fractures	dolomies (mi-chemin entre épingle et Hérault)
8	18	D	140	W	60			O			dolomies (mi-chemin entre épingle et Hérault)
8	19	So	155	E	15					1er banc calcaire sur dolomies	dolomies
8	20	D	70		90			O		débit	dolomies
8	21	D	10		90					l'autre débit	dolomies
8	22	D	130	SW	70					l'autre débit	dolomies
8	23	D	140	SW	85				4	l'autre débit	dolomies
8	24	F	65		90			calcite	4		dolomies ; sur le chemin
8	25	So	160	E	35						dolomies ; sur le chemin
8	26	D	145		90					débit	dolomies
8	27	D	35	W	75					débit avec calcite	dolomies
8	28	So	20	E	30						
9	1	D	40	SW	60			O		première direction réseau, fractures ; vide	dolomies
9	2	F	0	W	75			calcite		géopétal	dolomies
9	3	D	170	W	80			O		deuxième direction réseau	dolomies
9	4	D	50	NW	80					réseau	dolomies
9	5	So	125	NE	55						dolomies
9	6	So	30	SE	20						dolomies (+gros bancs)
9	7	F	70	N	65			calcite			dolomies (+gros bancs)
9	8	D	165	W	80			F		première direction réseau	dolomies (+gros bancs)
9	9	D	150	E	80			F		deuxième direction	dolomies (+gros bancs)
9	10	D	10	E	80			F		deuxième direction	dolomies (+gros bancs)
9	11	F	165		90			calcite	2		dolomies (+gros bancs)
9	12	So	45	SE	40						dolomies

