

E TUDE STATISTIQUE DES CAVITES KARSTIQUES DE LA REGION MONTPELLIERAINE (Causses méridionaux et Garrigues)

□ Jean-Frédéric BRUN Groupe d'Etudes et de Recherches Spéléologiques et Archéologiques de Montpellier, 7 bis rue de Porto, 34000 MONTPELLIER.

RESUME :

L'exploitation statistique d'un fichier de cavités concernant la région karstique montpelliéraine a été tentée pour étudier les paramètres liés à la répartition et à la spéléométrie des phénomènes karstiques hypogés. Les avens sont déconnectés des réseaux horizontaux mais réutilisent parfois à leur avantage des conduits préexistants qu'ils rajeunissent. Ils sont significativement plus profonds lorsqu'ils sont regroupés, ou présentent un puits parallèle, ou sont caractérisés par un vaste orifice et une patine ancienne. Les zones faillées de la région sont plus riches en avens sans que ceux-ci soient statistiquement plus profonds. Les galeries se répartissent de façon discontinue, par niveaux d'altitude que l'on retrouve avec constance, massif par massif, en tenant compte des vicissitudes du diastrophisme régional. Le remplissage total semble la règle dès que les conduits ont cessé d'être fonctionnels : il est moins complet uniquement dans certains cas de jeunesse ou de rajeunissement hydrologique. Les vieux niveaux de galeries, suspendus au-dessus des aplanissements fini-miocènes, ont des rosaces directionnelles différentes des plus jeunes. Certains faciès calcaires sont associés préférentiellement à un cavernement vertical (ou horizontal) plus intense. Nous terminons la présentation de ces résultats par un essai de synthèse à la lueur de la littérature actuelle sur la région.

SUMMARY :

A statistical study of a speleological file concerning the karstic area of Montpellier was undertaken, aiming to detect some factors statistically linked with cave repartition or speleometry. Potholes are generally disconnected from horizontal networks, but they use sometimes preexisting galleries. They are significantly deeper when grouped, or when presenting parallel shafts, or when being old shaped holes with a big entrance.

Splited zones contain more potholes, yet they are not statistically deeper. Horizontal caves exhibit a discontinuous distribution by altitude levels, which are regularly observed in every sector, when the effect of diastrophism is taken into account. Total filling seems to be the rule as soon as galleries have stopped functioning : utilization or reutilization by actual streams is required for avoiding partially this process. Old levels of caves, above end-Miocen surfaces, exhibit different orientation patterns of galleries than younger ones. Some limestone facies seems to allow a stronger vertical (or horizontal) cave formation. A schematic history of cave formation in this country is proposed as a working hypothesis.

De nombreuses études ont été consacrées au karst des Garrigues montpelliéraines, tant sur le plan de l'hydrogéologie (DUBOIS, 1964 ; PALOC, 1967 ; 1972), que de la géomorphologie (COULET, 1976) ou du recensement statistique des phénomènes karstiques hypogés (DUREPAIRE, 1985). Toute ces approches permettent une avance substantielle de nos connaissances relatives à l'endokarst de cette région. Curieusement, si l'emploi des mathématiques est loin d'être une nouveauté dans le domaine qui nous occupe, le type d'approche que nous proposons ici nous semble encore peu fréquent en spéléologie. Un travail un peu comparable a été consacré au Causse Méjean (THOMAS, 1981), mais de telles approches demeurent assez peu nombreuses. Tout autant que nos hypothèses relatives aux cavités, c'est donc une méthodologie particulière que nous soumettons au jugement et à l'appréciation du lecteur.

1. METHODOLOGIE

1.1 Recueil des données

Les données sont extraites d'un fichier de cavités développé par le Groupe d'Etudes et de Recherches Spéléologiques

et Archéologiques de Montpellier depuis 1969. Pour certains massifs, ce fichier a servi à réaliser des monographies : Massif du Taurac (BRUN, COSTE et TEMPLE, 1983), Causse de Viols-le-Fort-Cazeville (BRUN et al., 1983), Causse d'Aumelas (BRUN et CANDIE, 1982), Causse de Blandas-Montdardier (ROUX, sous presse), Causse de l'Hortus (ROUX, 1969), Causse de la Selle (CHERY et BARRAU, en préparation) etc... Pour d'autres régions, nous avons également utilisé des mises au point d'autres équipes : rive droite du Lamalou (DUBOIS, DUGLERY et LIAUTAUD, 1974), région de la Sellette (GALERA et LIAUTAUD, 1983).

1.2 Calculs statistiques

Les questions que nous avons cherché à résoudre sont de trois types :

- a) recherche d'un "lien" entre deux ou plusieurs paramètres (exemples : la profondeur des avens est-elle liée à la lithologie, au regroupement en ensembles de cavités contiguës, à la hauteur du versant voisin?...). Ce lien statistique ne prouve bien sûr aucunement la causalité, mais peut parfois permettre certaines hypothèses. Nous avons employé pour le rechercher les corrélations linéaires et les analyses factorielles : analyse en composantes principales, analyse factorielle des correspondances (LAGARDE, 1983).
- b) comparaison de deux ou plusieurs groupes. Par exemple : les avens s'ouvrant à proximité d'une faille sont-ils plus profonds que les avens situés à distance de tout accident tectonique recensé? Ce type de problème statistique est couramment rencontré dans les sciences de la vie, et on le résoud à l'aide de tests de comparaison tels que l'analyse de variance (comparaison entre plusieurs échantillons) ou le test paramétrique du "t" de Student (comparaison de deux échantillons). Dans le cas qui nous occupe, ces tests étaient en première approximation inapplicables, car ils présupposent que le caractère étudié suit une répartition normale (courbe de Gauss), ce qui ne semble pas être le cas pour les mesures spéléomé-

triques, dont la distribution est plutôt assimilable à une exponentielle décroissante. La solution la plus rigoureuse nous a semblé résider dans l'emploi de tests non paramétriques (test de Mann-Whitney, test de Kruskal et Wallis) qui permettent de comparer deux ou plusieurs échantillons sans aucun présupposé relatif à leur mode de distribution statistique (SCHWARTZ, 1981 ; JACQUEMIN et ORSETTI).

- c) comparaison de deux répartitions. Par exemple : les grottes contenant un écoulement d'eau sont-elles plus souvent longues de 100 m et davantage que les grottes fossiles? Le test de choix dans ce cas est le test du "Chi deux" (JACQUEMIN et ORSETTI).
- d) dans tous les cas, ces tests permettent de conclure par une phrase du type : "il n'est pas absurde, statistiquement, de penser que tel et tel échantillon différent réellement (ou sont liés, variant proportionnellement l'un de l'autre)". La solidité de cette "affirmation conditionnelle" est quantifiée par une probabilité donnée par les tables. Cette probabilité mesure le degré de vraisemblance de l'hypothèse nulle, c'est-à-dire de l'hypothèse selon laquelle les échantillons ne diffèrent pas ou ne sont pas liés. Nos résultats sont considérés comme statistiquement significatifs lorsque cette probabilité est inférieure à 5% (dans le texte, nous notons, dans ce cas : $p < 0,05$).

Les données rappelées ci-dessus sont très élémentaires, mais mériteraient d'être rappelées pour expliquer nos résultats statistiques. Nous avons testé de nombreuses théories, massif par massif, en utilisant ces méthodes. L'ensemble des résultats de ces calculs occuperait environ 200 pages. Nous n'insisterons ici que sur les résultats significatifs essentiels, utiles au raisonnement.

2. LES AVENS

2.1 Situation du problème

Les avens sont extrêmement nombreux dans la région considérée. Ils correspondent à deux tiers (66,28%) des cavités

recensées. Ce sont des conduits de profil vertical ou subvertical. Dans l'esprit des spéléologues, à la suite de MARTEL (MARTEL, 1921), on y voit volontiers d'anciennes pertes de cours d'eau, dont la déboulisation, au-delà des bouchons d'éboullis, conduirait, le long du "chemin de l'eau", à des galeries. Or, ces avens occupent souvent une position surélevée où aucune rivière n'a coulé depuis le Miocène. De plus, ils sont en général déconnectés de tout réseau de conduit sous-jacent. Dans la région Nimoise, G. FABRE (1980) a fait des constatations semblables et proposé une chronologie schématique pour la formation des avens en deux phases :

- 1) les avens vastes de patine ancienne, qui pourraient dater du Günz ;
- 2) les avens plus étroits et à patine "jeune" qui pourraient dater du Mindel.

La seconde phase, fréquemment, retouche les cavités héritées de la première. Dans les deux cas, ces épisodes de creusement sont contemporains de conditions climatiques particulières liées aux phases froides périglaciaires, et le réchauffement les interrompt. Jusqu'à plus ample informé, ce modèle tout à fait heuristique ne s'oppose pas aux observations de terrain de notre région. Bien plus, il explique pourquoi les avens que nous explorons sont :

- suspendus sur les hauteurs, où ils ont pu drainer les eaux nivales alors que les canyons quaternaires n'étaient pas profondément entaillés ;
- inachevés, se terminant souvent en cul de sac ;
- fréquemment amputés de leur partie haute par l'érosion ultérieure, ce dont témoignent les dépôts stalagmitiques (appelés "massifs de calcite" par les spéléologues) qui les entourent souvent en surface.

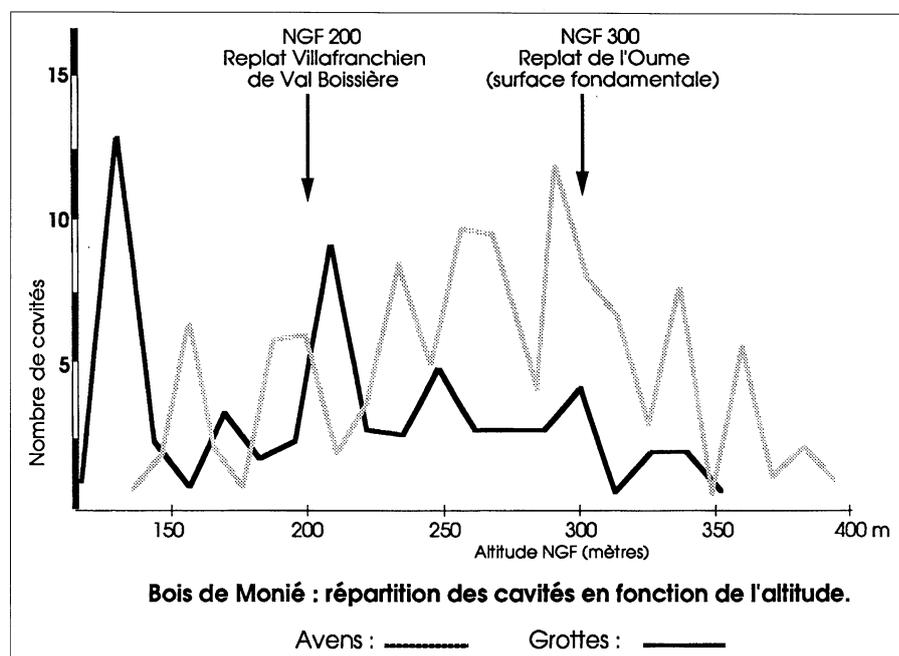
2.2 Dissociation entre cavernement horizontal et cavernement vertical

Sur 1222 cavités (Causse de Viols, Hortus, Pompignan, Aumelas, Taura, Bois de Monié, Ranc de Banès) on dénombre 412 grottes et 810 avens. On note que 18,45% des grottes, contre 5,18% des avens, aboutissent à des conduits horizontaux.

Cependant, il existe un petit nombre d'avens qui recoupent des conduits d'allure horizontale. Leur étude morphologique montre à l'évidence que le conduit horizontal semble avoir préexisté à l'aven, qui a, lui, une patine beaucoup plus "jeune" et réutilise visiblement en le "rajeunissant" ce témoin hérité d'une karstification antérieure. Ces "avens-grottes" sont des cavités intéressantes des Garrigues et des Causse, car leur morphologie complexe pose des problèmes de sagacité au spéléologue qui y recherche un prolongement. La réutilisation de vieux conduits semble associée à une plus grande profondeur. Sur 327 cavités (Causse de Viols et Taurac) 83 recoupent une galerie sous-jacente vraisemblablement préexistante et 244 n'en recoupent aucune. La fréquence des avens dépassant 20 m de dénivellation est doublée (55,4% contre 27,9% $p < 0,001$) dans le premier cas, et celle des avens dépassant 40 m est triplée (34,9% contre 10,7%, $p < 0,001$). On peut supposer que le "point faible" constitué par un conduit fossile localement préexistant a permis à l'aven, au cours de la durée de temps limitée de la phase érosive correspondante, de creuser davantage le massif calcaire, atteignant une plus grande profondeur. Autre interprétation possible (moins satisfaisante) de ce lien entre conduit sous-jacent et profondeur : la probabilité d'atteindre un conduit croît avec la profondeur qu'atteint un aven.

Figure 1 :

Diagramme de répartition des avens et grottes du Bois de Monié en fonction de l'altitude. Les grottes (en traits pleins) dessinent une série de pics discontinus de fréquence suggérant l'existence de "niveaux" dont la signification est discutée dans le texte. Les repères de la surface fondamentale à 300 m et du replat "günzien" de Valboissière à 200 m sont figurés.



Faciès	Longueurs horizontales			Profondeurs totales			Hauteurs de puits	
	n =	≥ 40 m	≥ 100 m	n =	≥ 40 m	≥ 80 m	n =	≥ 20 m
Eocène (e3 - 5c)	8	25,0%	12,5%	3	0,0%	0,0%	12	0,0%
Vilanginien (n1 - b2c)	51	43,1%	25,5%	76	2,6%	0,0%	85	4,7%
Berriasien (n1a)	10	50,0%	30,0%	18	11,1%	0,0%	21	9,5%
Portlandien (J9)	174	28,2%	13,8%	492	12,2%	4,3%	317	29,0%
Kimméridgien supérieur (J8)	148	20,9%	10,1%	78	7,7%	0,0%	152	11,8%
"Séquanien" (J7)	36	16,7%	2,8%	78	21,8%	6,4%	111	12,6%
"Rauracien" (J6)	32	21,9%	21,9%	43	9,3%	0,0%	25	4,0%
Callovo-oxfordien (J3-5)	4	25,0%	0,0%	10	20,0%	0,0%	6	0,0%
Bathonien (J2)	42	40,5%	26,2%	41	19,5%	2,4%	51	7,8%

Tableau 1 : Lithologie et cavernement. Speleometry and lithologic conditions.

MARTEL (1921) notait déjà la rareté des avens qui rejoignent vraiment le niveau des conduits actifs. Il en faisait un argument contre le principe de "jalonnement" de l'abbé Paramelle. L'intensification de l'exploration et de la désobstruction des fonds d'avens a révélé que certains de ceux-ci rejoignent bel et bien des niveaux actuellement noyés (ce qui n'exclut peut-être pas qu'ils aient pu être, autrefois, vadoses !). Ces exceptions ne sont pas ubiquitaires. Mis à part la région des Causses Majeures où l'érosion a été plus intense et où existent des niveaux marneux "perchés" bloquant les rivières souterraines près de la surface (plateau du Guilhaumard), nous retrouvons ces avens au sud des garrigues, là où le niveau phréatique actuel est peu profond (Causse de Viols-le-Fort ; Causse d'Aumelas). Un autre cas particulier d'avens "vivants" est celui où de vastes réseaux de galeries héritées de phases anciennes ont collecté des ruisselets qui ont prolongé leur évolution après l'arrêt des épisodes de cavernement vertical du Quaternaire ancien. Dans tous les cas, il s'agit bien de situations d'exception.

2.3 Dissociation d'ensemble entre l'emplacement des avens et les écoulements superficiels quaternaires.

Les avens sont situés sur les crêtes et les plateaux. La figure 1 illustre ce fait pour le massif du Bois de Monié. Il sont plus fréquents que les grottes au-dessus de 250 m d'altitude et vice-versa (Chi deux $p < 0,001$). Si nous admettons que ces avens datent du Günz et du Mindel (G. FABRE, 1980), ils s'ouvrent donc sur des surfaces que les cours d'eau avaient abandonnées à ces époques, puisque les géomorphologues placent vers 200 m les niveaux plio-villa-

franchiens et vers 300 m la "surface fondamentale" oligo-miocène de E. COULET. Par contre, le méandre tronqué de Valboissière à 200 m d'altitude, supposé villafranchien, et les surfaces situées à son niveau sont pauvres en avens. Ceci est moins net, à vrai dire, sur d'autres massifs tels que le Causse de la Selle.

Les cavités des garrigues que l'orographie actuelle fait fonctionner en "pertes" plus ou moins épisodiques sont réputées prometteuses dans les discussions spéléologiques. Nous en avons répertorié 158 sur 8 massifs (Sellette, Monié, Aumelas, Ranc de Banes, Taurac, Viols, Hortus et Larzac méridional). Au total ces pertes ne donnent que 15 fois sur des conduits développant plus de 500 m. Si l'on compare cette potentialité spéléométrique à celle des grottes fossiles banales, on observe que ces dernières donnent 1,7 fois plus souvent 100 m ($p < 0,05$). Les avens-pertes donnant sur plus de 100 m de conduits (9,49% de l'ensemble des pertes) sont en fait chaque fois des réutilisations de conduits préexistants recoupés par les écoulements actuels. Dans l'ensemble, on peut schématiquement distinguer trois catégories de pertes :

- a) pertes d'allure récente et inachevée : celles-ci semblent peu prometteuses. Le Quaternaire moyen-récent (Riss-Würm) semble avoir peu creusé d'avens et occasionné surtout gélifraction, ravinement et formation de conduits karstiques profonds. L'érosion holocène qui a suivi n'aurait encore occasionné qu'un creusement rudimentaire.
- b) pertes (d'aspect initial variable) recoupant un conduit préexistant qu'elles rajeunissent en le réduisant. Celles-là semblent intéressantes pour la spéléologie.
- c) pertes prenant d'emblée une allure d'aven à patine récente (puits corrodés en éteignoir). Peu fréquentes elles nécessitent souvent de laborieuses désobs-

tructions permettant d'atteindre 50 à 100 m de profondeur (perte du Mas Terrus, Aven Pierre etc...). Ce sont de véritables avens-pertes. Appartiennent-ils à la deuxième phase (supposée mindélienne) de formation des avens, ou à une troisième plus récente, comme le suggère leur situation hydrographique ?

Dans l'ensemble, ces constatations constituent un argument numérique en faveur de la conception actuellement retenue selon laquelle les avens n'auraient pas été des ponors servant de pertes régulières de rivières, au sens ou E.A. MARTEL l'entendait quand il employait le mot pittoresque de "goules d'absorption" (notion qui a encore largement cours parmi les spéléologues de terrain). Nos avens sont-ils des témoignages fossilisés d'une ancienne action érosive cryo-nivale lors des glaciations, comme les gouffres et "puits à neige" alpins et pyrénéens ? La réponse à cette intéressante question est au-delà des possibilités de notre méthodologie. Notons tout de même que, si les talwegs ne montrent aucun lien statistique avec une importance accrue des cavités qui s'y ouvrent, les dolines, au contraire, s'associent visiblement à des avens plus profonds : 56,7% des avens qui s'y ouvrent ou les jouxtent dépassent 20 m, et 30% dépassent 40 m contre respectivement 26,3% ($p < 0,01$) et 40 m dans 21,5% des cas. Les dolines, accumulant la neige, auraient-elles favorisé l'érosion crypto-nivale ? Ou témoignent-elles seulement d'une zone de "point faible" dont l'érosion a profité pour creuser un aven au Quaternaire ancien ?

2.4 Facteurs liés statistiquement à la profondeur des avens

Sur 331 avens (Bois de Montié, Ranc de Banes et Taurac), on note que ces cavités sont rarement solitaires. Dans 81% des cas elles sont groupées en paires (26%), triplets (14,5%) ou groupes de 4 et plus (40,5%),

FACIES DU PORTLANDIEN	LOCALISATION	SPELEOMETRIE											
		Longueurs de grottes				Dénivellées					Puits		
		n	> 20	> 40	> 100	n	> 20	> 40	> 80	> 100	n	> 20	> 40
PENTE EXTERNE	Pied NE de la Séranne N du Causse de Viols	12	75%	42%	17%	20	30%	15%	10%	5%	21	19%	5%
PLATIER EXTERNE	Taurac Falaises N du Pic St Loup Coutach	63	32%	16%	11%	268	18%	9%	3%	1%	43	30%	12%
LEVEE DETRITIQUE	Roc Blanc, Montmal Bois de l'Abric, Suquet Crêtes de la Selle B. de Monié Sud	76	58%	30%	12%	103	45%	21%	7%	3%	187	28%	7%
ARRIERE-RECIF (Plateforme interne)	Séranne (coupette, Bergerie du Mas) Bois de Sauzet Ranc de Banes	23	65%	48%	26%	101	27%	12%	4%	3%	66	33%	5%

Tableau 2 : Spéléométrie et faciès du Portlandien des Garrigues.
Speleometry and reef facies of portlandian limestones in the "Garrigues".

dans un rayon que nous avons fixé pour cette étude à 200 m. Il existe une corrélation entre la profondeur maximale atteinte dans un des avens du groupe et le nombre d'ovens du groupe, dans le Taurac ($r=0,714$, $p<0,01$) et le Ranc de Banes ($r=0,803$, $p<0,01$). L'existence d'un groupe d'ovens témoigne donc du voisinage d'un gouffre profond, et plus ceux-ci sont nombreux plus sa profondeur risque d'être importante. Dans un groupe donné d'ovens, les profondeurs sont corrélées (Taurac : $r=0,494$, $p<0,01$; Ranc de Banes : $r=0,711$, $p<0,01$; Bois de Monié : $r=0,430$, $p<0,01$). Plus un aven d'un groupe est profond, plus ses voisins proches risquent de l'être.

Les avens présentant un puits parallèle (18% des cas sur 489 avens des Causses de Viols, d'Aumelas et du Taurac) semblent être le plus souvent profonds, car ils dépassent -40 m dans 43,2% des cas contre 8,48% des avens exempts de cette particularité morphologique ($p<0,01$). On peut penser que l'existence de puits parallèles témoigne de l'intensité de l'érosion qui a affecté localement une zone calcaire. Un facteur favorisant l'existence de puits parallèles semble être la proximité des failles : sur le Causse de Viols, 33% des avens (sur 236 étudiés) s'ouvrent sur des accidents tectoniques avec rejet recensés par la carte géologique. Or 28% de ces avens sur failles contiennent des puits parallèles, contre 12% des autres, soit une fréquence multipliée par 2,3 ($p<0,01$). Parmi les facteurs propices aux puits parallèles, les zones de tectonique cassante semblent donc à retenir.

Ceci est vraisemblablement expliqué par le fait bien connu qu'une faille n'est en général pas isolée, mais accompagnée par tout un système de diaclases.

Les dimensions de l'entrée de l'aven permettent-elles de se faire une idée de son importance ? Beaucoup de belles découvertes de ces dernières années ont été faites sur désobstruction. Sur le Causse de Viols, 55% des avens dénombrés en 1983 par notre monographie ont été désobstrués à leur orifice (et deux se sont ouverts spontanément lors des précipitations : l'aven du Plan de Montferrand vers 1930 et celui de Maure vers 1976). Dans l'ensemble, le travail considérable que les spéléologues ont réalisé en désobstruction d'entrées semble avoir eu une rentabilité médiocre, puisque 21,8% des avens désobstrués dépassent -20 m et 9,02% dépassent -40 m, contre respectivement 43,1% ($p<0,001$) et 19,3% ($p<0,05$) des avens déjà ouverts (Causse de Viols). Ces derniers sont donc en règle deux fois plus "payants". Sans doute faut-il voir là l'effet de la bipartition des avens en deux phases de creusement. Les gouffres les plus anciens, ayant subi deux étapes érosives successives sont plus profonds que les avens récents dont l'entrée étroite est restée close, et qui s'achèvent sur un conduit préexistant sous-jacent.

L'influence exercée par le voisinage d'un versant est retrouvée sur le massif du Taurac, où la fréquence des avens est triplée dans la zone située entre 200 et 300 m de la pente ($p<0,05$). Sur ce massif la profondeur des avens est corrélée à la hauteur du versant voisin ($r=0,320$, $p<0,05$).

2.5 Conditions structurales et cavernement vertical

Le rôle éventuel des failles dans la formation des avens est malaisé à mettre

en évidence d'une manière statistique. Certes, beaucoup de gouffres importants s'ouvrent à proximité immédiate de failles mentionnées sur la carte géologique : l'abîme de Rabanel (Séranne), l'aven Didier (Aumelas), l'aven Christophe (Causse de la Selle) etc... Cependant, statistiquement, les avens s'ouvrant sur des failles ne sont pas plus souvent profonds que les autres. Les zones faillées, comme la zone anticlinale du Causse de Viols-le-Fort-Cazevieille, ont à l'évidence une densité accrue en cavités, mais ces cavités ne sont pas, dans l'ensemble, plus importantes. On peut penser que certaines failles sont effectivement des points faibles favorisant le creusement des cavités verticales : ce serait notamment le cas des accidents subméridiens rattachés à la distension oligocène. En revanche, les cassures ayant fonctionné en compression, notamment les accidents EW fini-crétacés, ne semblent pas avoir cette particularité. Une limitation de cette approche du rôle des failles provient de l'emploi de la seule carte géologique, qui ne mentionne que les cassures avec rejet. Comme nous le fait très justement remarquer J-N SALOMON, ce point sera à réétudier de plus près avec des cartes de fracturation plus détaillées.

Nous nous sommes intéressés aux rosaces directionnelles des cassures aux dépens desquelles se développent les avens. Sur 219 cavités verticales étudiées dans l'ensemble des garrigues, 115 sont vastes et de patine ancienne, rattachables a priori à l'épisode "ancien" de creusement, et 104 sont d'allure jeune, correspondant sans doute à l'épisode "récent". Nous avons observé que les premiers utilisent plus souvent des cassures N à NW (35,6% contre 21,15%, $p<0,05$), les avens "récents" préférant des cassures N à NE.

Photo 1 :

Lapié typique dans le Portlandien près de Viols en Laval. Statistiquement, nous ne retrouvons aucun lien précis entre ces formes d'érosion récente appartenant à l'épikarst et les cavités souterraines, tant sur le plan de la répartition que de la spéléométrie. Ceci va à l'encontre d'un concept assez répandu chez les spéléologues locaux.



Nous n'avons pas d'explication pour cette différence, au demeurant modeste.

Certains faciès calcaires semblent plus propices au développement des avens. Avec une certaine constance, malgré des conditions tectoniques ou topographiques très diverses, on retrouve, massif par massif, une prééminence des calcaires du Jurassique supérieur : Kimméridgien et Portlandien (tableau 1). Les puits y dépassent 20 m dans respectivement 12,17% et 29,02% des cas, c'est-à-dire dans l'ensemble 3,6 fois plus souvent que dans tous les autres faciès des garrigues, où seulement

5,71% des verticales excèdent cette profondeur ($p < 0,01$). Le Kimméridgien moyen ("Séquanien") donne 2 fois plus souvent des avens de plus de 40 m que tous les autres faciès ($p < 0,01$), y compris l'ensemble Kimméridgien supérieur-Portlandien ($p < 0,05$). A l'intérieur du Portlandien (tableau 2), ce sont les faciès de récif-barrière qui sont les plus riches en gouffres : comparés aux autres faciès du même étage, ces calcaires donnent 44,7% d'avens excédant 20 m (contre 21,2, $p < 0,001$) et 21,4% d'avens de plus de 40 m (contre 9,8, $p < 0,01$).

3. LE CAVERNEMENT HORIZONTAL

Nous avons vu que les avens et les grottes formaient des ensembles dissociés, même si l'érosion quaternaire, en taraudant les avens, a souvent rajeuni et réutilisé de très anciennes galeries préexistantes.

3.1 Répartition des conduits horizontaux par niveaux d'altitude.

E. COULET (1976) et G. FABRE (1980), dans leurs ouvrages, mentionnent le caractère visiblement étagé de certains ensembles de grottes.

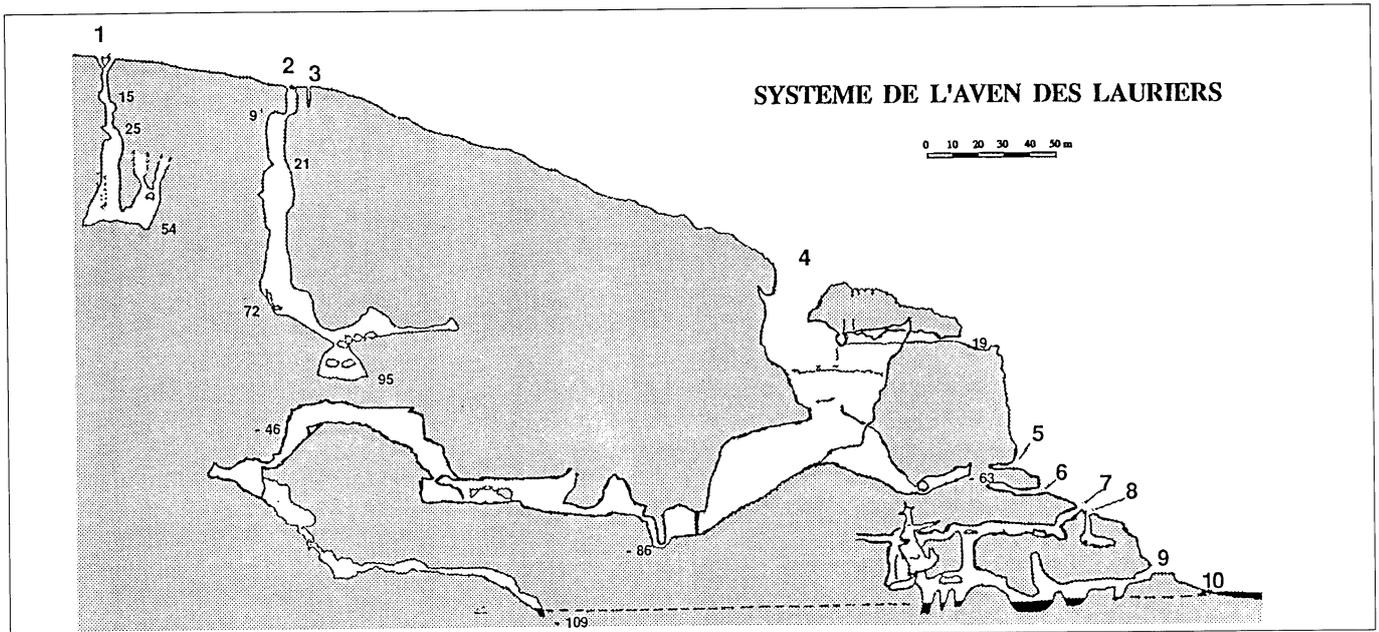
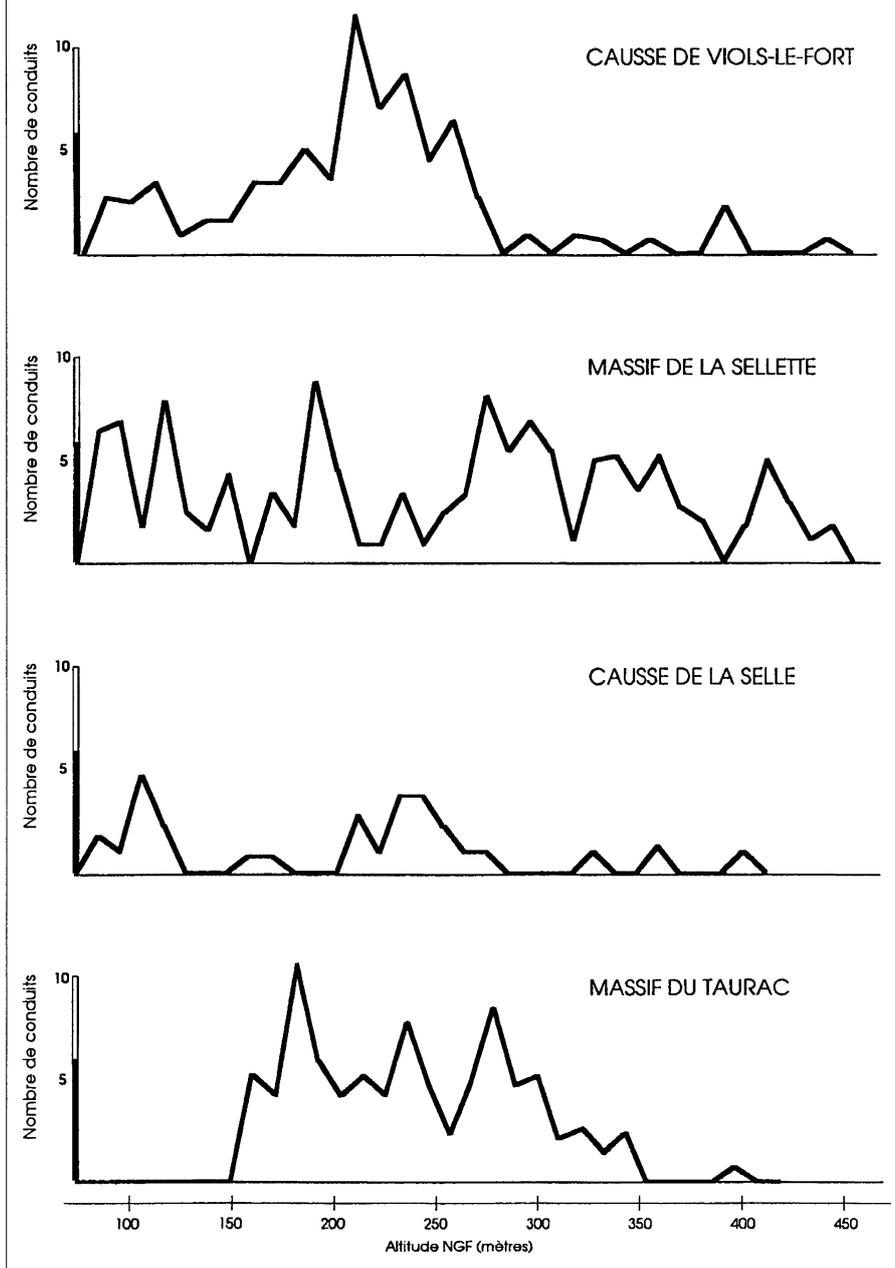


Figure 2 : Le système de l'aven des Lauriers (figuré en coupe développée) illustre la superposition de systèmes étagés de galeries dans les gorges de l'Hérault (d'après BRUN, COSTE et TEMPLE, 1983). Légende des indications chiffrées : 1) aven de la Charbonnière ; 2) aven n°3 du Lapiaz ; 3) aven des Lauriers ; 4) grotte des Lauriers ; 5) grotte n° 2 de Laroque ; 6) grotte du Lion ; 7) grotte du Maire ; 8) aven du Maire ; 9) grotte de la Route ; 10) exsurgence impénétrable des Sourcettes.

Répartition des conduits en fonction de l'altitude dans quatre massifs des Garrigues.



Dans le Taurac, on retrouve des exemples frappants de cette notion, comme le système de l'aven des Lauriers (Figure 2) ou celui du synclinal du Moulin Neuf qui a servi de modèle à MARTEL pour formuler sa loi de l'enfouissement progressif, par crans, des cours d'eau souterrains. On peut toujours, épistémologiquement, critiquer le choix d'exemples "démonstratifs". L'exploitation statistique des inventaires permet cependant de confirmer ces intuitions. Secteur par secteur, on peut établir des diagrammes de répartition des conduits en fonction de l'altitude. Lorsque des contraintes structurales particulières (niveaux imperméables suspendus) ne compliquent pas la situation, ces diagrammes sont démonstratifs (Figure 1 et 3).

La distribution des galeries horizontales dans la masse calcaire n'a rien d'aléatoire et dessine une série de pics.

- Les pics les plus bas, à moins de 30 m au-dessus du niveau de base actuel, sont à rapprocher des niveaux que G. FABRE attribue au Riss et au Würmholocène dans les canyons gardois. Ce sont les réseaux récents, actifs ou semi-actifs. On y retrouve les conduits les plus longs, car le remplissage ne les a pas encore tronçonnés.
- au niveau des aplanissements attribués au Villafranchien (vers 200 m d'altitude dans les moyennes gorges de l'Hérault) on trouve une série de vastes grottes que le remplissage rend souvent peu profondes.

Figure 3 : Fréquence de répartition des galeries souterraines dans les massifs suivants : A) Viols-le-Fort-Cazeville ; B) la Sellette ; C) le Causse de la Selle ; D) le Taurac. Des pics se dessinent, associés aux crans quaternaires d'enfouissement des cours d'eau, mais aussi aux crans quaternaires d'enfouissement des cours d'eau, aux hauts replats villafranchiens et aux surfaces miocènes. Noter sur le diagramme B (massif de la Sellette) où la surface fondamentale est à NGF 300, l'existence de deux niveaux bien caractérisés surmontant cette dernière.

Par analogie avec les déductions de G. FABRE pour les régions voisines de l'Uzège, on pourrait les attribuer au Quaternaire ancien (Günz). Il est tentant d'y voir d'anciens lits souterrains de l'Hérault villafranchien, à l'époque où il serpentait le long de ses aplanissements de Valboissière, du Frouzet et du Causse de la Selle.

- un autre niveau de grottes, tronçons imposants de galeries fortement remaniées par le remplissage et l'érosion se retrouve juste au-dessus de la surface fondamentale (vers 300m d'altitude dans le secteur de St Martin de Londres) que E. COULET attribue à un long façonnement oligo-miocène. On pourrait envisager de les rattacher au début de démantèlement de cette surface lors de la "crise" glyptogénique finimiocène, comme le fait, là aussi, G. FABRE pour certaines galeries de haut niveau de la région d'Uzès.
- plus originale nous paraît l'observation de belles galeries syngénétiques (ou paragénétiques), spectaculaires, d'allure horizontale, que l'érosion superficielle et le recouvrement par les avens révèle au-dessus du niveau de la surface oligo-miocène. Celles-ci sont très bien mises en évidence sur la Sellette, vers NGF 320-400 et 400-460, ainsi que sur la Séranne (avens du Lac Rouge). Témoignent-elles d'épisodes archaïques de karstification miocènes synchrones de la mise en place de la surface fondamentale ? En tout état de cause, elles ne sauraient être postérieures aux surfaces d'érosion au-dessus desquelles elles sont suspendues. Nous ne pensons pas, vu leur morphologie, qu'on puisse les attribuer à l'érosion "cutanée" en phase périglaciaire.
- à part, il ne faut pas omettre de citer les systèmes vauclusiens qui semblent parfois correspondre à de vieux conduits très évolués dont l'interprétation est complexe, et qui se développent sous les niveaux quaternaires récents cités

plus haut. Le critère altimétrique qui permet de présumer l'antériorité d'un conduit par rapport à une surface d'érosion sous-jacente est pris en défaut pour ces cavités.

- f) les témoins de très vieilles karstifications oligocènes ou crétaées (bauxites), se retrouvent ici et là. Mais il semble que l'érosion récente n'a guère su les rajeunir. Leur participation éventuelle à la genèse de grottes actuellement explorables reste à démontrer.

3.2 Facteurs associés au développement horizontal des grottes

La longueur des conduits explorables de 669 grottes que nous avons étudiées se répartit selon une exponentielle décroissante (Figure 4). Les grottes sont d'autant plus nombreuses qu'elles sont courtes. Dans l'ensemble, 80,4% des cavités horizontales de notre secteur ont un développement inférieur à 100 m. Seulement 5,7% mesurent 500 m ou davantage.

Il existe des sous-groupes de conduits horizontaux plus "rentables" :

- les "aven-grottes", c'est-à-dire les galeries recoupées en bas de puits. Ils dépassent 500 m dans 13,3% des cas, et 100 m dans 35,7% des cas, soit 1,8 fois plus souvent, $p < 0,001$. L'aven de la Leicasse (massif de la Seranne) représente un exemple frappant de cette notion. Une érosion vigoureuse, dans un aven de 200 m de profondeur, a recoupé un très vieux réseau fini-miocène à pliocène et l'a débarrassé entièrement de son remplissage sur plusieurs kilomètres, formant un ensemble de 12000 m de galeries pour 331 m de dénivellé.
- les réseaux actifs, où la circulation de l'eau s'oppose à l'obstruction des conduits. Parmi eux, 33,7% dépassent les 500 m (contre 0,7% des réseaux fossiles, $p < 0,001$) et 35,8% dépassent les 100 m (contre 16,2% des cavités "fossiles", $p < 0,001$).

Ces données donnent à penser qu'un conduit de grotte, dès qu'il cesse d'être hydrologiquement actif, s'obstrue en moins de 500000 ans de manière presque totale. Il ne sera alors visitable que par tronçons, dans les segments que l'érosion superficielle ramène au voisinage d'un plateau ou d'un versant, ou dans ceux que réutiliseront un aven ou un ruisseau souterrain "opportuniste". Il est en particulier frappant de noter que, dans notre étude, les belles cavernes fossiles des versants des canyons s'avèrent toutes bouchées après quelques dizaines de mètres, dès qu'elles s'enfoncent sous le massif. Seul un trajet parallèle au versant semble compatible avec une longueur plus importante. (Un cas particulier est constitué par les vastes réseaux de galeries fossiles

"aveugles" fortuitement recoupées par un aven, voire une excavation artificielle, et qui peuvent être importants).

3.3 Influences structurales statistiquement associées au cavernement horizontal

Les rosaces directionnelles des grottes diffèrent selon leur niveau, c'est-à-dire leur antiquité présumée. Ceci est tout particulièrement net sur la Sellette. Comme nous l'avons figuré sur la figure 4, les conduits horizontaux explorés au-dessus de la cote NGF 300, c'est-à-dire l'altitude approximative de la "Surface Fondamentale" oligo-miocène de E. COULET dans ce secteur, utilisent 2,7 fois plus souvent des diaclases E (41,6% contre 15,74% de l'ensemble des axes retrouvés, $p < 0,001$). Sur 401 grottes des massifs du Taurac, de la Sellette, et de Viols-le-Fort, la même tendance est retrouvée. Les niveaux supposés "plio-quatérnaires" utilisent davantage de direction N à NE (48,4% contre 35,8%, $p < 0,05$). Les niveaux situés au-dessus sont plutôt à dominance E. Sur la Seranne et le

Larzac méridional, on a également l'impression que les directions E sont caractéristiques des vieux réseaux horizontaux qui doublent souterrainement les antiques surfaces néogènes, tandis que les axes SN correspondent à l'érosion quaternaire (réseaux verticaux, grottes actives de fond de vallée). Entre les époques où le creusement E-W semble avoir dominé et les époques où le creusement N-S a primé, se placent au moins deux crises glyptogéniques (Fini-miocène et Villafranchien) qui ont pu modifier l'éventail des directions de cassures disponibles pour la karstification. Néanmoins, l'explication de notre constatation n'est pas claire.

Comme nous l'avons vu à propos des avens, la lithologie semble aussi avoir des liens avec la karstification horizontale (tableau 1). Sur 498 conduits horizontaux, c'est le Néocomien (Valanginien supérieur-Berriasien) qui semble le plus propice à ce phénomène. Les grottes y dépassent 1,9 fois plus souvent les 40 m ($p < 0,001$) et 2,2 fois plus souvent les 100 m ($p < 0,01$) que dans les calcaires du Malm.

Figure 4 :
Rosaces schématisant l'importance relative des différentes directions de galeries (axées sur des diaclases) sur le massif de la Sellette. Les conduits situés au-dessus de la surface fondamentale (NGF 300) utilisent 2,7 fois moins souvent des directions E que ceux des niveaux sus-jacents.

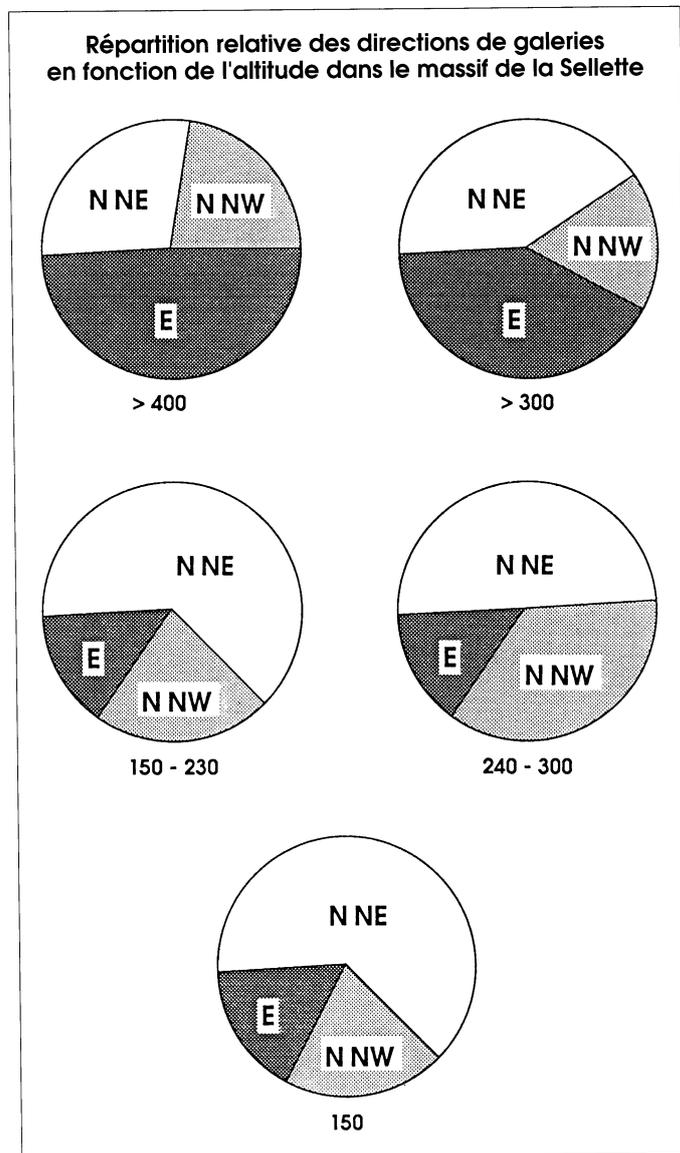




Photo 2 :

Les ravins quaternaires (ici la Dérièdière, sud du Causse de Viols-le-Fort) entaillent profondément les plateaux formés par les vieilles surfaces.

E. COULET (1976) attribue leur formation à une érosion fluvio-karstique en phase froide, en présence d'un pergélisol ; en faveur de ce concept, les conduits préexistants que ces ravins tronçonnent fréquemment sans paraître subir leur influence.

Toutefois, le Néocomien est localisé aux causses de l'Hortus et de Pompignan, zones assez originales, et il est difficile de tirer des conclusions.

Dans les calcaires jurassiques, ce sont le Bathonien et le Kimméridgien inférieur ("Rauracien") qui semblent les plus propices aux creusements horizontaux. Ce dernier étage surmonte en général les formations marno-calcaires ou glauconieuses du Callovo-Oxfordien qui, visiblement, tendent à créer des circulations d'eau suspendues (résurgences de la vallée de la Vis, exsurgence Gaëtan sur le Causse de la Selle, Event de Valliguières dans le Coutach, etc...).

4. CONCLUSIONS

En résumé, notre approche statistique des cavités souterraines de la région de Montpellier permet de dégager certaines données qui s'accordent avec les observations déjà formulées par certains karstologues comme E. COULET ou G. FABRE. D'autres observations sont plus surprenantes et méritent sans doute d'être examinées avec circonspection. A l'évidence, les mathématiques apportent une certaine rigueur dans le raisonnement, en soumettant les hypothèses à une vérification

numérique : elles n'en présentent pas moins d'indiscutables causes d'erreur.

Le tableau qui se dégage à l'issue de cette fastidieuse série de calculs nous montre une région karstique façonnée par une histoire complexe, en plusieurs phases.

a) les karstifications antérieures au Néogène ne semblent pas avoir laissé de cavernes explorables, sauf lorsque l'exploitation minière les a vidées artificiellement de leur remplissage.

b) la haute surface mise en place à l'Oligocène nous est connue par une série de crêtes et de hauts plateaux. Son démantèlement (Oligocène-Miocène) semble avoir laissé de très vieux vestiges de galeries suspendues, où les directions E-W sont préférentiellement représentées.

La "Surface Fondamentale" se met alors progressivement en place.

c) la crise messinienne (fini-miocène) pourrait expliquer le niveau d'imposantes galeries retrouvées juste au-dessous de cette dernière surface : l'abaissement général du niveau des circulations à l'occasion du début de creusement des ravins, aurait favorisé le creusement de lits de rivières souterraines.

e) au Villafranchien, l'aire anticlinoriale de la Buèges, avec la Seranne et le

Larzac, se retrouvent en position surélevée (de même que les garrigues, à un moindre degré). L'Hérault va façonner une série d'aplanissements partiels (Valboissière, Frouzet, Merle) doublés eux aussi de conduits souterrains horizontaux, qui se combleront et se fossiliseront rapidement.

f) le Quaternaire ancien et moyen occasionne deux périodes successives, inachevées, de creusement d'avernes en ambiance froide. Ces phases érosives rajeunissent certaines galeries héritées des épisodes antérieurs. A ce stade l'essentiel des cavités fossiles des plateaux serait donc en place.

g) le Quaternaire récent (Risset Würm) approfondit notablement les vallées. Une érosion fluvio-karstique entaille profondément les massifs sans former de cavernes, mais en tronquant parfois d'anciens conduits néogènes ou villafranchiens que l'on retrouve de part et d'autre de ces ravins. Deux autres niveaux de grottes (anciennes résurgences ou cours latéraux des cours d'eau) se forment au fond des vallées : ce sont les belles grottes semi-actives actuellement explorables, déjà vieillissantes. La gélifraction intense forme les "baumes" et abris sous roche, ainsi que les éboulis omniprésents.

h) au cours de l'Holocène, d'importants remplissages se forment dans les conduits au-dessus des dépôts würmiens primitifs. Les archéologues en ont mesuré l'ampleur. De nouveaux écoulements karstiques tendent à supplanter les réseaux würmiens, mais les conduits qui en résultent sont peu évolués, rarement explorables. Notamment les pertes temporaires situées sur les plateaux.

REMERCIEMENTS

L'essentiel de la partie mathématique de ce travail a été réalisé au cours d'une année sabbatique de l'auteur dans le département de la Martinique en 1984. La collaboration de tous les membres du GERSAM a été indispensable au recueil préalable des données. J-M COLOMINA et J. CHERY ont joué un rôle actif dans l'élaboration de cette étude.

Je remercie tout particulièrement H. PALOC pour l'abondante documentation qu'il m'a communiquée, ainsi que M. LAURES et E. COULET dont les ouvrages, aimablement offerts, m'ont été précieux.

Je tiens à remercier enfin J-N SALOMON pour avoir soigneusement revu le texte de ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- BRUN JF. -1968 - "Etude statistique des paramètres morphologiques et géomorphologiques liés à la spéléométrie dans les karsts des garrigues", Comité Départemental de Spéléologie de l'Hérault, Bull. n° 8, pp 12-14.
- BRUN JF. et CANDIE C. - 1982 - "Le massif karstique d'Aumelas (garrigues montpelliéraines, Hérault)", Spélé'Oc 20, 1982, pp. 17-23.
- BRUN JF., COSTE Th. et TEMPLE JR. - 1983 - "Inventaire spéléologique du massif du Taurac(Hérault)", GERSAM.
- BRUN JF., PALOC JP., MICHAVILA JC. - 1986 - "Les massifs karstiques de la région de Montpellier", Spelunca n° 22, pp.29-33.
- BRUN JF. et al. - 1983 - "Inventaire spéléologique du Causse de Viols le Fort-Cazevielle", GERSAM, 112 p.
- CASTERET N. - 1970 - "Ancienneté des cavernes", in : "Secrets et Merveilles du Monde souterrain", Librairie Académique Perrin, Paris.
- CHERY J. et al. - 1985 - "L'aven de la Leicasse, massif de la Séranne, Hérault", Spelunca 19, n° pp.18-20.
- COULET E. -1969- "Caractères et problèmes du karst languedocien", Etudes et travaux de "Méditerranée" n° 7, pp.15-35.
- COULET E. - 1976 - "Morphologie des plaines et garrigues du Languedoc méditerranéen", Champion, Paris (3 t., 2042 p).
- DUBOIS P. - 1964 - "Les circulations souterraines dans les calcaires de la région de Montpellier", Bull. BRGM, n°2, pp. 1-31
- DUBOIS P. - 1969 - "Sur la morphologie et l'évolution souterraine de la région calcaire - Nord-montpelliéraine", Etudes et Travaux de "Méditerranée" n°7, pp. 37-50.
- DUBOIS P., DUGLERY Cl et LIAUTAUD JP.- 1974- "Esquisse karstologique du Bois de Mounié", Bull. Féd. Spéléo. Hérault, 4, pp. 97-116.
- DUREPAIRE P. - 1985 - "Inventaire et étude géologique, hydrologique et géomorphologique détaillées des cavités naturelles du bassin d'alimentation de la source du Lez (Hérault)", Mém. Centre d'Etudes et de Recherches Géologiques et Hydrologiques, 25 (2 tomes).
- FABRE G. - 1980 - "Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques" Mém. AFK n°2, pp. (446 p).
- GALERA JL. et LIAUTAUD JP. - 1983 - "Inventaire spéléologique des cavités de la montagne de la Sellette", Explokarst n°1, pp. 45-269.
- GEZE B. - 1979- " Guide géologique régional : Languedoc méditerranéen, Montagne Noire", Masson, Paris.
- JACQUEMIN JL., ORSETTI A.- 1980- "Guide pratique et réflexions sur le choix et l'utilisation des tests statistiques pour la comparaison de deux petits échantillons" Servier (Paris).
- JENNINGS J.N. - 1985 - " Karst geomorphology", Basil Blackwell (Oxford and New-York).
- LAGARDE J. de - 1983 - "Initiation à l'analyse des données" Dunod (Paris).
- MARTEL E.-A. - 1921 - " Nouveau traité des eaux souterraines", Doin, Paris.
- PALOC H. - 1967 -"Carte hydrogéologique de la France. Région karstique Nord-Montpelliéraine" Notice explicative. Mém. BRGM, 50, 229 p.
- PALOC H. - 1972 - "Carte hydrogéologique des Grands Causses", Notice explicative. CERGA-BRGM, 82 p.
- ROUX R. - 1969 - "Spéléologie de l'Hortus", GERSAM.
- ROUX R. - 1988 - "Inventaire spéléologique du Causse de Blandas Montardier", GERSAM (sous presse).
- SCHWARTZ D. - 1981 - "Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes", Flammarion, Paris.
- THOMAS C. et THOMAS C. - 1981 - "Aperçu sur la spéléogénèse du Causse Méjean", in "Grands Causses", Annales des 6e et 7e congrès, pp. 29-57.