



HAL
open science

**Les remplissages détritiques
endokarstiques. Contribution méthodologique à la lecture
des mémoires paléogéographiques et
environnementales. Application aux systèmes karstiques
de Choranche (Vercors) et d'Orgnac (Bas-Vivarais).**

Anne-Sophie Perroux

► **To cite this version:**

Anne-Sophie Perroux. Les remplissages détritiques endokarstiques. Contribution méthodologique à la lecture des mémoires paléogéographiques et environnementales. Application aux systèmes karstiques de Choranche (Vercors) et d'Orgnac (Bas-Vivarais).. Minéralogie. Université de Savoie, 2005. Français. NNT: . tel-00011125v2

HAL Id: tel-00011125

<https://theses.hal.science/tel-00011125v2>

Submitted on 29 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

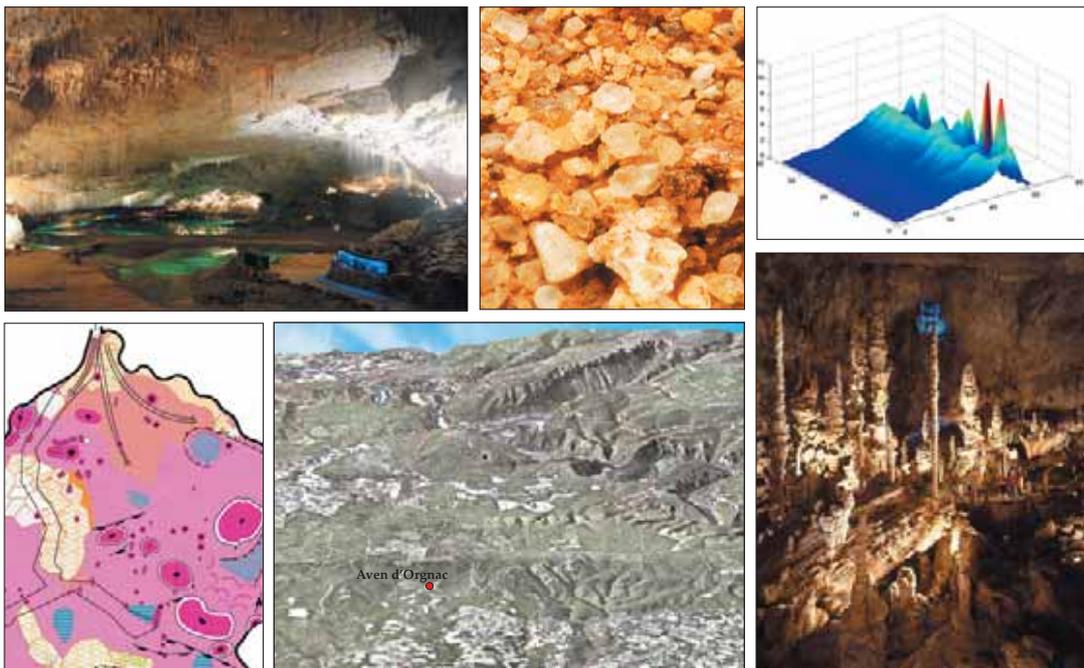
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les remplissages détritiques endokarstiques.
Contribution méthodologique à la lecture des mémoires
paléogéographiques et environnementales.

Application aux systèmes karstiques de Choranche (Vercors)
et d'Orgnac (Bas-Vivarais).

Thèse de Doctorat de Géographie
soutenue publiquement le 30 septembre 2005

Anne-Sophie PERROUX



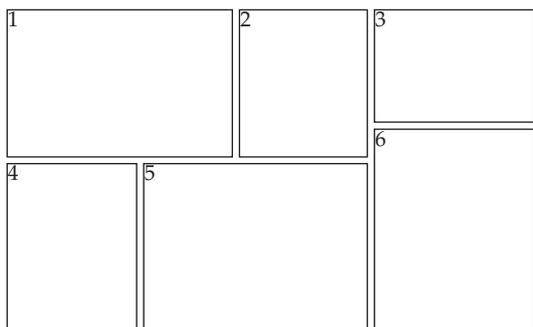
Université de Savoie
Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne

Composition du Jury :

Richard MAIRE - Université de Bordeaux
Yves QUINIF - Faculté Polytechnique de Mons
Catherine FERRIER - Institut de Préhistoire et de Géologie du Quaternaire
Jean-Jacques DELANNOY - Université de Savoie
Marc DESMET - Université de Savoie

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Directeur
Co-directeur

Illustrations de couverture :



1. Vue d'ensemble de la zone d'entrée des Grottes de Choranche - Vercors (Cliché Grottes de Choranche/Edy CP).
2. Vue à la loupe binoculaire d'un niveau sableux des sédiments du lac de la Cathédrale à Choranche (cliché A.S. Perroux).
3. Visualisation 3D de l'évolution granulométrique d'une carotte du lac de la Cathédrale à Choranche (réalisation Y. Perrette/A.S. Perroux).
4. Extrait de la cartographie morphologique de la Salle Plane de l'Aven d'Orgnac - Ardèche (réalisation B. Sadier).
5. Visualisation 3D du secteur d'Orgnac et des gorges de l'Ardèche (réalisation E. Ployon).
6. Vue d'ensemble de la salle d'entrée de l'Aven d'Orgnac (cliché Aven d'Orgnac/J.M. André).

Les remplissages détritiques endokarstiques.
Contribution méthodologique à la lecture des mémoires
paléogéographiques et environnementales.

Application aux systèmes karstiques de Choranche (Vercors)
et d'Orgnac (Bas-Vivarais).

Thèse de Doctorat de Géographie
soutenue publiquement le 30 septembre 2005

Anne-Sophie PERROUX

Université de Savoie
Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne

Composition du Jury :

Richard MAIRE - Université de Bordeaux
Yves QUINIF - Faculté Polytechnique de Mons
Catherine FERRIER - Institut de Préhistoire et de Géologie du Quaternaire
Jean-Jacques DELANNOY - Université de Savoie
Marc DESMET - Université de Savoie

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Directeur
Co-directeur

REMERCIEMENTS

A l'issue de ces années de thèse, je voudrais remercier plusieurs personnes, ayant contribué à divers niveaux à ce travail.

Je tiens tout d'abord à saluer Richard Maire et Yves Quinif, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury. L'enthousiasme, et les chaleureux encouragements qu'ils m'ont tous deux témoignés durant ces derniers mois m'ont été d'un grand réconfort. Je souhaite aussi souligner leur patience et leurs efforts de disponibilité. Qu'ils soient ici remerciés pour ce soutien sans faille.

J'aimerais aussi remercier Catherine Ferrier, qui a également accepté avec enthousiasme de participer au jury. Au cours de quelques missions de terrain, sur le site exceptionnel de la grotte Chauvet, j'ai pu profiter de ses compétences et apprendre beaucoup, tant sur la sédimentologie que sur la cavité elle-même, toujours dans un climat de bonne humeur. Son soutien, dans la « dernière ligne droite », a été très précieux.

Merci aussi à Marc Desmet, co-directeur de ce travail, qui a eu la lourde tâche de m'initier aux méthodes et outils de la sédimentologie. J'ai eu plaisir à travailler avec lui, et je lui suis particulièrement reconnaissante pour les compromis consentis en ce qui concerne la rédaction du manuscrit, qu'il aurait souhaité moins « géographique » ou même « littéraire »... Question de discipline...

Enfin, mes remerciements vont à Jean-Jacques Delannoy, directeur de cette thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée en me donnant ce travail. Le regard éclairé qu'il porte sur le milieu karstique m'a guidé dans mes recherches et dans mon propre positionnement. Les discussions que nous avons eues ont toujours été une grande source de réflexion pour moi. Je lui témoigne ici ma gratitude pour tous les enseignements que je retire de ce parcours.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration et la confiance des partenaires extérieurs. Laurent Garnier et les guides du site touristique des Grottes de Choranche nous ont toujours accueillis avec le sourire, n'hésitant pas à mettre la main à la pâte (et les pieds dans l'eau...) pour la campagne d'échantillonnage notamment. J'ai aussi eu le privilège de travailler avec tous les membres de l'équipe Chauvet, de qui j'ai beaucoup appris dans un cadre vraiment exceptionnel, aussi bien humain que naturel. Le site de l'aven d'Orgnac a été également un terrain d'étude très agréable, l'accueil de Joël Ughetto, Françoise Prud'homme, Lydia Gamberi et Philippe Barth a toujours été très chaleureux. Le concours de Stéphane Tocino, sous terre, était également très précieux. Parfois un peu inquiet sur la quantité de « trous » que nous étions susceptibles de faire dans cette grotte, il n'a jamais perdu son humour ni sa bonne humeur. Que toutes ces personnes soient ici remerciées pour leur aide et leurs qualités humaines.

Accueillie au LGUS en 1998, devenu depuis le laboratoire EDYTEM, je voudrais ici saluer tous les enseignants puis les collègues que j'ai côtoyés dans ces murs. L'équipe, qui n'a cessée de s'étendre, a su rendre le quotidien agréable, maintenant toujours une ambiance à la fois studieuse et légère. J'ai eu plaisir à travailler avec chacun d'entre eux, tant sur les enseignements qui m'ont été confiés durant la thèse, que sur la recherche. Je voudrais témoigner ma reconnaissance à chacun, pour tout ce qu'ils

m'ont apporté dans un climat de travail que beaucoup peuvent nous envier. Au sein du laboratoire, des collaborations plus étroites se sont établies au fil de mes travaux. A ce titre, je voudrais remercier tout particulièrement Yves Perrette et Stéphane Jaillet, pour leur aide conséquente sur le terrain comme devant l'ordinateur. Ce travail leur doit beaucoup. Je voudrais aussi faire un clin d'œil amical à mes collègues doctorants, je leur souhaite à tous une belle thèse et de nombreux projets pour la suite. Mes remerciements vont également aux étudiants de Master : Benjamin, Maxime et Matthieu, qui ont contribué à étoffer nos connaissances sur le site d'Orgnac.

Enfin, je voudrais ici avoir une pensée reconnaissante et affectueuse pour mes proches, qui ont supporté à leur façon ce travail. Je remercie tout d'abord mon père Paul et mes sœurs Catherine, Dominique et Valérie. Ils m'ont apporté leur soutien et leur compréhension tout en me laissant libre de mes choix, et ce malgré, j'imagine, quelques inquiétudes silencieuses quant aux longues années d'études de « la petite dernière »... Mes pensées vont aussi à ma tante, Christiane, pour la fierté peut-être parfois un peu débordante dont elle fait quelquefois preuve à mon égard, mais après tout, ça ne fait pas de mal !! Et un clin d'œil à mes p'tits neveux préférés, Jean-Baptiste et Cyrielle, pour qui tout ça est encore un peu obscur et lointain, mais sait-on jamais ?

J'adresse aussi de chaleureux remerciements à ma « belle famille », pour l'accueil qu'ils m'ont réservé et la gentillesse que tous me témoignent chaque jour. Des remerciements particuliers pour Marie, ma belle-sœur, pour le sérieux coup de main reprographique qu'elle m'a donné. Et bien sûr, mon compagnon Félix, talentueux chocolatier-pâtissier de son état, que je remercie tendrement d'avoir allègrement épongé le stress et les coups de pompes de ces derniers mois.

Que tous acceptent ici ma sincère et profonde gratitude.

Je veux aussi remercier ici quelques personnes pour qui j'ai une grande tendresse. Françoise, Nathalie et Stéphanie, les copines de fac, avec qui le temps passe si vite, et qui sont toujours un peu étonnées et amusées que certains de nos profs soient aujourd'hui mes collègues... ! Une pensée toute particulière va aussi à Jocelyne, et Anne-Marie, rencontrées à travers la musique, et avec qui les soirées déjantées étaient toujours reconstituantes pour le moral ! Et puis nous resterons dans la musique pour finir, avec un merci tout spécial à Marie-Françoise, professeur de violoncelle, qui m'a longtemps supportée (dans tous les sens du terme ... !) et écoutée, et qui m'a beaucoup appris, juste avec un violoncelle. Et puis ceux-là s'en moquent sûrement un peu, mais merci aussi, dans le désordre, à Bach, Schumann, Dvorak, Pärt, Glass, Reich, Shorter, Corea, Pertucciani, Rodrigo, Chostakovitch, Saint-Saëns, Vian, Kernis, Schubert, Guibert et bien d'autres encore... qui exercèrent tour à tour, dans toute la phase de rédaction en particulier, des pouvoirs de concentration ou de défoulement réellement positifs... !

A mes proches, famille et amis

*A celle qui peut-être,
même depuis de lointains mondes,
garde sur nous un oeil bienveillant*

Et pour toi, Félix

Dans le domaine de la musique, on croît ou l'on veut croire que l'on contrôle bien les phénomènes mais, en réalité, il y a une foule de choses qui vous échappent, qui ne sont pas de l'ordre de l'analyse et de la connaissance. La science pose des questions, mais on y répond parfois de manière légère.

Iannis Xénakis, Compositeur
Chercheurs ou Artistes ?
Ed. Autrement, 1995.

RESUME

Ce travail de thèse s'insère dans le cadre des recherches menées sur les enregistreurs naturels continentaux, et sur leur intérêt en tant que mémoire environnementale et climatique. Un grand nombre d'études ont, en effet, été menées sur les glaciers alpins, les cernes d'arbres, les dépôts lacustres et les spéléothèmes entre autres. Devant la richesse des informations ainsi mises à jour quant aux évolutions environnementales et climatiques passées, pour des échelles locales à régionales et avec une résolution annuelle à décennale, la nécessité d'étudier les dépôts détritiques endokarstiques et d'évaluer la mémoire de ces archives naturelles s'est imposée.

Dans cette recherche, nos objectifs sont de deux ordres. Il s'agit tout d'abord de comprendre les dynamiques de dépôt des sédiments étudiés en intégrant au mieux les spécificités et contraintes induites par le milieu endokarstique. En ajustant les méthodes de la sédimentologie classique, nous cherchons donc à mieux saisir les modalités de la sédimentation en milieu souterrain, de façon à avoir une meilleure lecture des dépôts accumulés. En parallèle, notre travail vise à caractériser, par la construction de « cartes d'identités », les différents modes de piégeage sédimentaire reconnus sous terre, en vue d'une typologie. Cette identification est importante dans la mesure où elle pourrait permettre, à terme, de travailler sur des dépôts endokarstiques anciens, dont la dynamique de sédimentation n'est plus observable aujourd'hui. Ainsi, les données environnementales archivées par ces dépôts seraient mieux déchiffrées.

A travers l'étude de deux sites complémentaires, les grottes de Choranche dans le Vercors et l'aven d'Ornac dans le Bas-Vivarais ardéchois, nous avons donc entrepris l'analyse à haute résolution de différents remplissages détritiques fins, soit encore actifs soit non fonctionnels. Les méthodes mises en œuvre ont été empruntées aux sédimentologues, et vont de la granulométrie au traitement de signal, en passant par les images de Passega et des mesures de colorimétrie ou encore de susceptibilité magnétique. Un important volet de méthodes karstologiques est également intégré, afin de toujours repositionner notre objet d'étude dans son contexte.

De cette double approche, il ressort que les sédiments détritiques de l'endokarst fonctionnent comme un enregistreur des fluctuations environnementales locales ; les écoulements étant le principal vecteur de transmission de l'information. C'est aussi une grande complexité de l'archivage qui a été mise en avant, et qui s'exprime à plusieurs niveaux de nos recherches. Ainsi, le choix de la carte d'identité des modes de piégeage sédimentaire doit être retravaillé pour tenter de voir si une caractérisation plus fine est possible, en vue d'atteindre une meilleure reproductibilité. D'autre part, à partir des datations au ^{14}C de charbons de bois, la chronologie de cette archive n'a pas pu être clairement mise en évidence. A travers les différents signaux sédimentaires étudiés, il semble que la résolution peut être très variable ; étant directement soumise aux dynamiques de sédimentation, mais aussi selon les sites. Ces résultats sont les premiers jalons de recherches ouvrant de nombreuses perspectives, parmi lesquelles les datations et notamment la méthode du ^{210}Pb , occupent une place de choix. C'est une des clés de lecture les plus importantes par rapport au but final envisagé, en filigrane dans ce travail de doctorat : la possibilité de reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques à partir des archives détritiques endokarstiques.

SOMMAIRE

RESUME	1
SOMMAIRE	3
INTRODUCTION GENERALE	7
PARTIE I : LA FONCTION MEMOIRE DU KARST. PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.	13
<hr/>	
INTRODUCTION	17
CHAPITRE I : LES FONCTIONS MÉMOIRES DU KARST – RAPPELS ET ETAT DE L'ART.	19
1. Précisions sur le cadre conceptuel	19
2. La morphologie endokarstique	22
3. Les remplissages	29
4. Les spéléothèmes : archive privilégiée des recherches environnementales	34
5. Vers une étude des autres mémoires endokarstiques	38
CHAPITRE II : APPROCHE ORIGINALE DES ARCHIVES DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.	55
1. Positionnement de notre étude des remplissages détritiques	55
2. Discussion : quels sont les sédiments détritiques les plus appropriés pour notre démarche analytique ?	58
3. Rôle et pertinence des pièges à sédiments de l'endokarst.	61
CONCLUSION	77
PARTIE II : LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION. MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.	79
<hr/>	
INTRODUCTION	83
CHAPITRE I : LES MÉTHODES D'ÉTUDE DES SYSTÈMES SÉDIMENTAIRES DE SURFACE : BASE À LA CONSTITUTION DE NOTRE PROPRE DÉMARCHE.	85
1. Echantillonnage des sédiments	85
2. Acquisitions de données	90
3. Etude dynamique : caractérisation du piégeage sédimentaire	99
4. Etude dans les domaines temporel et fréquentiel	103
5. Les autres méthodes utilisables	107
CHAPITRE II : APPLICATION AU MILIEU ENDOKARSTIQUE - UNE DÉMARCHE METHODOLOGIQUE SPECIFIQUE.	115
1. La pression de l'endokarst sur la sédimentation souterraine	115
2. Approche karstologique : des méthodes complémentaires	118

CONCLUSION	124
PARTIE III : ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES ACTIFS - LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).	125
<hr/>	
INTRODUCTION	129
CHAPITRE I : LE CHOIX DU SITE DE CHORANCHE ET LE CONTEXTE VERCUSIEN.	131
1. Les lacs souterrains de Choranche	131
2. Les grottes de Choranche : un véritable laboratoire souterrain	136
3. Le Massif des Coulmes et le Vercors Septentrional : grands traits	140
CHAPITRE II : L'ETUDE DES CAROTTES DE CHORANCHE – MISE EN APPLICATION DE NOTRE APPROCHE.	145
1. Prélèvements effectués et description des carottes	145
2. Les analyses granulométriques	156
3. Le signal sédimentaire à travers d'autres proxy et leurs traitements	195
4. Les datations	230
CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET INTERPRÉTATIONS.	237
1. Le point sur la caractérisation des pièges lacustres de l'endokarst	237
2. Evaluation de la capacité mémoire des dépôts détritiques endokarstiques	248
CONCLUSION	255
PARTIE IV : APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).	257
<hr/>	
INTRODUCTION	261
CHAPITRE I : LE CHOIX DE L'AVEN D'ORGNAC ET LE CONTEXTE ARDECHOIS.	263
1. Les plateaux calcaires du Bas-Vivarais	263
2. L'Aven d'Orgnac : présentation générale	268
3. Les secteurs d'étude choisis	269
CHAPITRE II : L'ETUDE DES PRÉLEVEMENTS D'ORGNAC – TRANSFERT DE NOTRE APPROCHE AUX PIÈGES FOSSILES.	275
1. Approche globale préliminaire des dépôts	275
2. Description des prélèvements	290
3. Les analyses granulométriques et les traitements associés	294
4. Les autres lectures du signal sédimentaire	311
CHAPITRE III : INTERPRÉTATIONS ET ESTIMATION DE LA REPRODUCTIBILITÉ.	323

1. Le point bas de la salle Nord	323
2. Le fond de la Chatière des Sables	329
CONCLUSION	335
CONCLUSION GENERALE	337
BIBLIOGRAPHIE	345
ANNEXES	369
TABLES	405
Table des Figures	407
Table des Photographies	411
Table des Tableaux	412
Table des Matières	413

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail de thèse s'insère dans le cadre des recherches menées sur les enregistreurs naturels continentaux, et en particulier sur les archives endokarstiques. L'ensemble de ces recherches vise à décrypter, par des analyses spécifiques, les différents dépôts accumulés sous terre, afin de saisir les informations environnementales archivées à haute résolution, sur des échelles spatiales locales à régionales [Maire, 2000]. Le milieu karstique, à travers ses capacités d'intégration et de conservation notamment, recèle en effet de précieuses mémoires naturelles. C'est donc dans un but de compréhension des évolutions passées du climat et de l'environnement, sur des échelles spatiales et temporelles complémentaires des grandes calottes glaciaires et des carottes océaniques [Lorius, 1991 ; Dansgaard *et al.*, 1993 ; Jouzel *et al.*, 1993 ; Desmet *et al.*, 1995 ; Appenzeller, 1998 ; Graham *et al.*, 2004], que ces enregistreurs continentaux sont étudiés.

Dans le cas précis des dépôts endokarstiques, de nombreuses études ont été conduites depuis plus de quarante ans sur les remplissages sédimentaires, parfois avec une entrée archéologique et/ou paléontologique, mais très rarement avec des outils permettant une analyse à haute résolution des dépôts [Cavaillé, 1960 ; Renault, 1967 ; Bastin *et al.*, 1986 ; Ferrier, 1988 ; Gospodaric, 1988 ; Campy *et al.*, 1992 ; Bintz, 1995 ; Debard, 1997b ; Delannoy, 1997 ; Texier, 1997 ; Quinif et Maire, 1998 ; Kervazo *et al.*, 2003]. Grâce aux techniques de datations [Duplessy *et al.*, 1972], seuls les spéléothèmes et plus précisément les stalagmites, ont fait l'objet d'études haute résolution en abondance, avec des données de premier intérêt quant aux évolutions paléoclimatiques et paléoenvironnementales [Bastin, 1982 ; Gordon *et al.*, 1989 ; Genty, 1993 et 1994a ; Lauritzen, 1995 ; Fairchild *et al.*, 2000 ; Perrette, 2000 ; Smart et Richards, 2003 ; Williams *et al.*, 2003 ; Drysdale *et al.*, 2004]. Devant la richesse et la précision informationnelles des stalagmites (résolution infra-annuelle), l'idée s'est alors imposée de conduire des études à haute résolution sur les remplissages sédimentaires détritiques des grottes, afin de voir si ces dépôts résultant d'autres processus dans l'endokarst sont également une source d'informations paléoenvironnementales à des échelles de temps très fines.

Les recherches que nous restituons dans cette thèse se concentrent sur ces questionnements : « *Les dépôts détritiques fins accumulés et conservés dans l'endokarst sont-ils une archive naturelle environnementale fonctionnant à haute résolution ? Et si oui, quel est le potentiel informationnel de ces remplissages, par rapport aux autres enregistreurs continentaux naturels, et en ce qui concerne les fluctuations environnementales et climatiques passées ?* »

Notre problématique a donc pour objet l'étude des dépôts détritiques fins dans le but d'apporter les premiers éléments de réponse à ces questionnements. Une réflexion préalable sur le choix des sites d'études a été nécessaire, ainsi que sur les types de dépôts *a priori* les plus intéressants d'un point de vue informationnel. Une réflexion identique a été parallèlement conduite sur les méthodes et démarches analytiques *ad hoc* à mettre en œuvre pour extraire les informations les plus fines, tant d'un point de vue fonctionnel qu'environnemental, voire climatique. Cette problématique englobe ainsi d'autres questionnements comme la pertinence et la place des archives détritiques, vis-à-vis des spéléothèmes et des autres enregistreurs continentaux, jusqu'aux enjeux et choix méthodologiques en rapport avec la qualité des résultats recherchés.

Compte tenu de ce contexte de travail, l'approche adoptée s'est rapidement fixée sur deux sites karstiques présentant des atouts et intérêts complémentaires :

- Les grottes de Choranche, dans le Vercors, se sont imposées à nous comme le site « référent » de cette étude, et ce pour deux principales raisons. C'est tout d'abord un véritable laboratoire souterrain, étudié depuis plusieurs années. Ainsi, l'hydrologie de ce système karstique (écoulements actifs et pérennes) et sa karstogenèse sont bien connues. De plus, des études haute résolution ont déjà été effectuées sur des concrétions de cette cavité, nous donnant un cadre informationnel dans lequel positionner et éventuellement calibrer nos propres résultats [Delannoy, 1981 et 1997 ; Delannoy *et al.*, 1988 ; Perrette *et al.*, 1997a ; Perrette, 2000].

- L'aven d'Orgnac, dans le Bas-Vivarais, a été retenu en tant que site « test », pour comparer et éprouver les résultats issus des grottes de Choranche. Cette cavité ardéchoise, aujourd'hui non fonctionnelle du point de vue des écoulements, présente en effet des enjeux intéressants pour notre étude. Outre le fait de pouvoir tester notre méthodologie sur un site assez différent de Choranche (écoulements absents, connaissances générales plus réduites initialement, autre secteur géographique...) et donc de pouvoir travailler sur la question de la reproductibilité de nos recherches, l'étude de l'aven d'Orgnac impliquait des questionnements plus directs sur la place et l'histoire morphogénétique de cette cavité dans l'évolution géomorphologique du Bas-Vivarais. En cela, notre problématique de départ se trouvait déjà prolongée.

En parallèle à ces choix de sites d'étude, la mise en place de la démarche méthodologique s'est inspirée des travaux des sédimentologues « de surface », et en particulier des techniques utilisées pour l'étude des sédiments des lacs alpins. En effet, les sédiments laminés des lacs alpins sont des archives continentales à haute résolution (infra-annuelle), et de nombreux travaux témoignent de la richesse informationnelle de ces dépôts [Magny, 1995 et 2004 ; Huh *et al.*, 1996 ; Stea et Mott, 1998 ; Chapron, 1999 ; Goslar *et al.*, 1999 ; Magny *et al.*, 2001 ; Kilian *et al.*, 2002 ; Arnaud, 2003 ; Mischke *et al.*, 2005]. Le type de particules sédimentaires étudiées dans notre travail étant très proche de ce que recèlent les lacs alpins, les différentes méthodes employées ont donc été reprises pour nos analyses, constituant le principal axe de notre méthodologie d'étude haute résolution.

En fonction de la problématique, des questionnements et des axes clés de notre recherche doctorale, le plan suivant, articulé en quatre parties, a été adopté :

Partie I : Cette partie se propose tout d'abord de dresser un état de l'art quant aux recherches menées sur les archives endokarstiques (Chapitre I). Après quelques rappels sur le cadre conceptuel dans lequel nous positionnons notre approche du karst, nous reprenons les différents mémoires karstiques en rappelant les grands principes de leurs fonctionnements, afin d'en faire ressortir leurs capacités informationnelles et leurs complémentarités. Dans le second chapitre, nous développons notre problématique de recherche et son intérêt vis-à-vis des autres archives endokarstiques. A l'issue de cette première partie sont donc définis les choix des sites d'études et des pièges sédimentaires étudiés dans cette thèse.

Partie II : Cette deuxième partie est centrée sur l'approche méthodologique mise en œuvre. Un premier chapitre reprend les différents outils utilisés pour l'étude haute résolution des sédiments de surface, depuis les techniques de prélèvements d'échantillons jusqu'au traitements de données les plus pointus. Le principe de chaque méthode d'acquisition de données et/ou de mesures est expliqué au moins dans ces grandes lignes. Nous avons pris le parti de développer ces méthodes et outils un

à un, et de façon quasi-exhaustive, car ils n'ont que très rarement été mis en œuvre dans le karst ; il nous semblait donc important de fournir toutes les informations à ce sujet. Le second chapitre de cette partie est une réflexion sur la translation de ces différentes méthodes au milieu endokarstique. Une discussion est conduite sur les paramètres naturels différant entre la surface et l'endokarst, et sur ce qu'il convient d'adapter ou de modifier en conséquence, par rapport aux méthodes proposées. Un volet sur les méthodes plus classiques de la karstologie, indispensables dans notre travail, est également développé.

Partie III : Cette partie traite de l'étude des grottes de Choranche, et plus précisément des deux pièges lacustres actifs de la partie aval de cette cavité. Le premier chapitre présente le site d'étude et a pour objet d'argumenter son choix, en partant des remplissages étudiés pour s'élargir aux données générales du contexte vercusien. Le deuxième chapitre expose tous les traitements de données effectués sur les carottes de sédiments, à travers quatre grands axes méthodologiques : la description visuelle des carottes, les différentes analyses et traitements granulométriques, les traitements croisant les différents signaux sédimentaires (susceptibilité magnétique, spectrocolorimétrie et imagerie en niveaux de gris), et enfin la question des datations et du cadre chronologique. L'ensemble de ces résultats fait l'objet d'une synthèse, dans le troisième chapitre, proposant des interprétations et des discussions autour de trois grands points : la possibilité d'une caractérisation des dynamiques de piégeage sédimentaire spécifiques au karst, l'interprétation sur le fonctionnement des deux systèmes lacustres étudiés en tant qu'accumulateurs de sédiments, et la capacité informationnelle que l'on peut potentiellement en ressortir.

Partie IV : Construite sur un mode très proche de la partie III, cette dernière partie traite du second site étudié : l'aven d'Ornac (Ardèche). La cavité et son environnement sont présentés dans le premier chapitre, depuis les données générales concernant les plateaux du Bas-Vivarais à une présentation de l'aven et des points particuliers qui y ont été retenus pour nos travaux. Le chapitre II regroupe les données acquises, incluant cette fois des outils plus spécifiques au karst et notamment la cartographie morphologique des sols. Les autres données (description, granulométrie, autres signaux et traitements), sont restituées et commentées exactement comme dans la partie III. Enfin, le troisième et dernier chapitre de cette partie a pour objet d'interpréter les résultats et de proposer une synthèse. Ces interprétations portent sur des hypothèses de fonctionnement des remplissages anciens étudiés, et sur leur portée informationnelle vis-à-vis des écoulements contemporains de leur édification. Une discussion est également proposée en parallèle, quant à la reproductibilité de la méthodologie employée.

PARTIE I
LA FONCTION MEMOIRE DU KARST.
PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS
DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.

PARTIE 1 : LA FONCTION MEMOIRE DU KARST. PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.

Problématique/Objectifs :

Chercher à comprendre les modalités de la sédimentation détritique endokarstique (en considérant les fonctions de transport et de piégeage des sédiments), pour mieux appréhender la capacité mémoire de ces dépôts.



INTRODUCTION

La première partie de cette thèse a pour objet de reprendre et de démontrer tout l'intérêt du domaine karstique en tant que mémoire naturelle des fluctuations environnementales et climatiques extérieures. Dans le contexte des recherches actuellement menées dans ce sens, le positionnement de notre propre problématique pourra ainsi être développé et expliqué. Pour exposer toutes ces connaissances sur les mémoires karstiques et ce que l'on propose d'y ajouter dans le cadre de cette thèse, cette partie s'articulera en trois chapitres.

Le premier chapitre permettra de faire une présentation sous forme de synthèse des travaux menés actuellement sur le karst, et plus particulièrement sur l'endokarst, en tant que mémoire naturelle. Nous repréciserons tout d'abord le karst dans son acception conceptuelle et théorique telle que nous l'aborderons dans ce travail. Puis les formes et les formations, ces différents enregistreurs naturels renfermés par le karst seront décrits, leur étude également. Les différentes mémoires seront regroupées par catégorie, en fonction de leur nature, de leur constitution et de leur mode de fonctionnement. Par ce classement et à partir des travaux actuels, il apparaît que les différentes archives naturelles contenues dans le karst renferment des mémoires diverses, aux capacités informationnelles variées. Les données environnementales contenues sont en effet d'une grande diversité, dans leur nature, mais aussi dans leur portée chronologique et spatiale, et dans la précision de chaque information retirée. La complémentarité de ces mémoires entre elles, mais aussi avec les autres enregistreurs naturels continentaux sera ainsi mise en avant et développée. Cette synthèse sur les mémoires endokarstiques, nous amènera à recentrer le discours sur l'archive qui est au cœur de notre recherche doctorale : les sédiments détritiques endokarstiques.

Une présentation plus fouillée de ces dépôts permettra d'introduire notre problématique. En reprenant l'historique des études engagées sur ces remplissages endokarstiques, nous verrons comment et pourquoi ils ont été étudiés. De là, les lacunes ou les faiblesses dans la connaissance de ces dépôts seront mises en avant. Elles s'exprimeront à travers deux notions essentielles :

- le rôle de *transfert de matières*, correspondant à l'*hydrodynamisme* souterrain et ses fluctuations dans la mise en place de ces remplissages ;
- le rôle de *mémorisation*, joué par les formes et la complexité des conduits endokarstiques qui servent de *pièges à sédiments* aux capacités variables.

La mise en exergue de ces deux fonctions sera le point de départ de notre propre approche des remplissages détritiques endokarstiques. Notre problématique sera donc exposée à travers ces deux notions discutées dans le chapitre II. Nous tenterons de montrer dans quelle mesure il est intéressant de mieux cerner ces deux fonctions de l'endokarst, dans le but de mieux comprendre le fonctionnement de l'archive naturelle qui en dépend. La valeur informationnelle des dépôts détritiques de l'endokarst, considérée à travers ses deux fonctions constitutives, devrait alors apparaître plus clairement.

Dans le second chapitre de cette partie, la réflexion et l'analyse de ces fonctions de transfert et de piégeage seront largement développées. En les considérant indépendamment l'une de l'autre, nous tenterons de montrer que chacune de ces deux fonctions peut avoir des expressions très variées. Les possibilités d'étude, pour la mise en application la plus pertinente de notre problématique, ressortiront

alors peu à peu. Les objectifs de la problématique ayant été exposés lors du positionnement de notre travail, les conditions optimales d'étude sur le terrain seront ensuite données par la présentation détaillée de ces deux fonctions.

CHAPITRE I : LES FONCTIONS MÉMOIRES DU KARST – RAPPELS ET ETAT DE L'ART.

Dans ce chapitre, nous proposons de faire une synthèse des connaissances sur le karst et de sa fonction mémoire naturelle environnementale. Quelques précisions seront données ici, sur le cadre conceptuel et théorique à partir duquel a été construit notre travail. Il est important de préciser en premier lieu ces notions conceptuelles car elles conditionnent notre façon d'aborder le karst et son environnement.

Dans un premier temps, les différentes fonctions du domaine karstique en tant que mémoire naturelle seront exposées. Une synthèse des données actuelles sera ensuite proposée pour chaque mémoire endokarstique, à savoir :

- les vides et les formes du karst (roche encaissante),
- les concrétions carbonatées (spéléothèmes),
- les remplissages détritiques (sédiments fins à grossiers, glace...).

La mise en place et le fonctionnement de chaque support enregistreur endokarstique seront rappelés. La place et la pertinence de ces archives vis-à-vis des questionnements actuels sur l'évolution régionale des climats et/ou de l'environnement seront également discutées. Un des principaux atouts de ces archives est leur complémentarité mutuelle, ainsi qu'avec les autres mémoires environnementales du domaine de la montagne aujourd'hui largement étudiées (lacs, glaciers, tourbières...). Pour chacune de ces archives endokarstiques, seront analysés les apports informationnels, mais aussi les limites, en terme de mémoire environnementale. A travers tous ces éléments, le développement des études passées et actuelles sur ces archives endokarstiques est abordé. A l'issue de ce chapitre de présentation et de synthèse sur la capacité mémoire du karst telle qu'elle est connue à ce jour, la discussion pourra être recentrée sur le sujet de cette thèse : les dépôts détritiques de grotte et leur propre potentiel informationnel.

1. Précisions sur le cadre conceptuel

Il nous paraît important de préciser notre vision du karst, afin de poser les bases de la problématique de notre travail doctoral, et de délimiter le cadre de notre étude.

a) L'approche systémique : notions élémentaires

Il ne s'agit pas ici de dresser un historique de l'approche systémique, mais de partir des concepts contenus dans cette approche pour préciser le positionnement de notre recherche. De nombreuses définitions d'un système existent, mais toutes regroupent l'idée qu'un système est composé d'éléments bien identifiables, en relations les uns avec les autres. Selon les auteurs, d'autres notions complémentaires sont ajoutées à la définition : organisation, hiérarchisation, complexité, dynamique [Durand, 1979]. La systémique peut donc se définir comme une approche permettant d'aborder des objets complexes (figure I.1), un outil permettant de décomposer un objet d'étude en différentes unités et en relations entre ces unités [Durand, 1979].

Trois critères associés au concept de système [Walliser, 1977 ; Durand, 1979] et étroitement soumis aux notions de temps et de dynamique [Prigogine, 1996] nous paraissent intéressants pour notre étude :

- *Autonomie* : Tout système définit un ensemble en rapport réciproque avec son environnement, de telle sorte qu'il possède sa propre autonomie. C'est la notion de système ouvert qui est donnée ici. Un système ouvert échange de la matière, de l'énergie et de l'information avec son environnement, tout en gardant une capacité propre d'auto-organisation.
- *Cohérence* : Un système est composé de sous-systèmes dont les interactions assurent une certaine cohérence.
- *Permanence* : Un système subit des modifications dans le temps, tout en conservant une certaine permanence. C'est l'idée d'équilibre du système qui est sous-tendue ici, et qui rejoint la notion d'auto-organisation déjà évoquée.

D'autre part, nous retiendrons qu'un système peut être considéré et étudié selon trois angles de vue complémentaires sur le plan temporel [Walliser, 1977] :

- *Structurel* : caractérise le système dans son état d'équilibre ;
- *Fonctionnel* : relate les transformations effectuées par chaque sous-système et les relations entrée-sortie ;
- *Evolutif* : montre les modifications des sous-systèmes, des frontières du système et de son organisation par rapport à l'environnement.

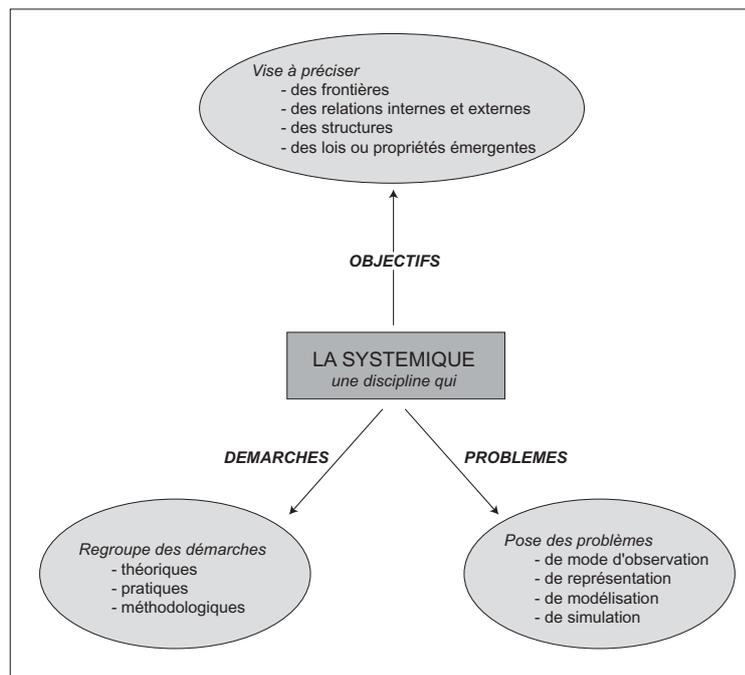


Figure I.1 : Définition graphique de l'approche systémique (d'après Durand, 1979).

b) Le système « Karst »

Ces différentes fonctions s'appliquent au karst, comme l'ont montré de nombreux travaux [Mangin, 1974, 1981, 1982 et 1998 ; Quinif, 1983 et 1994 ; Delannoy, 1981, 1986b et 1997].

Dans cette thèse, nous abordons le karst en tant que système physique ouvert, ayant des échanges avec ce qui est considéré comme extérieur au système [Walliser, 1977 ; Durand, 1979]. Il est

défini comme « ... l'impluvium au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage. Ce système est soumis au processus dynamique que sont les circulations d'eau ; l'entrée d'un tel système est représentée par les apports dus aux précipitations et la sortie par le débit des sources, point d'aboutissement du drainage » [Mangin, 1982]. Un tel système subit des processus dynamiques selon les trois niveaux temporels cités plus haut : structurel, fonctionnel et évolutif (figure I.2) qui interagissent dans l'organisation du réseau de drainage [Mangin, 1982 ; Delannoy, 1997 ; Delannoy *et al.*, 1999].

Par cette approche du karst, on perçoit que c'est la circulation des eaux qui commande l'évolution du karst. A travers la chimie des eaux, deux paramètres sont directement actifs sur le système karstique [Bakalowicz, 1979] : le flux d'eau et le flux de gaz carbonique. Mais ces données chimiques sont soumises aux paramètres d'état du système, à savoir la nature de la roche encaissante, sa porosité et son degré de fissuration. Enfin, les conditions aux limites d'un tel système interviennent également sur la karstification. Elles sont exprimées par le gradient hydraulique d'une part lié au niveau de base karstique et à la position de l'exutoire, et par le potentiel en eau et en gaz carbonique d'autre part. Ces derniers sont déterminés par les conditions géologiques, géomorphologiques et climatiques régnant autour du système karstique [Mangin, 1982]. Ces différentes conditions au creusement d'un système karstique seront discutées dans la suite, et illustrées à travers un exemple.

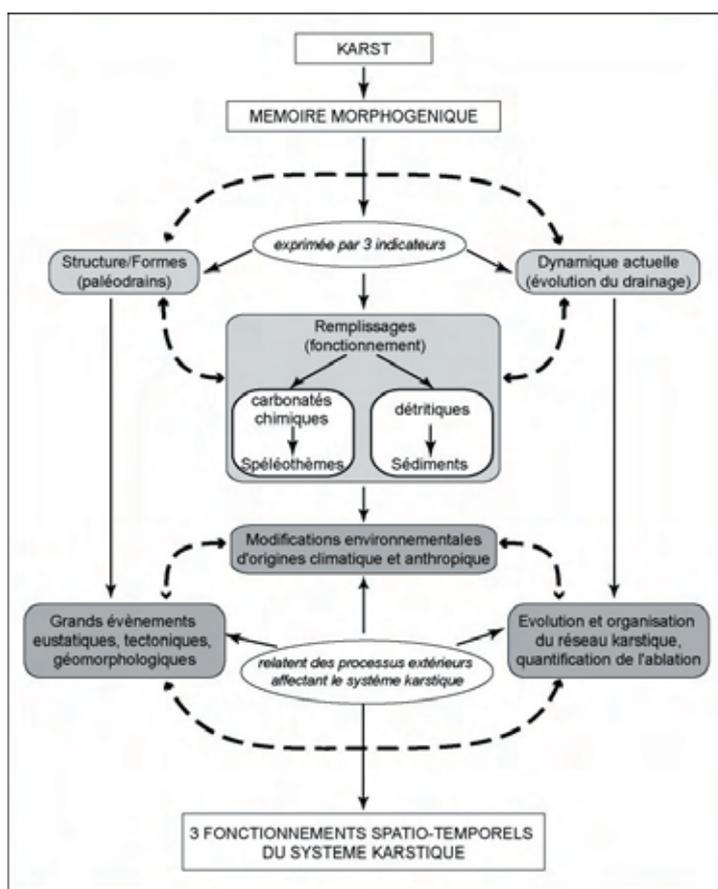


Figure I.2 : Schéma de synthèse montrant l'articulation des trois mémoires morphogéniques du karst (modifié d'après Delannoy *et al.*, 1999).

c) Intérêt de l'approche systémique

Les différents critères présentés ci-dessus permettent de préciser les entrées, les sorties et les flux qui participent au fonctionnement et à l'organisation du karst, ainsi que l'environnement du système.

Pour notre propre problématique, la systémique présente donc l'avantage de positionner clairement notre objet d'étude, en l'identifiant par rapport à son environnement. Les remplissages, et notamment les dépôts détritiques seront donc considérés dans ce travail comme un élément fort du système, car ils permettent, du fait de leur position dans le karst, de travailler sur les flux passés et actuels d'eau et de matière (figure I.2). En s'appuyant sur ces différentes caractéristiques, leur fonctionnement dans le système pourra être abordé, par rapport aux informations issues des autres mémoires (formes et formations carbonatées), et par rapport aux conditions extérieures (entrées et sorties des écoulements, évolution des conditions environnementales et climatiques aux limites du système).

Avant toutes choses, et selon la logique de l'approche systémique du karst, les différents moteurs et éléments structurant d'un karst seront développés. Cette présentation nous permettra d'analyser la fonction mémoire environnementale du karst à ses différents niveaux d'expression, mais également de saisir les relations et interactions entre les différentes archives endokarstiques. Nous exposerons tour à tour les indicateurs que sont les formes et les formations (remplissages carbonatés et détritiques). Ils seront également présentés à travers quelques exemples permettant de montrer leur dynamique et leur évolution. Dans ce chapitre, nous traiterons de façon de plus en plus exclusive et détaillée des dépôts détritiques, archives endokarstiques au cœur de notre travail de thèse. Nous pourrions alors exposer notre problématique et notre approche de ces remplissages dans la suite de cette première partie.

2. La morphologie endokarstique

L'objet est ici de faire le point sur le lien existant entre les modalités de création d'un vide et l'empreinte correspondante conservée au sein du karst. On soulignera également que les témoins du creusement peuvent s'imbriquer et s'exprimer à différentes échelles. Nous ne retraiterons pas de la classification des cavernes et des types de conduits en fonction de leur mode de creusement [Renault, 1970 et 1987 ; Gilli, 1995]. L'intérêt du discours développé ici est plutôt de montrer l'importance des formes et des vides (première unité constitutive du système karstique) en tant qu'indicateur paléogéographique. La notion de vide a d'ailleurs été prise en compte depuis longtemps dans les travaux sur l'endokarst. Mangin [1982] cite B. Gèze qui dès 1974 considère la caverne comme « un trou avec de la roche autour ». Ce développement sur les réseaux nous paraît nécessaire car c'est à l'intérieur de ces réseaux que se situent les remplissages détritiques que nous étudions.

a) La formation du karst

Le creusement d'un réseau karstique repose sur la circulation de l'eau [Mangin, 1982]. Si les secteurs fissurés du massif jouent le rôle essentiel de point d'entrée, par infiltration, la situation du point de sortie conditionne fortement l'organisation des écoulements, et de ce fait la structuration du creusement. C'est entre ces deux points, impluvium et niveau de base, que les eaux dissolvent la roche, créant ainsi un réseau de drainage karstique qui deviendra de plus en plus structuré et hiérarchisé au cours du temps. Le rôle du point de source est donc ici essentiel. En effet, si la position de ce point d'exutoire évolue au cours du temps (changement du niveau de base), toute l'organisation du réseau de drainage s'en ressent. Pour illustrer cette évolution, l'exemple le plus parlant est ici le cas d'une grotte dont l'exutoire est au niveau d'une rivière qui s'encaisse, creusant ses propres gorges. L'encaissement du cours d'eau entraîne une migration de l'exutoire. Tant que le réseau karstique, dans son enfoncement, ne rencontre pas un niveau géologique imperméable (le plus souvent des marnes pour les karsts des

massifs préalpins), le point de source correspondra au talweg du cours d'eau superficiel. Cette évolution implique une réorganisation des drains, avec la création de nouveaux conduits et l'abandon partiel ou total d'anciens conduits (figure I.3). Ainsi, les empreintes (formes et vides) laissées par la circulation des eaux sont en étroite relation avec la position du point de source. Les formes et les vides karstiques, qui constituent une mémoire morphologique, sont donc en grande partie conditionnés par l'évolution de la position de l'exutoire.

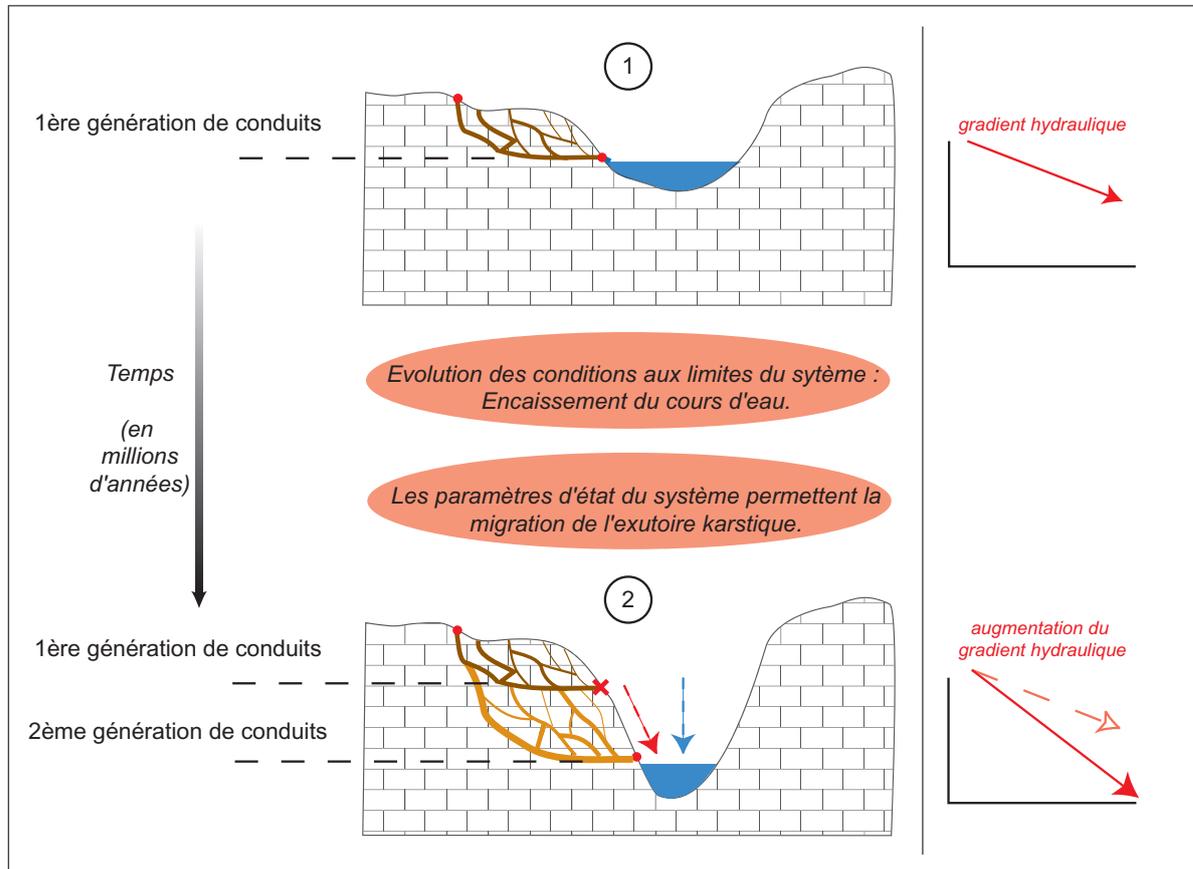


Figure I.3 : Schéma montrant les conséquences de la migration de l'exutoire sur l'évolution d'un réseau de drainage (commentaire dans le texte).

Si l'évolution de l'exutoire est un facteur important, les points d'entrée ont aussi leur importance, notamment à travers la notion de karst unaire ou binaire (figure I.4). On rappelle que cette différenciation repose sur la présence ou non d'assises imperméables sur le massif calcaire [Mangin, 1982 ; Delannoy, 1997 ; Salomon, 2000]. Dans le cas d'un karst unaire, nous avons un système simple uniquement composé de terrains karstiques. Les précipitations tombent directement sur le calcaire et sont rapidement absorbées par l'ensemble du bassin d'alimentation karstique. Il y a alors un développement important de fissures et de pores sur toute la zone épikarstique (partie superficielle du karst), à partir desquels le réseau de drainage va se mettre en place. Les karsts unaires peuvent présenter une couverture perméable, correspondant le plus souvent au développement d'un sol. Dans le cas de karsts binaires, le bassin d'alimentation karstique englobe un bassin versant développé dans des assises imperméables situées en amont du karst. Les précipitations tombant sur ces assises non carbonatées sont alors concentrées par les cours d'eau qui alimenteront ensuite le karst par l'intermédiaire de pertes. Le drainage présentera alors des structures d'écoulements prononcées dès l'amont du système [Delannoy, 1997]. La structuration du réseau de drainage est donc différente selon que l'on a affaire à un karst unaire ou binaire.

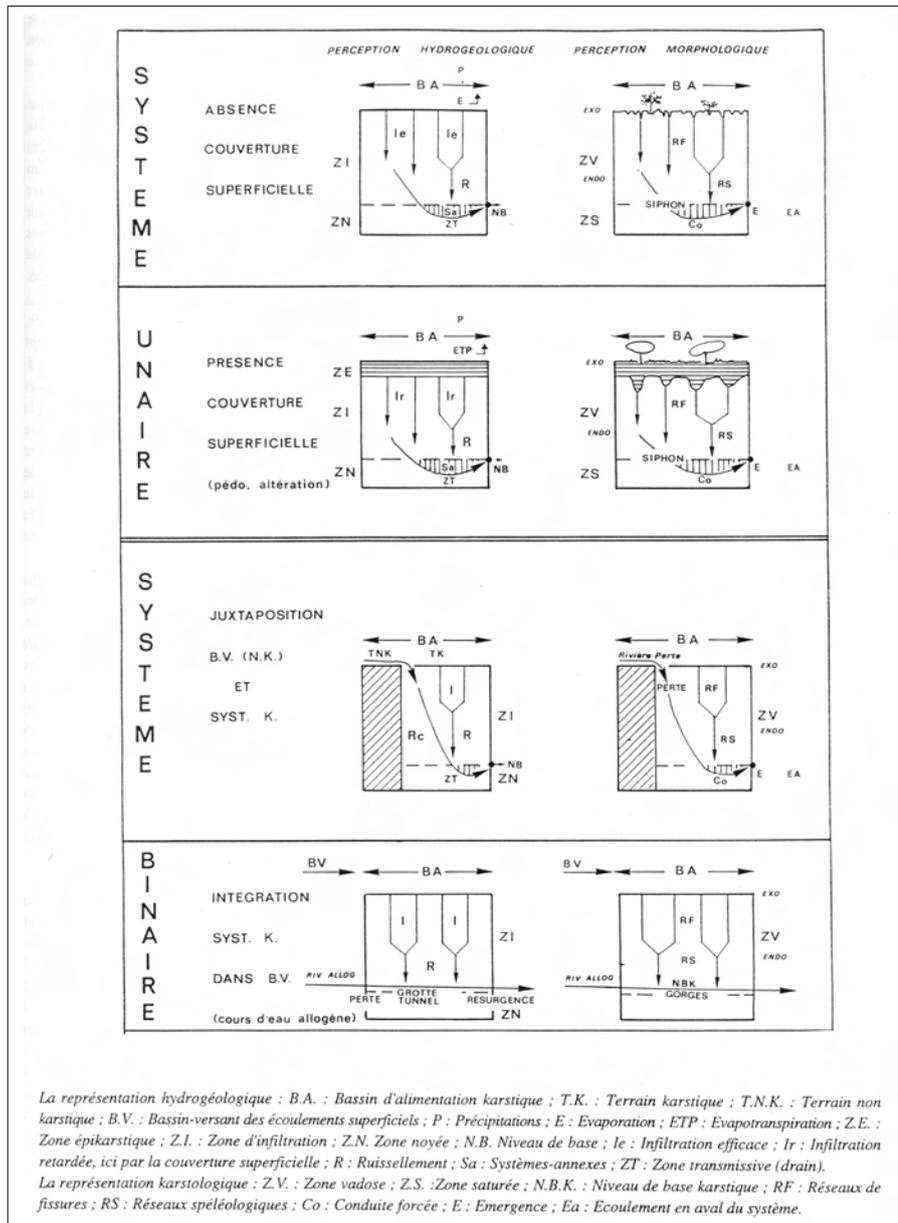


Figure I.4 : Les systèmes karstiques unaires et binaires (d'après Delannoy, 1997).

La prise en compte de la roche encaissante permet d'aborder la notion de résistance du milieu (paramètre d'état du système) ; la composition du calcaire et son degré de fracturation sont des facteurs qui vont influencer l'organisation des vides et le drainage du massif [Delannoy, 1997]. Les conditions et la vitesse de karstification sont donc dépendantes de nombreux critères : composition du calcaire, agressivité des eaux et dynamique des écoulements en fonction des points d'entrée (système unaire ou binaire) et de sortie du massif karstique [Eraso, 1975 ; Bakalowicz, 1975 et 1979 ; Mangin, 1982 ; Ford et Williams, 1991]. Ce sont ces trois critères principaux, soumis eux-mêmes aux conditions climatiques locales et à la géologie, qui façonnent l'endokarst au fur et à mesure de sa genèse. Chaque forme, chaque vide, garde la trace de ses conditions de creusement. C'est l'action de l'eau, tant « mécanique » que chimique, qui sculpte les réseaux karstiques au cours du temps.

Ce rappel des formes souterraines, et des vides endokarstiques, fait ressortir une première fonction mémoire endokarstique, source d'informations karstogénétiques et paléogéographiques. Dans la mesure où ces empreintes peuvent être surimposées les unes aux autres, il est possible de retrouver la succession des différents écoulements qui ont conduit à la forme observée [Renault, 1970 ; Gilli, 1995].

De plus, les formes peuvent s'exprimer à des échelles spatiales variées et complémentaires. L'exemple du creusement des galeries syngénétiques est fréquemment cité pour illustrer ce phénomène (figure I.5a ; photo I.1). La forme tubulaire du conduit (ou conduite forcée) indique un écoulement en zone noyée. On se réfère alors à une « macroforme ». Les microformes (vagues d'érosion) laissées sur la paroi de ce type de galerie permettent de préciser les modalités et le sens des écoulements prenant en charge les sédiments détritiques.

b) Les données paléogéographiques

Les différentes formes emboîtées renseignent sur l'évolution paléogéographique du massif. On peut les distinguer en deux groupes : les macroformes et microformes. Le tableau I.1 renvoie pour chacune, aux indices paléogéographiques correspondants. L'observation des vides est donc très riche car les témoins, les empreintes des différents processus de creusement peuvent se succéder, sans pour autant se masquer. Cet « empilement » de traces, de formes, est possible car ces formes résultent de dynamiques d'écoulement variées et agissant à des échelles spatiales et temporelles différentes. On parle parfois de rupture dans la flèche du temps pour expliquer cette conservation de formes successives. Cela exprime le fait que différentes dynamiques de creusement du karst puissent se succéder les unes aux autres, avec parfois même une interruption de la karstification (réseau asséché plus ou moins longuement). Par rapport à une flèche du temps constante et régulière par définition, chaque dynamique de creusement fonctionne avec un rythme propre. On peut ici reprendre l'exemple de la galerie en conduite forcée, qui évolue dans un second temps en galerie en trou de serrure (figure I.5b). Ce type d'organisation des vides renseigne sur deux phases de creusement différentes, à savoir un écoulement rapide en zone noyée puis un écoulement libre en zone vadose. Dans un tel exemple, la chronologie des événements est préservée, conservée par les formes. Seul le temps qui sépare ces deux processus est difficile à appréhender, car à une absence éventuelle d'écoulements entre ces deux phases peut correspondre une absence de témoins.

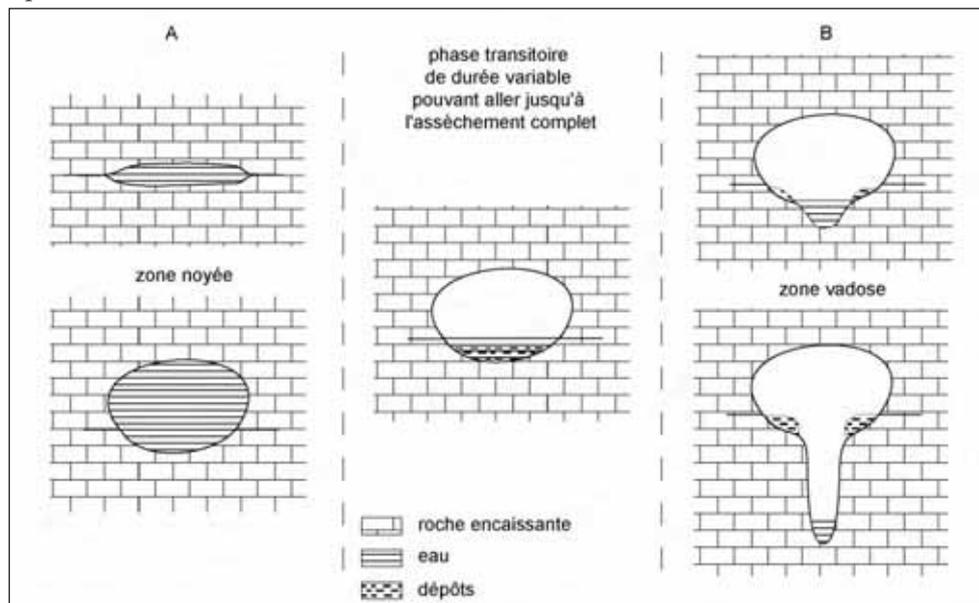


Figure I.5 : Exemple de creusement d'une galerie en régime noyé puis d'évolution en régime vadose (modifié d'après Renault, 1970).

Les vides sont également l'expression de formes à toutes les échelles possibles, depuis la galerie considérée dans sa globalité comme on vient de le voir, jusqu'aux traces laissées sur les parois de la roche encaissante. On peut rappeler ici le cas des coups de gouge ou vagues d'érosion [Renault, 1967 ;

Lismonde et Lagmani, 1987 ; Slabe, 1995] qui sont une expression à plus fine échelle (entre 10 et 100 mm de longueur) d'un creusement en zone noyée. C'est un phénomène purement hydrodynamique couplé à la corrosion chimique. Sur les parois d'une galerie, ces vagues sont disposées de manière aléatoire, et peuvent parfois tapisser le plancher et le plafond. Des études poussées de ces vagues d'érosion ont apporté des résultats intéressants pour les modalités de creusement (figure I.6 ; photo I.1). Ces travaux ont mis en évidence que l'allongement de ces microformes (rapport de leur longueur à leur largeur) est en rapport avec la vitesse du courant [Roques, 1969 ; Curl, 1966 *in* Lismonde et Lagmani, 1987 ; Slabe, 1995].

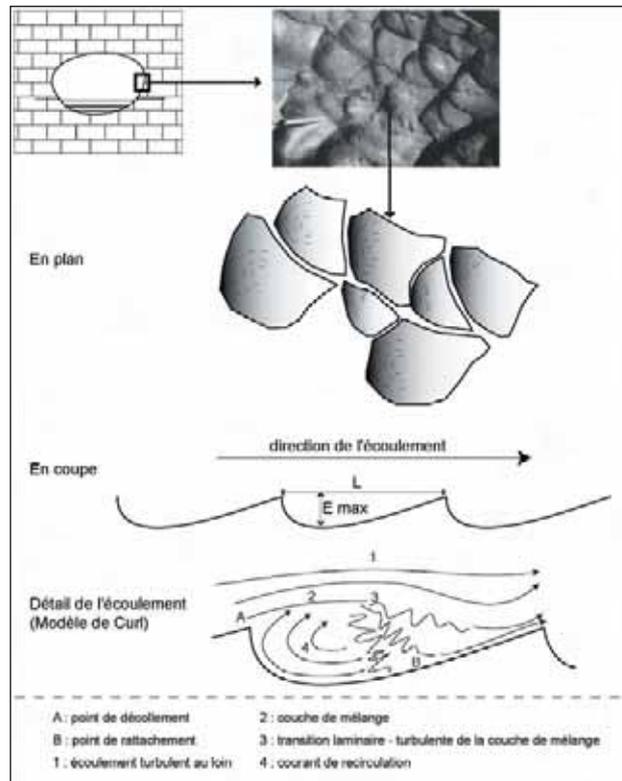


Figure I.6 : Les vagues d'érosion sur les parois d'une galerie en « conduite forcée » et leur signification (d'après Lismonde et Lagmani, 1987 ; Slabe, 1995).

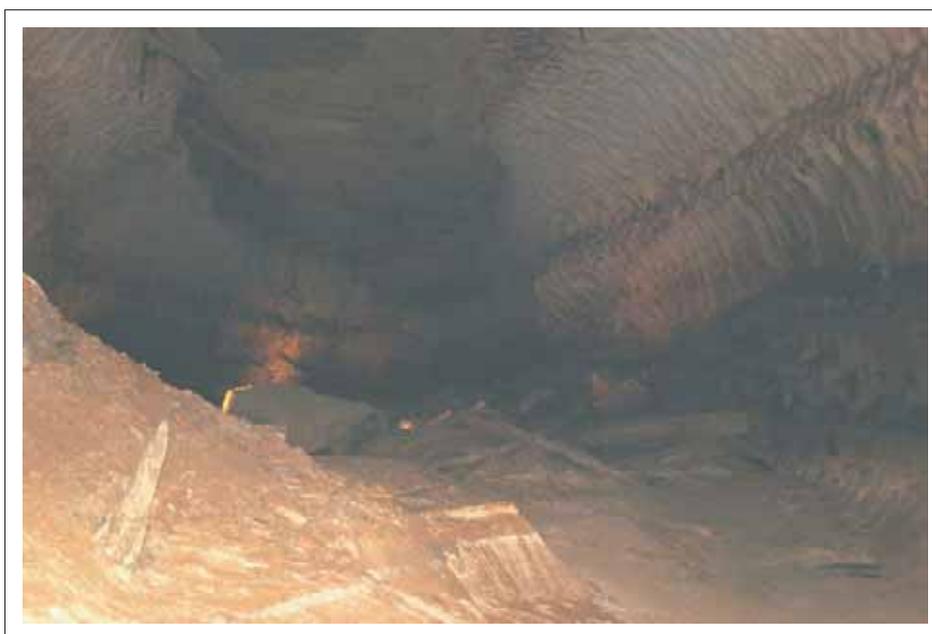


Photo I.1 : Photographie d'une galerie en tube, creusée en zone noyée – Grotte de St Marcel – Ardèche (cliché A.S. Perroux).

Enfin, il faut préciser que l'étude des formes n'implique pas seulement l'action chimique et mécanique de l'eau sur la roche encaissante. Ce fonctionnement est à la base de la création des vides, mais le panel des formes que l'on rencontre dans l'endokarst est enrichi par d'autres phénomènes qui peuvent agir simultanément ou successivement. Ainsi, la présence de particules sédimentaires dans les eaux qui circulent au sein du karst peut conduire à des accumulations de sédiments. Ce phénomène, lorsqu'il est combiné à un écoulement lent des eaux, produit des galeries de type paragénétique (figure I.7) [Renault, 1970]. Le remplissage sédimentaire est donc synchrone du creusement des conduits. Là encore, les formes s'expriment aux échelles macroscopiques (section de galerie) et aux échelles microscopiques. La présence de chenaux de voûte, en simple sillon ou en anastomose est une indication de creusement par l'eau sous pression, à l'interface remplissage/roche encaissante (tableau I.1). En fonction de la vitesse des écoulements, la voûte sera donc entaillée par des chenaux plus ou moins développés [Quinif *et al.*, 1992 ; Slabe, 1995].

Parfois, ce sont des phénomènes tectoniques qui interviennent après la karstification (figure I.8) [Bini, 1992 ; Gilli, 1995 ; Häuselmann *et al.*, 1999 ; Vanara, 2000]. La tectonique laisse aussi des marques de son action sur le karst, souvent spectaculaires à observer (galeries décalées, concrétions cassées...). D'autres formes typiques de l'endokarst existent donc, liées à des phénomènes de creusement et d'évolution des galeries complexes.

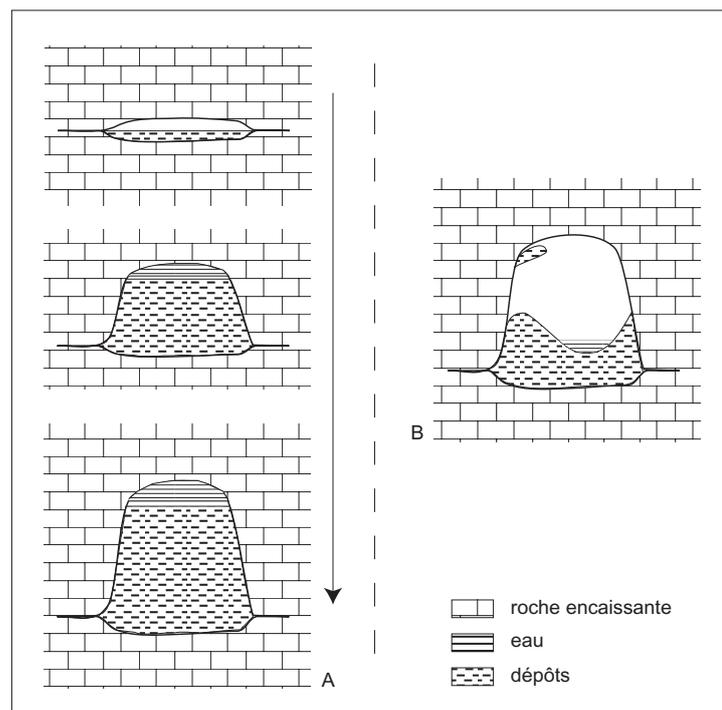


Figure I.7 : Exemple de creusement et d'évolution paragénétique d'une galerie, en régime vadose, avec présence simultanée de dépôts (d'après Renault, 1970).

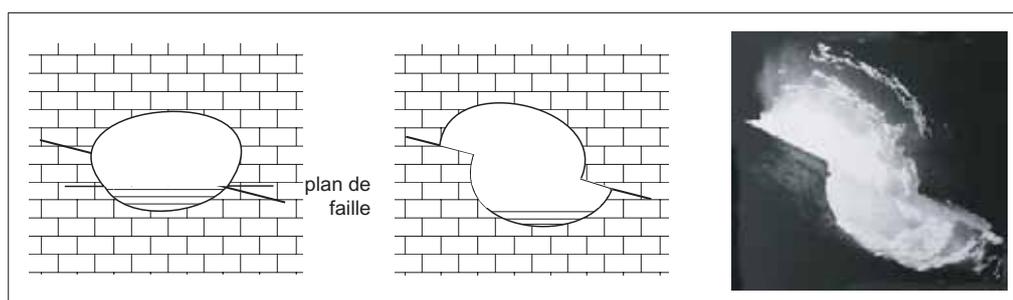


Figure I.8 : Exemple d'un mécanisme tectonique sur une galerie endokarstique (d'après Bini *et al.*, 1992).

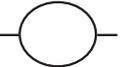
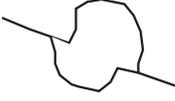
	Forme (liée à l'eau)	Nom	Dimensions / Position	Information paléogéographique
Macroformes		Galerie syngénétique	Section métrique à plurimétrique	Creusement en régime noyé Écoulements rapides
		Galerie paragénétique		Creusement sous écoulement libre, de vitesse variable (accumulation sédimentaire synchrone)
		Galerie		Creusement en régime noyé et écoulements rapides puis remodelage de la section par écoulements libres et ponctuels
		Galerie en trou de serrure	Position horizontale	Creusement en régime noyé puis surcreusement de la section par écoulements libres et relativement permanents
		Galerie méandriforme	ou sub-horizontale	Creusement en régime vadose Écoulements libres et rapides
		Galerie décalée		Creusement en régime noyé et écoulements rapides puis perturbation tectonique sur faille ou diaclase
		Puits	Section métrique à plurimétrique Position verticale ou sub-verticale	Creusement gravitaire en régime noyé
Microformes		Grandes Salles (vue en plan)	jusqu'à plusieurs centaines de mètres, en hauteur comme en largeur	Creusement de niveaux facilement érodables le plus souvent sous un toit calcaire ou dans des zones de détente mécanique (proximité de versant) Indication géologique
		Vagues d'érosion	Longueur et largeur pluricentimétriques Présentes sur les parois de galeries	Pour les galeries creusées en régime noyé, indication du sens et de la vitesse d'écoulement
		Flutes	Longueur pluricentimétrique largeur centimétrique Présentes sur les parois de galeries	Dissolution prolongée des parois par un écoulement (perpendiculaire à l'allongement des flutes) de vitesse particulièrement régulière
		Coupoles de dissolution	Diamètre pluricentimétrique à métrique Présentes sur les plafonds	Dissolution par des écoulements ascendants, rapides et sous pression (syngénétisme ou paragénétisme), par effet de tourbillons engendrés sur une hétérogénéité de la roche
		Chenaux anastomosés ou en sillon	Section pluricentimétrique Présents sur les plafonds, planchers et parois	Dissolution par des écoulements sous pression rapides (souvent à l'interface roche-sédiments, par paragénétisme) pour les plafonds et parois Dissolution par écoulements libres et lents pour les planchers

Tableau I.1 : Récapitulatif des différentes formes endokarstiques façonnées par les écoulements et de l'information paléogéographique associée (d'après Renault, 1967 et 1970 ; Delannoy, 1981 ; Lismonde et Lagmani, 1987 ; Gilli, 1995 ; Slabe, 1995).

L'intérêt des formes de l'endokarst en tant que mémoire paléogéographique a pu être ici mis en avant. Le tableau I.1 recense ces formes et renvoie à l'indication paléogéographique correspondante. Les formations, ou dépôts *s.l.* constituent également des mémoires naturelles, leur intérêt propre est développé dans ce qui suit.

3. Les remplissages

Nous présentons rapidement ici les points forts des remplissages en tant qu'archives environnementales. L'intérêt de chacun de ces supports enregistreurs pour les reconstitutions environnementales sera ensuite développé.

a) Une diversité de mémoires naturelles protégées

Le karst renferme une grande diversité de dépôts qui ont fait l'objet de différentes classifications [Maire, 1982 ; Renault, 1987 ; Delannoy, 1981 et 1997 ; Le Fillatre, 2001]. Nous retiendrons ici celle de Quinif [1994], car elle trie les dépôts en fonction des processus à l'origine de leur formation : concrétions (précipitation chimique), accumulations de glace, dépôts d'origine biochimique ou anthropique, remplissages de nature détritique (photos I.2 à I.4). Ces derniers peuvent d'ailleurs être de composition variée allant des fragments de la roche encaissante (liés à des phénomènes de détente mécanique) [Maire, 1982 ; Campy, 1990] jusqu'aux sables et argiles parfois issus de sources plus lointaines [Bruxelles, 2001 ; Quinif, 2002 ; Camus, 2003]. Ces dépôts, qu'ils soient autochtones ou allochtones, renseignent par leur nature sur les conditions environnementales locales propices à leur développement. Il est maintenant clairement établi que les phases biostatiques (stabilité climatique durable permettant le développement d'une bonne couverture végétale), et les phases rhexistatiques (destruction du couvert végétal, pouvant avoir pour origine un déséquilibre climatique ou une perturbation anthropique importante) ne privilégient pas les mêmes accumulations de dépôts. Ainsi, les spéléothèmes se développent préférentiellement lors d'épisodes biostatiques, grâce à la présence de la couverture végétale qui assure un échange de CO₂. A l'inverse, les accumulations de sédiments détritiques sont plutôt constituées lors d'épisodes de rhexistatie, lorsque les sols sont soumis à une érosion plus importante [Maire, 1982 ; Quinif, 1994 ; Audra, 1995]. Chaque dépôt endokarstique renvoie donc vers une indication d'ordre climatique et environnementale (incluant ici le rôle de l'Homme), expliquant sa propre existence au sein du karst. Nous verrons plus loin que la constitution, l'élaboration de ces différentes mémoires naturelles (mécanismes et processus de croissance) informent encore plus finement sur les conditions climatiques et environnementales qui règnent au moment de leur édification, notamment à travers le régime hydrologique.

De plus, toutes ces archives présentent l'avantage d'être conservées, protégées par l'endokarst. Cet aspect est souvent évoqué pour justifier l'intérêt du karst pour les recherches paléoenvironnementales. C'est, en effet, un argument essentiel, qui donne à toutes les archives endokarstiques, y compris les formes et les vides, une valeur informationnelle particulièrement riche. La fonction protectrice du karst vis-à-vis des dépôts qu'il renferme est bien réelle, et permet une conservation parfois exceptionnelle des différentes archives au cours du temps [Delannoy, 1992].

Mais selon nous, cette notion de protection est double, voire ambiguë : il est évident que les archives endokarstiques ne sont pas « détériorées » par des phénomènes extérieurs. Seules des actions



Photo I.2 : Edifices stalagmitiques massifs de la salle de la Cathédrale - Grottes de Choranche (cliché Grottes de Choranche – Ed. Flash cartes).

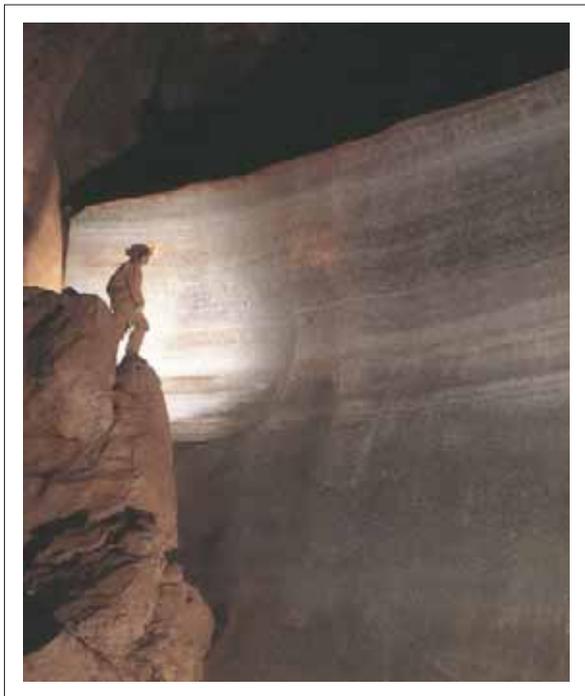


Photo I.3 : Accumulation de glace souterraine (cliché S. Caillault).

Photo I.4 : Accumulation détritique avec la trace d'un ancien chenal comblé – Grotte de St Marcel – Ardèche (cliché A.S. Perroux).



anthropiques agressives pour le milieu (destructions de concrétions, carrières...) sont susceptibles d'affecter notablement ou irrémédiablement l'endokarst. En cela, la fonction de protection attribuée au karst est pleinement justifiée. Mais on se trouve alors en contradiction avec la fonction mémoire environnementale du karst. Cette mémoire implique justement un enregistrement des modifications des conditions extérieures, qu'elles soient climatiques, environnementales ou anthropiques, *via* un impact sur l'évolution et le vieillissement du réseau karstique. Il y a donc un certain paradoxe sur cette propriété du milieu karstique. Loin de vouloir remettre en cause cette fonction de protection, nous souhaitons seulement montrer au lecteur que cette notion est à considérer avec précaution et discernement. Il est prudent d'en nuancer la portée et les effets. Aussi dans cette thèse, nous préférons plus souvent parler du rôle de « filtre » que joue le karst sur les différentes archives naturelles qu'il contient ; le terme de filtre nous paraissant en effet plus approprié et plus juste. Le karst a donc, de manière globale, un effet filtreur par rapport aux conditions environnementales et climatiques auxquelles il est soumis. Par contre, les zones de l'endokarst où les différents types de remplissages se forment ont, elles, une capacité d'intégration des données environnementales et climatiques apportées par les écoulements, grâce à la concentration des accumulations de matières en des points bien précis. Cela est vrai tant pour les remplissages détritiques que pour les spéléothèmes. Pour les formations contenues dans l'endokarst, et par rapport à la qualité de la mémoire environnementale qu'elles constituent, l'effet de filtre du karst dans sa totalité est atténué ponctuellement, localement, par un effet de concentration et d'intégration des dépôts. Ce pouvoir intégrateur des remplissages sera d'ailleurs plus longuement expliqué dans la présentation de notre recherche (cf. *infra* : Partie I, Chap. II).

b) Des informations environnementales combinées

Un autre point fort de l'endokarst est la présence concomitante d'archives contenant des informations différentes [Audra, 1995]. Cet « empilement » d'archives, ajouté aux connaissances que l'on peut tirer de chaque dépôt considéré indépendamment des autres, apporte des informations paléoclimatiques et paléoenvironnementales d'une longue portée chronologique. Cette succession de différentes archives endokarstiques n'est pas sans poser de problèmes. On sait que la mémoire environnementale de ces différents remplissages repose sur une accumulation de matières. Or, dans ce milieu naturel, l'apport de matière n'est ni régulier ni constant. Ainsi, selon l'évolution des écoulements, les enregistreurs endokarstiques pourront subir des interruptions d'accumulation (lacunes), voire même des départs de matière accumulée pouvant conduire jusqu'à l'effacement complet, localement, d'une phase d'évolution du réseau karstique. Mais le problème de la perte d'information peut se produire dans l'autre sens, lorsqu'une phase d'accumulation est de beaucoup plus grande ampleur que la phase précédente. Ainsi, comme c'est le cas dans les réseaux de l'Aven d'Orgnac, la phase de colmatage argileux est d'une telle ampleur (plusieurs mètres de remplissages argilo-limoneux) qu'elle masque tout ce qui est en dessous (phases de concrétionnement, effondrements de parois...) [Kaufmann, 2002].

Comme dans le cas des formes endokarstiques, l'information que l'on peut tirer de l'étude des remplissages se situe à différentes échelles : dans un dépôt pris isolément (étude de sa constitution propre, sur l'échelle de temps qu'il représente) et dans le même dépôt étudié par rapport à son environnement endokarstique plus ou moins immédiat (formes et formations voisines, d'où une échelle de temps plus longue, pouvant remonter à la genèse de tout ou partie du réseau karstique).

Pour illustrer ce jeu d'échelle, on peut reprendre l'exemple fréquemment cité d'une concrétion qui scelle une accumulation de sédiments détritiques (figure I.9). Sans faire une description détaillée

d'une telle disposition de témoins du passé dans l'endokarst, on peut tout de même en faire un rapide commentaire. L'accumulation sédimentaire peut livrer des éléments d'informations sur les dynamiques d'écoulement (granulométrie, chenaux, limites érosives...) et les sources de matières (composition des sédiments). De même, la concrétion sus-jacente possède sa propre histoire (laminations, interruption(s) de croissance...), et est de plus datable. L'empilement de ces deux dépôts informe sur deux états successifs de la portion du réseau karstique qui les contient. En l'occurrence, des écoulements libres déposent des sédiments selon au moins deux dynamiques différentes. On peut dire que la première est plus faible que la seconde à cause de la présence des chenaux et d'une limite érosive avec la seconde unité sédimentaire. Puis, on observe un arrêt de cette dynamique au profit d'infiltrations dans le karst fissuré, produisant du concrétionnement sur le remplissage de fines. La principale difficulté, devant une telle succession de dépôts, consiste à évaluer le temps qui s'est écoulé entre les phases de sédimentation et de concrétionnement ; et si aucune autre phase ne s'est intercalée, laissant peu ou pas de traces. Cette difficulté doit rendre prudente toute interprétation chronologique et informationnelle. Elle nécessite des recoupements avec d'autres sources d'informations issues de l'endokarst ou de l'exokarst.

Pour démontrer de façon plus complète l'intérêt des informations qui sont engrangées au sein d'une galerie endokarstique, nous avons imaginé un cas à la fois réaliste et le plus riche possible en éléments informationnels variés, détaillé et expliqué dans la figure I.10. Ce dessin se veut être une synthèse graphique ; il a pour but de regrouper les différentes mémoires endokarstiques, et de mettre en évidence la part d'histoire racontée par chaque archive et l'histoire plus longue, plus globale constituée par leur empilement, leur emboîtement (figure I.10). Des éléments présents dans cette figure de synthèse seront repris et développés dans la suite de ce chapitre (cf. *infra* : Partie I, Chap. I.5).

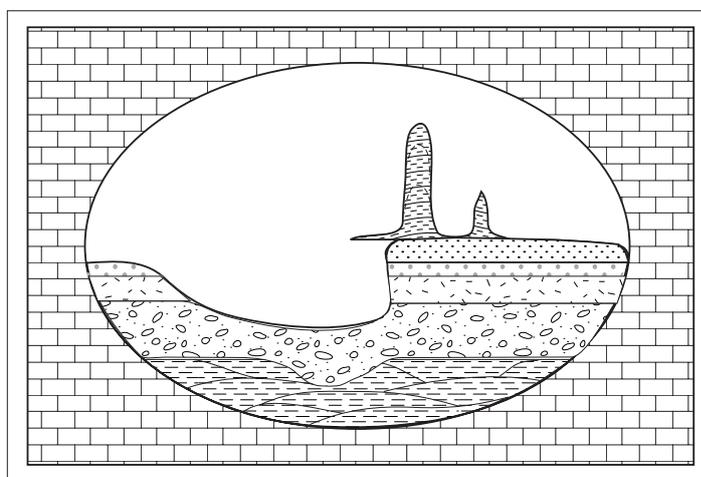


Figure I.9 : Exemple de mémoires naturelles de l'endokarst emboîtées (commentaire dans le texte).

A partir des observations faites sur le terrain, toutes les méthodes d'étude à disposition (cf. *infra* : Partie II, Chap. I) et notamment les datations, contribuent à préciser l'histoire des archives naturelles, pour elles-mêmes et pour l'ensemble d'un secteur avec tous les indicateurs qu'il renferme, y compris la morphologie des vides dont nous avons parlé plus haut. On peut également ajouter que tous les remplissages contenus dans un karst peuvent renfermer d'autres éléments complémentaires, de nature tout à fait différente, qui sont souvent de très bons indicateurs environnementaux. Ainsi, un dépôt endokarstique peut avoir piégé au cours de son édification des pollens, des charbons, de la microfaune, des fragments végétaux, des vestiges archéologiques... qui sont autant de compléments très précieux aux reconstitutions environnementales [Bastin, 1978 et 1982 ; Laville *et al.*, 1985 ; Morel, 1990 ; Pastre *et al.*, 1994 ; Perrette *et al.*, 1997a] (cf. *infra* : Partie I, Chap. I.5.b.3).

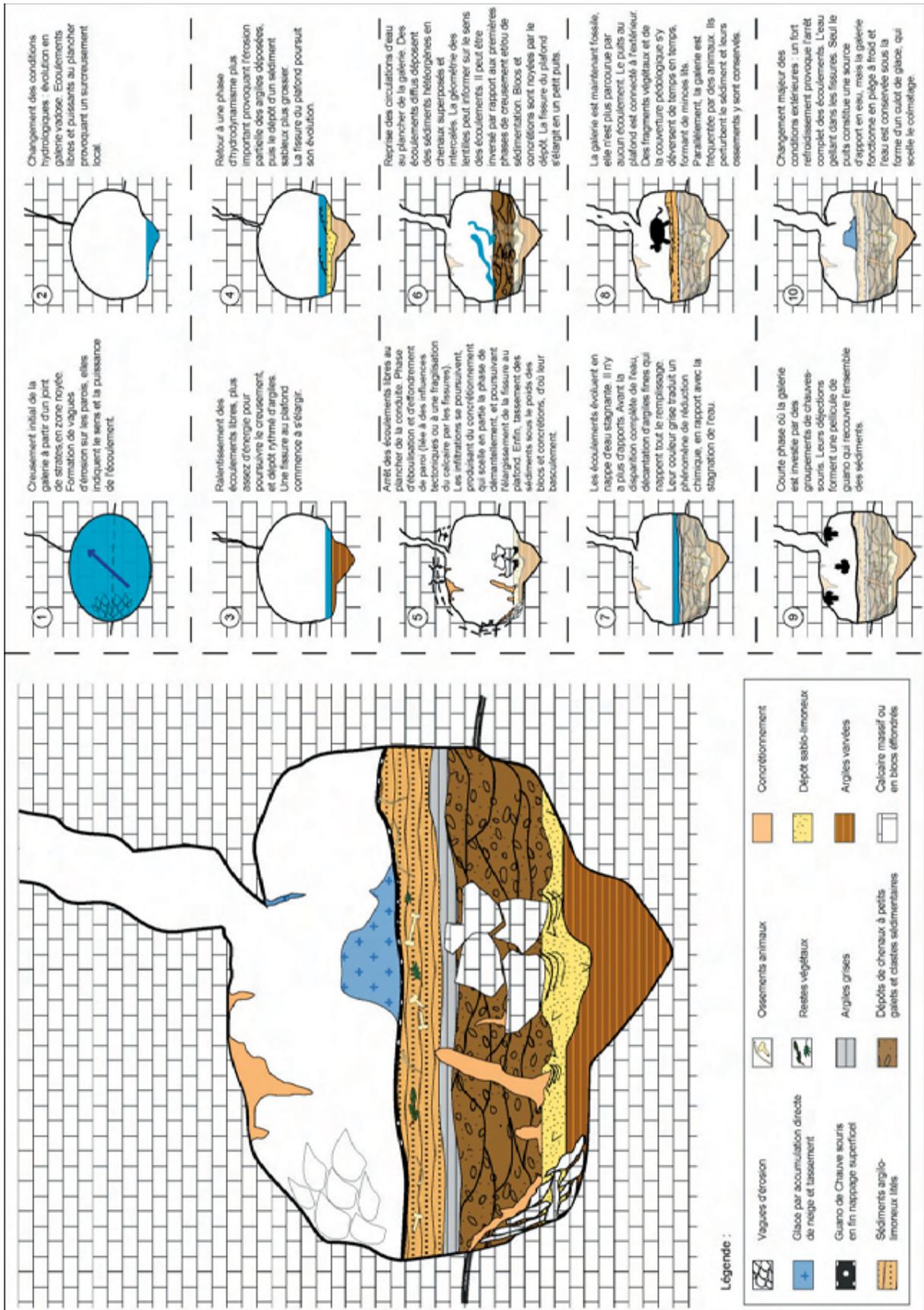


Figure I.10 : Une galerie « idéale » - synthèse graphique de la richesse informationnelle constituée par les dépôts endokarstiques.

Après cette présentation générale des différentes mémoires contenues dans l'endokarst et de leurs atouts et limites en tant que mémoire naturelle, nous allons nous centrer d'une manière plus détaillée sur les spéléothèmes tout d'abord, puis sur les formations détritiques. Le choix de cette dichotomie a été fait car elle illustre particulièrement bien la dissymétrie des travaux scientifiques (entre dépôts carbonatés d'origine chimique d'une part, et sédiments d'origine détritique d'autre part) mais aussi la différence dans les objectifs visés au départ, selon l'archive étudiée.

4. Les spéléothèmes : archive privilégiée des recherches environnementales

Dans ce point, nous verrons pourquoi et comment les concrétions sont devenues le dépôt endokarstique étudié par excellence pour les reconstitutions environnementales. Le développement des recherches ainsi que la diversité des méthodes à disposition seront rappelés.

a) Un dépôt souterrain naturellement favorisé

Dans l'inconscient collectif des spéléologues et des autres visiteurs du monde souterrain, les concrétions ont toujours occupé une place de choix. Le développement de l'activité touristique souterraine de masse a reposé, et repose encore aujourd'hui sur ces critères. Dans la plupart des cas, c'est le concrétionnement, gigantesque ou insolite dans ces formes, qui consacre la beauté d'une grotte et fait office d'attraction touristique [Gauchon, 1997 ; Salomon, 2000 ; Biot, 2003]. Même si cela a un caractère anecdotique, on ne peut exclure que cette perception du monde souterrain ait influencé l'initiation des recherches sur l'endokarst en tant que mémoire environnementale. C'est donc tout naturellement que bon nombre de travaux se sont orientés vers les spéléothèmes [Baker *et al.*, 1993 ; Baker *et al.*, 1998 ; Beynen *et al.*, 1997 ; Blanc, 1992 ; Dreybrodt, 1980 et 1988 ; Fairchild *et al.*, 2000 ; Ford, 1997 ; Genty, 1992 ; Genty *et al.*, 2003 ; Gewalt, 1980 ; Perrette, 1997b et 2000 ; Perrette *et al.*, 1997b ; Quinif, 1992 ; Quinif et Maire, 1989 ; Quinif *et al.*, 1994, Schwarcz *et al.*, 1976 ; Shopov *et al.*, 1994 ; Williams *et al.*, 2003...]. Pourtant, dès la fin des années 1950, les premiers travaux de recherches importants sur le domaine karstique concernaient plutôt les remplissages argileux [Cavaillé, 1960 ; Renault, 1967]. Si les spéléothèmes sont aujourd'hui plus largement étudiés, ils le sont surtout depuis les années 1970, notamment avec le développement des datations isotopiques.

Outre cette vision du monde souterrain, les concrétions présentent de nombreux avantages, qui en font des échantillons particulièrement aisés à manipuler : relative « facilité » de prélèvement, conservation des échantillons « à l'air libre », pas de problème de détérioration avec le temps... Ces aspects secondaires ont également pu contribuer au succès des spéléothèmes dans les recherches paléoenvironnementales menées sur le karst, même si c'est l'aspect « support » de datation qui a joué un rôle essentiel.

b) Les premières recherches : un enregistreur prometteur

Les premiers travaux menés sur ces dépôts d'origine chimique remontent à une trentaine d'années environ. Ils suivent de près l'important essor des explorations spéléologiques des années 1970, grâce aux progrès techniques [Schwarcz *et al.*, 1976 ; Gewalt, 1980 ; Renault, 1990a ; Quinif, 1994 ; Maire, 1995]. Initiées par les spéléologues scientifiques, ces recherches ont rapidement attirées d'autres spécialistes notamment en ce qui concerne les datations [Duplessy *et al.*, 1972, Winograd *et al.*, 1992 ;

Szabo *et al.*, 1994]. Très vite, la notion d'enregistreur endokarstique des fluctuations du climat s'installe, avec celle de filtre protecteur joué par le massif karstique, évoquée plus haut. A cela s'ajoute une donnée particulièrement attrayante : le karst est représenté sous tous les climats du globe. Le karst en tant que mémoire environnementale devient donc un dispositif très attractif pour tenter de mener une réflexion sur les climats de la Terre et leur(s) évolution(s) [Maire *et al.*, 1994 ; Salomon, 1997 ; Baker *et al.*, 1998 ; Drysdale *et al.*, 2004].

Différentes avancées scientifiques et techniques viennent conforter l'intérêt que les chercheurs portent au karst comme archive environnementale. Dans le cas précis des spéléothèmes, c'est avant tout le caractère datable de ces enregistreurs naturels qui a joué un rôle majeur dans le développement des recherches. Dès les années 1970, les premières datations de concrétions furent opérationnelles [Duplessy *et al.*, 1972] permettant de travailler sur les derniers 400 000 ans, grâce au rapport U/Th. Mais les isotopes de l'oxygène se révèlent également être un bon géochronomètre pour la calcite et les concrétions [Winograd *et al.*, 1992 ; Szabo *et al.*, 1994 ; Lauritzen, 1995]. Le fait de pouvoir disposer un cadre chronologique à la fois étendu et précis sur ses archives naturelles leur donna une valeur informationnelle très importante. Grâce aux datations, les recherches sur les reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques devenaient en effet beaucoup plus pertinentes et intéressantes ; l'évolution d'un système karstique pouvant être précisément resituée dans un contexte plus général. Avec la connaissance du cadre chronologique et environnemental, les processus responsables de telle ou telle formation dans l'endokarst devenaient également plus clairs, pouvant être analysés plus en détails. Peu après, la découverte des laminations et surtout l'explication de leur constitution augmentent encore le potentiel d'archivage de l'endokarst, révélant une qualité et une précision exceptionnelles à ces enregistreurs naturels. A travers ces découvertes, une première distinction s'opère entre stalactites et stalagmites : le fonctionnement hydrologique des premières donnant une archive moins fine, moins précise que les secondes, les études se tourneront presque exclusivement vers les stalagmites. Avec les lamines stalagmitiques, on se rend compte en effet que l'on peut atteindre un degré de résolution temporelle très élevé, avec deux à quatre lamines annuelles (figure I.11) [Dreybrodt, 1980 et 1981 ; Genty, 1993 et 1994 ; Quinif *et al.*, 1994 ; Baker *et al.*, 1998 ; Perrette, 1999]. Le karst devient alors le siège d'archives naturelles fonctionnant à très haute résolution, et clairement positionnées du point de vue chronologique.

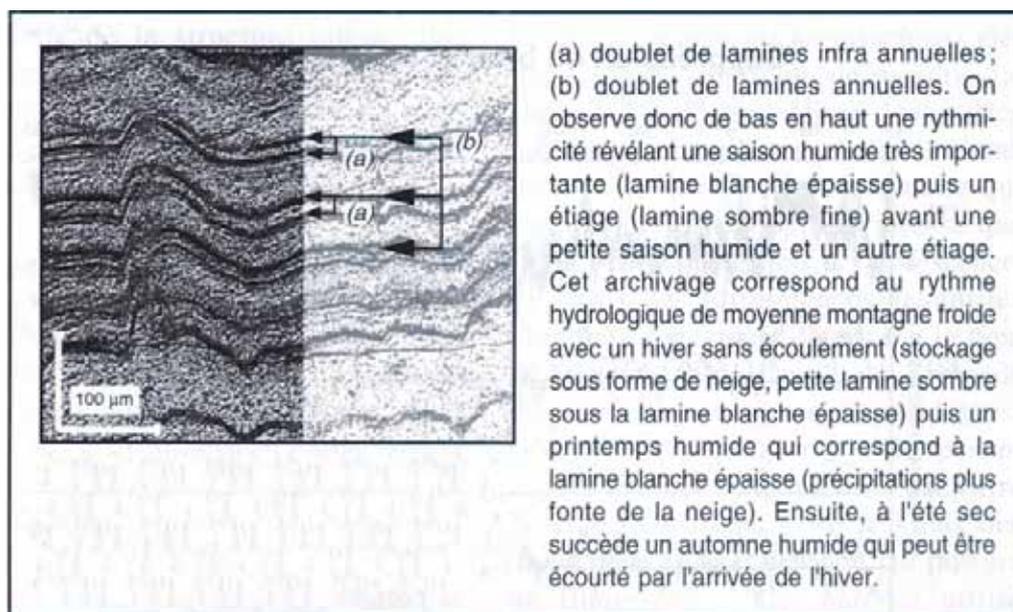


Figure I.11 : Lamination infra-annuelle dans un spéléothème du Vercors (d'après Perrette, 1999).

Peu à peu, devant la richesse d'informations environnementales que recèlent les spéléothèmes, la communauté internationale des chercheurs se tourne vers les autres types de remplissages de l'endokarst, et notamment les dépôts d'origine détritique. Il apparaît alors indispensable de faire une étude exhaustive de tous ces remplissages, afin d'éprouver le contenu informationnel de chacun d'eux et de réfléchir sur la validité spatiale qu'il convient de leur accorder [Perrette, 1998 ; Maire *et al.*, 2000]. A une échelle plus locale, et dans le but de concentrer et mieux gérer ces recherches, le GDR 440 du CNRS intitulé « Enregistrement à haute résolution de l'environnement dans les dépôts laminés karstiques » est créé en 1994 et regroupe des chercheurs aux spécialités complémentaires. L'objectif général de ce GDR est « ... de fédérer les recherches de pointe actuellement menées en France, mais également en Belgique et en Italie, sur l'analyse à haute résolution des dépôts souterrains rythmés : les concrétionnements (ou spéléothèmes) et les dépôts détritiques laminés et varvés¹... » [Maire *et al.*, 2000]. Au-delà du GDR, la communauté des chercheurs a également à cœur de travailler sur ces dépôts partout sur le globe en vue de comparaisons sur leur fonctionnement propre sous différents climats, et des différents karsts les renfermant. Ces objectifs, ont également conduit à la mise en place d'un certain nombre de laboratoires souterrains, qui permettent le suivi en temps réel de l'évolution des cavités et de leurs dépôts carbonatés (Laboratoire souterrain de Moulis – Ariège, Grottes de Choranche – Vercors, Grotte de Han sur Lesse - Belgique, Grotte de Villars - Dordogne).

c) Une diversité des méthodes d'étude disponibles

L'étude des concrétions bénéficie d'un large panel de méthodes de recherche, qui n'a pas cessé de s'étoffer depuis les premiers travaux. De nombreuses techniques ont été développées autour des spéléothèmes [Smart et Richards, 2003].

Il y a, tout d'abord, les méthodes d'étude qui portent directement sur les concrétions elles-mêmes. Une des premières approches à être abondamment développée concerne les datations par la méthode dite U/Th [Duplessy *et al.*, 1972 ; Quinif, 1989a]. Nous rappelons simplement que cette désintégration d'²³⁸U et ²³⁴U en ²³⁰Th permet de dater les spéléothèmes entre quelques milliers d'années et 350 000 à 400 000 ans, limite maximale imposée par la demi-vie du ²³⁰Th. Les isotopes 238 et 234 de l'uranium sont les seuls éléments de la famille radioactive à être transportés au sein du karst, dans les eaux d'infiltration (figure I.12). L'uranium précipite avec la calcite au moment du concrétionnement. Il entame alors sa désintégration et produit un descendant insoluble, le thorium. La teneur en ²³⁰Th est donc fonction de l'âge de la stalagmite [Gewelt, 1985 ; Cantillana *et al.*, 1986 ; Delannoy *et al.*, 1986 ; Quinif, 1990 ; Quinif *et al.*, 1994]. D'autres méthodes de datation sont utilisées comme le ¹⁴C. Les applications sont variées et s'étendent aux travertins et aux matières organiques [Quinif, 1988 ; Delannoy *et al.*, 1989 ; Diaz del Olmo *et al.*, 1997 ; Genty *et al.*, 1998] mais la portée chronologique est bien moindre [Quinif *et al.*, 1994]. Enfin, d'autres rapports isotopiques [Bosak, 2003] peuvent être mesurés dans les stalagmites (²H/¹H, ¹³C/¹²C, ¹⁸O/¹⁶O, ²²⁶Ra/²¹⁰Pb...), ils fournissent des informations non plus purement chronologiques, mais de nature paléoclimatique [Gewelt, 1985 ; Winograd *et al.*, 1992 ; Quinif *et al.*, 1994 ; Verheyden *et al.*, 1999 ; Almogi-Labin *et al.*, 2003 ; Condomines, 2003 ; Williams *et al.*, 2003 ; Drysdale *et al.*, 2004 ; Genty *et al.*, 2004].

¹ En effet, on fait une différence entre lamines et varves, ces deux organisations internes à un sédiment donné n'ont pas du tout la même signification quant au rythme de fonctionnement, de croissance de l'archive considéré. Typiquement, les varves sont un dépôt lacustre finement lité, dont l'origine s'explique par un contrôle saisonnier du débit des cours d'eau lié à la fonte des glaciers. Cette périodicité est utilisée comme moyen de datation. Par extension, on nomme souvent varves tout dépôt feuilleté dont la sédimentation est commandée par le rythme des saisons. A l'inverse, le terme de lamine –on parle parfois aussi de « fausses varves »- évoque simplement la disposition des constituants d'un sédiment en fines lames, disposition qui peut avoir des causes variées. Les varves, avec leur rythme saisonnier, sont un cas particulier de lamines [Foucault A. et Raoult J.-F. – 1995 -*Dictionnaire de Géologie* - Ed. Masson, 4^{ème} mise à jour, 324 pages].

On peut également mentionner la technique du comptage des lamines, plus simple (observation au microscope pouvant également être assistée par ordinateur), qui permet aussi dans certains cas de positionner un cadre chronologique, au moins relatif [Baker et Smart, 1995 ; Genty, 1992 ; Baker *et al.*, 1998]. Ainsi, avec cette technique de comptage de lamines, un âge approximatif a pu être établi pour la partie sommitale d'une concrétion des Grottes de Choranche (Vercors), encore active au moment de son prélèvement. Cette concrétion comporte un niveau très riche en charbons. L'âge de ce niveau à charbons, évalué par comptage des lamines de calcite à la fin du XIX^{ème} siècle, s'est révélé en bonne concordance avec la période d'activité charbonnière qui fut présente sur le plateau sus-jacent aux grottes autour des années 1890 [Perrette *et al.*, 1997a]. Par ce type de calage, c'est également la question des taux de croissance des stalagmites qui est abordée. En l'occurrence, la portion de concrétion étudiée donne des taux de croissance compris entre 0,08 et 0,14 mm/an. Les niveaux à charbons renvoient un taux de croissance intermédiaire de 0,1 mm/an [Perrette *et al.*, 1997a].

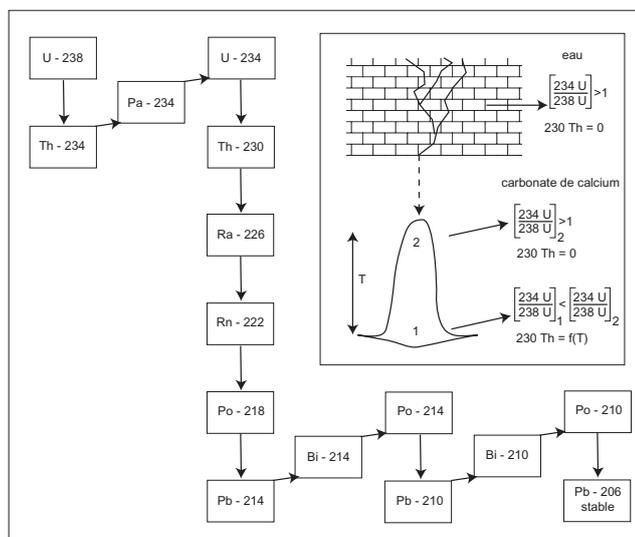


Figure I.12 : Famille radioactive de ^{238}U et comportement géochimique des éléments ^{238}U , ^{234}U et ^{230}Th dans les eaux de percolation et les stalagmites (d'après Quinif, 1990).

D'autres techniques sont employées à l'étude de la structure interne des stalagmites. Sans chercher à les expliciter en détail – ce n'est pas l'objet de ce manuscrit – nous les citons seulement pour illustrer la diversité des moyens d'étude. Pour plus d'informations, le lecteur pourra se reporter aux différentes sources bibliographiques citées. Les méthodes optiques sont nombreuses, depuis le microscope qui permet l'étude des fabriques cristallines [Genty, 1993 ; Quinif *et al.*, 1994 ; Perrette, 2000], aux techniques de traitement d'images, de fluorescence et réflectance par laser, par rayonnement X, ou encore par spectrométrie (figure I.13). Ces dernières permettent une étude « en continu » des concrétions, en produisant un signal d'évolution de l'échantillon, sur une variable en particulier, au cours du temps. C'est grâce à ces méthodes, et aux traitements mathématiques qui en découlent, que l'on a pu montrer l'enregistrement de ruptures et de cycles climatiques au sein des stalagmites [Shopov *et al.*, 1994 ; Perrette, 1999 et 2000 ; Perrette *et al.* 1997b et 1999 ; Frisia *et al.*, 2003 ; Shopov, 2003]. L'étude des inclusions fluides et de leur contenu contribue également à augmenter les connaissances sur la structure interne des stalagmites, ainsi que sur l'influence climatique qui est intervenue en amont [Schwarcz *et al.*, 1976 ; Genty *et al.*, 2003].

Enfin, le contenu des spéléothèmes a également suscité le développement de méthodes connexes comme l'étude des éléments traces et des acides humiques et fulviques en rapport avec les sols sus-jacents aux sites étudiés [Yang, 1994 ; Fairchild, 2000 ; Nordhoff *et al.*, 2003] et l'étude des

pollens et charbons piégés par la calcite [Bastin, 1978 et 1982 ; Quinif et Deflandre, 1990 ; Perrette *et al.*, 1997a ; Maire *et al.*, 2000]. D'autre part, les recherches sur des concrétions « modernes » ont permis de faire un parallèle plus fin avec les données météorologiques correspondantes. Il en ressort une meilleure compréhension du fonctionnement des spéléothèmes, et on a pu aborder ainsi l'impact anthropique au sein de ces archives [Genty, 1992 et 1994a]. Toujours dans le souci de mieux cerner la dynamique de croissance des spéléothèmes, des travaux sont menés sur les modalités de l'alimentation en eau, tant quantitative (propriétés physiques) que qualitative (propriétés chimiques) en laboratoire mais aussi dans les grottes (figure I.14) étudiées de façon permanente (laboratoires souterrains cités plus haut) [Buhmann et Dreybrodt, 1985a et 1985b ; Mangin, 1981 et 1984 ; Perrette, 1999 ; Delannoy *et al.*, 1999a].

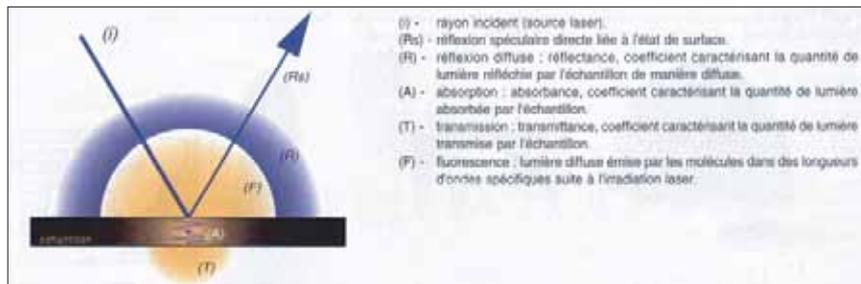


Figure I.13 : Les différentes émissions de lumière d'un spéléothème en réponse à une excitation par source laser (d'après Perrette, 1999).

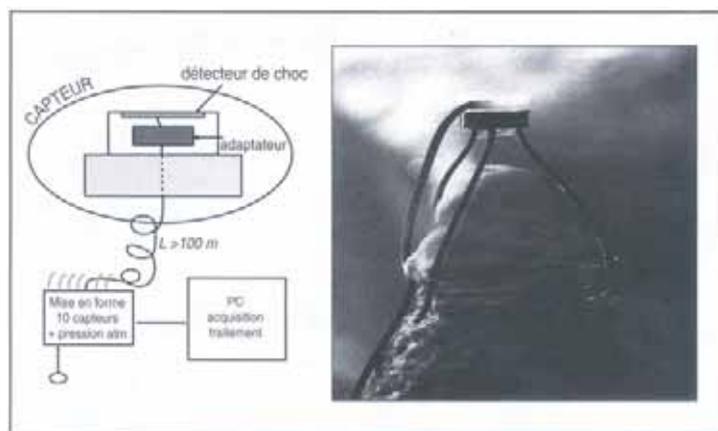


Figure I.14 : Dispositif expérimental permettant de mesurer le régime hydrologique des concrétions dans les grottes de Choranche (d'après Perrette, 1999).

5. Vers une étude des autres mémoires endokarstiques

L'objectif de ce point est de faire l'inventaire des autres dépôts endokarstiques, ayant vocation d'enregistreurs naturels. Nous en ferons une présentation exhaustive, avec les points forts et les points faibles de chaque type de remplissage considéré en tant qu'archive environnementale. Tout en nous rapprochant des dépôts qui sont au centre de notre propre recherche, les moyens d'étude seront évoqués, mais nous insisterons surtout sur le fort potentiel d'informations totalisé par toutes ses archives, et leur place stratégique dans le contexte général des recherches sur les paléoclimats et les paléoenvironnements.

a) Des enregistreurs potentiels nombreux

Même si ces dépôts ont fait l'objet des toutes premières études endokarstiques [Cavaillé, 1960 ; Renault, 1967 et 1970], ils ont été depuis délaissés et assez peu étudiés, comparativement à la masse

considérable des travaux sur les spéléothèmes. Les dépôts non carbonatés sont pourtant abondants dans l'endokarst. Les différents exercices de classification des dépôts endokarstiques qui ont été proposés par un certain nombre d'auteurs en attestent [Maire, 1982 ; Renault, 1987 ; Quinif, 1994 ; Delannoy, 1997 ; Le Fillatre, 2001]. Nous les reprenons ici en fonction de leur processus originel.

1. Dépôts d'origine biologique

Ils comprennent les débris végétaux, organiques (humus, phosphates, guano) et une partie des vestiges archéologiques (ossements, fossiles) [Clottes, 2001]. Les dépôts végétaux sont la plupart du temps des fragments de bois. Ils peuvent être bien conservés et présentent dès lors l'avantage de pouvoir être identifiés et datés avec le ^{14}C [Ruiz Bustos, 1997 ; Briffa, 2000 ; Carcaillet, 2001]. Les dépôts organiques peuvent subir des processus chimiques de dégradation et donner des oxydes, des nitrates, des phosphates [Renault, 1987 ; Quinif, 1994]. La plupart du temps, ce sont des marqueurs ponctuels, piégés et/ou transformés au sein d'un remplissage plus massif (figure I.10 ; photo I.5).

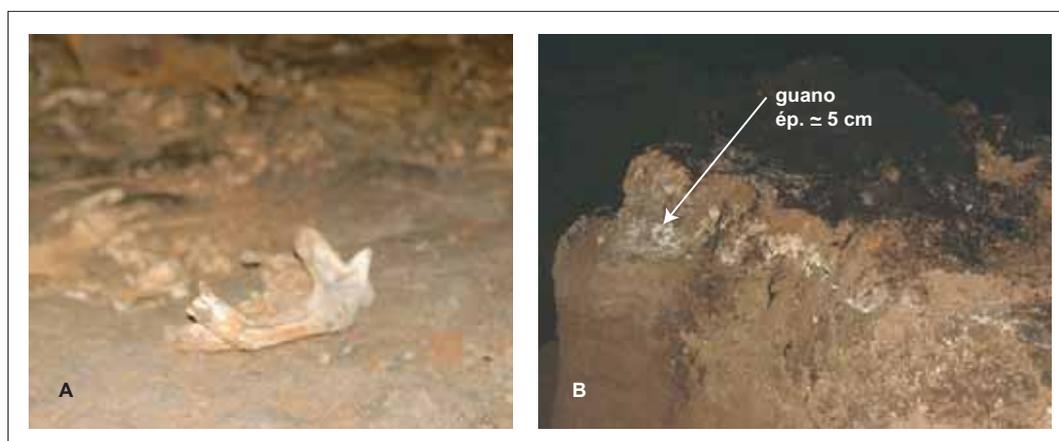


Photo I.5 : Exemples de dépôts d'origine biologique. A : ossements – Grotte Chauvet – Ardèche, B : guano nappant un remplissage – Grotte de St Marcel – Ardèche (clichés A.S. Perroux).

Les restes d'animaux peuvent également être très variés. Cela va des ossements d'ours aux restes de petits rongeurs. Leur identification paléontologique et leur datation (^{14}C sur le collagène des os) est une source de renseignements très pointus sur l'environnement de la cavité à un moment donné à savoir le climat ambiant et le couvert végétal *via* le régime alimentaire des espèces identifiées [Philippe et Fosse in Clottes *et al.*, 2001 ; Cregut et Fosse, 2001 ; Bocherens *et al.*, 2003 ; Drucker *et al.*, 2003]. La microfaune aquatique est également ici un indicateur environnemental. Les coquilles présentes dans un sédiment peuvent permettre, par l'identification de l'espèce, de remonter à la qualité des eaux circulant dans le karst [Vervier *et al.*, 1991 ; Ferreira *et al.*, 2003 ; Bichain *et al.*, 2004].

Ces dépôts ont donc des origines très diverses. Mais en règle générale, leur nature même ainsi que leur disposition au sein d'un remplissage endokarstique en font des indicateurs précieux sur l'histoire climatique de la cavité correspondante et sur les fréquentations, animales ou humaines, auxquelles elle a pu être soumise [Morel, 1990]. Pour la conservation de ces types de dépôts, la fonction protectrice du karst évoquée plus haut (pas d'érosion, pas de lumière...) est un atout majeur.

2. Dépôts d'origine physique

Par souci d'exhaustivité, cette rubrique permet de traiter des accumulations de glace souterraine. La glace souterraine est rarement incluse dans les différents essais de classification des

dépôts endokarstiques. Seul Maire [1980 et 1982] en parle, en les incluant dans les dépôts d'origine détritique. Ces accumulations de glace ne sont pourtant pas issues d'une dégradation d'un matériau préexistant¹, mais sont liées à un changement d'état de l'eau dans une grotte, le plus souvent de liquide à solide (rarement de l'état gazeux à l'état solide pour des glaciers de haute altitude). C'est donc bien un mécanisme physique qui est responsable de ce type de dépôt et c'est pourquoi nous en faisons une rubrique différente.

Les glaciers souterrains, préférentiellement situés dans des karsts d'altitude, ont surtout été étudiés en tant que piège à froid et pour la structure laminée des culots de glace (photo I.6) [Racovita, 1972 ; Maire, 1976 et 1980 ; Lismonde *et al.*, 1999]. Les cavités englacées se sont révélées être de bons indicateurs climatiques (figure I.10). Elles sont le plus souvent étudiées par des mesures *in situ* (températures, courants d'air) [Lismonde *et al.*, 1999 ; Perroux, 2000 et 2001, Luetscher *et al.*, 2003], l'échantillonnage de glace et la conservation des échantillons étant problématiques. Pour tout prélèvement de glace, il y a en effet un risque de fusion impliquant une destruction plus ou moins partielle de la lamination (lamine d'été fine et riche en particules/lamine d'hiver plus épaisse et plus pure), et de là, des problèmes de contamination entre lamines dont les compositions se mélangent [Perroux, 1999]. De plus, la conservation intrinsèque des glaciers, notamment à des altitudes moyennes, est bien mise à mal depuis les dernières décennies, à cause du réchauffement actuel [Hobléa, 1999]. Les spéléologues s'accordent à dire que nombre de premières explorations ces dernières années ont été rendues possibles par la disparition de bouchons de glace.

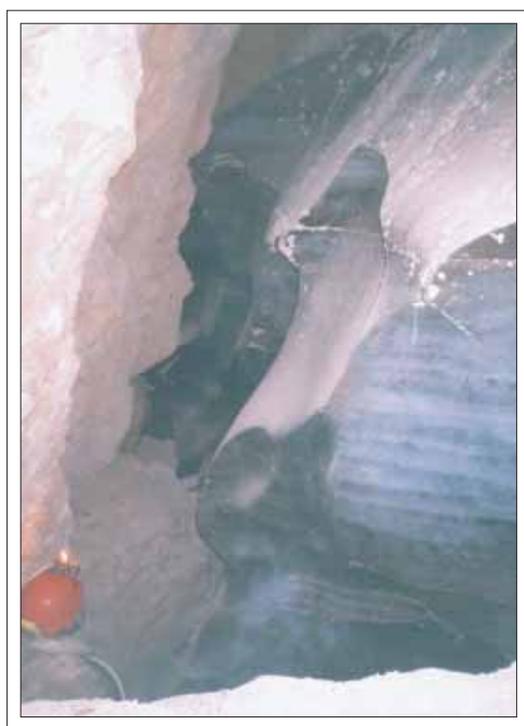


Photo I.6 : Détail d'une accumulation de glace souterraine où la lamination est visible – Glacière d'Autrans – Vercors (cliché A.S. Perroux).

La glace souterraine présente un potentiel très intéressant pour des études environnementales. Si les techniques de prélèvement sont complexes, elles sont bien maîtrisées par les glaciologues. L'analyse d'une carotte de glace souterraine, par le dosage des métaux lourds contenus pourrait apporter

¹ En effet, le détritisme sous-entend la dégradation d'une roche préexistante. Il s'agit de la définition géologique du détritisme donnée dans [Foucault A. et Raoult J.-F. – 1995 -*Dictionnaire de Géologie* - Ed. Masson, 4^{ème} mise à jour, 324 pages]. Ce n'est pas le cas de la glace souterraine, qui doit plutôt être considérée comme une construction (transformation de l'eau en glace) que comme une dégradation.

des informations de premier intérêt sur l'impact des activités humaines sur le milieu environnant, et en particulier le karst. Le dosage des métaux lourds dans la glace est une technique d'étude environnementale largement utilisée par les glaciologues et ce sur des carottes de glace de toutes les régions du globe [Van de Velde *et al.*, 1998 ; Ferrari *et al.*, 2001 ; Ferrari *et al.*, 2002 ; Boutron *et al.*, 2004]. Ainsi, sur des calottes glaciaires andines (volcan du Sajama, Bolivie), l'étude de ces métaux permet de voir différentes évolutions : l'étude du Bismuth relate l'histoire des éruptions volcaniques de ce secteur des Andes, mais on peut aussi travailler sur l'histoire de l'exploitation des mines d'Or, depuis le XVI^{ème} siècle [Ferrari *et al.*, 2001]. En effet, c'est une méthode de travail tout à fait pertinente dans la mesure où les métaux lourds sont de bons traceurs de l'ensemble des évolutions environnementales extérieures. A titre d'exemple, on citera le bismuth (Bi) comme traceur de l'activité volcanique, l'aluminium (Al) comme traceur des aérosols continentaux, le plomb (Pb), le césium (Cs), le zinc (Zn) et le mercure (Hg), comme traceurs spécifiques des émissions industrielles, et notamment nucléaires pour Pb et Cs [Perroux, 1999]. On pourrait donc envisager une étude de ces traceurs dans la glace souterraine. De telles mesures pourraient permettre :

- de comparer la quantité de métaux lourds entre glace souterraine et glaciers alpins ;
- d'en déduire ainsi une réflexion plus détaillée, et si possible quantitative du rôle de filtre du karst ;
- de réfléchir sur les problèmes de conservation de la glace endokarstique, liés aux risques de fonte estivale plus ou moins marquée ;
- de produire, au final une interprétation des mesures en terme d'évolution environnementale.

Sur la possibilité de proposer des reconstitutions à caractère environnemental, il faut préciser ici que la glace souterraine est une archive fonctionnant sur une échelle temporelle non seulement récente, mais surtout plus courte que l'ensemble des autres mémoires endokarstiques dont il est question dans ce chapitre. C'est d'une mémoire sub-actuelle qu'il s'agit ici, mais dont la résolution peut être considérée comme élevée avec deux lamines par an (saison froide/saison chaude). On peut toutefois signaler qu'il existe quelques travaux sur les karsts alpins et jurassiens dans lesquels la pénétration temporaire des glaciers continentaux sous terre, lors de maxima glaciaires au cours du Quaternaire, a pu être mise en évidence par des remplissages particuliers [Jeannin, 1991 ; Audra *et al.* 1993 ; Sbaï *et al.*, 1995 ; Bini *et al.*, 1998 ; Lignier, 2001 ; Lignier et Desmet, 2002]. On se trouve alors dans un cas un peu marginal de glace « souterraine », d'une portée chronologique plus lointaine, et tout à fait pertinente du point de vue des paléoenvironnements du Quaternaire alpin et sub-alpin.

3. Dépôts d'origine détritique

Ces dépôts sont de nature et d'origine beaucoup plus variées [Choppy, 1988 ; Ek et Quinif, 1988 ; Quinif, 1994 ; Delannoy, 1997 ; Le Fillatre, 2001]. Ils se distinguent selon deux grandes catégories qui sont d'une part, les dépôts détritiques gravitaires, d'origine autochtone car ils sont le produit d'évolutions *in situ* des réseaux karstiques ; et d'autre part, les sédiments détritiques transportés par les eaux dont la source peut être plus ou moins distante du karst qui les a piégés (dépôts pouvant être aussi bien autochtones qu'allochtones), en fonction du contexte géologique, géomorphologique et climatique [Maire, 1982 ; Renault, 1987].

La première catégorie rassemble des dépôts d'éboulement, d'effondrement de voûte gravitaire, ou de dissolution (photo I.7). Ce sont des éléments provenant de la destruction de la roche encaissante, liée à un déséquilibre mécanique, leur taille va des fragments centimétriques aux gros blocs

plurimétriques. Ces dépôts issus du démantèlement du réseau karstique traduisent le plus souvent un épisode ponctuel dans l'histoire de la karstogenèse. Un déséquilibre mécanique peut avoir la tectonique (secousses sismiques) comme origine. Néanmoins, la détente mécanique est la cause principale de ces chutes de blocs. De tels rééquilibrages de la voûte s'observent parfois très bien, c'est le cas dans l'aven d'Orgnac, en Ardèche, et notamment dans la partie touristique qui comprend l'aven s.s. Mais les dépôts gravitaires peuvent aussi être beaucoup plus fins, comme par exemple les argiles de décalcification, issues de la dissolution des carbonates dans la roche calcaire encaissante, soit à l'interface roche-air, soit au niveau de micro-fissures. Dans ce cas précis, malgré le rôle de l'eau, on considère tout de même ce type d'argiles comme un dépôt autochtone, dans la mesure où la source de matière est le karst lui-même et où le transport est quasi-nul [Delannoy *et al.*, 2004]. Enfin, cette première catégorie de dépôts gravitaires comprend aussi des sables et argiles ayant transité *via* le réseau de fentes. Ces dépôts fins sont parfois qualifiés de sédiments parautochtones [Quinif, 1994] ; ce qui sous-entend que leur origine n'est pas strictement cantonnée à l'endokarst. En effet, il peut s'agir des argiles de décalcification mentionnées plus haut comme de clastes provenant de la surface, ou encore de débris de desquamation [Delannoy, 1992]. Les deux origines de matière sont possibles ; il est important de les distinguer car elles ne traduisent pas du tout les mêmes processus de transport et de mise en place et renvoient donc à des conditions environnementales différentes.



Photo I.7 : Vue d'un dépôt détritique d'origine gravitaire (cliché J.J. Delannoy).

Les dépôts transportés par les écoulements constituent la seconde catégorie de remplissages détritiques. Elle regroupe tous les matériaux issus de l'érosion extérieure, susceptibles d'être transportés dans le karst par la circulation de l'eau (photo I.8). Ils ont donc une origine « fluviatile » et sont dépendants des circulations d'eau souterraines. Les tailles granulométriques qui en découlent sont plus restreintes que dans la première catégorie : des argiles aux sables, et plus rarement, des galets. L'étude de ces dépôts et de leur disposition relative par rapport aux autres renseigne sur les conditions de genèse et d'évolution de la cavité. Associés à une étude des vides qui les contiennent (fonction de piégeage des sédiments), les dépôts détritiques allochtones sont de précieux enregistreurs de l'hydrodynamisme de la cavité, et des paléoenvironnements correspondants [Delannoy *et al.*, 1988 ; Kervazo et Laville, 1988 ; Camus, 2003]. Pour ces dépôts en particulier, il convient de préciser que leur accumulation à un endroit donné du réseau karstique n'est pas forcément définitive. Selon l'évolution des écoulements, une accumulation détritique peut en effet être remobilisée, partiellement ou totalement, jusqu'à un autre

point d'accumulation plus à l'aval du système. En termes d'indicateurs environnementaux, les dépôts détritiques fins sont donc en étroit rapport avec les circulations souterraines, tant à l'échelle du massif karstique qu'à l'échelle du réseau lui-même (figure I.10). L'eau joue un rôle de transfert de matières entre l'extérieur et le karst, mais aussi entre l'amont et l'aval du système de drainage. De plus, les sédiments remobilisés peuvent alors subir des modifications de structure et de forme. C'est ainsi qu'on peut retrouver des clastes et autres galets d'argiles ou même de calcaire, qui expriment un démantèlement partiel des remplissages (voire de l'encaissant) et/ou un faible transport. Les dépôts remobilisés peuvent donc être distingués des sédiments venus directement de l'extérieur. Cela illustre la complexité, du point de vue de la logique d'accumulation, des dépôts que l'on peut trouver piégés dans l'endokarst. Enfin, les dépôts détritiques seront différents selon que l'on a affaire à des systèmes karstiques unaires ou binaires. En effet, les flux, les apports, ne sont pas les mêmes pour ces deux grands types de systèmes. Le karst binaire, dont l'organisation est plus proche de celle d'une rivière a une plus grande dissipation d'énergie dans ses écoulements. Les flux de matière y sont en général plutôt grossiers (cela dépend de la nature lithologique du bassin versant). A l'inverse, les systèmes unaires ont une hiérarchisation plus complexe qui permet un transport privilégiant les particules sédimentaires les plus fines. Ces deux grands types de systèmes karstiques peuvent donc également induire leur propre dynamique, pour ce qui concerne les flux détritiques.

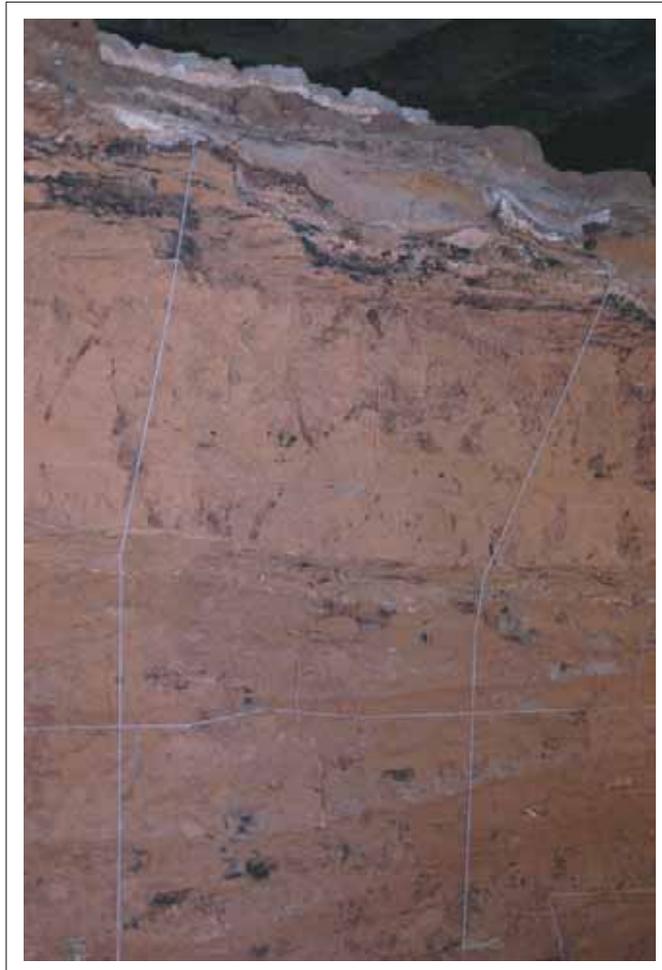


Photo I.8 : Vue en coupe d'un remplissage détritique d'origine « fluviale » – Grotte Chauvet – Ardèche (cliché A.S. Perroux).

La fonction mémoire de ces différents dépôts détritiques s'exprime à plusieurs niveaux. Tout d'abord, un type de dépôt considéré isolément permet de remonter vers sa dynamique de mise en place et son piégeage au sein du karst. Sur l'ensemble d'un remplissage constitué de différents sédiments

détritiques, l'étude de chaque unité sédimentaire identifiée, mais aussi de chaque limite entre unités (limites érosives, chenaux, lentilles...) autorise alors la reconstitution des processus de sédimentation qui ont agi successivement et ont participé à la karstogenèse de la cavité. Ces processus étant révélateurs de conditions climatiques et environnementales plus larges qu'au niveau du réseau karstique seul, on peut donc produire des interprétations sur les évolutions climatiques et environnementales, au moins à l'échelle de tout le massif karstifié (figure I.10) [Delannoy, 1981 ; Debard, 1988; Ferrier, 1988 ; Audra, 1994 ; Quinif et Maire, 1998 ; Vanara, 2000 ; Camus, 2003 ; Losson, 2003]. C'est là la principale qualité des remplissages détritiques en tant que mémoire environnementale et climatique. L'intérêt informationnel de chaque type de dépôt détritique sera présenté plus concrètement et de manière plus détaillée dans le point suivant. Ces dépôts peuvent s'avérer précieux dans d'autres cas de figures, comme par exemple leur rôle de protection, notamment dans le cas de karsts décapités. En protégeant le concrétionnement enfoui, ils permettent la conservation de celui-ci, malgré la disparition des réseaux karstiques. Ces remplissages et leur contenu (concrétions mais aussi altérations spécifiques au domaine souterrain) sont alors les seuls témoins de l'existence d'un karst [Bruxelles, 2001]. Enfin, les remplissages détritiques fins, en connexion étroite avec l'état du couvert végétal sus-jacent, sont des indicateurs précieux du degré d'érosion. Aussi, lorsque l'on a affaire à des remplissages récents et actuels, cette mémoire endokarstique est une très bonne mesure des impacts humains sur le milieu naturel (déforestation, agriculture massive...) [Delannoy, 1985 et 1986b].

En outre, nous tenons à souligner que parmi l'ensemble des dépôts endokarstiques (spéléothèmes exclus) présentés ici selon leur origine biologique, physique et détritique, les dépôts détritiques offrent une grande échelle de temps. Dans un objectif de reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques, cette portée chronologique des enregistreurs naturels n'est pas négligeable.

b) L'étude des dépôts détritiques *s.l.*

Bien que les recherches sur les spéléothèmes occupent le devant de la scène, des travaux sur les dépôts détritiques sont toutefois engagés. Comme nous l'avons dit plus haut, ces archives ont été très tôt étudiées, dès la fin des années 1950 [Cavaillé, 1960 ; Renault, 1967 ; Maire 1976]. Les chercheurs et spéléologues se sont consacrés à leur étude en premier lieu par rapport à leur rôle dans la spéléogenèse. Puis assez rapidement, les recherches et fouilles archéologiques ont amené de nouveaux travaux sur ces remplissages [Ferrier et Leblanc, 1990 ; Sordoillet, 1999]. Certaines accumulations riches en vestiges peuvent en effet être de premier intérêt en ce qui concerne les occupations animales et humaines de porches et d'abris sous roches [Clottes *et al.*, 2001 ; Debard *et al.*, 2002]. En bonne logique, les questionnements relatifs aux paléoenvironnements régionaux sont vite apparus ; ce qui a donné lieu à une production régulière de travaux sur ces thèmes, sur différentes régions karstiques [Maire, 1976 ; Audra, 1994 ; Hobléa, 1999 ; Jaillet, 2000 ; Bruxelles, 2001 ; Camus, 2003 ; Piccini *et al.*, 2003]. Au fur et à mesure de ces différents travaux, des méthodes connexes viennent augmenter le contenu informationnel, la richesse de ces dépôts.

1. Les recherches sur la spéléogenèse

La spéléogenèse, la compréhension de la formation des cavités a été l'amorce des nombreuses études menées sur les dépôts détritiques endokarstiques. Dès la fin des années 1950, les dépôts détritiques souterrains sont étudiés de près, et ce afin de comprendre leur présence (identification et provenance des argiles) et leurs interactions éventuelles avec le karst et son évolution (cas typique des

galeries paragénetiques). Les travaux de A. Cavaillé [1960] et P. Renault [1967, 1970] sont sans doute les premiers et les plus complets sur ces questions. On peut d'ailleurs noter que les questionnements sur les remplissages détritiques de grottes sont déjà à l'époque au centre des recherches sur la karstologie puisque Cavaillé [1960] expose ces travaux lors d'un colloque du Groupe Scientifique du Comité National de Spéléologie, exclusivement consacré aux argiles des grottes. Il étudie les argiles de grottes avec les outils de la sédimentologie de l'époque (analyses granulométriques et minéralogiques), livrant des contextes de dépôt et des origines possibles des sédiments.

Cet auteur a également mené une réflexion de fond sur ces dépôts détritiques et la manière de les aborder. Ainsi, il est vraisemblablement le premier à mentionner que les dépôts de sédiments dans les galeries ne se forment pas comme dans le cas de rivières aériennes, et que leur position dans le réseau a également toute son importance. La notion de piégeage des sédiments est donc déjà approchée une première fois ici. Cela le conduit à faire une distinction très claire et très judicieuse entre deux approches possibles de ces remplissages [Cavaillé, 1960] :

- une étude *statique* : réflexion sur l'établissement des conditions de dépôt, la constitution des argiles et la compréhension du développement du réseau karstique. On se situe donc plutôt ici dans l'analyse d'un piège sédimentaire et de son contenu, en vue de comprendre comment et pourquoi une telle accumulation de sédiments se trouve à un endroit précis du réseau karstique.
- une étude *dynamique* : conception évolutive des phénomènes karstiques et identification de différentes phases de dépôt en rapport avec des modifications climatiques extérieures. Il s'agit ici d'étudier le karst à travers son contenu détritique mais dans une vision plus large, intégrant l'ensemble du réseau karstique et son évolution. En travaillant à cette échelle, et en utilisant des observations sur la morphologie superficielle et la paléogéographie, il devient possible de remonter vers des données de nature environnementale et/ou climatique.

La valeur informationnelle des dépôts détritiques endokarstiques était donc déjà mise en avant dès les années 1960. Par rapport au terme d'étude « statique » proposé par Cavaillé [1960], nous préférons le terme d'étude « fonctionnelle ». Le terme statique nous paraît en contradiction avec une étude des conditions de dépôt. Il s'agit bien, selon les propres mots de Cavaillé, de comprendre comment se constitue un dépôt de sédiments. Ce processus n'a rien de statique, et met plutôt en avant le fonctionnement d'une accumulation sédimentaire. Dans la suite, nous parlerons donc plutôt d'études fonctionnelles et d'études dynamiques.

Les travaux de Renault [1967, 1970] suivent de près ceux de Cavaillé. Ils visent également à la compréhension des processus intervenant dans la formation des cavités. A ce titre, et par rapport à la distinction que fait Cavaillé entre deux études possibles des remplissages, Renault se situe plutôt dans l'approche fonctionnelle. Il considère, en effet, les dépôts en place dans un but de compréhension de la spéléogenèse. Les outils sédimentologiques de Renault sont les mêmes que ceux de Cavaillé, levés de coupes sur place et analyses granulométriques en laboratoire.

Renault approfondit les questions relatives à la forme et la position (morphologie et micromorphologie) des accumulations argileuses au sein d'un réseau karstique [1967]. Il considère de plus près le rapport entre le remplissage et le creusement d'un point de vue géodynamique (action directe du remplissage sur la roche encaissante) et hydrologique (réduction de la surface rocheuse soumise à l'action mécanique et chimique de l'eau) [Renault, 1967]. Ces analyses sur la morphologie des

sédiments, et sur leur relation mécanique avec la roche encaissante se révéleront riches d'enseignements. C'est d'ailleurs grâce à l'association des analyses sédimentologiques et morphologiques que Renault identifie et classe les différents types de creusement de galeries que nous connaissons aujourd'hui (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.2). Les travaux de ces deux auteurs marquent donc un grand progrès de la karstologie. Grâce aux recherches de Renault [1967], la communauté scientifique perçoit tout l'intérêt qui réside dans la mise en commun des recherches sur les dépôts et sur la morphologie des cavités. Le karst est un tout, ces éléments constitutifs gagnent à être étudiés conjointement.

2. Les premières études stratigraphiques : entrées environnementale et archéologique

Sur la base des études sédimentologiques classiques, les remplissages détritiques sont rapidement étudiés pour acquérir des informations environnementales [Baïssas, 1972 ; Burhenne, 1988 ; Gospodaric, 1988 ; Kervazo et Laville, 1988 ; Maire et Quinif, 1988, Campy *et al.*, 1992] et archéologiques [Ferrier et Leblanc, 1990 ; Bintz et Vital, 1995 ; Texier et Bertran, 1995 ; Texier, 1997 ; Debard, 1997]. Par rapport à la dichotomie proposée par Cavailé [1960], on passe ici dans le registre des études dynamiques. En effet, il s'agit alors d'études séquentielles intégrant la chronologie et la dynamique du milieu, à la fois interne et externe (figure I.15).

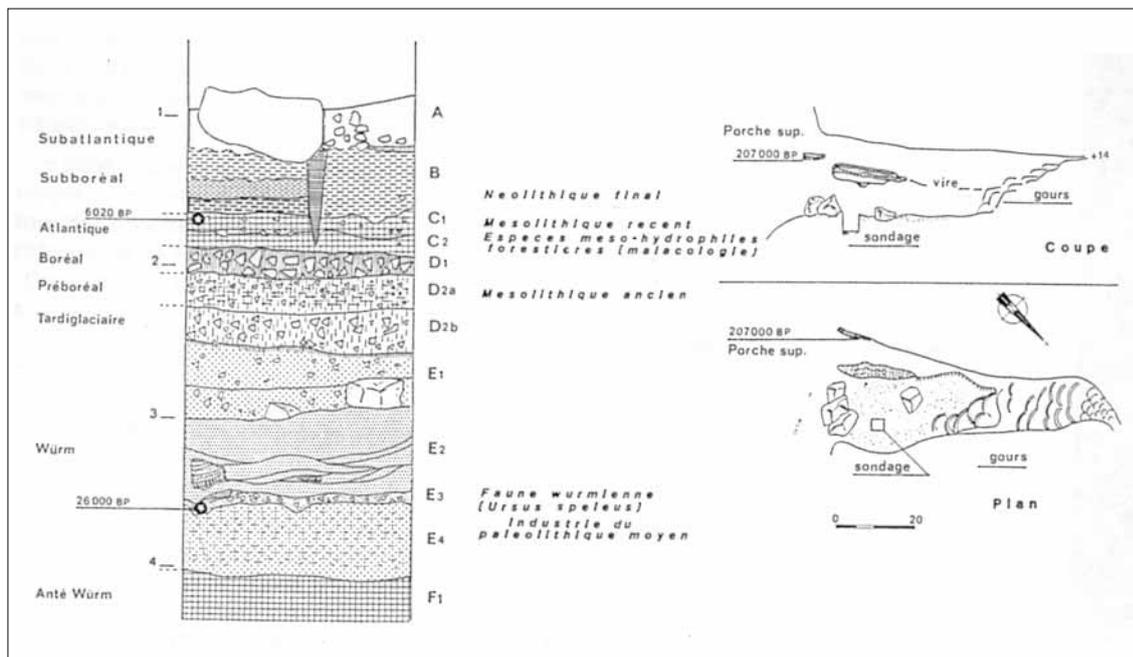


Figure I.15 : Exemple d'une coupe mettant en relation des éléments climatiques et archéologiques – Coupe stratigraphique du sondage préhistorique de Balme Rousse (Cirque de Choranche) issu des fouilles de Bintz (d'après Delannoy *et al.*, 1988).

Les études stratigraphiques visent à produire une interprétation de l'évolution de l'environnement de la cavité étudiée, voire d'un environnement plus étendu, en se raccordant au contexte climatique fourni notamment grâce à la connaissance de la chronologie du Quaternaire (tableau I.2). Du point de vue de la méthode, les remplissages étudiés sont aussi bien des remplissages d'abris sous roche et de porches de grotte (cas le plus fréquent par rapport à l'archéologie), que des dépôts véritablement situés dans l'endokarst.

Dans tous les cas, les remplissages sont étudiés à l'échelle d'une ou plusieurs coupes (nettoyées et/ou dégagées), sur laquelle un important travail de description des différentes unités stratigraphiques et de leurs limites les unes par rapport aux autres est effectué [Baïssas, 1972 ; Burhenne, 1988]. La

	Séquences climatiques	Chronologie		Volcanisme		Industries	
		BC	BP	BP	Localisation		
POSTGLACIAIRE	SUB-ATLANTIQUE	-1000	-1000		900 cendres (?)	1050	Moyen-âge
		0	-2000				Gallo-Romain
	SUB-BOREAL	-1000	-3000		3450 (Montcineyre)	1500	Age du Fer
		-2000	-4000		~4100 cendres	2150	Bronze final Bronze moyen Bronze ancien
	ATLANTIQUE	-3000	-5000		~5000 cendres	3050	Chalcolithique
		-4000	-6000		~5750 (Montcineyre)	3450	Chasséen
		-5000	-7000		6000 (P. Voche) 6660 (N. Pavin)	3800 4050 4710	Epicardiat
		-6000	-8000		7610 (P. de Côme) 8100 (St Saturnin)	5700	Cardial
	BORÉAL PRÉ-BORÉAL	-7000	-9000		8100 (10 datations) 8820 (P. de Lassolas)	6150 6630	Cardial ancien Castelnovien
		-8000	-10000		9150 (P. de Lassolas) 9690 (P. Mey)		Souventerrien Montadien
WURM IV	DRYAS III	-8000	-10000		10000 (Lempdes)	8050	Azilien
		-9000	-11000		10900 (P. de la Nugère) 11000 (Royat)	9050	Romanélien
	ALLERÖD DRYAS II	-10000	-12000		11600 (P. de Côme) 11900 (P. de Borme)		Azilien Romanélien
		-11000	-13000		12800 (Sca des Roches) 13200 (P. de Gorze)	10850	Magdalénien Romanélien Magdalénien
	BÖLLING	-12000	-14000				Magdalénien
		-13000	-15000				
	ANGLES LASCAUX	-14000	-16000		15500 (P. de Lassolas) 15900 (P. de Côme) 16400 (P. de Côme)		Salpétrien inf.
		-15000	-17000		<17000 (Laschamp)	15050	Solutrén
	LAUGERIE	-16000	-18000		18100 (P. de Mercœur)		Proto-Solutrén
		-17000	-19000				
WURM III	TURSAC	-19000	-21000		21600 (P. de Borme) <22000 (Olby)	20050	Gravettien
		-21000	-23000				
	SALPÉTRIÈRE KESSELT	-23000	-25000		27100 (P. de la Rodde)		Aurignacien
		-25000	-27000		(2) 29600 (6 datations) 30500		
	ARCY	-27000	-29000				
Inter WURM II-III	LES COTTÉS HENGELO	-29000	-31000				
		-31000	-33000		33800 (P. Louchadière) 34200 (P. de Gorze) 35000 (Pronat)	33050	Péripardien
WURM II	QUINSON	-33000	-35000				
		-35000	-37000		36400 (P. Louchadière) 36700 (P. Pourcharet) 38900 (P. de Cambegrasse) 39200 (P. de Borme) 40600 (Petit P. de Dôme)		
		-37000	-39000				
		-39000	-41000				
		-41000	-43000		(3) 43500 (5 datations) 44000		
		-43000	-45000				
		-45000	-47000				
		-47000	-49000				
		-49000	-51000		51000 (P. de Manzat)		
		-51000	-53000				
Inter WURM I-II		-53000	-55000		54400 (P. de Mercœur) (?)		
		-55000	-57000		56800 (Gravenoire)		
		-57000	-59000				
		-59000	-61000		59900 (P. de Mercœur)		
		-61000	-63000				
WURM I		-63000	-65000		63700 (P. de Montchié)		Mustérien
		-65000	-67000				
		-67000	-69000		69600 (P. de Jumes) (?)		
		-69000	-71000				
		-71000	-73000				
		-73000	-75000				
		-75000	-77000				
		-77000	-79000				
		-79000	-81000				
		-81000	-83000		82300 (P. de Manjat)		
RISS-WURM		-83000	-85000				
		-85000	-87000				
		-87000	-89000				
		-89000	-91000		90000 (P. de Chanot)		
		-91000	-93000				

Tableau I.2 : Synthèse chronologique paléoclimatique et archéologique du Quaternaire récent (d'après Miskovsky, 1987).

géométrie de ces dépôts est un vecteur d'informations quant aux écoulements (direction et puissance) responsables des différentes strates identifiées et de leurs conditions de sédimentation [Texier et Bertran, 1995]. Les analyses sédimentologiques complètent généralement ce travail de terrain (granulométrie, calcimétrie, pétrographie, micromorphologie, diffraction des argiles, minéraux lourds...) en caractérisant la composition de chaque unité stratigraphique, et éventuellement en identifiant l'origine, voire l'évolution, des composants [Delannoy *et al.*, 1988 ; Kervazo et Laville, 1988 ; Ferrier et Leblanc, 1990 ; Jeannin, 1991 ; Bruxelles, 2001 ; Losson, 2003]. Les études ainsi menées permettent d'attribuer un ou plusieurs processus d'élaboration pour chaque unité stratigraphique (gélivation, lessivage, ruissellement, alluvionnement, détente mécanique, altération...). Grâce à un argumentaire prenant aussi en compte la situation des remplissages dans la grotte, chaque processus peut être rattaché à tel ou tel événement climatique et/ou environnemental [Texier, 1997].

Les travaux menés au Gouffre de la Pierre St Martin (Pyrénées) sur la Galerie Aranzadi, en sont un exemple particulièrement représentatif [Maire et Quinif, 1988 ; Quinif et Maire, 1998]. Les notions de complémentarité des archives endokarstiques ont été mises en avant et démontrées avec acuité (cf. *infra* : Partie I, Chap. I.5.c). Le remplissage est étudié *in situ*, avec l'identification et la description détaillée de grands ensembles sédimentaires. La position du remplissage dans la galerie est également prise en compte. Enfin, ces observations de terrain sont complétées par des analyses sédimentologiques en laboratoire : granulométrie et traitements associés (transport sédimentaire, analyses géochimiques indicatrices de la nature et de l'origine du sédiment). L'ensemble de toutes ses méthodes d'analyses a permis de produire des interprétations quant à la spéléogenèse et à la sédimentogenèse dans la cavité. Le cadre chronologique donné par les datations de concrétions contenues dans le remplissage détritique, dans cet exemple, a permis de raccorder ces interprétations spéléogénétiques aux fluctuations climatiques, de 300 000 B.P au début de l'Holocène.

Il faut préciser ici qu'un remplissage est rarement uniquement détritique. L'intercalation de niveaux et planchers stalagmitiques, de concrétions cassées ou de vestiges archéologiques, paléontologiques n'est pas rare. Cela permet de travailler avec un cadre chronologique mieux défini, notamment grâce aux datations possibles sur les concrétions [Maire et Quinif, 1988 ; Quinif et Maire, 1998] et ossements [Cregut et Fosse, 2001], et aux connaissances de l'archéologie (tableau I.2). Cela contribue également à affiner l'interprétation à différents niveaux : en termes de fluctuations climatiques, de modifications environnementales extérieures, d'occupations humaines ou animales [Bintz et Vital, 1995 ; Debard, 1997 ; Sordoillet, 1999 ; Clottes *et al.*, 2001 ; Moeyersons *et al.*, 2002 ; Mourer-Chauviré *et al.*, 2003]. En outre, karstogenèse et évolution du climat étant liées (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.3.a), l'étude stratigraphique des dépôts, l'analyse de ces remplissages est également utile pour expliquer la genèse d'une cavité [Delannoy *et al.*, 1988 ; Gospodaric, 1988] et au-delà, la karstogenèse voire la morphogenèse du massif concerné.

3. Des méthodes d'étude connexes : une mémoire environnementale enrichie

Depuis le début des années 1970 (date qui marque le commencement des études de remplissages détritiques endokarstiques en vue d'interprétations paléoenvironnementales), de nombreux autres moyens d'analyse ont été développés. Ils permettent de conduire des recherches plus complètes sur les remplissages souterrains, qui peuvent contenir des éléments d'une origine autre que le détritisme, et apportent des données supplémentaires variées, montrant ainsi que ces remplissages recèlent de nombreuses informations à caractère environnemental et climatique. Ces approches complémentaires

sont ici exposées, mettant en avant leurs intérêts mais aussi leurs limites.

La présence de vestiges d'animaux dans les remplissages de grotte ou d'abris sous roche n'est pas rare, et leur étude est souvent très instructive [Cregut et Fosse, 2001 ; Mourer-Chauviré *et al.*, 2003]. Les restes paléontologiques sont en effet de puissants indicateurs, et ce à deux titres. Tout d'abord, la paléontologie permet la reconnaissance des espèces et de là de retrouver des indications sur la végétation environnante à travers le régime alimentaire [Bocherens *et al.*, 1999]. De plus, si les ossements retrouvés sont relativement bien conservés, le collagène qu'ils contiennent peut être daté par le ^{14}C . Les ossements offrent ainsi une balise chronologique [Bosak, 2003 ; Drucker *et al.*, 2003]. Mais cette approche paléontologique n'a pas toujours lieu d'être, la présence de vestiges étant loin d'être systématique. L'étude de la microfaune, voire plus spécifiquement de la malacofaune ou de la microfaune stygobie¹ peut également être un complément d'étude tout à fait intéressant [Bastin *et al.*, 1986 ; Morel, 1990 ; Vervier *et al.*, 1991 ; Bonnet *et al.*, 1992 ; Bruyère *et al.*, 1993 ; Delannoy, 1997 ; Rousseau et Puisségur, 1999 ; Ferreira *et al.*, 2003].

Les analyses palynologiques complètent les études des remplissages souterrains. Les travaux de Bastin, dès 1978 ont montré l'intérêt de cette approche. L'étude des pollens a sa place dans les recherches à caractère paléoenvironnemental, puisque la reconnaissance des pollens conduit à la reconstitution du couvert végétal et à son évolution. Ces informations peuvent alors être raccordées en toute logique à des évolutions du climat. De plus, les pollens présentent l'avantage d'être piégés aussi bien dans les sédiments détritiques que dans les dépôts carbonatés. Dans la mesure où, comme nous l'avons déjà dit plus haut, un remplissage sédimentaire endokarstique est souvent mixte, les pollens peuvent être reconnus en continu, tout le long de l'accumulation étudiée. Dans l'enregistreur naturel « accumulation détritique souterraine », l'indicateur « pollen » possède une forte complémentarité, et est donc d'une grande valeur informationnelle. De nombreuses études de remplissages prenant en compte l'analyse des pollens ont été menées et ont permis des interprétations paléoenvironnementales et paléoclimatiques relativement fines [Quinif *et al.*, 1979 ; Bastin *et al.*, 1982 ; 1988]. Ainsi, l'étude des pollens contenus dans les remplissages de la grotte de la Vilaine Source a permis de reconstituer 11 spectres polliniques (plantes herbacées 76 % et *Pinus* 16 %) qui ont permis de définir le contexte biogéographique d'un climat pléniglaciaire [Quinif *et al.*, 1979].

Pouvant être piégés dans l'accumulation sédimentaire (détritique comme carbonatée) au même titre que les pollens, les charbons (origine anthropique) et tephtras (origine volcanique) sont également des indicateurs environnementaux de grand intérêt que l'on peut parfois rencontrer, et pour lesquels des méthodes d'analyse existent. Même si on les rencontre plus rarement, ces objets d'étude peuvent avoir différents rôles dans les reconstitutions paléoenvironnementales. Les charbons de bois peuvent être datés (^{14}C), mais peuvent aussi être identifiés en terme d'essence végétale (analyses anthracologiques), et être mis en relation avec des activités anthropiques [Thiébault, 1991 ; Perrette *et al.*, 1997a ; Carcaillet, 2001 ; Carcaillet *et al.*, 2002]. De même, les résidus de volcanisme sont un élément de datation dans un contexte régional, et indiquent une zone géographique qui peut influencer la sédimentation endokarstique. Le volcanisme étant étudié et bien connu par ailleurs (tableau I.2), les tephtras sont un des rares éléments pouvant éventuellement renvoyer vers une information de nature spatiale plus vaste, et dont la source est clairement positionnée, dans l'espace comme dans le temps [Debard et Pastre, 1988 ; Gewalt et Juvigné, 1988 ; Pastre *et al.*, 1994]. Une bonne illustration des apports de la téphrochronologie

¹ La faune stygobie désigne les organismes des milieux aquatiques karstiques et plus généralement des eaux souterraines [Viala C. – 2000 - *Dictionnaire de la Spéléologie* – Ed. Spelunca Librairie, 264 pages].

est faite par l'étude du remplissage de l'abri Moula, en Ardèche. Dans cette petite cavité karstique à ciel ouvert, le remplissage sédimentaire a livré des résidus de volcanisme. Un lit cendreuse bien délimité a en effet été décelé, et sa composition minéralogique (absence de calcaire mais présence de quartz, de feldspaths du socle et de granules de basalte) n'a rien de commun avec l'environnement local du site. Par contre, ce cortège minéralogique concorde avec le volcanisme Pléistocène supérieur de la moyenne Ardèche. Ce tephra a donc permis de poser un repère chronologique dans l'étude du remplissage de l'abri Moula, mais aussi d'estimer une aire d'influence, puisque que les centres éruptifs correspondants sont distants de 57 km, vers l'WNW, du site.

D'autres méthodes d'études des remplissages détritiques ont également été développées ces dernières décennies, portant sur le sédiment lui-même. Il s'agit de la technique des minéraux lourds, permettant de travailler sur l'identification des sources de matières [Delannoy *et al.*, 1988 ; Bruxelles, 2001], et de la mesure du paléomagnétisme, comme moyen de datation d'une accumulation sédimentaire grâce aux inversions magnétiques terrestres enregistrées au fur et à mesure du remplissage [Maire, 1982 ; Audra *et al.*, 1999]. Toutes ces techniques d'études peuvent être couplées [Bravard *et al.*, 1986 ; Bintz *et al.*, 1997], afin de produire des interprétations, des reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques beaucoup plus détaillées, et placées dans un cadre chronologique mieux défini (tableau I.3).

Archive	Démarche d'analyse Méthode	Informations environnementales
Faune fossile	Reconnaissance paléontologique > reconnaissance de l'espèce et du régime alimentaire	Données sur la couverture végétale (herbivores) et la faune
	Datations au ^{14}C sur le collagène des ossements	Cadre chronologique
Microfaune stygbie	Espèces présentes selon la qualité des eaux	Qualité des eaux > pédologie, type de sols en surface
Pollens	Extraction et reconnaissance des essences végétales	Données sur la couverture végétale et son évolution
Restes végétaux (feuilles, branchages, charbons)	Reconnaissance des essences végétales et d'arbres, Antracologie dans le cas des charbons de bois	Etat du couvert végétal et forestier Données sur les impacts de l'Homme avec les charbons
	Datations au ^{14}C	Cadre chronologique
Tephras	Restes de volcanisme identification minéralogique et reconnaissance de l'origine	Cadre chronologique et marqueur spatial régional
Sédiments détritiques	Minéraux lourds identification géologique	Recherche des sources de matières dans le contexte géologique régional
	Paléomagnétisme	Cadre chronologique par rapport aux inversions du champ magnétique terrestre

Tableau I.3 : Les différentes mémoires environnementales incluses dans les archives détritiques endokarstiques.

Dans cet historique des recherches sur les dépôts détritiques, on constate donc que même si le concrétionnement a été largement mis en avant au cours des vingt dernières années (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.4.), les dépôts détritiques ont tout de même, depuis plus longtemps, été abondamment étudiés. Leur rôle capital dans la spéléogénèse a été démontré et conjointement, ils recèlent un potentiel informationnel riche et diversifié en regard des questionnements sur les paléoenvironnements, les paléoclimats et les impacts anthropiques.

c) Un fort atout : la complémentarité spatio-temporelle

Enfin, parmi les arguments en faveur des dépôts endokarstiques comme archive naturelle, nous insisterons sur un point qui nous paraît primordial : la place de cette mémoire environnementale dans le paysage scientifique actuel visant à la compréhension des climats passés et présents et des évolutions environnementales.

Pour ce qui concerne la représentativité spatiale de ces archives, les recherches visent des reconstitutions locales (à l'échelle d'un massif) voire régionales. Par analogie au « Global Change », on parle donc ici de « Local Change ». C'est à ce niveau que la fonction « filtre » du karst apparaît dans toute sa dualité. En effet, la protection des mémoires naturelles endokarstiques autorise leur étude, mais dans le même temps, cette protection peut avoir une influence sur les archives constituées en agissant comme une « barrière », une limitation de l'étendue spatiale représentée. Ce paradoxe de la fonction « filtre » du karst force à la prudence quant à la validité spatiale de ces mémoires. Pour le cadre temporel, l'étude des formes, et particulièrement des microformes permet de travailler sur des karsts formés à l'ère Tertiaire. Mais en ce qui concerne la mémoire des remplissages endokarstiques, et au-delà du problème des lacunes de sédimentation (par arrêt des apports ou remobilisation des dépôts), elle se limite le plus souvent au Quaternaire voire même à l'Holocène et ce tant par les archives elles-mêmes que par les moyens de datations dont nous disposons.

La place du karst en tant que mémoire naturelle est très pertinente. Elle s'exprime par une forte complémentarité, une grande cohérence vis-à-vis des autres archives étudiées. La notion de complémentarité intervient à deux niveaux. Au sein du karst, tout d'abord : nous avons rappelé plus haut (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.3) que les différentes archives naturelles regroupées dans l'endokarst ont un fonctionnement directement dépendant du climat extérieur (biostasie/rhexistasie). Dans le but de contribuer aux recherches sur les paléoenvironnements et les paléoclimats, ces archives gagnent donc à être étudiées conjointement dans une cavité puisqu'elles se complètent mutuellement. Mais une complémentarité existe aussi au-delà du karst, à plus grande échelle par rapport aux autres enregistreurs continentaux (tableau I.4). Elle s'exprime spatialement dans la mesure où les différents supports de recherche sur le « Local Change » connaissent une répartition altitudinale. Chaque étage possède une ou des archive(s) naturelle(s) différente(s), dont le fonctionnement et la capacité mémoire sont propres et dépendent du milieu et de ses conditions climatiques. De plus, les fluctuations environnementales et climatiques confèrent à ce continuum une certaine mobilité. En effet, en fonction d'un état climatique donné, la répartition altitudinale des différentes archives naturelles sera modifiée (tableau I.4). Cette complémentarité a également une expression temporelle, le panel des enregistreurs continentaux fournissant des durées et des précisions d'enregistrement variables, donc complémentaires les unes des autres. Même si cette notion ne peut pas être totalement dissociée des aspects méthodologiques de datations, cela tient en majeure partie à la capacité de pérennisation et d'accumulation d'éléments informationnels au cours du temps, pour chaque archive.

DOMAINES D'ALTITUDE				
	Haute montagne	Etage nival	Moyenne montagne	Piémont
	<p>Le schéma illustre un profil de montagne traversant quatre domaines d'altitude : Haute montagne, Etage nival, Moyenne montagne et Piémont. Une courbe rouge en forme de U, étiquetée 'CONTINUUM' à l'extrémité supérieure et 'INFORMATIONNEL' à l'extrémité inférieure, s'étend de la haute montagne vers le piémont. Des flèches rouges indiquent la 'mobilité du continuum exprimée pour la couverture végétale' (pointant vers la gauche) et la 'péjoration' (pointant vers la droite). Un point 'optimum' est marqué sur la pente de l'étage nival. Des illustrations de glaciers, d'arbres, de karst et de lacs sont placées dans leurs zones respectives.</p>			
<i>Support enregistreur</i>	Glaciers tempérés	Glacières souterraines, Arbres fossiles	Remplissages endokarstiques, Cernes des arbres, Couvert végétal, Lichens	Varves et sédiments lacustres, Tourbières
<i>Type de données environnementales</i>	Bilan de masse, Fonte, Mouvements glaciaires, Composition et circulation atmosphérique	Fonte, Circulations d'air endokarstiques, Impacts anthropiques	Fluctuations climatiques, Températures/Précipitations, Croissance des arbres, Activités humaines/Pollution	Fonte des glaciers, Couvert végétal
<i>Discipline scientifique</i>	Glaciologie, Géomorphologie	Dendroglaciologie, Glaciologie, Karstologie,	Karstologie, Sédimentologie, Palynologie, Lichenométrie, Dendrochronologie	Sédimentologie lacustre et continentale, Palynologie, Biologie végétale
<i>Validité spatiale</i>	Régionale à hémisphérique	Régionale	Régionale à locale	Régionale à locale
<i>Validité temporelle</i>	Quaternaire-Holocène	Historique	Historique à Holocène	Historique à Holocène
<i>Résolution précision</i>	Annuelle basée sur les phases froides	Infra-annuelle basée sur l'alternance saison chaude/saison froide	Infra-annuelle avec altern. épisode froid (dép. dét) et chaud (concrétion, cernes)	Infra-annuelle basée sur le comblement et altern.ép. froid (varves) et chaud (pollens)
<i>Exemple bibliographique</i>	Angélias et Gaudichet (1991), Luckman (1998a et b)	Lismonde et al. (1999), Perroux (2000), Briffa et al. (2004)	Quinif et al. (1992), Morel et Villard (1993), Perrette (2000)	Le Roy Ladurie (1983), Magny (1995), Arnaud (2003)

Tableau I.4 : Schéma de synthèse représentant tous les enregistreurs continentaux contribuant aux recherches sur le « Local Change », en fonction de leur complémentarité spatio-temporelle.

§§§§§§§

Ce premier chapitre avait pour but de rappeler l'intérêt du karst, pris dans sa globalité, en tant que mémoire naturelle continentale à haute résolution.

Sur la base de quelques exemples pratiques comme théoriques et en faisant référence à de nombreux travaux antérieurs, nous nous sommes attachés à mettre en avant les richesses connues et pressenties de l'endokarst, qui en font une mémoire naturelle continentale de tout premier ordre. La synthèse des connaissances sur les différentes archives contenues dans le karst a permis de montrer leurs particularités et l'intérêt propre de chacune, à travers les modalités de leur édification naturelle et les moyens d'étude à disposition. Enfin, en traitant des limites informationnelles de chacune de ces mémoires, tant sur l'archive elle-même, du fait de sa constitution qu'à cause des limites méthodologiques, nous avons pu insister sur l'intérêt de ces différentes mémoires endokarstiques lorsqu'elles sont appréhendées conjointement. Leur complémentarité, au niveau du karst comme au niveau de l'ensemble des enregistreurs naturels continentaux plaide en la faveur de mémoires naturelles tout à fait pertinentes pour augmenter les connaissances en karstologie et contribuer aux recherches sur les évolutions paléoclimatiques et paléoenvironnementales, incluant le rôle de l'Homme.

Au terme de cette présentation sur le contexte général de données et de connaissances sur les mémoires naturelles endokarstiques, nous avons pu nous focaliser sur les dépôts détritiques endokarstiques. Dans la suite, nous allons discuter de leur potentiel informationnel paléoenvironnemental et paléoclimatique, afin de préciser notre propre approche de ces remplissages, qui se veut différente et complémentaire de ce qui a été exposé jusqu'ici. Nous concentrerons peu à peu le discours sur les types particuliers de dépôts détritiques endokarstiques qui ont été étudiés dans le cadre de cette thèse, et sur les critères informationnels et méthodologiques qui nous ont conduits vers ce choix.

CHAPITRE II :

APPROCHE ORIGINALE DES ARCHIVES DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.

La synthèse précédente sur les fonctions mémoires du karst a permis de faire ressortir les fonctions protectrice et cumulative d'information. Parmi les références citées, rares sont celles qui traitent la question de la dynamique des dépôts en jeu [Maire et Quinif, 1988]. De même, les modalités du transport et du piégeage des matériaux au sein du système de drainage karstique ne sont que rarement abordées. Cela rejoint ce que nous avons développé concernant la fonction « filtre » exercée par le karst (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.3.a). Nous pensons que cette fonction de « filtre », n'étant pas considérée dans toute sa mesure, limite les études sédimentologiques. Cette fonction particulière du karst doit, en effet, être appréhendée plus en détail, afin de mieux comprendre la karstogenèse et les dynamiques en cause dans l'évolution d'un système de drainage karstique.

Il est clair que le karst exerce un « tri » de l'information accumulée, à travers le transfert de matière représenté par les écoulements et par un système de drainage plus ou moins complexe. Cette spécificité de la sédimentation souterraine, par rapport aux connaissances de la sédimentation de surface, n'est pas prise en compte dans l'ensemble des travaux cités. Pourtant, dans le but de cerner et de calibrer le rôle de filtre exercé par le karst sur ses mémoires naturelles, il importe de prendre ces données en considération, en essayant de mener une réflexion basée sur ces deux notions essentielles :

- la contrainte géométrique que le réseau karstique impose aux circulations d'eau souterraine et au transport des matières en suspension, autrement dit, le rôle de *l'hydrodynamisme* en tant que vecteur de *transfert* de l'information ;
- et l'importance des formes endokarstiques en tant que réceptacles potentiels pour l'archivage des particules sédimentaires, donc le rôle de *l'endokarst* dans sa fonction de *piégeage* des sédiments.

Il nous semble que ces considérations ont leur intérêt, et que ce sont des clés importantes pour travailler à une meilleure compréhension de la karstogenèse et de ses mécanismes, et par voie de conséquence, pour les interprétations d'ordre paléoclimatique et paléoenvironnemental. C'est donc sur la base de ces deux éléments spécifiques au karst que nous avons développé notre problématique de recherche. Nous en exposons les contours précis dans ce chapitre.

1. Positionnement de notre étude des remplissages détritiques

Une réflexion sur la fonction filtre du karst, exercée entre autres sur les sédiments détritiques au fur et à mesure de leur stockage dans un réseau karstique va être ici développée. En évaluant le rôle de cette fonction, les interprétations paléoclimatiques et paléoenvironnementales proposées devraient gagner en précision. De fait, la compréhension du fonctionnement propre d'un système karstique en tant qu'enregistreur des fluctuations extérieures s'en trouverait également améliorée.

a) Nécessité d'une approche complémentaire

Pour tenter d'appréhender l'influence exercée par le karst sur la sédimentation détritique, nous proposons d'adopter une démarche de travail différente, dans la mesure où le dépôt endokarstique est, avant tout, considéré comme une « accumulation de données ». Cette accumulation intègre les conditions de transport au sein du karst, donc l'influence du milieu, avec tout ce que cela peut impliquer en perturbations de l'information environnementale contenue dans les matériaux déposés (c'est la notion de filtrage). D'autres questionnements interviennent alors, se regroupant autour des modalités du transport sédimentaire à l'intérieur d'un système de drainage karstique. Il s'agit donc de tenter d'évaluer la contrainte exercée par le karst, sur la sédimentation. On devrait donc pouvoir ainsi estimer les principales différences qu'il y a entre sédimentation souterraine et sédimentation de surface. Pour mémoire, selon la dichotomie indiquée par Cavaillé [1960], l'entrée que l'on se propose de développer ici se situe très clairement dans les approches dites dynamiques.

Dans les travaux sur les remplissages que nous avons cités, les approches de la dynamique de mise en place des sédiments reposent sur les théories de la sédimentation de surface, et notamment les diagrammes de Passega [Maire et Quinif, 1988 ; Audra, 1994]. Cette méthode, en croisant graphiquement deux paramètres granulométriques, permet de caractériser des environnements de dépôts (cf. *infra* : Partie II, Chap. I.3.b). En appliquant cette approche aux remplissages souterrains, on fait l'approximation que le comportement hydrodynamique est strictement identique entre la surface et l'endokarst. Or, pour les raisons invoquées plus haut, nous pensons que ce postulat, écartant complètement la fonction « filtre » du karst et ses contraintes spécifiques, est excessif. Il serait préférable de considérer cette spécificité, et les contraintes particulières du milieu sur la sédimentation. Les travaux de Cavaillé [1960] et de Renault [1967] que nous avons rappelés (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.5.b.1), montraient déjà le rôle considérable des dépôts sur les modalités de la karstification. En faire l'abstraction est dommageable pour la qualité des interprétations faites sur les dynamiques de dépôt d'un remplissage endokarstique, et de là, sur les hypothèses paléoenvironnementales et paléoclimatiques.

Nous nous proposons donc, dans le cadre de cette thèse, d'intégrer au mieux les théories de sédimentation mises en place par Passega au domaine karstique. La nécessité de passer par cette démarche s'impose donc ici dans le but de caractériser le transport sédimentaire souterrain et les conditions de sédimentation spécifiques du milieu karstique. La connaissance, et une meilleure prise en compte de l'hydrodynamisme endokarstique doit précéder nous semble-t-il, toute interprétation paléoenvironnementale plus avancée.

b) Une démarche de travail différente : l'entrée hydrodynamique

L'entrée hydrodynamique pourra apporter les précisions nécessaires quant à la fonction « filtre » du karst et à la qualité informationnelle des dépôts détritiques endokarstiques en tant que mémoire paléoenvironnementale.

Cette démarche de travail complète les précédents travaux dans la mesure où les dépôts étudiés vont être choisis pour leur potentiel de données sur les paléoenvironnements, mais aussi par rapport à leur localisation au sein du système de drainage. La démarche d'étude étant fondée sur l'hydrodynamisme et sur sa compréhension, les sédiments à analyser vont être sélectionnés sur un critère non encore traité

jusqu'ici : le piège dans lequel les dépôts détritiques s'accumulent. Cette notion de piège nous paraît fondamentale ; on en revient donc à l'importance des formes et des vides endokarstiques discutée au début de ce mémoire (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.2).

Concrètement, on se propose de partir du raisonnement suivant. A partir de l'étude d'un réseau karstique actif (les grottes de Choranche – Vercors), nous allons mettre en avant les différents types de pièges à sédiments. Cette démarche a pour but de définir un référentiel, en termes de piégeage sédimentaire. Le contexte de dépôt étant donc connu sans la moindre ambiguïté, le prélèvement des sédiments et leur étude granulométrique autorise de ce fait la construction d'images de Passega, l'environnement de dépôt étant ainsi « granulométriquement » caractérisé. Une telle démarche méthodologique nous permettra alors d'identifier le(s) contexte(s) hydrodynamique(s) contemporains des accumulations sédimentaires fossiles étudiées dans d'autres cavités, aujourd'hui asséchées. En bonne logique, cette recherche plus pointue sur le contexte de mise en place des dépôts ne peut que conduire à des interprétations environnementales et climatiques mieux calibrées ; c'est l'objectif final de notre recherche.

c) Incidences sur le travail de terrain

Les travaux que nous avons développés durant la thèse, et que nous présentons dans ce mémoire sont donc à la charnière entre d'une part, les questionnements portant sur la mémoire morphogénique du karst, comprenant les formes, les remplissages et l'évolution du réseau de drainage, et d'autre part, les reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques que le karst permet de produire. En d'autres termes, ces recherches sur les modalités de la sédimentation souterraine visent à préciser le rôle du karst dans sa fonction de mémoire naturelle, oscillant entre protection des enregistreurs et « filtre occultant » de l'enregistrement.

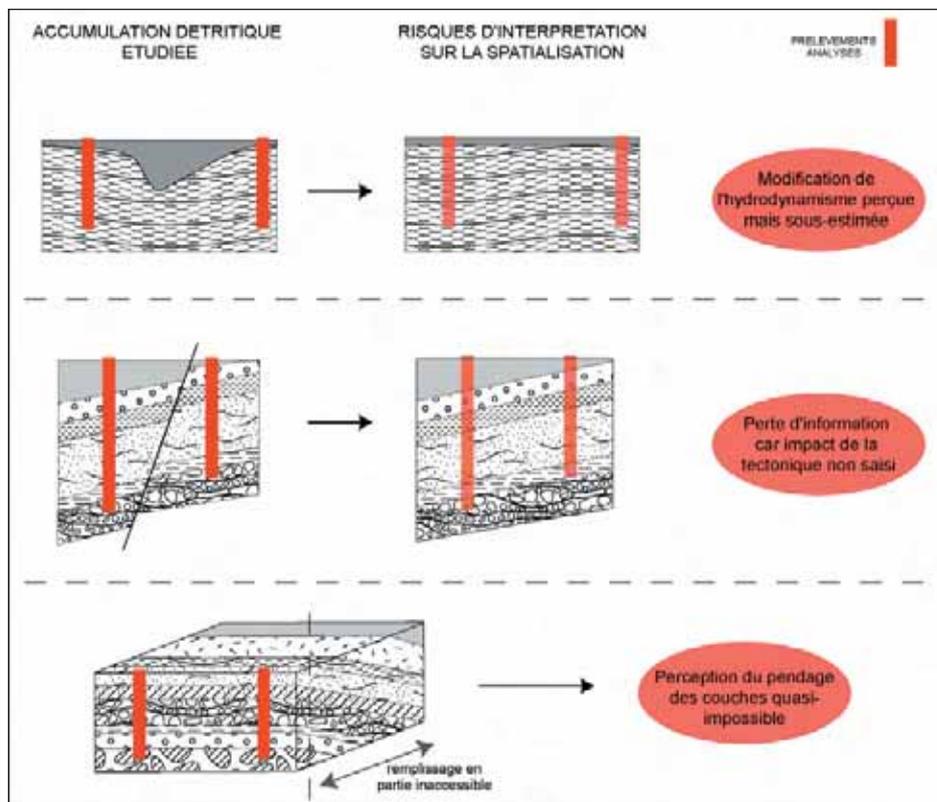


Figure I.16 : Exemples de différents remplissages et problème de la connexion des prélèvements en vue d'une spatialisation de l'information.

Les méthodes utilisées pour essayer d'apporter des éléments de réponse à ces questions reposent en grande partie sur l'analyse de données granulométriques, pour l'élaboration des images de Passegá. Mais pour produire des analyses les plus complètes possibles de l'hydrodynamisme endokarstique, d'autres traitements ont été utilisés. Ces aspects méthodologiques seront abondamment exposés plus loin (cf. *infra* : Partie II, Chap. I). Plus généralement, le choix de cette approche a des conséquences sur la façon de travailler, sur l'utilisation des techniques d'analyse. Nous avons précisé plus haut qu'il était important de travailler sur un référentiel, à savoir un site actif. Cela implique que le sédiment étudié n'est pas aussi accessible que dans le cas des études « classiques » de dépôts endokarstiques, à des fins de reconstitutions paléoenvironnementales et/ou archéologiques. La présence d'eau rend l'accès au remplissage souvent malaisé, et la description *in situ* de coupes n'est alors pas envisageable. On est donc contraint de se limiter à l'étude en laboratoire des prélèvements effectués dans le remplissage (carottes dans un lac actif, ou dans un piège actif de zone noyée capacitive¹). Si le fait de travailler sur des échantillons permet un plus grand nombre de mesures, granulométriques et autres, cela présente aussi un inconvénient quant à la perception de la géométrie en trois dimensions et de la stratigraphie « en grand » des accumulations étudiées (figure I.16). La spatialisation des résultats obtenus à partir d'un ou plusieurs prélèvements doit donc être menée avec prudence.

2. Discussion : quels sont les sédiments détritiques les plus appropriés pour notre démarche analytique ?

Notre démarche de travail ayant été définie par rapport aux connaissances sur les dépôts détritiques en tant que mémoire environnementale, nous allons maintenant voir, parmi les différents types de dépôts détritiques et de leur contenu, ceux d'entre eux qui semblent les plus intéressants, les plus pertinents à analyser pour caractériser des dynamiques de mise en place. Cette discussion sur les différents types de dépôts détritiques sera également l'occasion de développer et repreciser certains aspects de cette étude. Pour faire cette sélection, nous utiliserons comme support à notre discours la classification des dépôts détritiques proposée par Delannoy [1997], rappelée ci-contre (tableau I.5).

a) Dépôts à valeur informationnelle inadaptée à notre approche

En vue de l'étude de l'hydrodynamisme responsable de la mise en place d'accumulations sédimentaires détritiques souterraines, deux catégories de dépôts apparaissent clairement inadéquates. Ce sont tout d'abord tous les dépôts détritiques accumulés sans transport par les eaux souterraines (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.5.a.3). Selon la classification de Delannoy (tableau I.5), il s'agit donc de tous les dépôts regroupés dans les catégories : « absence de mouvement » et « mouvement provoqué par la gravité ». Les dépôts de ces deux catégories sont le produit de processus, pour la plupart mécaniques et gravitaires. Ils incluent aussi des phénomènes beaucoup plus « discrets », où l'eau joue essentiellement son rôle chimique, à l'interface air/calcaire. Mais le rôle de l'eau et des déplacements qu'elle peut produire reste extrêmement limité. Les processus de production de ces différents dépôts ne sont donc pas ceux qui nous intéressent ici, dans le cadre de notre problématique. D'autre part, nous avons montré au fil de notre discours que la position des dépôts dans le réseau avait son importance, introduisant

¹ Le terme « capacitive » est ici employé pour désigner une galerie noyée dans laquelle les eaux circulent lentement, permettant une décharge sédimentaire. Ce terme englobe la notion de conservation, d'accumulation. Il est à l'opposé de la notion de galerie noyée « transmissive », dans laquelle les écoulements sont rapides, ne permettant aucune accumulation de matière en son sein. Ses mêmes notions sont utilisées pour exprimer le fonctionnement des stalagmites en tant qu'enregistreur paléoenvironnemental [Perrette, 2000].

ainsi la notion cruciale de piège potentiel. Là encore, et par rapport à nos objectifs, les dépôts gravitaires et mécaniques ne sont pas suffisamment représentatifs de la fonction de piège du karst. En effet, leur position tient bien plus à leur source de production, et à leur taille qui rend leur transport quasi-impossible, qu'à un véritable contexte de piégeage au plancher des réseaux.

MODE DE TRANSPORT	ORIGINE DU MATERIEL		FAMILLE DE DEPOT
	MECANISME INITIAL	MECANISME SECONDAIRE	
ABSENCE DE MOUVEMENT OU DE TRANSPORT	Dissolution de la roche encaissante		Produit de décalcification <i>in situ</i> (argiles résiduelles, arènes dolomitiques)
MOUVEMENT PROVOQUE PAR LA GRAVITE	Effondrement (détente méc.)		Chaos ouvert de blocs
	Effondrement (détente mécanique)	Dissolution blocs sous-jacents	Chaos fermé de blocs (affaissement, dissolution)
	Gélifraction porche, entrée puits		
	Gélifraction surface, puits	Transit assisté par neige ou eau	Eboulis lité, cône d'éboulis... (parautochtones)
	Desquamation		Eboulis lité, affaissement
	Corrosion de la roche encaissante	Déplacement par gravité via le réseau de fentes	Produit de décalcification (abs. de struct. sédiment.)
	Altération superficielle	Déplacement par gravité via le réseau de fentes	Altérite piégée (abs. de struct. sédiment.)
TRANSPORT PAR LES EAUX COURANTES	Effondrement, écroulement		Galets
	Gélifractions		Graviers, granules
	Produits de décalcification :		Structure sédimentaire (litage) :
	Calcaires "purs" -----		Argiles résiduelles (illite prédominante)
	Calcaires gréseux -----		Sables, limons
	Calcaires marneux -----		Limons, argiles
	Calcaires silex -----		Galets à granules
	Dolomies -----		Sables
	Altération superficielle		Argile, présence structure sédimentaire et de kaolinite
	Perte d'un cours d'eau exogène		Galets, sables, argiles de pétrographie différente du substrat encaissant, et présentant un fort émoussé
Perte d'écoulement d'origine glaciaire		Sables fins et "farine glaciaire" carbonatés - Possibilité de varves si ennoisement du réseau	
Perte glaciaire		Moraines	

Tableau I.5 : Les principaux types de dépôts détritiques endokarstiques classés en fonction de leur mode de transport et de leur origine (simplifié d'après Delannoy, 1997).

En outre, même si cela a déjà été évoqué, nous rappelons ici que d'autres éléments peuvent être piégés au sein d'un remplissage détritique. Il s'agit d'éléments aussi divers que les pollens, les niveaux à phosphates, les charbons et fragments de végétaux, les tephres. A priori, même si certains de ces éléments peuvent avoir été soumis à un transport par les eaux, ces différents objets à forte valeur paléoenvironnementale sont peu propices à une recherche sur les contraintes hydrodynamiques, soit qu'ils sont de constitution tout à fait inadaptée, soit qu'ils sont présents de façon trop ponctuelle dans une accumulation détritique.

Cependant, il peut y avoir certains cas où ces éléments, relativement abondants et répartis d'une certaine façon dans le sédiment, livrent tout de même quelques données sur leurs conditions de piégeage dans le remplissage. Nous en donnerons un exemple dans ce manuscrit (cf. *infra* : Partie III, Chap. II.5 et III.2).

b) Dépôts retenus pour l'application de notre approche

Tous les dépôts recensés dans la deuxième partie de la classification de Delannoy [1997] (tableau I.5), regroupés sous l'intitulé « transport par les eaux courantes » sont *a priori* valables et potentiellement intéressants pour mener une étude sur leurs conditions hydrodynamiques de piégeage. Mais cela mérite d'être nuancé car ces dépôts, étant différents dans leur origine, ne fournissent pas tous la même quantité ni la même qualité d'informations. Seuls seront retenus ceux qui, *in situ*, mettent en évidence la présence d'un piège endokarstique.

En réalité, et en regard de l'étude des sédiments que nous proposons, seuls les dépôts les plus fins de cette catégorie vont être les plus intéressants pour nous et cela pour plusieurs raisons :

- Les dépôts fins, au niveau de la source de matière, sont plus facilement mobilisés que les graviers et galets. En terme de transport, ils sont donc déplacés en plus grande quantité et seront transportés sur une plus grande distance vers l'aval du système. Par rapport à la faculté d'intégration de données des accumulations détritiques, les dépôts fins sont donc les plus intéressants.
- Ces mêmes dépôts fins, puisqu'ils sont facilement mis en mouvement par les circulations d'eau, sont faiblement immobilisés au cours de leur transport dans le réseau de drainage. Un ralentissement temporaire des circulations souterraines (tronçon de galerie de pente localement plus faible, conduit plus large...) ne provoquera qu'une très faible décharge sédimentaire.

En partant de ces hypothèses, on peut considérer qu'un remplissage détritique fin identifié à un endroit donné du réseau karstique caractérise par sa présence même un type de piège à sédiments particulièrement efficace, soit par sa morphologie, soit par sa position (cf. *infra* : Partie I, Chap. II.3). Dans la mesure où, comme nous l'avons dit plus haut, nous choisissons les dépôts à analyser en fonction du type de piège endokarstique qui a permis leur accumulation, le comportement des sédiments fins est donc le plus adapté à ce que nous recherchons.

Enfin, en partant du principe que les circulations d'eau sont pérennes ou quasi-pérennes, on peut également postuler que la mobilisation à la source et le transport des fines se fait de façon relativement constante. Cela assure une certaine régularité à l'accumulation des sédiments au niveau du piège endokarstique. Ces dépôts, dans leur fonction d'enregistreurs naturels, offrent ainsi une des meilleures continuités relatives d'informations hydrodynamiques et par voie de conséquence, d'informations paléoenvironnementales.

Dans notre recherche, tous les dépôts dont la taille est supérieure aux granules (granules, graviers et galets) n'ont pas été retenus. Nous travaillons sur les pièges de sédiments fins, dont la taille varie entre les argiles et les sables, exceptionnellement les sables grossiers (taille inférieure à 800 μm , conformément à la classification terminologique de C. K. Wentworth et à la norme standard, entre moins de 8 et presque 0 en échelle Φ , tableau I.6). Ce sont ces dépôts qui présentent pour nous la plus grande valeur informationnelle potentielle.

US STANDARD		DÉNOMINATION (selon C.K. WENTWORTH)	AFNOR		MÉTHODE D'ÉTUDE
mm	Φ		α	mm	
BLOCS (BOULDERS)					
256	-8		-24	250	MESURE DIRECTE
			-23	200	
128	-7	GROS CAILLOUX (COBBLES)	-22	160	
			-21	125	
			-20	100	
64	6	GRAVE	-19	80	
			-18	63	
			-17	50	
			-16	40	
			-15	31,5	
32	-5	(GRAVEL) PETITS CAILLOUX (PEBBLES)	-14	25	TAMISAGE
			-13	20	
16	-4		-12	16	
			-11	12,5	
			-10	10	
8	-3		-9	8	
			-8	6,3	
			-7	5	
			-6	4	
			-5	3,15	
4	-2	GRANULES	-4	2,5	SÉDIMENTATION
	{etc}		-3	2	
2	-1		-2	1,6	
{1,68}	{-0,75}	TRÈS GROSSIER	-1	1,25	
{1,41}	{-0,5}				
{1,19}	{-0,25}				
1	0		0	1	
{0,84}	{0,25}	SABLE	1	0,8	
{0,71}	{0,5}	GROSSIER	2	0,63	
{0,59}	{0,75}				
0,5	1	ARENITES (SAND)	3	0,5	
	{etc}		4	0,4	
0,25	2		5	0,315	
			6	0,25	
0,125	3		7	0,2	
			8	0,16	
			9	0,125	
0,0625	4		10	0,1	
			11	0,08	
			12	0,063	
0,0312	5	GROSSIER	13	0,050	
			14	0,040	
			15	0,031	
0,0156	6	MOYEN	16	0,025	
			17	0,020	
			18	0,016	
0,0078	7	FIN	19	0,0125	
			20	0,0100	
			21	0,008	
0,0039	8	TRÈS FIN	22	0,0063	
			23	0,005	
			24	0,004	
0,0020	9	ARTICLE (CLAY)	25	0,0031	
			26	0,0025	
			27	0,002	
			28	0,0016	
0,00098	10		29	0,00125	
			30	0,001	
			31	0,0008	
			32	0,00063	
0,00049	11		33	0,00050	

Tableau I.6 : Correspondance des échelles et dénominations granulométriques (d'après Chamley, 1987).

3. Rôle et pertinence des pièges à sédiments de l'endokarst.

Dans l'approche des remplissages détritiques souterrains que nous voulons développer ici, les conditions hydrodynamiques apparaissent essentielles pour la compréhension des accumulations sédimentaires endokarstiques, et notamment détritiques fines. La question de l'accumulation de ces particules à certains endroits du karst a aussi permis de faire une sélection des types de remplissages les plus intéressants pour développer notre recherche. La notion de piège à sédiments, jouant le rôle de « bande enregistreuse » des fluctuations extérieures, apparaît aussi comme un critère déterminant de notre travail. L'efficacité de cette fonction repose essentiellement sur la morphologie riche et complexe de l'endokarst.

Malgré le faible nombre de références bibliographiques à ce sujet, nous tenterons de montrer, au fil du texte, toute la variété de pièges sédimentaires que le karst offre naturellement. L'intérêt de se pencher sur cette caractéristique des remplissages sédimentaires endokarstiques sera développé et argumenté à travers des notions énergétiques (modalités du dépôt des sédiments dans un piège) et spatiales (position dans le réseau de drainage et question de l'accessibilité). Cette réflexion théorique permettra également de faire le point sur les différents pièges à sédiments que l'on peut rencontrer dans l'endokarst.

Cette discussion autour du critère « piège endokarstique » permet de recentrer le propos sur notre propre approche, et sur le type de piège endokarstique qui est apparu comme étant le plus judicieux, pour tester la démarche d'étude présentée. En expliquant alors plus finement le comportement de ce piège sous terre, nous essayerons d'en montrer les atouts mais aussi les limites, par rapport au stockage d'une mémoire environnementale.

a) La fonction de piégeage : diversité et aspects énergétiques

L'évolution des formes de l'endokarst, liée aux variations des conditions de creusement, produit un grand nombre de pièges potentiels pour les sédiments fins [Delannoy, 1982 et 1992]. C'est donc l'énergie et l'agressivité des eaux qui sont ici en cause [Bakalowicz, 1979 ; Quinif, 1994].

Cette diversité sera développée en fonction des principales grandes zones karstiques. Mais, nous tenons à préciser ici que la distinction adoptée entre zone noyée et zone vadose ne trouve sa justification que sur un plan purement théorique, pour la clarté du discours. En réalité, la diversité des pièges et des accumulations sédimentaires qui s'y forment est liée à l'histoire et à la formation du réseau karstique. Celle-ci repose sur la succession de différentes phases de creusement et d'épisodes d'ennoiement et d'écoulements libres qui façonnent le système karstique et ses pièges potentiels. Cela implique donc qu'on ne peut considérer un piège uniquement à un instant donné. Sa présence même est l'intégration de différents épisodes de creusements/remplissages, antérieurs mais dont la combinaison a contribué à la constitution de la phase de piégeage observée.

1. En zone noyée

Les zones noyées du karst, à condition qu'elles soient de type capacitif¹ et non transmissif, recèlent de nombreux pièges sédimentaires potentiels. Ces types de pièges sont dépendants des formes des conduits et des galeries, mais surtout des écoulements qui y circulent. Ainsi, une zone noyée transmissive, même avec une morphologie suffisamment complexe pour offrir des zones de piégeage, ne sera pas propice à l'accumulation de dépôts, notamment les détritiques fins. On entend en effet par zone transmissive une zone où les écoulements ont une vitesse rapide, telle que l'accumulation d'informations ne peut se faire [Mangin, 1981 et 1998 ; Perrette, 1999]. Les particules transportées par l'eau sont donc soumises à une forte énergie, et poursuivent leur déplacement jusqu'à l'exutoire karstique voire au-delà. A travers un hydrodynamisme fort, c'est donc le transfert de l'information uniquement qui est alors exprimé.

¹ Transmissif/Capacitif : On peut caractériser un système par son aptitude à transmettre des signaux (flux d'eau, de matière). Si le système transmet un signal sans le perturber, on dit que le système est transmissif. Si le système transmet un signal en le perturbant, en le filtrant plus ou moins, ce système est dit capacitif [Perrette, 1999]. Dans le cas du drainage karstique, un système transmissif transmet directement les précipitations (entrée du système) vers l'exutoire (sortie du système). Au contraire, un système capacitif filtrera le rythme des précipitations par l'effet du stockage/déstockage de l'eau, selon la nature des écoulements souterrains.

Par contre, en zone noyée capacitive, l'écoulement des eaux plus lent entraîne le dépôt de particules sédimentaires dont les fines. C'est ainsi qu'une galerie noyée peut emmagasiner des sédiments soit apportés de l'extérieur, soit qui étaient déjà stockés avant dans le karst à l'amont (cas des systèmes binaires). Les dépôts peuvent alors s'accumuler de différentes façons, à partir d'un point bas de la galerie comme contre un obstacle à la circulation des eaux. En effet, le moindre obstacle peut suffire, en écoulement très lent, à initier la sédimentation localement (figure I.17). La présence d'un obstacle peut avoir différentes origines : l'existence de blocs ou de concrétions sous-entend une phase de karstogenèse antérieure, à écoulement libre ; mais les différences de lithologie peuvent aussi jouer ce rôle. D'autre part, si des conditions hydrodynamiques de zone noyée capacitive persistent suffisamment longtemps, les galeries peuvent aussi être parfois entièrement colmatées. Dans une telle dynamique, la notion de piège est moins marquée, c'est l'énergie de l'écoulement (pouvant même être extrêmement réduite) qui est prépondérante. Si la source de matière est conséquente, les zones noyées du karst peuvent alors devenir de gigantesques pièges à sédiments.

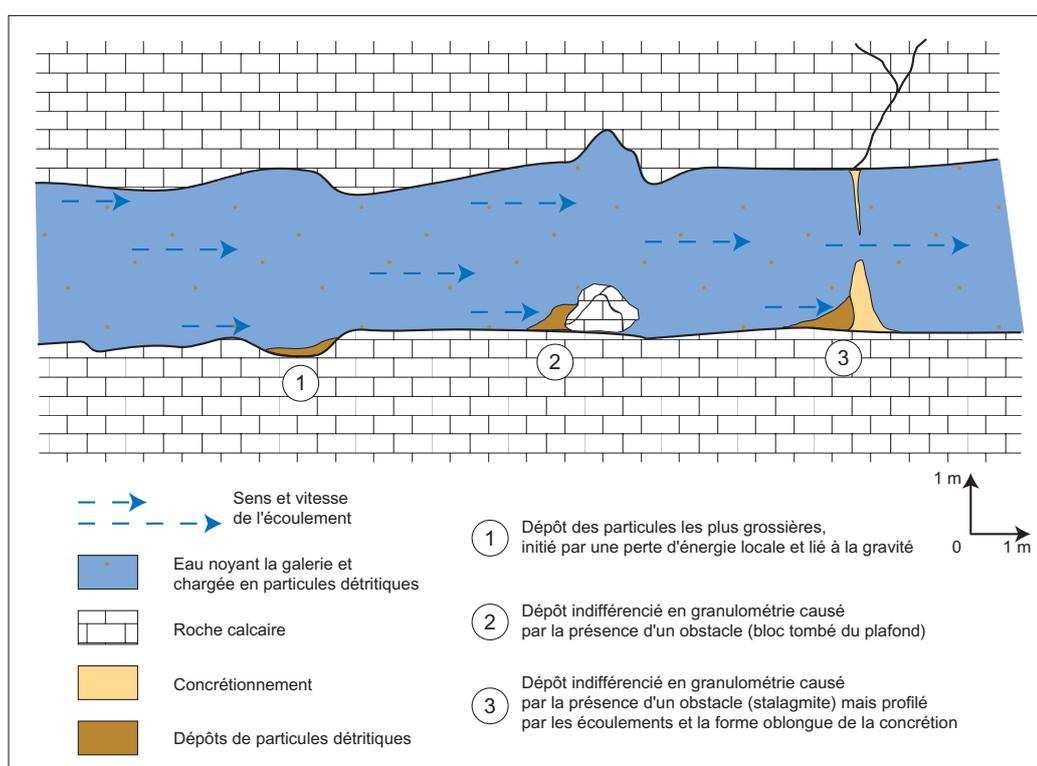


Figure I.17 : Les différentes causes possibles dans l'initiation d'une sédimentation en zone noyée capacitive.

Ce type de piégeage pose le problème de l'accessibilité. En effet, pour leur étude en système actif (ce qui est le cas dans notre démarche), les sédiments accumulés en zone noyée ne sont pas les plus faciles à atteindre. Pour tous les remplissages de ce type, et dès lors qu'on n'est pas spéléonaute, on est contraint de travailler sur des sites fossiles (absence d'écoulements), ou sur des cavités n'étant plus, au moins en partie, en zone noyée. Les données des sites actifs restent forcément très intéressantes, ne serait-ce que pour affiner la compréhension du fonctionnement de ces galeries noyées, mais leur observation et le prélèvement des sédiments qui s'y déposent implique une lourde mise en œuvre logistique. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avons pas étudié ces pièges de zone noyée active en partie pour ces raisons techniques, mais aussi car, comme nous allons le voir, ce ne sont pas ceux qui permettent l'entrée en matière la plus pertinente en regard de l'approche méthodologique que nous avons développée.

En revanche, l'étude d'un paléosystème, l'Aven d'Orgnac (Sud Ardèche), développée dans

ce mémoire (cf. *infra* : Partie IV) permettra de mettre en avant l'intérêt de ces dépôts. Cette cavité a bien connu une phase d'envolement et de colmatage de ses réseaux. Nous verrons que l'étude des sédiments de certains secteurs de cette cavité et de leur piégeage a été pour nous un moyen d'évaluer la reproductibilité de notre approche.

2. En zone vadose

La zone vadose du karst est beaucoup plus aisée pour l'approche fonctionnelle. L'accessibilité des dépôts, et leur étude en site actif, ne montre pas d'obstacle majeur. Par la diversité des écoulements et des autres phénomènes qui peuvent s'y produire, la zone vadose renferme une grande richesse de pièges potentiels. Mais il faut là aussi nuancer l'intérêt de ces différents pièges en fonction de leur position dans le système de drainage, et en fonction de l'hydrodynamisme. La vitesse d'écoulement est toujours à prendre en compte dans la zone vadose du karst. Cette distinction devient même essentielle dans la réflexion menée sur le choix du piège à étudier, car les écoulements libres connaissent une plus grande variabilité dynamique que les écoulements en zone noyée.

En effet, la stabilité des conditions d'écoulement en zone vadose est toute relative. Pour illustrer cet aspect du problème, imaginons une rivière souterraine pérenne (figure I.18). Sur son parcours dans le réseau de drainage, elle rencontre un certain nombre de pièges potentiels pour les particules détritiques qu'elle transporte. Les ruptures de pentes, marmites, méandres, ou encore des obstacles constitués par des blocs effondrés ou des concrétions sont autant de possibilités de dépôt de matière par la rivière. Lors d'une saison estivale, un écoulement relativement indigent permet l'accumulation de sédiments au niveau de ces différents pièges, la quantité de dépôt étant différente selon le type de piège rencontré. On est donc alors dans un contexte hydrodynamique à tendance « capacitive », tout au moins localement, qui autorise l'accumulation de dépôts au sein du karst. Mais dès que survient un orage, l'hydrodynamisme de la rivière est considérablement modifié. Les écoulements deviennent plus importants, avec une vitesse et une énergie de transport décuplées par rapport aux conditions « normales » d'écoulement. Dans un tel contexte de crue souterraine, les accumulations sédimentaires constituées dans ce type de piège sont totalement ou partiellement remobilisées. En zone vadose, la crue et d'une manière générale les hautes eaux, sont donc des épisodes de forte énergie, qui remobilisent les accumulations sédimentaires.

Le phénomène de crue pouvant être fréquent sous terre, cet exemple illustre l'importance de l'efficacité du piège potentiel pour les sédiments transportés jusqu'à lui. En fonction de l'étude que nous souhaitons mener sur les remplissages détritiques endokarstiques, un « bon » piège sédimentaire doit donc remplir les conditions suivantes :

- être *accessible*, aspect qui nous fait privilégier la zone vadose du karst ;
- être *efficace*, ce qui sous-entend que sa position sur le parcours de la rivière souterraine, et sa forme puissent permettre le dépôt et l'accumulation durable de sédiments fins en limitant au maximum les risques de départ de matière.

Ce dernier point, sur ce que nous avons appelé « l'efficacité » d'un piège sédimentaire introduit une autre notion, en étroite relation à la forme : la taille d'un piège potentiel pour l'accumulation de sédiments. En effet, le dépôt de particules détritiques dans un piège repose sur la perte d'énergie des écoulements. Dans un piège de grande taille (taille relative, considérée par rapport à une rivière

souterraine), cette perte d'énergie est mieux assurée. Surtout, le problème des remobilisations de matière s'en trouve réduit. En effet, plus le volume d'eau à remettre en mouvement est grand, plus cette agitation sera faible. Ainsi, les accumulations de sédiments sont à l'abri d'éventuelles remobilisations. A l'issue de cette réflexion sur les pièges potentiels de l'endokarst en fonction des aspects énergétiques, un seul type de piège apparaît réellement pertinent et en conformité avec les autres paramètres de l'étude proposée : le lac souterrain.

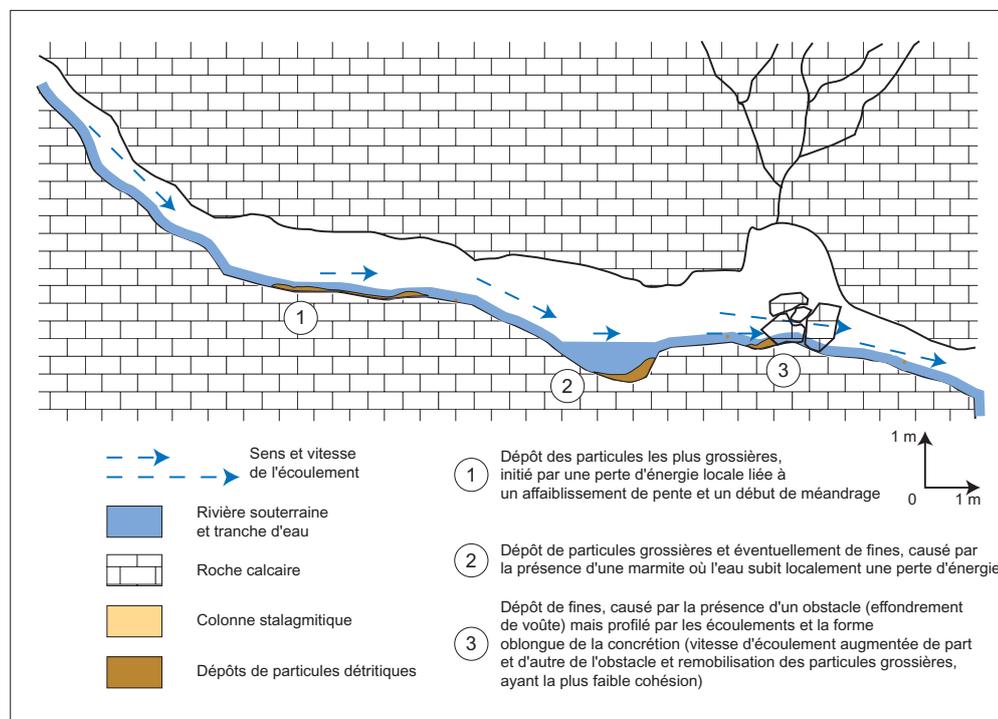


Figure I.18 : Le problème de l'instabilité hydrodynamique en zone vadose, et ses effets sur le fonctionnement des pièges sédimentaires.

3. Le lac endokarstique : piège sédimentaire par excellence

Le système lacustre souterrain représente donc pour nous le piège sédimentaire « idéal », à plusieurs titres. Tout d'abord, et conformément à ce qui a été montré dans le chapitre précédent, un système lacustre est un « accumulateur » de particules transportées par une (ou plusieurs) rivière(s) souterraine(e). Ces écoulements apportent donc au niveau du piège lacustre des dépôts détritiques fins, dont on a vu qu'ils étaient les plus pertinents pour mener à bien notre étude (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.2.b). Ce type de piège est donc en bonne cohérence avec les autres critères importants que nous avons besoin de respecter pour l'étude envisagée.

Le système lacustre remplit aussi toutes les conditions discutées au sujet de la grande diversité des pièges endokarstiques (figure I.19):

- *accessibilité* : Par définition, un lac souterrain se situe dans la zone vadose du karst. Son accès sera *a priori* toujours possible et l'étude de la sédimentation dans un site actif y est aisée. On peut souligner que la beauté des lacs souterrains est souvent exploitée dans les cavités touristiques. Les aménagements prévus en conséquence, pour les visiteurs, en facilitent encore grandement l'accès.
- *forme* : La présence d'un système lacustre sur le parcours d'une rivière souterraine implique une rupture de pente. Cette rupture assure une perte d'énergie des écoulements dès leur arrivée

dans le lac. Cette baisse de l'hydrodynamisme permet la sédimentation relativement continue des particules détritiques transportées.

- *taille* : Par rapport à la largeur de l'écoulement de la rivière souterraine, la largeur d'un système lacustre est souvent au moins deux à trois fois supérieure. Ce rapport des dimensions, (taille d'un système lacustre par rapport à la rivière qui l'alimente) est très important car c'est la garantie d'un piège sédimentaire pérenne. En effet, plus le lac est grand, plus le volume d'eau qu'il contient sera capable de conserver une certaine stabilité dynamique, quels que soient les événements hydrologiques qui surviennent. Ainsi, lors d'une crue, l'augmentation de l'énergie d'écoulement sera, au moins en partie, absorbée par le système lacustre. Plus le lac est grand, plus sa capacité à atténuer les variations hydrodynamiques de la rivière souterraine sera forte. Il en va de même de la conservation des dépôts accumulés dans le lac. Plus le piège est grand, moins il y aura de possibilités de remobilisations et de départs de matière lors d'épisodes hydrologiques violents.

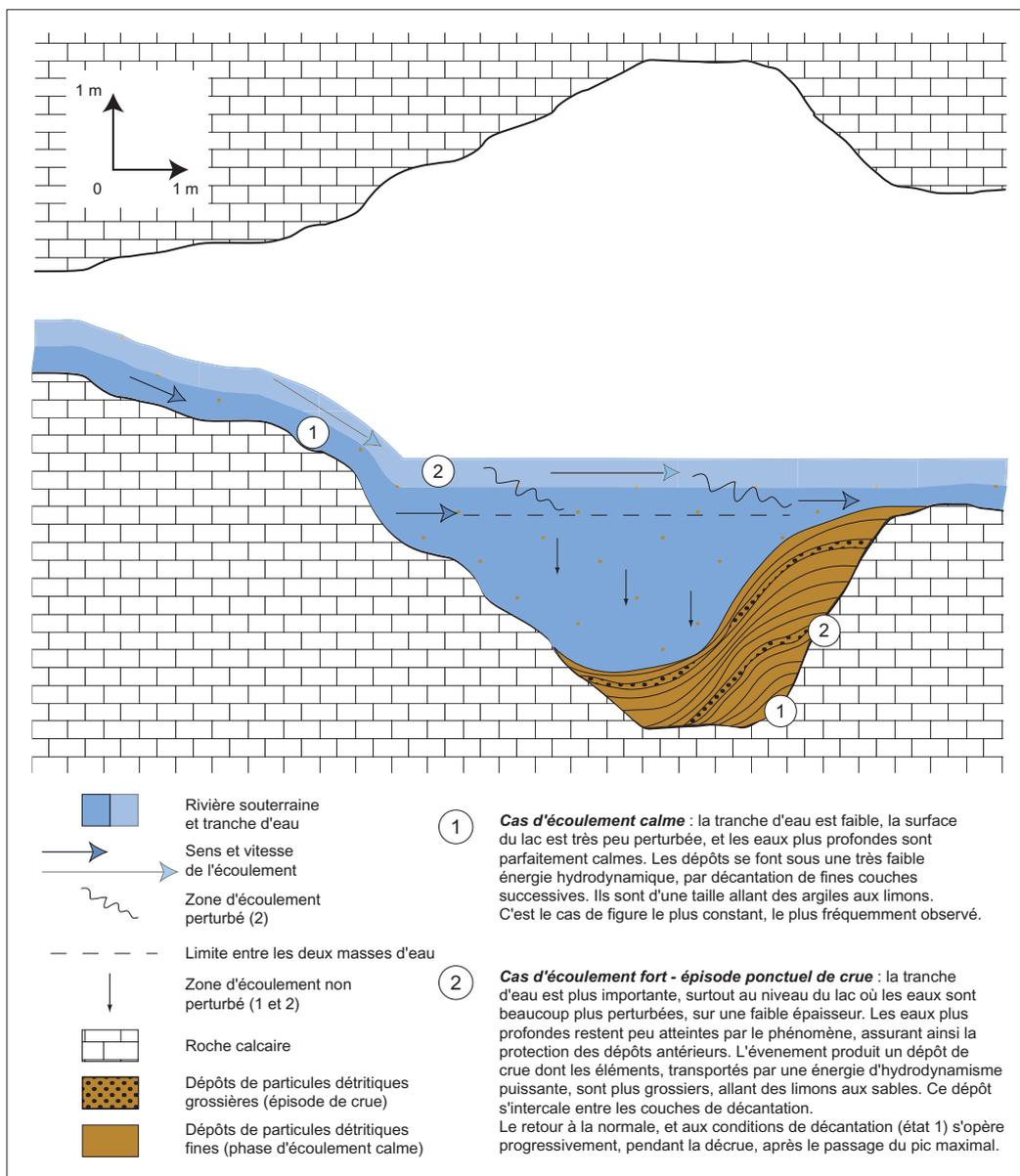


Figure I.19 : Le système lacustre endokarstique et son comportement en tant que piège sédimentaire.

En se plaçant dans un contexte de rivière souterraine pérenne, le système lacustre endokarstique en tant que piège sédimentaire est donc la garantie d'un archivage des dépôts relativement régulier et constant. Le problème des lacunes de sédimentation y est également limité, de part sa capacité à compenser, à minimiser les fortes modifications de l'hydrodynamisme pouvant se produire à l'amont. Dans le cadre de l'étude d'un piège à sédiments détritiques actif, le système lacustre, en assurant la continuité et la protection des dépôts fins accumulés, est donc de loin, le plus adéquat.

Cette présentation des différents types de pièges montre bien à quel point il est important de faire la part des choses, et de mener un raisonnement le plus complet possible sur ce que l'on veut montrer, et ce dont on dispose réellement au niveau de l'endokarst. En plaçant la notion de piégeage comme une des principales entrées de notre approche des dépôts, une réflexion sur les types de pièges et leur fonctionnement est absolument incontournable (tableau I.7). Dans ce contexte d'une démarche méthodologique nouvelle, on est donc contraint de comprendre, de cerner le fonctionnement du piège lui-même, pour évaluer son intérêt, avant de pouvoir raisonnablement en étudier le remplissage sédimentaire, la mémoire naturelle qui y est constituée.

b) La place des pièges dans le réseau de drainage : données spatiales

L'importance de la localisation des pièges sédimentaires endokarstiques dans le réseau de drainage est en étroite rapport avec la notion de mémoire naturelle environnementale et climatique. Derrière cette notion d'archive, c'est l'idée de cumul des informations qui intervient. Aussi, la position d'un piège sédimentaire au sein d'un réseau karstique à son importance. Plus le piège se situe à l'aval du système, plus les sédiments qui s'y accumulent, dans leur nature et leur disposition, intègrent des données en relation avec les conditions extérieures, mais également en rapport avec le réseau de drainage à l'amont.

1. Rappels sur la hiérarchisation intrinsèque du karst

Le karst possède la faculté de s'auto-organiser [Mangin, 1982 ; Delannoy, 1997], au fur et à mesure de son évolution qui est fonction de la géologie (nature et structure), de la géomorphologie, des climats, et des fluctuations du niveau de base, ces dernières étant liées aux conditions hydrologiques (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.1). Quelle que soit l'évolution de ces différents paramètres régionaux, le karst s'élabore sous forme d'un réseau de conduits plus ou moins étendu, dont la complexité et la hiérarchisation augmentent au cours du temps.

Cette hiérarchisation repose sur la concentration de l'énergie des écoulements avec la gravité. Ainsi, un réseau karstique à son interface avec la surface est composé de multiples points d'entrée pour les écoulements, tandis que leur évacuation se produit en un seul point dont l'emplacement est directement dépendant du niveau de base. La partie sommitale d'un réseau karstique est donc constituée d'un réseau de fentes relativement développé, qui va peu à peu se transformer en un réseau de conduits plus large mais aussi moins dispersé, jusqu'à devenir un drain seul et unique, au niveau de l'exutoire karstique (figure I.20).

	Type de piège endokarstique	Dimensions / Position	Fonctionnement	Pérennité de l'archivage et qualité de la mémoire
Zone noyée transmissive	présence éventuelle de quelques formes convenant pour constituer un piège	des aspérités sur la section de conduit (qq cm) aux creux plus conséquents (qq dm à m)	régime trop puissant pour permettre le moindre dépôt de matière, fonction de transfert seule active	néant : pas de piégeage des particules détritiques véhiculées, pas d'archives sédimentaires sur les évolutions environnementales
Zone noyée capacitive	Anfractuosités et irrégularités des conduits	présentes sur toute la section de la galerie, centimétriques	blocage des particules en suspension, transportées à l'interface eau/paroi	piège peu efficace, archivage très faible et de qualité médiocre
	méandres et anastomoses	présents sur toute la section de la galerie, développement variable, larges de qq centimètres	sur les parois et le plancher, la complexité de la forme piège des particules irrégulièrement	piège peu efficace, archivage très faible et de qualité médiocre
	marmites	présentes au plancher, diamètre décimétrique à métrique	possibilité de dépôt par gravité des particules les plus grossières	piège efficace, archivage plus régulier mais biaisé en données granulométriques, qualité faible
	"lacs"	présents au plancher, diamètre plurimétrique	cas où les écoulements sont localement ralentis, dépôt de particules grossières mais décantation de fines possible	piège efficace, archivage régulier et peu biaisé en données granulométriques mieux représentées, qualité moyenne
	blocs éboulés du plafond	obstacle au plancher, l'empreinte laissée à la voûte peut constituer un piège, taille décimétrique à métrique (pour 1 bloc)	blocage des particules en suspension (forte cohésion), à l'interface eau/paroi pour la voûte, blocage simple au niveau des blocs au sol	piège peu viable, piégeage désordonné, et fort risque de remobilisation de la matière
	concrétionnement	obstacle formé au plancher et à la voûte, largeur centimétrique à métrique	blocage des particules en suspension (forte cohésion), pour la voûte, blocage simple pour les blocs au sol	piège peu viable, piégeage désordonné, et fort risque de remobilisation de la matière
Zone vadose	Anfractuosités et irrégularités des conduits	présentes sur toute la section de la galerie, centimétriques	dans le cas d'écoulements forts, blocage des particules en suspension, transportées à l'interface eau/paroi	piège peu efficace, archivage très faible, très ponctuel et de qualité médiocre
	méandres et anastomoses	présents sur toute la section de la galerie, développement variable, larges de qq centimètres	actifs au plancher, la complexité de la forme piège des particules irrégulièrement	piège peut efficace, archivage très faible, et très peu viable, qualité médiocre
	marmites	présentes au plancher, diamètre décimétrique à métrique	possibilité de dépôt par gravité des particules les plus grossières	piège efficace, archivage plus régulier mais biaisé en granulométrie, qualité et viabilité faibles
	lacs	présents au plancher, diamètre plurimétrique	perte notable d'énergie des écoulements, une sédimentation régulière est assurée	piège très efficace, archivage complet et régulier, grande pérennité, qualité et viabilité bonnes
	blocs éboulés du plafond	obstacle au plancher, taille décimétrique à métrique (pour 1 bloc)	blocage des particules transportées face à l'obstacle, dépôt profilé par accélération locale des écoulements de part et d'autre de l'obstacle	piège efficace mais archivage biaisé car tri des particules fonction de leur cohésion, qualité et viabilité médiocre
	concrétionnement	obstacle formé au plancher, d'une largeur centimétrique à métrique	blocage des particules transportées face à l'obstacle, dépôt profilé par accélération locale des écoulements de part et d'autre de l'obstacle	piège efficace mais archivage biaisé car tri des particules fonction de leur cohésion, qualité et viabilité médiocres

formes devant leur présence à une phase vadose antérieure à la phase noyée capacitive

pouvant résulter d'une phase noyée

problème d'accessibilité

sous réserve d'écoulements lents, de type capacitif, s'exerçant avec une certaine constance

Tableau I.7 : Les différents pièges à sédiments de l'endokarst, et leur intérêt en tant que support à la constitution de mémoires environnementales.

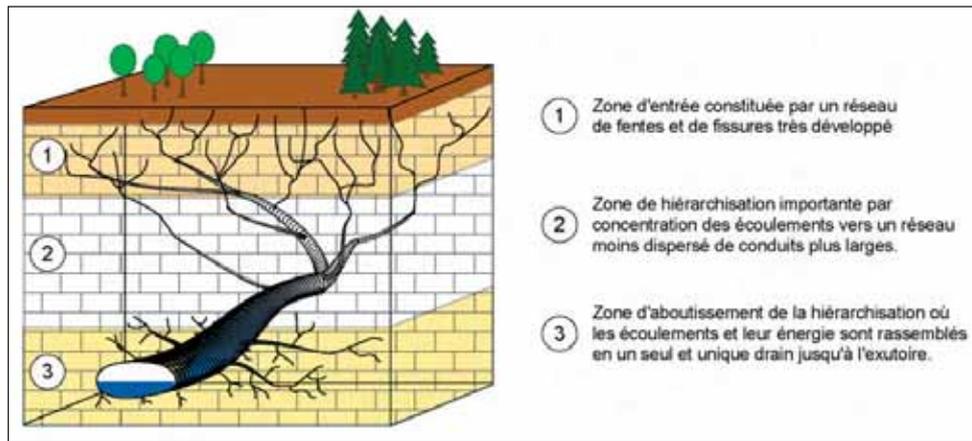


Figure I.20 : Schéma de la hiérarchisation d'un réseau de drainage karstique sous l'effet de la concentration des écoulements (modifié d'après Perrette, 1999).

Le système karstique tend naturellement à réduire sa dissipation d'énergie, notamment en fusionnant les conduits d'écoulement. Cette canalisation de l'énergie des écoulements vaut également pour les informations climatiques et environnementales transmises par l'eau au système karstique. L'eau, dans son rôle de transfert entre la surface et l'endokarst, apporte et centralise au sein du karst les différentes données relatives aux conditions extérieures, notamment à travers les remplissages. Les composantes environnementales ainsi transmises par les écoulements sont donc peu à peu regroupées, mais aussi enrichies de données internes, au fur et à mesure de leur transit dans le réseau karstique. Aussi, parmi les différents pièges que nous venons de présenter, ceux qui sont situés dans les zones les plus à l'aval (au plus près de l'exutoire karstique), constituent un archivage d'autant plus riche et complexe. En effet, la mémoire naturelle considérée est alors une résultante qui combine :

- des données extérieures climatiques et environnementales ;
- des données propres à l'ensemble du réseau karstique depuis l'entrée dans le système, jusqu'au piège lui-même et son fonctionnement.

Une fois de plus, sur ces considérations spatiales, le karst joue un rôle double. Il protège et intègre des données sur les conditions climatiques et environnementales extérieures, tout en les imprégnant de nuances, de modifications liées au comportement du réseau de drainage parcouru jusqu'au piège. Le karst agit donc bien réellement en « filtre », en exerçant sa propre influence sur les archivages naturels qu'il contient. La localisation d'un piège à sédiments dans un réseau karstique devient donc un paramètre important à prendre en compte, la fonction intégratrice des données extérieures et endokarstiques étant d'autant plus performante que l'on se situe loin dans la hiérarchisation des conduits actifs. Toutefois, cette capacité à l'intégration des données peut être assez variable, et notamment selon le type de karst considéré. En effet, un karst unaire, avec de très nombreux points d'entrée sur le système karstique, implique une certaine dispersion des écoulements, au moins au départ. La capacité d'intégration de données dans un tel système sera donc *a priori* plus perturbée, voire amoindrie, que dans un système binaire où les écoulements sont moins diffus dès leur entrée dans le massif calcaire.

2. Choix de la zone d'étude

Pour l'étude des dépôts détritiques que l'on se propose de faire et par rapport à nos objectifs d'améliorer la lecture de la mémoire environnementale correspondante, cette capacité à cumuler, à

intégrer des données externes et internes au système karstique est très pertinente. En effet, une telle combinaison de données est riche d'informations tant sur la karstogenèse (*via* les comportements hydrodynamiques du système), que sur les évolutions et fluctuations locales extérieures (à travers la nature, la structure et l'origine des dépôts).

Il est donc important de travailler sur un piège lacustre, pour les raisons développées jusqu'ici, mais aussi de prêter attention à sa localisation dans le réseau de drainage. Par rapport à ce qui vient d'être discuté, il apparaît clairement que c'est la partie aval des systèmes karstiques qui est la plus intéressante dans notre approche et ses objectifs. En cela, le type de piège choisi n'est pas en contradiction. En effet, compte tenu de la hiérarchisation, c'est bien dans la partie aval d'un karst qu'on trouve les conduits les plus larges, les formes les plus vastes. C'est donc dans cette partie des réseaux que la présence d'un grand piège, comme le lac, est la plus probable (figure I.20). De plus, l'aval des réseaux peut être parfois d'accès très aisé.

Le piège endokarstique de type lacustre s'affirme donc bien comme étant le plus intéressant, à tous les niveaux de l'analyse théorique conduite ici, pour mener à bien notre travail. Il assure une sédimentation détritique fine, relativement continue dans les apports et à l'abri des problèmes de remobilisations de la matière sédimentée. On doit donc simplement vérifier, dans le choix du site actif étudié, qu'on se situe bien à l'aval de réseaux parcourus par des écoulements pérennes, de façon à garantir l'assurance d'une continuité de l'archivage, et l'intégration d'un maximum de données sur l'amont du système ainsi que sur ses relations avec les fluctuations climatiques et environnementales extérieures.

c) Réflexion sur le type d'archive naturelle constituée : intérêts et limites

Dans ce dernier point du chapitre, nous montrerons que la mémoire naturelle formée par l'accumulation sédimentaire au niveau d'un piège lacustre endokarstique, comporte à travers ses particularités de fonctionnement, des avantages et des inconvénients dont il faut avoir conscience avant de se lancer dans l'étude et l'analyse des dépôts.

1. L'empreinte du réseau de drainage

Dans sa capacité à filtrer et à canaliser les écoulements et leur contenu informationnel, le karst confère donc aux remplissages sa propre empreinte. C'est l'intégration du fonctionnement hydrologique de tout l'amont du système qui est synthétisée dans les dépôts détritiques accumulés. Ce fonctionnement transparaît dans l'organisation des sédiments, dans leur granulométrie, qui renvoie à une capacité de transport, et dans les couches détritiques atypiques que la stratigraphie pourra laisser apparaître. Dans un piège situé à l'aval du réseau de drainage, le remplissage est donc marqué par le parcours de ses sédiments constitutifs dans le réseau amont, qui ont collecté sur leur passage une masse de données sur l'hydrodynamisme endokarstique. Le dépôt, considéré dans son intégralité, en garde la « mémoire » ; la dernière information correspondant au piégeage et au dépôt dans le lac. En cela, le piège lacustre par son propre fonctionnement (ne serait-ce que la hauteur d'eau), fait également partie de l'élaboration de la mémoire constituée par les sédiments détritiques. A partir d'un remplissage lacustre, on peut donc travailler sur les modalités de piégeage et de transport, et remonter ainsi vers des données plus générales sur la karstification et son évolution telles que l'ancienneté de fonctionnement du piège lacustre, l'enregistrement des crues (modalités et fréquence)...

Mais un réseau de drainage implique une telle complexité dans les cheminements possibles des écoulements, que la notion de filtre peut s'exprimer au point de masquer certains aspects du fonctionnement karstique. Il y a donc un certain nombre de processus ou de phénomènes qui peuvent intervenir à l'amont du piégeage lacustre, et dont l'archivage ne se fera pas ou sera difficilement décelable.

Il en va ainsi, par exemple, de dépôts peu stables constitués en amont et qui sont remobilisés très facilement, au moins partiellement, à la moindre augmentation d'énergie des écoulements. Sans pour autant avoir affaire à une véritable dynamique de crue, ces particules remobilisées peuvent finalement atteindre le piège lacustre, après une ou plusieurs interruptions de leur transport. Au niveau du lac, ces particules remobilisées seront probablement définitivement conservées mais elles introduiront une forte perturbation dans la logique chronologique du remplissage dans son ensemble (figure I.21). Du point de vue stratigraphique comme granulométrique, ces dépôts ne seront pas forcément distinguables car apportés par des écoulements très peu différents de l'écoulement produisant la sédimentation de fond¹. La faible modification des écoulements peut avoir une origine strictement endokarstique (effets de seuil sur les parties amont), ou une origine extérieure, mais dans les deux cas, il est extrêmement difficile d'identifier le dépôt ainsi constitué dans le lac et le cas échéant, d'en expliquer l'origine (localisation du piège antérieur, nombre de remobilisations, même dépôt encore existant à l'amont ou totalement remobilisé... ?). L'efficacité du piège lacustre peut donc présenter une certaine faiblesse quant à la logique chronologique des dépôts qui y sont accumulés. Si ce type de piège permet de limiter au maximum les problèmes de départ de matières et de lacunes, les remobilisations de matières représentent un apport de particules détritiques prenant part au remplissage sans la moindre logique temporelle. C'est une caractéristique dont il faut avoir conscience lors des essais de reconstitutions paléoenvironnementales.

Il est important d'avoir conscience que ce problème de lisibilité existe. Nous verrons tout de même que des méthodes connexes et/ou des éléments non détritiques du remplissage permettent d'identifier ce type de processus introduisant une certaine anarchie dans la logique chronologique (cf. *infra* : Partie II, Chap. I.5 ; et Partie III, Chap. II.5).

2. Les perturbations induites sur l'archivage des fluctuations extérieures

Dans la transmission vers l'endokarst des informations extérieures relatives aux évolutions climatiques et environnementales, l'action du karst en tant que filtreur n'est pas la seule active, et d'autres données interviennent. Il y a tout d'abord la présence de la couverture pédo-végétale, dont la propre évolution au cours du temps est dépendante des conditions climatiques. Pour différents types de climats, la couverture bio-pédologique sera différente, et réagira différemment aux précipitations (abondance de végétation, évapotranspiration...). Cette couverture, par sa localisation à l'interface entre le karst et son voisinage environnemental et climatique, jouera déjà vis-à-vis des précipitations, un rôle de filtre sur les écoulements transmis à l'endokarst (en ralentissant ou en différant dans le temps les infiltrations). En produisant des transmissions d'informations différentes au fil de son évolution, la couverture bio-pédologique induit déjà un certain nombre de perturbations, de filtres, sur l'archive sédimentaire endokarstique finalement constituée dans le massif considéré.

¹ On parle ici de sédimentation de fond, pour signifier qu'il s'agit de la sédimentation détritique fine qui s'exprime sous le régime hydrologique le plus régulier (par opposition à toute autre énergie hydrodynamique qui peut intervenir à tout moment et produire une sédimentation différente).

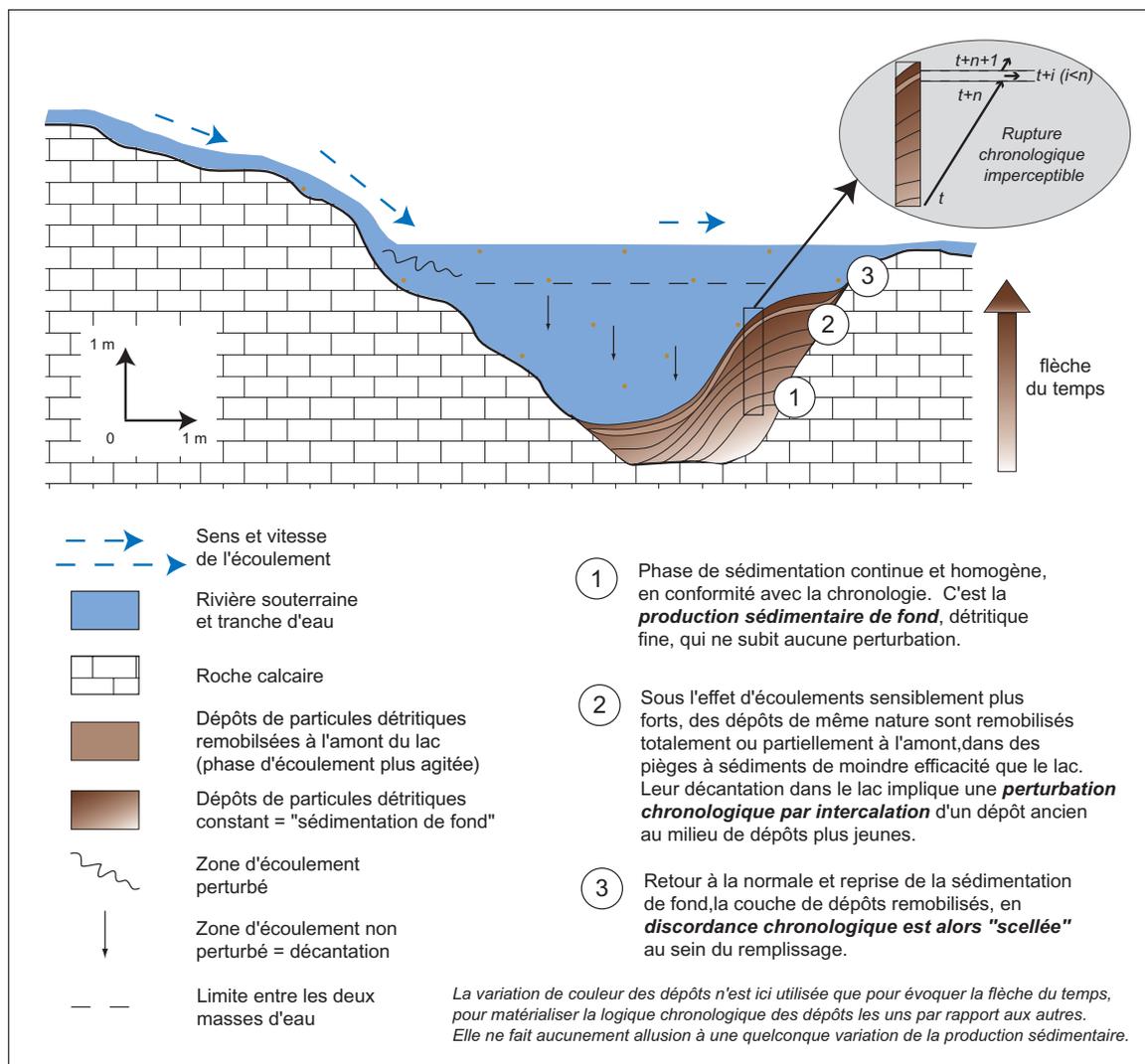


Figure I.21 : Les remplissages lacustres comme marque d'une sédimentation endokarstique complexe agissant à différentes échelles spatiales et temporelles.

La question de la distance à la source de matière intervient aussi, notamment dans le cas des karsts binaires. Elle n'est d'ailleurs pas sans lien avec le rôle joué par une éventuelle couverture biopédologique. En effet, plus la distance parcourue par les écoulements, depuis la source jusqu'au piège souterrain est grande, plus le filtrage de l'information finalement enregistrée sera fort. Il y a donc là une limite, un inconvénient dans le fait de choisir un archivage constitué en bout de course. Certes, la richesse des informations mémorisées est bien réelle, mais elle repose en partie sur une certaine complexité, liée à l'intégration, à la combinaison des différentes données cumulées depuis le point de départ des écoulements. Cette complexité rend donc la lecture des archives plus difficile.

De plus, comme on l'a expliqué pour des variations internes au karst, des événements d'ampleur beaucoup plus importante, causés par les évolutions climatiques et environnementales extérieures peuvent ne pas être conservés au sein du karst. Il y a en effet deux catégories de phénomènes pour lesquels l'archivage dans un lac endokarstique ne gardera pas forcément de traces, notamment s'ils interviennent de façon brutale et ponctuelle.

C'est ainsi qu'un été particulièrement sec peut produire un étiage sévère des écoulements pouvant aller jusqu'à une interruption exceptionnelle de la sédimentation endokarstique. Cette

interruption, d'une durée pouvant varier de quelques semaines à quelques mois, ne laisse pas le temps au système karstique de s'installer dans une autre logique d'évolution. Au niveau du piège lacustre qui sera resté en eau pendant l'absence de dépôts, cela signifie que la lacune de sédimentation laissée ne sera pas forcément perceptible après la reprise de la sédimentation (figure I.22). A l'inverse, un épisode de précipitations particulièrement important peut produire, au niveau du système de drainage karstique des écoulements d'une énergie exceptionnellement forte. Cela a pour conséquence un déboufrage massif des réseaux, incluant la remise en eau de certains conduits fossiles ou colmatés. Au niveau du piège lacustre, la violence des écoulements peut franchir un seuil et produire une agitation inhabituelle du volume d'eau, plus en profondeur. Un départ de matières est ainsi engendré (figure I.22). Dans ce second cas, la limite entre la sédimentation avant et après la crue est bien visible (limite érosive liée à la remise en mouvement des particules sédimentées, puis dépôt grossier caractérisant l'épisode de crue). Par contre, c'est l'épaisseur de sédiments remobilisés qui est impossible à estimer. La chronologie stratigraphique subit donc une perte d'information qu'il est difficile d'apprécier.

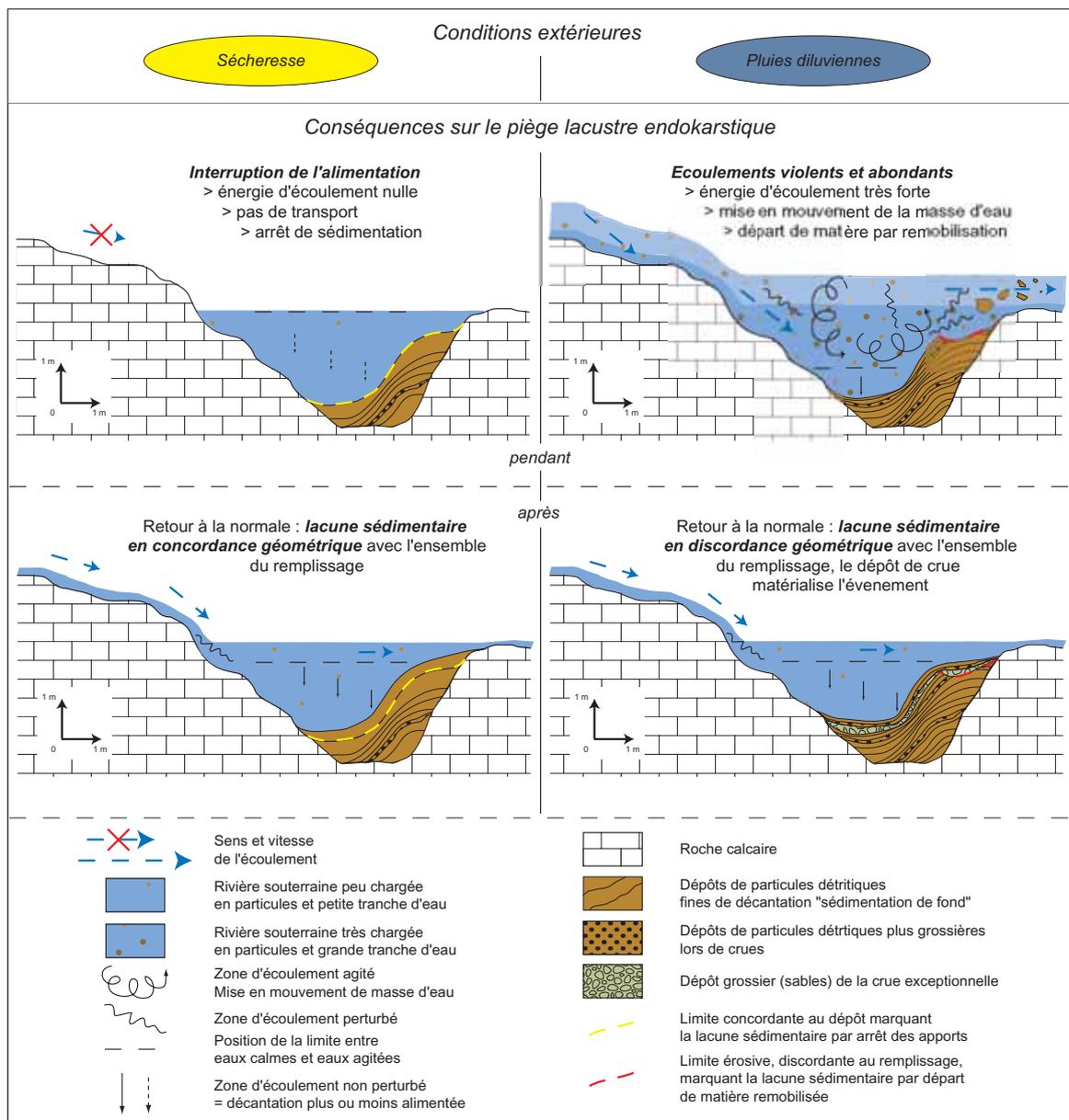


Figure I.22 : Différentes perturbations dans la continuité de l'enregistrement sédimentaire dans un lac endokarstique, causées par des événements extérieurs exceptionnels.

Ce genre de phénomène conduisant à la perturbation, voire à la perte d'informations est d'autant plus ennuyeux que les éléments en cause correspondent à des manifestations importantes de la variabilité des conditions extérieures. C'est là encore un des aspects qui justifie toute l'importance de travailler sur un piège endokarstique situé dans un réseau actif, au moins pour avoir le contrôle des enregistrements de la sédimentation actuelle et sub-actuelle. En effet, c'est seulement par ce moyen, que l'on peut comparer la teneur de l'archivage sédimentaire endokarstique avec la donnée environnementale et climatique directement observée (données météorologiques, témoignages...). L'étude d'un site actif est donc le seul moyen de faire la part des choses et d'évaluer la qualité de l'enregistrement naturel souterrain à travers l'impact réellement exercé par le karst.

3. Le parallèle avec les lacs de surface en tant que pièges à sédiments

Il est tentant de faire un parallèle entre les deux pièges sédimentaires que sont les lacs de surface et les lacs souterrains. Cela sera développé par la suite (cf. *infra* : Partie II, Chap. II.1) et nous verrons que les points communs sont rares. En effet, le filtrage produit par le karst introduit un grand nombre de différences dans le fonctionnement même du piège et sa relation à la source de matière ; cela accroît considérablement la complexité de la mémoire naturelle qui s'y forme. Tout le discours développé jusqu'ici s'est attaché à le démontrer.

La seule réelle similitude réside dans le problème de l'étude « en grand » du remplissage. Dans les deux cas, l'étude sédimentologique et surtout stratigraphique, géométrique, ne peut s'appuyer que sur des prélèvements en différents points du remplissage. Le choix des points d'échantillonnage n'est pas toujours simple et peut être lié à des contraintes matérielles, et/ou d'accessibilité. Pourtant, ce choix est important car c'est la répartition des prélèvements qui conditionne la spatialisation des données. Et la géométrie d'un remplissage a son intérêt, surtout lorsque l'on veut comprendre le fonctionnement du piège sédimentaire.

§§§§§§§

Dans la mesure où les reconstitutions paléoclimatiques et paléoenvironnementales s'appuient sur une bonne analyse et une bonne compréhension de ces phénomènes d'hydrodynamisme endokarstique, notre approche des dépôts détritiques vise à mieux cerner les modalités du transfert de matière et à mettre en avant la notion de piégeage des sédiments.

La fonction de piégeage dans l'endokarst a été discutée, permettant de mettre en évidence son rôle important dans l'archivage sédimentaire de données relatives aux évolutions climatiques et environnementales. La discussion autour de la grande diversité des pièges endokarstiques potentiels a aussi montré que les différents types de pièges pouvant avoir des fonctionnements différents, il est important d'en faire une analyse pour faire un choix judicieux dans le piège à étudier. Le piège le plus intéressant pour l'étude que nous voulons mener est incontestablement le lac endokarstique. Ce choix fait, nous avons pu en discuter les intérêts et les limites en tant que support à un archivage de données environnementales. La fonction « filtre » du karst est alors apparue dans toute sa dualité, atout et contrainte à la fois. Son expression se fait à différents niveaux (figure I.23) :

- *protection* : le karst protège les archives naturelles qu'il contient. Cette notion de protection sous-tend une autre particularité des archives environnementales endokarstiques : un

enregistrement des fluctuations environnementales plus ou moins direct, en rapport avec la distance à l'extérieur. De fait, plus une archive se constitue en profondeur dans les réseaux, plus l'enregistrement des données extérieures est indirect. La qualité de la mémoire environnementale constituée s'en trouve donc modifiée, par rapport à une archive de surface. Dans le cas de sédiments détritiques, nous avons également montré que leur protection est directement dépendante de l'efficacité du piège endokarstique qui a permis leur accumulation (problème des dépôts de matière). La notion de protection intervient donc à deux échelles : au niveau du piège à sédiment (petite échelle) et par rapport au réseau de drainage dans son ensemble et aux sources de matière (grande échelle).

- *filtrage/tri* : cet aspect est également dépendant de la distance à la source de matière, donc de la position de l'archive étudiée dans le réseau de drainage. Plus l'archive est placée en profondeur, en aval du réseau de drainage, plus la mémoire naturelle correspondante, en connexion avec les variations des conditions extérieures, sera filtrée par le long parcours des écoulements. Cette notion de filtrage ne doit pas être perçue comme une simple « perte » d'information. Il peut s'agir simplement d'une information de nature environnementale, dont la « trace » dans l'archive naturelle est modifiée par le karst, spécifique au milieu. L'information environnementale est donc bien archivée par la mémoire naturelle, mais elle n'a pas la même lecture que dans une archive naturelle de surface.

- *intégration* : l'intégration des informations augmente la quantité de données mémorisées, mais complique aussi leur lecture, l'identification de chacune. Cette dernière notion est également corrélée à la position des archives dans le karst. Plus une archive s'est constituée en profondeur, plus elle intégrera, sous réserve de la bonne qualité du piégeage, des données de l'extérieur et des éléments en provenance de l'endokarst, collectés à l'amont du piège. Toute la difficulté consiste alors à reconnaître et à individualiser chaque information. Nous avons montré que cela n'est pas toujours évident.

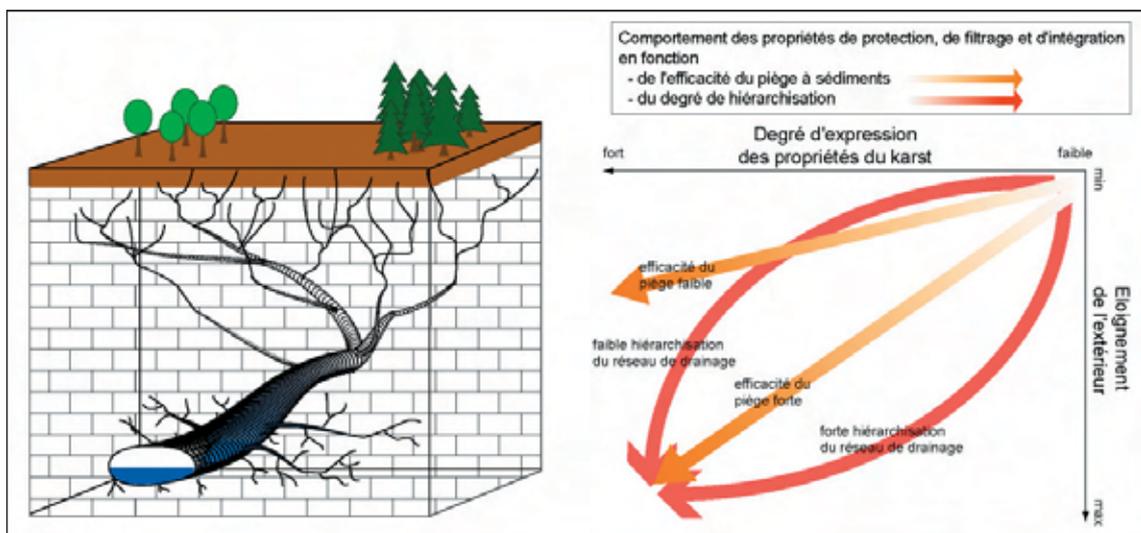


Figure 1.23 : L'évolution des contrôles intrinsèques du karst sur son contenu en archives naturelles du type sédiments détritiques.

Les trois paramètres composant la fonction filtre du karst (protection + filtrage/tri + intégration) sont étroitement corrélés les uns aux autres et leur association confère aux mémoires naturelles endokarstiques une forte spécificité. En effet, les notions de tri et d'intégration notamment permettent de faire ressortir le fait que plus le filtrage dans son ensemble sera important, pour une archive placée

en profondeur dans le réseau de drainage, plus l'information enregistrée peut être considérée comme majeure, de première importance dans l'évolution des fluctuations environnementales. La capacité mémoire des archives endokarstiques est donc tout à fait fonctionnelle, mais elle est soumise par la combinaison de ces trois paramètres, à un cryptage relativement poussé et propre au domaine karstique.

Par rapport à l'approche originale des dépôts détritiques endokarstiques que nous avons proposé, et en tenant compte des objectifs que nous nous sommes fixés, il est clair que toute cette démarche théorique, cette conceptualisation de ce qu'il est possible de faire est un préalable indispensable. La bonne marche des analyses envisagées et un test pertinent des méthodes utilisées repose sur cette réflexion et sur le choix mûri des types de dépôts et de pièges les plus appropriés. En définissant très précisément ces paramètres, on contribue à une démarche méthodologique plus fondée, dans laquelle les résultats et les interprétations possibles seront d'autant mieux positionnées.

Tous ces éléments de réflexion sur le contexte de piégeage et la fonction de mémoire naturelle endokarstique font ressortir un point crucial de notre approche : l'étude et surtout l'interprétation des données de la sédimentologie doit impérativement s'opérer en deux temps. Le premier doit s'attacher à la compréhension des modalités du transport et de l'archivage des sédiments détritiques dans un réseau karstique. C'est le préalable indispensable au second temps de notre démarche. C'est en effet seulement après cela qu'une réflexion plus large sur les causes externes au système karstique pourra être raisonnablement conduite. La compréhension de l'archivage des fluctuations climatiques et environnementales externes dans les mémoires naturelles de l'endokarst ne peut se faire qu'avec une certaine connaissance des conditions internes au système.

CONCLUSION

Dans les chapitres de cette première partie, nous avons tenté de montrer l'intérêt du milieu karstique et de son rôle joué à différentes échelles, de mémoire naturelle des évolutions climatiques et environnementales incluant l'impact de l'Homme. Cette présentation nous a permis de positionner notre propre approche du karst, à travers les remplissages détritiques, en tant qu'enregistreur naturel. La présentation de l'étude originale envisagée, sur les dépôts détritiques endokarstiques comme une archive à part entière, a conduit à une discussion sur les contraintes du terrain, et à une réflexion la plus exhaustive possible sur les moyens les plus pertinents de mener à bien cette recherche. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence des notions particulièrement capitales dans notre travail, à savoir l'hydrodynamisme souterrain et la fonction de piégeage, caractères ayant tous deux des expressions spécifiques au milieu karstique.

La présentation détaillée de ses deux fonctions a montré qu'elles conditionnaient pour beaucoup la qualité de la mémoire naturelle constituée par les remplissages détritiques. Mais nous avons montré que ces deux critères participant de façon combinée à l'élaboration d'une archive, impliquent intrinsèquement un troisième paramètre capital : le rôle complexe de *filtre protecteur* exercé sur les dépôts par le karst lui-même.

Sur la base de cette réflexion théorique quant à la mise en œuvre de notre étude, nous avons donc pu successivement argumenter les choix des dépôts étudiés et de leur position dans l'endokarst. Les conditions *a priori* les meilleures sont donc apparues et ce par rapport au système de drainage dans son ensemble comme au niveau du piège sédimentaire considéré isolément et de son fonctionnement propre. La problématique de notre travail de thèse a ainsi été développée et explicitée ; l'étude que nous ferons portera donc sur des *dépôts détritiques piégés dans un lac*, localisé de préférence à l'aval du système de drainage, et ce pour les raisons suivantes :

- En termes d'*hydrodynamisme*, le lac offre la plus grande stabilité. Sous réserve d'un fonctionnement pérenne de la rivière souterraine à laquelle le lac est connecté (y veiller dans le choix du site), les apports en particules détritiques seront constants. De là, leur dépôt régulier dans le lac par la perte d'énergie hydrodynamique est assuré. Le lac permet donc un enregistrement continu.
- En termes de *piégeage*, le lac souterrain semble être le type de piège endokarstique le plus performant en raison de sa taille. Celle-ci confère au volume d'eau une bonne inertie qui préserve les dépôts de perturbations et/ou de lacunes (selon que la rivière accuse des épisodes de crues ou d'étiage).
- En termes de *localisation/filtrage*, le lac, s'il est situé en aval du système, est la garantie d'une intégration des informations apportées par les écoulements depuis la surface, mais aussi tout au long de son cheminement dans le réseau de drainage. L'intégration des informations est un moyen de compenser la fonction de filtre exercée par le karst.

Ces trois critères qui conditionnent le meilleur moyen d'aborder l'étude de ces dépôts ont donc été analysés, en vue d'en extraire les paramètres les plus valables, la combinaison optimale pour notre approche. Les aspects théoriques de la problématique sont ainsi clairement exposés. Il nous faut

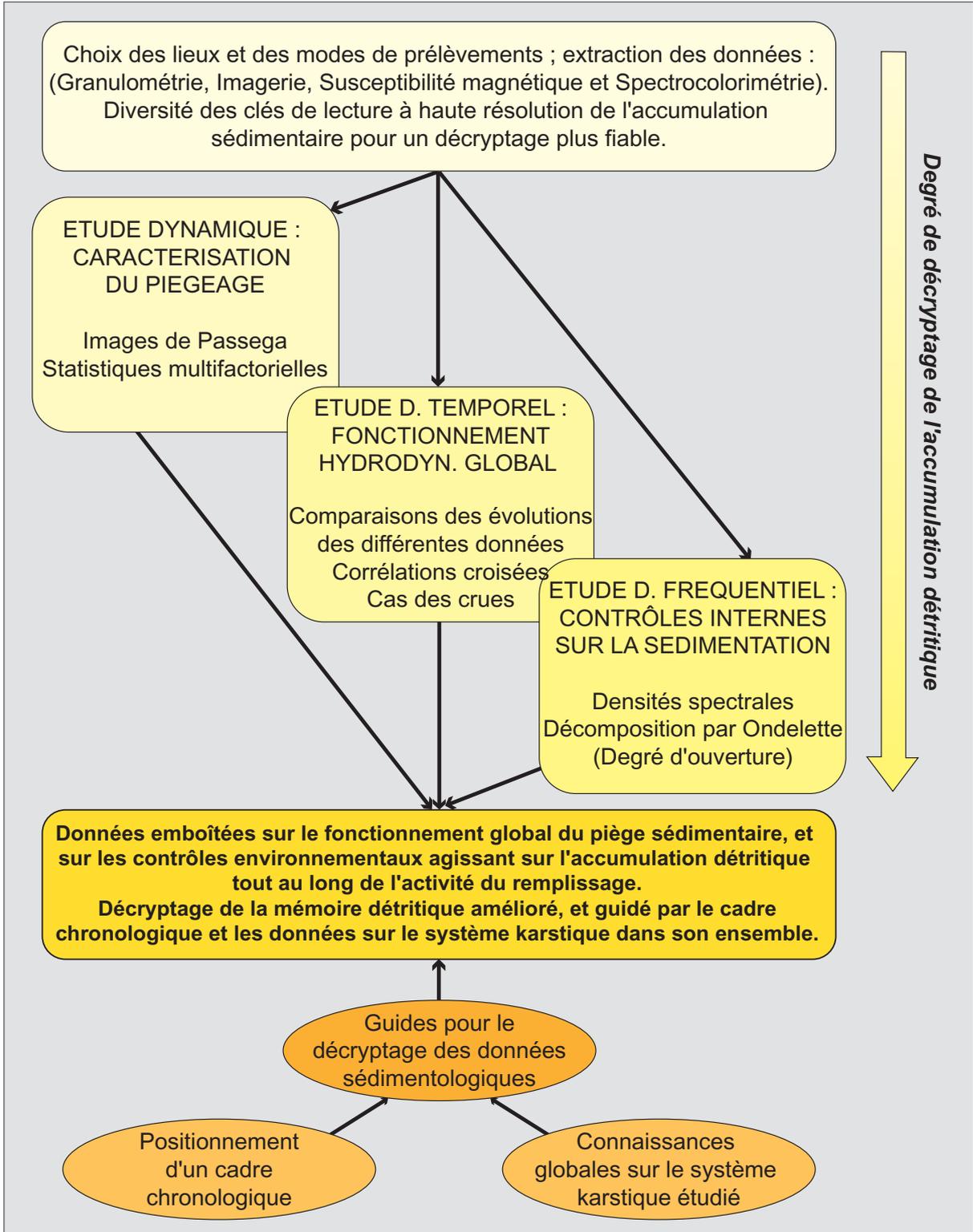
maintenant expliquer la méthodologie qui sera mise en œuvre, afin d'utiliser au mieux les dépôts détritiques lacustres endokarstiques et d'atteindre nos objectifs de compréhension du fonctionnement de cette archive particulière de l'endokarst.

PARTIE II
LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION.
MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.

**PARTIE 2 : LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION.
MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.**

Démarche globale :

Utiliser les méthodes de la sédimentologie classique, et les moyens d'études à haute résolution des systèmes sédimentaires de surface comme base analytique.
Adaptation pour une mise en oeuvre optimisée dans le milieu endokarstique.



INTRODUCTION

La problématique que nous venons de poser, nécessite comme toute problématique une approche méthodologique adaptée. Afin de répondre aux objectifs fixés, celle-ci a été construite à partir des entrées suivantes :

- la définition des modes de prélèvements, d'analyse et de traitements à partir des méthodes existantes ;
- leur adaptation au domaine endokarstique par rapport aux contraintes spécifiques du milieu (accessibilité, spécificité de fonctionnement...);
- les résultats que l'on est droit d'espérer, et leurs limites informationnelles par rapport aux méthodes utilisées et au milieu naturel.

De cette réflexion sur l'intérêt et l'apport informationnel de chaque méthode envisagée dépend, en grande partie, la qualité de l'approche des sédiments détritiques endokarstiques que nous souhaitons appliquer. Dans un premier temps, nous aborderons les différentes méthodes utilisables pour notre recherche. Leurs atouts et leurs limites seront analysés, en tenant compte du milieu sur lequel nous travaillons, et de ses contraintes particulières.

Compte tenu d'une part du concept de piège endokarstique qui est central dans notre problématique de recherche, et d'autre part des pièges étudiés (lacs souterrains), les outils d'analyse utilisés pour les sédiments des lacs de surface apparaissent d'emblée les plus appropriés. Le premier chapitre de cette partie leur est consacré. Nous tenterons de montrer leurs intérêts respectifs pour notre recherche. De plus, nous traiterons de la question de la résolution, de la précision des mesures acquises sur les sédiments. Le souci d'extraire de ces sédiments lacustres des données ayant la *meilleure résolution possible* est un objectif prioritaire. Il s'agit d'utiliser la meilleure résolution « technique », offerte par chaque outil d'analyse ou d'acquisition de données. Cette notion de travail à haute résolution implique donc l'utilisation d'un pas d'échantillonnage le plus fin possible, et cela sera présenté et argumenté au fur et à mesure de la description des méthodes. Ce chapitre a également pour objet de développer les techniques de traitement de données employées. La description de ces outils est aussi le moyen de montrer le type d'information apporté par chaque méthode. L'ensemble de ces méthodes d'analyses fournira ainsi une première trame de la démarche méthodologique que nous avons élaborée.

Le second chapitre de cette partie a pour objet la question du transfert de ces différents outils et méthodes au milieu endokarstique. L'analogie faite avec les lacs de surface sera ainsi ajustée, pondérée par une analyse des différences pouvant intervenir sur les plans à la fois technique et analytique. La notion d'un *cryptage original* des archives endokarstiques, et particulièrement des sédiments détritiques sera ainsi mise en évidence. Cela implique donc de prendre un certain recul quant au potentiel des outils d'étude, et de rester d'une grande prudence sur les interprétations des données correspondantes. La *réponse spécifique* des moyens d'analyse liée au milieu naturel conduira ainsi à étoffer notre démarche méthodologique. En effet, notre approche des sédiments détritiques endokarstiques, par son originalité, présente aussi une certaine fragilité du point de vue des méthodes. Pour faire une lecture correcte des données issues des nouvelles méthodes d'étude que nous proposons, l'existence d'un *référentiel* constitué de connaissances sur le site étudié et l'évolution de son environnement, se révèle alors indispensable. Notre démarche d'étude se doit donc d'être complétée par des méthodes de travail plus classiquement

employées dans les recherches sur le karst. Ces méthodes adaptées au milieu karstique seront donc présentées. Elles permettront de constituer un cadre de connaissances karstologiques, géographiques, environnementales et climatiques sur le site étudié. Ce cadre nous servira de guide, de contrôle, pour la lecture et le décryptage des mesures acquises par les nouvelles méthodes.

CHAPITRE I : LES MÉTHODES D'ÉTUDE DES SYSTÈMES SÉDIMENTAIRES DE SURFACE : BASE À LA CONSTITUTION DE NOTRE PROPRE DÉMARCHE.

L'objet de ce premier chapitre est de présenter les différentes méthodes disponibles, et *a priori* adaptées, pour notre recherche. Les techniques d'acquisition et de traitement de données qui sont exposées reposent sur deux idées de départ. Tout d'abord, dans la mesure où notre problématique porte sur les pièges lacustres endokarstiques, les méthodes d'investigation couramment utilisées dans les recherches sur les lacs de surface, par analogie, s'imposent d'elles mêmes. Ces modes de prélèvement et d'analyse sont présentés dans un premier temps. D'autres méthodes d'utilisation plus large que le strict domaine des sédiments lacustres sont également discutées.

Notre préoccupation principale étant de comprendre plus finement les modalités de la sédimentation souterraine, ces différentes méthodes sont discutées dans un second temps, afin d'en extraire la meilleure résolution technique et/ou opératoire. Le souci de travailler à haute résolution sur les sédiments lacustres endokarstiques se justifie, en effet, par le fait qu'un des intérêts de notre approche réside dans la compréhension détaillée des dynamiques de transport et de piégeage et de leurs causes, au sein d'un réseau de drainage karstique.

L'apport de chaque méthode sera mis en valeur, ainsi que leur complémentarité informationnelle respective. Après une présentation des modes d'échantillonnage, nous aborderons les analyses sédimentologiques (granulométrie notamment), et les acquisitions et traitements d'autres données. Quelques explications sur la méthode d'imagerie en niveaux de gris, sur la mesure de susceptibilité magnétique et sur la mesure de spectrorimétrie seront développées. Les différentes possibilités de traitement de ces données seront également indiquées.

1. Echantillonnage des sédiments

Les lacs de surface comme les lacs endokarstiques étant des sites actifs ou « en eau », l'étude directe des sédiments y est évidemment impossible. Les prélèvements sédimentaires s'imposent donc, et différents dispositifs ont été développés en fonction de l'épaisseur de la tranche d'eau, des contraintes d'accès, de la quantité supposée de sédiment...

a) Les modes de prélèvements

Pour les lacs de surface ou souterrains, on peut travailler par plongée, avec un carottier-tube [Lignier, 2001]. Dans ce cas, les carottes de sédiments sont de longueur assez réduites (au mieux métrique). Il faut au moins deux plongeurs pour opérer. Le carottier est enfoncé à la main dans le sédiment. Pour le récupérer, on en fixe le sommet à un dispositif calé par des flotteurs, qui permet d'extraire la carotte par traction. Un second plongeur se tient prêt à obturer la base de la carotte, dès que celle-ci sera libérée du sédiment (figure II.1). Cette technique présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre sans de gros besoins logistiques. L'extraction de sédiments peut également se faire à l'aide d'une « box-core » (carottier-boîte). Il s'agit d'une simple boîte qu'on enfonce dans le sédiment, et qu'on

retire en dégagant un peu le sédiment autour (figure II.2). Dans ce cas, l'échantillon est assez réduit, puisque la boîte mesure moins d'un mètre de long, et le prélèvement peut donc être fait par un seul plongeur. De plus, on peut en boucher la base avant l'extraction, ce qui limite les problèmes de perte de matière, par rapport au carottier-tube. L'intérêt de travailler par plongée est que l'on peut multiplier les prélèvements, mais leur taille est limitée sinon leur extraction serait impossible.

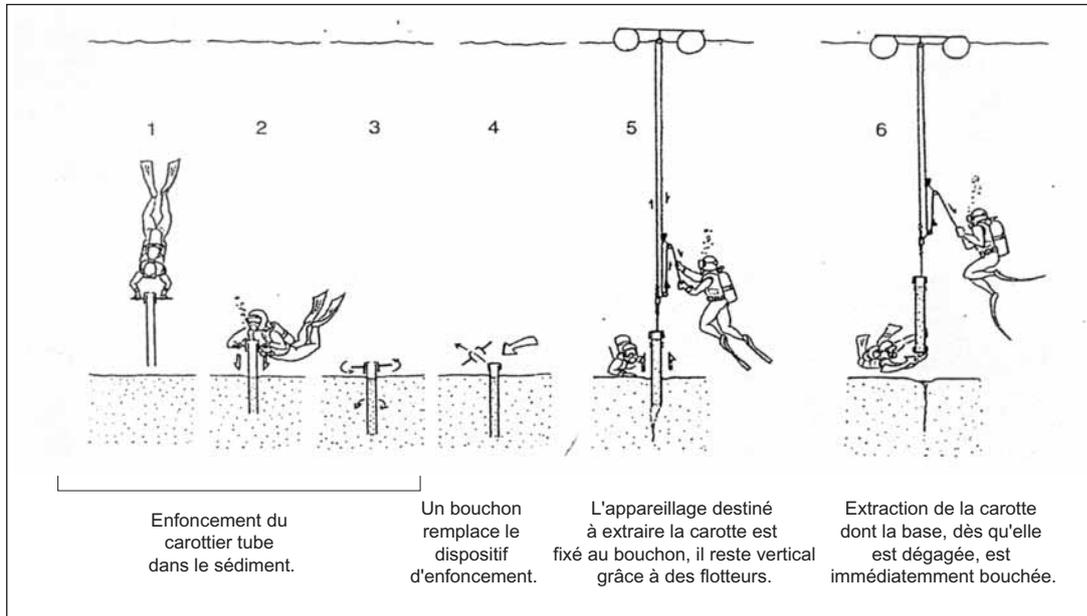


Figure II.1 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement par carottier-tube (d'après Lignier, 2001).

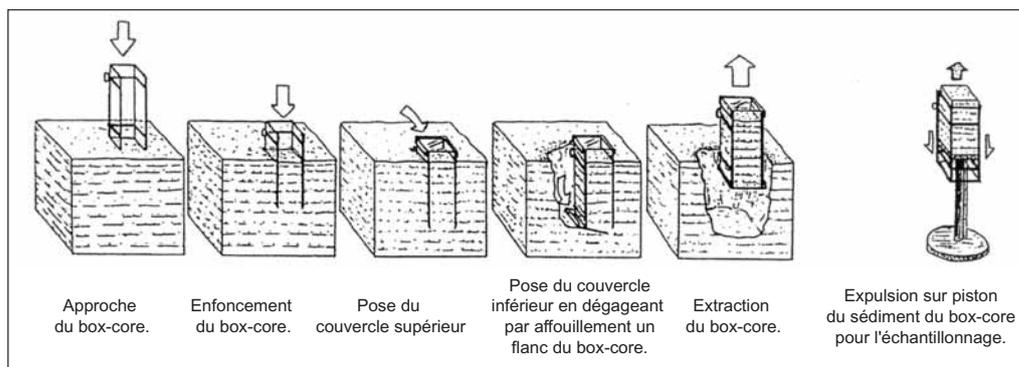


Figure II.2 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement par carottier-boîte (d'après Lignier, 2001).

Un second mode opératoire est le prélèvement de sédiments depuis la surface, également avec deux options. La première, plus performante, est aussi la plus lourde à mettre en œuvre. Elle nécessite une barge équipée d'un tripode. Chaque pied du tripode dispose d'un câble enroulé, et le centre de la barge peut s'ouvrir. C'est par cette trappe que le carottier est dirigé vers le fond du lac, à l'aide des trois câbles déroulés simultanément. A l'interface eau-sédiment, on actionne depuis la barge, un poids qui permet l'enfoncement progressif du tube dans le sédiment. On contrôle la profondeur d'enfoncement à l'aide des câbles, marqués tous les mètres. Quand cette profondeur correspond à la capacité du tube, celui-ci est remonté grâce aux trois câbles, toujours enroulés simultanément. De façon à ne pas perdre de sédiment lors de la remontée du tube, un système de sphincters permet de fermer la base de la carotte, dès lors qu'elle est remontée. Cette méthode, qui nécessite la présence d'au moins quatre personnes pour travailler, permet de carotter à grande profondeur, et de faire de grands prélèvements. Elle permet également de procéder à des carottages successifs, sur le même point d'échantillonnage et

de pouvoir ainsi atteindre aisément des sédiments profonds (figure II.3). Compte tenu de la lourdeur de mise en œuvre et de l'encombrement de l'appareillage, cette technique est la moins adaptée au milieu souterrain.

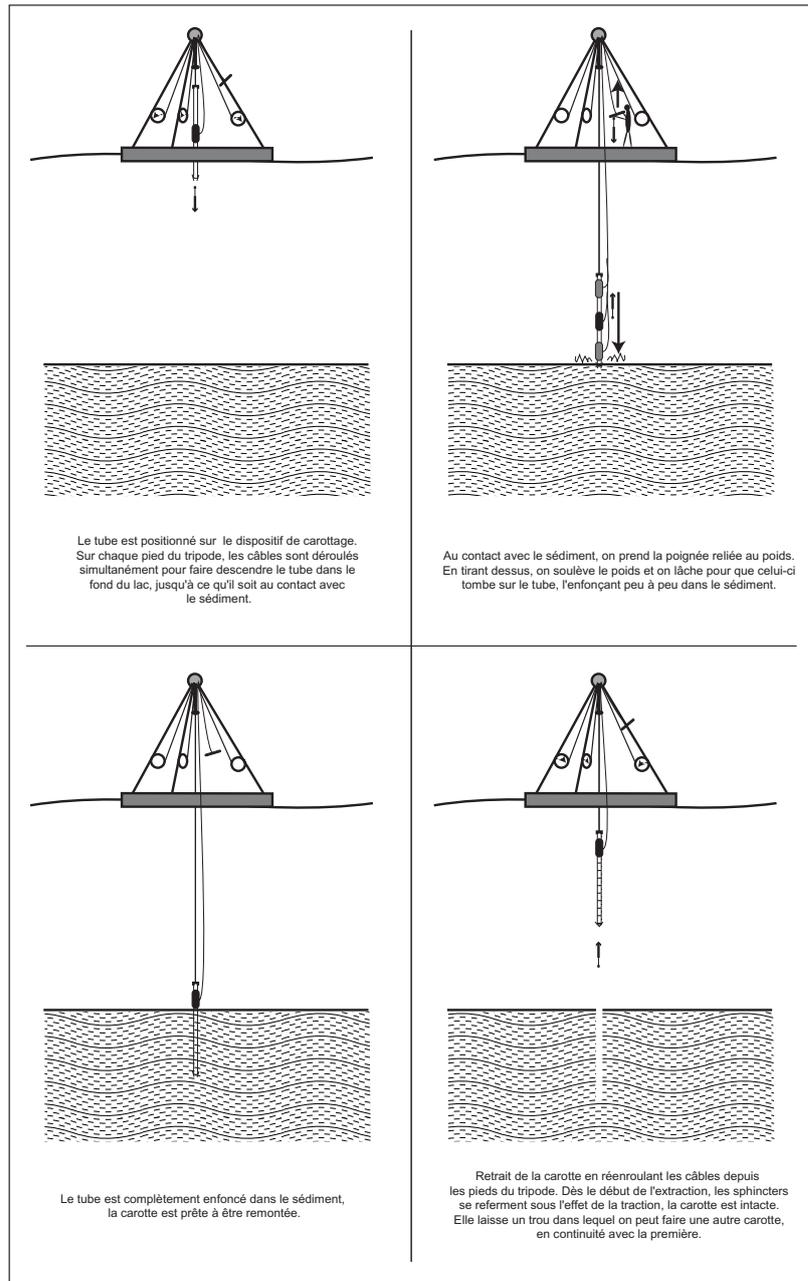


Figure II.3 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement depuis la surface, à l'aide d'une barge.

La seconde option permettant de travailler à distance du sédiment, repose sur l'utilisation d'un carottier à déclencheur. Dans ce second cas, le matériel est plus restreint. On opère depuis un bateau, le carottier est préparé et lesté de poids, le tube qui servira à échantillonner est également disposé. L'ensemble du dispositif est attaché à une simple corde, placée sur une poulie, avant d'être lentement immergé. Lorsque le carottier est correctement positionné au fond de l'eau, à l'endroit souhaité, on peut procéder au prélèvement. Un piston hydraulique déclenche alors les poids, qui tombent sur le tube, l'enfonçant dans le sédiment. Comme dans le cas précédent, un système de sphincters est également présent sur ce carottier, évitant la perte de sédiment lors de son extraction et de sa remontée. Cette seconde méthode de prélèvement à distance suppose de travailler sous une tranche d'eau relativement claire, puisqu'il faut surveiller la descente et la position du carottier pour l'échantillonnage (figure II.4 ;

photo II.1). De plus, le système de poids déclenché à distance, sous l'eau, ne peut fonctionner qu'une seule fois, et implique des prélèvements réduits, souvent de moins d'un mètre, surtout si on a affaire à un sédiment très compact. Plusieurs personnes sont nécessaires pour travailler confortablement.

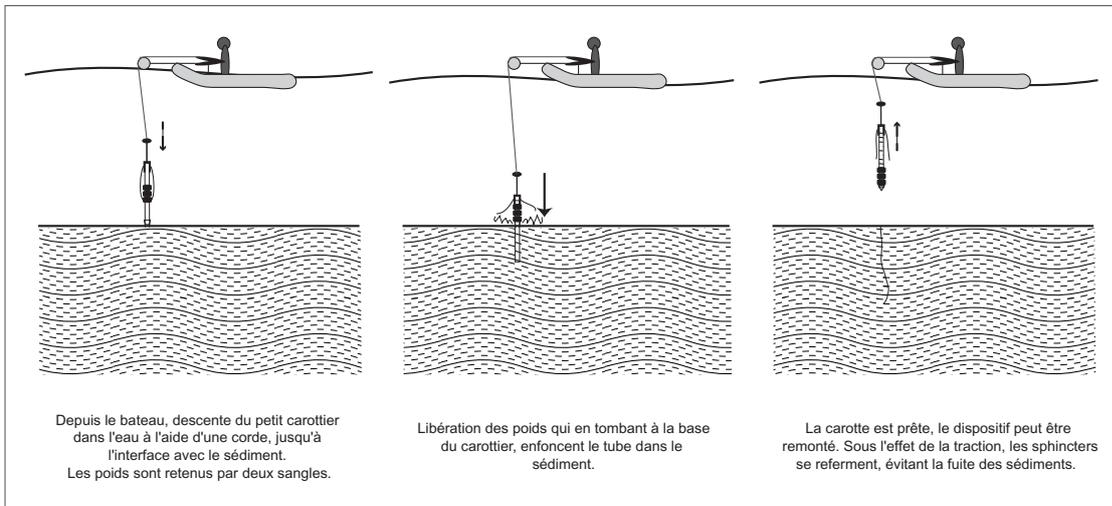


Figure II.4 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement depuis la surface, à l'aide du petit carottier.

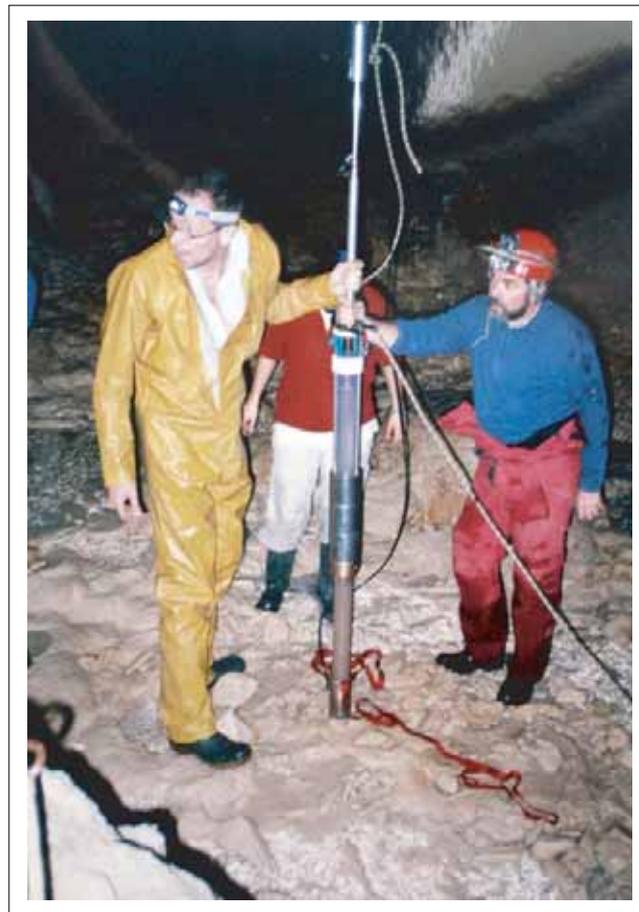


Photo II.1 : Le petit carottier utilisé pour notre étude, dans le lac de la Cathédrale à Choranche (cliché A.S. Perroux).

On peut ajouter que si le sédiment est sous une très faible tranche d'eau, voire temporairement émergé (plage ou banquette), le tube à prélèvement peut être enfoncé « à la main » directement dans le sédiment (photo II.2). Il est retiré de même, en faisant simplement attention à en boucher rapidement le fond, dès que celui-ci est dégagé, pour éviter la perte de matière.



Photo II.2 : Carottage direct sur la banquette argileuse du lac de la Cathédrale à Choranche (cliché A.S. Perroux).

Dans toutes ces méthodes, les tubes utilisés sont en pvc, et ont un diamètre de 6 cm. Bien entendu, chaque carotte prélevée doit être vidée de l'eau qui peut rester au sommet, et bouchée sans laisser d'air, pour empêcher le mélange éventuel des couches. Chaque échantillon doit être ensuite immédiatement nommé et surtout orienté.

b) Avantages et inconvénients des carottes de sédiments

L'ensemble de ces méthodes ne permet pas d'avoir une vision de la masse sédimentaire globale. La géométrie des couches sédimentaires en grand, à l'échelle du lac est de ce fait difficilement appréhendable. Il y a donc une perte, voire un biais de l'information tirée d'une carotte en vue de la spatialisation de la sédimentation ; ce problème a d'ailleurs déjà été soulevé (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.1.c). Or, la spatialisation est un moyen important pour notre approche car elle peut aider à comprendre le fonctionnement du piège endokarstique et à identifier les différentes zones d'intérêt informationnel. Le problème de la spatialisation est donc le point faible majeur, mais malheureusement inévitable, lorsqu'on travaille à partir de prélèvements ponctuels. En dehors de la prospection sismique, qui reste difficilement applicable en milieu souterrain, cet écueil peut être contourné par la connaissance de la dynamique endokarstique, et de la dynamique du lac. La géométrie des dépôts peut alors être abordée par des raccords, des corrélations entre des prélèvements judicieusement placés sur un ou plusieurs profils.

L'avantage de ce mode de prélèvement par carottage est la préservation de l'organisation stratigraphique des sédiments. Elle ne perturbe en rien la géométrie des couches successives de sédiments. En fonction des techniques utilisées, seul un léger effet de pistonage peut apparaître, dû à l'effet de succion produit par l'extraction du prélèvement de la masse sédimentaire totale. Dans ce cas, l'ensemble des couches de la carotte devient légèrement convexe. Mais ce phénomène secondaire étant bien connu, il ne pose pas de problème majeur dans la suite des analyses. Enfin, il faut préciser que les carottes une fois prélevées, sont ouvertes au laboratoire en deux moitiés égales, dans le sens de la longueur. Le tube est scié sur sa périphérie et la séparation des deux moitiés se fait grâce à un fil que l'on passe dans le sédiment (photo II.3). Ce procédé de prélèvement permet donc de travailler sur une moitié de carotte, et de garder l'autre intacte, bien emballée et conservée en chambre froide. En cas de problème ou de nécessité, on pourra avoir recours à la seconde moitié, ce qui est parfois précieux.



Photo II.3 : Ouverture d'une carotte au laboratoire (cliché A.S. Perroux).

Pour notre étude, nous avons principalement eu recours au mode de prélèvement « à distance » avec le carottier à déclencheur, et aux prélèvements « à la main » pour les dépôts de faible profondeur à émergés (cf. *infra* : Partie III, Chap. II.1).

2. Acquisitions de données

Nous désirons ici faire le point des différentes techniques permettant d'aborder les dynamiques de dépôt des particules sédimentaires, voire leur moteur. Ce sont bien sûr les critères granulométriques qui sont les plus utilisés. A travers différents traitements de données, la granulométrie peut être confrontée à d'autres types de mesures sur les sédiments.

a) La granulométrie

C'est la donnée centrale de toute étude sédimentologique, surtout lorsqu'on se pose la question de la dynamique de mise en place des sédiments. Les mesures granulométriques sont nombreuses, et rassemblent un grand nombre de données directes et calculées, sur les grains qui composent un sédiment.

1. Méthode

La technique du tamisage est de moins en moins utilisée au profit d'appareils de mesures laser. Ceux-ci sont plus particulièrement adaptés à l'étude des particules fines, et donnent directement les principaux critères de granulométrie d'un échantillon. Dans le cas présent, nous avons utilisé le microgranulomètre laser Mastersizer™ de Malvern Instruments, financé par le CISM¹ (photo II.4).

Pour effectuer une mesure, on dilue un peu de sédiment dans une cuve d'eau agitée, où des ultrasons permettent de séparer les particules sédimentaires les unes des autres. Grâce au logiciel d'exploitation de la machine, on surveille la quantité de sédiment présente dans la cuve. Pour une mesure correcte, la proportion de sédiment dans la cuve (obscurité) doit atteindre 12 % environ. Cette valeur obtenue, la mesure peut être effectuée. L'eau chargée de sédiment est alors analysée, envoyée entre deux vitres traversées par le faisceau laser. Ce faisceau est dévié par les particules sédimentaires en suspension. L'angle et l'intensité du rayon diffracté sont alors mesurés 10 000 fois par balayage, la valeur

¹ CISM : UFR Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne, Université de Savoie.

de l'angle du rayon diffracté étant inversement proportionnelle à la taille des particules. Le pourcentage de volume occupé par chaque classe granulométrique est calculé par le logiciel en appliquant la théorie de Fraunhofer qui assimile les particules à des disques plats et opaques [Blois, 2000]. On obtient ainsi directement dans un fichier les données servant à construire les courbes granulométriques simples et cumulées, et d'autres mesures indirectes, calculées par le logiciel. Ces données sont classiques en granulométrie, il s'agit d'indices de classement, d'asymétrie, et de valeurs statistiques comme la médiane, le mode, les percentiles. L'appareil utilisé et le logiciel d'exploitation donnent tous ces résultats directement après la mesure, courbes granulométriques comprises (annexe 1). Les données peuvent être directement transférées vers les logiciels de traitement de données, *via* Excel™.



Photo II.4 : Le microgranulomètre laser Mastersizer™ de Malvern Instruments (cliché A.S. Perroux).

2. Mise en œuvre et limites

Ce type d'appareillage est très performant pour les mesures de granulométrie car il couvre un large éventail de tailles (jusqu'à 900 μ pour l'appareil utilisé ici). De plus, chaque mesure ne nécessite que très peu de sédiments, ce qui permet à l'échelle d'une carotte, de faire des mesures très rapprochées et donc d'avoir une assez bonne résolution sur l'évolution de la granulométrie en fonction de la profondeur. En l'occurrence, sur toutes les carottes, nous avons fait une mesure de granulométrie tous les 3 mm. Une telle résolution était possible et nécessaire, mais sur les carottes de lacs de surface, souvent de plusieurs mètres, un pas d'échantillonnage aussi fin est plus rarement utilisé. Un autre avantage de la microgranulométrie laser est qu'elle permet de faire des granulométries décarbonatées directement. En effet, on peut se dispenser des calcimétries classiques faites au calcimètre Bernard, et doubler chaque mesure au microgranulomètre. La première est faite sur le sédiment total, tel que cela vient d'être décrit. Immédiatement après cette mesure, on injecte directement dans la cuve qui contient encore du sédiment un peu d'acide chlorhydrique (quelques millilitres selon la concentration d'HCl, entre 0,5 N et 2 N par exemple), toujours en surveillant l'évolution du taux d'obscurité. Tant que ce taux d'obscurité n'est pas stabilisé, la décarbonatation du sédiment n'est pas achevée et on peut ajouter un peu d'acide. Quand l'obscurité n'évolue plus, on peut déclencher la mesure. On obtient alors la granulométrie du sédiment décarbonaté. De la comparaison des deux mesures et de leur spectre granulométrique, on peut déduire la proportion et la ou les classe(s) granulométrique(s) des carbonates [Trentesaux *et al.*, 2001 ; Arnaud, 2003].

Toutefois, la méthode présente un inconvénient. Nombre de travaux se sont penchés sur la qualité de la mesure effectuée par les granulomètres laser et sur sa précision. Il s'avère que la précision est bonne pour la majorité des classes granulométriques. Mais par contre, ces travaux ont montré que par rapport à la méthode classique (tamisages et décantations), la proportion des argiles est sous-estimée

par les mesures de microgranulométrie laser [Konert et Vandenberghe, 1997]. Cela va même plus loin, la précision de la mesure variant avec le pourcentage calculé. En effet, il a été montré qu'au-dessus d'un certain pourcentage, dont la valeur « seuil » est différente pour chaque classe granulométrique, les fractions granulométriques les moins représentées sont surestimées, alors que les plus abondantes sont sous-estimées. Ainsi, la microgranulométrie laser lisse sensiblement les proportions granulométriques [MacCave *et al.*, 1986 ; Loizeau *et al.*, 1994 ; Beuselinck *et al.*, 1998]. Dans le cadre d'une étude telle que celle que nous avons menée, il est bon de connaître cette limite de la mesure laser, afin de nuancer les interprétations correspondantes en conséquence. De plus, même si le biais de mesure existe, le fait de faire toutes les mesures sur le même appareil permet de conserver une relative homogénéité et une certaine cohérence aux résultats obtenus.

b) L'imagerie en niveaux de gris

Cette technique d'analyse des sédiments est la seule que l'on peut assimiler à une acquisition de données en continu. En effet, dans ce cas, la question du pas d'échantillonnage ne se pose pas directement, puisque l'on travaille à partir d'une image de la carotte sédimentaire. En terme de résolution, l'imagerie en niveaux de gris est donc la technique la plus performante. Pour toutes les autres méthodes d'étude présentées, le choix du pas d'échantillonnage est toujours présent, générant de fait des données discrétisées. L'imagerie présente donc cet atout, cette qualité de résolution sur toutes les autres méthodes exposées ici.

Le principe d'acquisition des données est simple. Nous avons utilisé le protocole établi par nos collègues du LGCA¹, ainsi que leur matériel. La carotte de sédiment est positionnée sur un banc gradué et éclairé au dessus duquel est fixée une caméra numérique reliée à un ordinateur (photo II.5). Un deuxième ordinateur peut être nécessaire pour procéder à la conversion simultanée des images en niveaux de gris. Avant de commencer la numérisation de la carotte, les néons du banc doivent avoir fonctionné environ une heure, pour qu'ils produisent une lumière homogène. La carotte est placée sur un rail qui doit être parfaitement perpendiculaire à la caméra. Il faut veiller au réglage des néons, afin qu'ils ne produisent pas de reflet ou de lumière hétérogène sur la carotte. La mise au point de l'image peut alors être faite avec la caméra. Grâce à l'ordinateur relié à la caméra et au logiciel d'exploitation ImageGrabber™, on visualise l'image de la caméra directement à l'écran. La carotte, affectée d'un mètre, est placée de telle façon qu'on observe son sommet à l'écran. Lorsque la mise au point est faite sur cette première image, on peut commencer à travailler et à prendre les clichés de la carotte. La mise au point doit rester inchangée durant toute la capture des images, de façon à obtenir une image globale parfaitement homogène au final. Le travail d'acquisition des images peut alors commencer. On capture la première image, par exemple sur les dix premiers centimètres de carotte, puis on décale la carotte de façon à avoir à l'écran les dix centimètres suivants pour le second cliché, et ainsi de suite. Il est impératif de prévoir au moins 1 cm de recouvrement entre deux clichés successifs, pour pouvoir ensuite reconstruire l'image totale de la carotte (figure II.5).

La deuxième étape du travail consiste à convertir les images en niveaux de gris. A partir du logiciel ScionImage™, chaque image est convertie grâce aux canaux de conversion de couleur, bleu, rouge ou vert. Le canal qui offre le meilleur contraste est retenu. Pour nous, le canal retenu est le bleu, il présente la plus grande richesse de contraste dans les teintes de gris par rapport à l'image initiale. Le choix du canal de conversion en niveaux de gris étant validé, on utilise la fonction « histogramme » du

¹ Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, basé à Grenoble et à Chambéry.

logiciel. Grâce à cette fonction, on trace directement sur le cliché en niveaux de gris, une droite parallèle à la profondeur de la carotte. Ce tracé doit éviter les trous ou les gros grains dans le sédiment car le logiciel le transforme en une courbe d'évolution des teintes de gris, et il génère dans le même temps le fichier de valeurs correspondantes. Ce fichier de valeur est alors exporté vers un logiciel de traitement de données, via le format TXT. Là encore, on renouvelle l'opération pour chaque cliché. Par contre, ici, la fonction histogramme doit être exécutée sans recouvrement entre les clichés, pour ne pas produire de doublons de données numériques. Ici, la présence du mètre prend tout son sens : il permet de se caler précisément sur chaque photo, sans chevauchement ni lacune (figure II.5).



Photo II.5 : Le banc de numérisation utilisé pour le traitement des carottes en images (cliché A.S. Perroux).

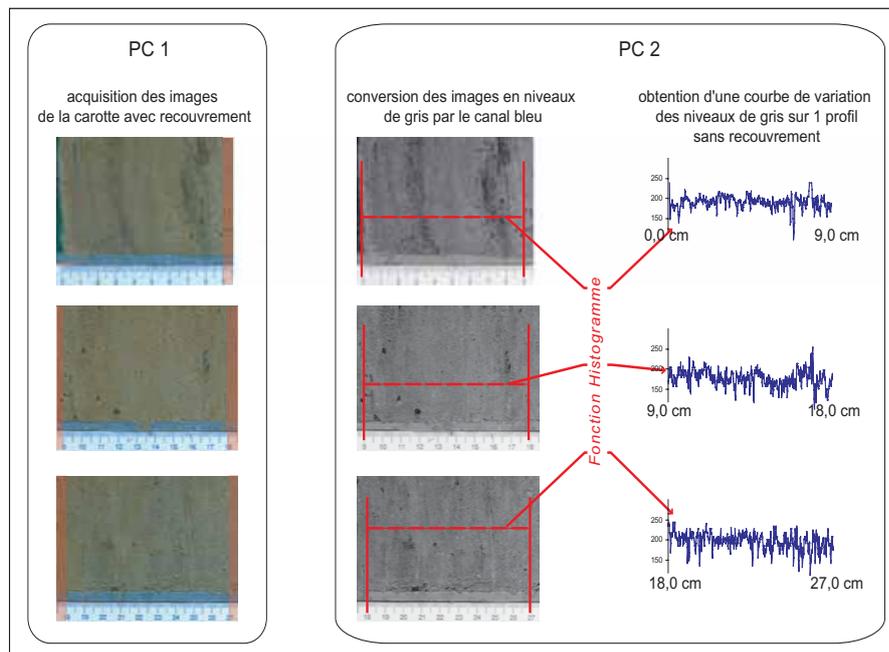


Figure II.5 : Schéma des étapes de l'acquisition des courbes de niveaux de gris.

La qualité de la résolution peut être estimée à ce stade. Par exemple, pour un profil de 10 cm converti en données numériques par la fonction histogramme, le fichier de valeurs contient un certain nombre de valeurs. Il suffit de faire le rapport entre les deux pour avoir une idée de la résolution. En l'occurrence, les clichés utilisés et leur conversion fournissent une valeur tous les 120 à 150 microns, selon les fichiers. On a donc bien un pas d'échantillonnage nettement plus fin que les 3 mm déjà évoqués, et ces données peuvent être considérées comme continues. Les valeurs numériques varient entre 0 (noir) et 256 (blanc) selon l'intensité du gris.

La dernière étape de ce travail sur les images en niveaux de gris consiste à rassembler images et fichiers de valeurs en une seule image d'une part et un seul fichier de valeurs d'autre part. Pour les images, on travaille sous Adobe Photoshop™. Chaque cliché est importé au format TIFF dans un document de travail global. Il est calé au cliché précédent « à la main », par ajustements progressifs. Là encore, la présence du mètre sur les photos est du premier intérêt car on peut alors avoir une précision d'ajustement inférieure au millimètre. Pour les fichiers de données, on les regroupe simplement dans un fichier Excel™ global. Il faut alors simplement veiller aux données charnières entre deux fichiers. On vérifie que le regroupement des fichiers est correct en regardant la résolution globale. Si le pas entre deux données est le même que pour une photo isolée, alors le regroupement des données est correct.

L'imagerie en niveaux de gris est un moyen efficace et précis permettant de suivre l'évolution du sédiment en fonction de la profondeur. La courbe correspondante, comparée aux données granulométriques donne une bonne image des dynamiques sédimentaires. Les variations de teinte reflètent des évolutions d'ordre granulométrique et/ou de la nature des sédiments. Elle offre donc une lecture de la carotte complémentaire de la granulométrie. La seule réserve que l'on peut émettre sur cette méthode concerne le choix d'un profil de référence. En effet, sur les 7 cm de diamètre de la carotte, seul un profil est retenu et considéré comme représentatif. On peut toutefois palier à cette limite avec d'autres logiciels de traitement comme MatLab™. Un tel outil peut récupérer plusieurs profils sur l'image de la carotte en niveau de gris. La courbe qui en ressort, en intégrant plusieurs valeurs, est alors plus représentative de l'évolution sédimentaire.

L'imagerie en niveaux de gris est la méthode d'acquisition de données la plus fine, un profil de la carotte étant directement converti en valeurs numériques. Pour les deux autres méthodes présentées ci-dessous, l'acquisition de données est différente. Elles nécessitent des outils spécifiques, et les mesures sont effectuées manuellement.

c) La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est la capacité d'un corps à acquérir une aimantation en présence d'un champ magnétique. Sa mesure fournit ainsi une indication sur les minéraux ferromagnétisables contenus dans un échantillon, en mesurant son attraction en réaction à un aimant. Les mesures peuvent être exprimées en masse (m^3/kg ou 10^{-8} unités SI) ou en volume (10^{-5} unités SI) [documentation constructeur]. Nous avons utilisé cette dernière unité de mesure. Ce type de mesure, opéré sur toute la longueur d'une carotte, renseigne donc sur l'évolution de ce paramètre au cours du temps dans le sédiment. La réponse mesurée peut correspondre à différents degrés de magnétisme, qui sont eux-mêmes corrélés à certains types de minéraux en présence. Les minéraux qui donnent la réponse la plus forte ($SM > 0$ et forte) sont les minéraux ferromagnétiques (fer pur, oxydes de fer dont magnétite notamment, nickel et chrome). Ceux qui donnent la réponse la plus faible ($SM < 0$, diamagnétisme) correspondent aux minéraux pauvres en fer (quartz, carbonate de calcium, graphite, gypse). Cette catégorie inclue également les matières organiques et l'eau. Une catégorie intermédiaire regroupe les minéraux paramagnétiques ($SM > 0$ et faible), dont les silicates ferromagnésiens et les argiles font partie [documentation constructeur ; Arnaud, 2003 ; Carranza-Edwards *et al.*, 2005 ; Hu *et al.*, 2005 ; Mischke *et al.*, 2005].

Cette méthode permet, outre la donnée sur les minéraux en présence, de corrélérer différentes carottes de sédiments entre elles. Par rapport aux questions de spatialisation soulevées, la susceptibilité

magnétique permet ainsi d'affiner les reconstitutions géométriques et spatiales. La variation de ce paramètre est aussi un moyen d'évaluer l'évolution de l'érosion au cours du temps, voire d'estimer le fonctionnement d'une source de sédiments sur les autres [Ellwood *et al.*, 1997 ; Arnaud, 2003 ; Ellwood *et al.*, 2004]. Ainsi, les travaux d'Arnaud [2003] sur les sédiments du lac du Bourget, montrent que la susceptibilité magnétique reflète le rapport entre la fraction silicatée (dont la présence est liée aux crues du Rhône) et la fraction carbonatée. Dans cet exemple, ce paramètre permet donc de faire la part entre les contributions de deux sources composant le sédiment étudié.

Les mesures réalisées sur les carottes de sédiments endokarstiques ont été faites à partir d'un susceptibilimètre de Bartington Instruments (appareil du LGCA), qui dispose de plusieurs sondes différentes. L'ensemble du dispositif (sonde et boîtier intermédiaire de connexion) est relié à un ordinateur, à partir duquel on peut contrôler le déroulement des opérations grâce à un logiciel d'exploitation, Multisus™. Le sédiment doit être à température ambiante, et recouvert d'un film protecteur plastique, dont l'épaisseur ne doit pas dépasser 0,05 mm sous peine d'introduire un biais dans les mesures. Pour nos échantillons, la sonde utilisée est le MS2E/1 (photo II.6), car elle est particulièrement adaptée aux sédiments fins, et offre une bonne résolution. Son aire de mesure est d'environ 1 cm sur 3 mm, elle peut être employée de deux façons, en positionnant ce rectangle soit parallèlement à la carotte (mesure ponctuelle), soit en le plaçant perpendiculairement. Nous avons opté pour la seconde solution qui permet de faire des mesures plus rapprochées et donc de travailler à une plus grande précision. Le pas d'échantillonnage que nous avons choisi est de 3 mm, pour les raisons suivantes. Tout d'abord, un tel pas permet de rester homogène par rapport aux données de granulométrie, ce qui simplifie l'exploitation et le croisement des données pour la suite. De plus, compte tenu des caractéristiques de la sonde, il aurait été inutile de descendre en dessous de 3 mm puisque c'est la largeur effective de la mesure par la sonde. On aurait alors eu des données en chevauchement, ce qui ne donne pas une indication très claire sur le comportement et l'évolution du paramètre considéré. Un dernier choix doit se faire avec cette sonde, elle offre deux précisions possibles de la mesure : soit à 1.0×10^{-5} soit à 0.1×10^{-5} . Toujours dans l'objectif d'avoir la meilleure résolution possible sur les sédiments lacustres endokarstiques, nous avons choisi la précision la plus fine, à 0.1×10^{-5} . La mesure est plus longue, mais nous avons pu vérifier que sa qualité était nettement supérieure à une mesure effectuée avec une précision de 1.0×10^{-5} .



Photo II.6 : La sonde MS2E/1 du susceptibilimètre Bartington™ et le boîtier de contrôle MS2 (cliché constructeur).

Par l'intermédiaire du logiciel, on spécifie la sonde utilisée, et sous quelles conditions (position et précision). Après une mesure de calibration et un calcul de dérive (environnement magnétique de la pièce) afin d'appliquer une correction aux mesures sur le sédiment, les mesures sont lancées depuis l'ordinateur, et enregistrées dans un fichier de données directement utilisable. La correction préalablement calculée doit être appliquée aux données toutes les 10 à 20 mesures. Le logiciel trace la courbe au fur et à mesure des données. Une donnée semblant aberrante peut être rapidement décelée,

et la mesure tout de suite vérifiée. Enfin, il est important de préciser que le contenant de la carotte doit être inerte sur le plan magnétique.

d) La spectrorimétrie

Comme les précédentes, cette méthode d'analyse permet d'appréhender et de spécifier les variations dans la sédimentation tout le long des échantillons, et selon des critères de couleur [Chapman et Shakleton, 1998 ; Barrett, 2002].

La spectrorimétrie correspond à une triple mesure car elle évalue à la fois les variations de teinte, de clarté et de saturation (« tristimulus »). L'espace de couleur CIELAB, utilisé ici, a été défini en 1976 par la Commission Internationale d'Eclairage. Les valeurs de teinte, de clarté et de saturation sont exprimées par les trois paramètres L^* , a^* et b^* ; L^* représentant la clarté, et a^* et b^* représentant la chromaticité (figure II.6).

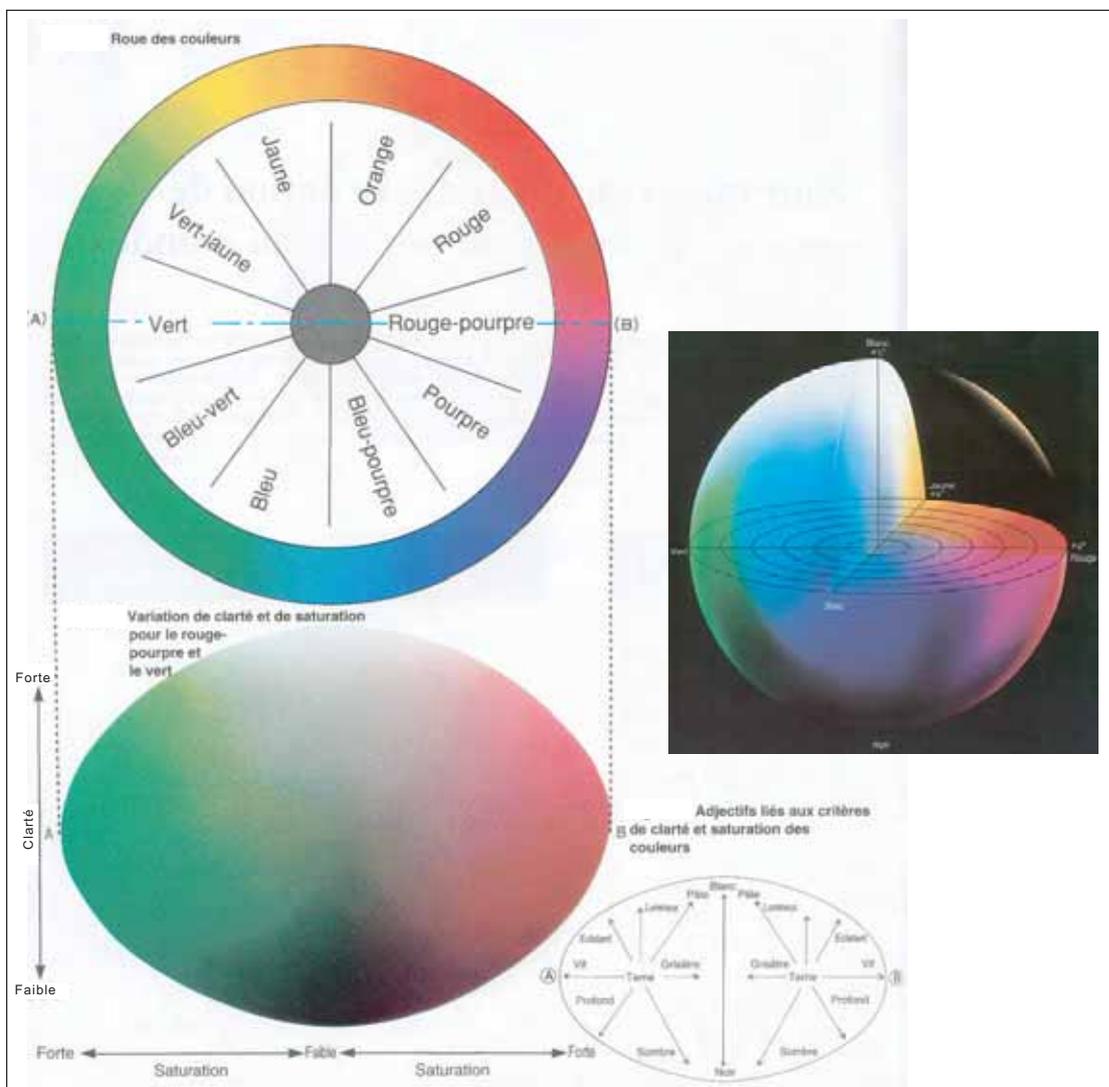


Figure II.6 : Les relations des trois paramètres de colorimétrie (d'après documentation constructeur).

L'appareil que nous avons utilisé pour les mesures de spectrorimétrie est un Minolta CM 2600 d™ (photo II.7) avec le logiciel d'exploitation SpectraMagic™. Ce matériel a été mis à notre disposition par le LGCA. L'avantage de cette méthode est que les carottes ne subissent aucune préparation préalable. Le film plastique protecteur doit être conservé, protégeant l'appareil du sédiment

et réciproquement. Le spectrophotomètre permet de travailler avec deux fenêtres de mesure : 3 mm ou 8 mm. Nous avons utilisé le masque laissant une fenêtre de 3 mm de diamètre pour effectuer la mesure, ce qui nous a permis de plus de conserver le pas d'échantillonnage que nous avons utilisé pour la granulométrie et la susceptibilité magnétique.



Photo II.7 : Le spectrophotomètre Minolta CM 2600 d™ (cliché A.S. Perroux).

Le spectrophotomètre intègre de nombreux paramètres, d'où différents réglages pour effectuer les mesures. Pour nos sédiments endokarstiques, le réglage choisi a été le suivant :

- *Ouverture spéculaire = S/I+E* : ce premier paramètre signifie que la mesure est doublée, elle est faite une fois avec la réflexion spéculaire exclue, une fois avec la réflexion spéculaire incluse. Tout objet soumis à la lumière renvoie une réflexion totale qui a deux composantes, la réflexion spéculaire, symétrique à l'émission lumineuse, et la réflexion diffuse, qui est renvoyée par toute la surface de l'objet (figure II.7). Autrement dit, la réflexion spéculaire est l'effet miroir que peut renvoyer un objet sous la lumière, et cela a pour effet de modifier la perception de la couleur « réelle » de l'objet. La mesure en réflexion spéculaire exclue semble donc plus juste. Mais nous avons opté pour les deux types de mesure car la réflexion spéculaire peut être pour les sédiments l'expression d'une brillance, qui renvoie à la notion d'usure, de polissage des grains. Cette donnée a donc son intérêt pour l'étude du transport des particules.
- *Emission UV = 100%* : ce réglage intervient sur la source lumineuse utilisée pour les mesures. L'émission UV à 100 % signifie que les mesures seront faites sous une lumière contenant toutes les composantes UV de la source lumineuse de l'appareil. C'est l'option la plus couramment utilisée car la plus complète. Les composantes UV peuvent être complètement exclues en sélectionnant 0 %.
- *Illuminant 1 = D65* : ce paramètre joue sur la qualité de la lumière émise pour les mesures, qualité qui a une influence sur la température de couleur. Le code D65 sélectionné correspond à une émission de lumière standard, assimilée à la lumière du jour (qui inclut les UV et est donc en bonne cohérence avec le paramètre précédent), et correspond à une température de couleur de 6504 K (degrés Kelvin = degrés Celsius + 273). Il existe d'autres options de lumière blanche, fluorescente ou incandescente.
- *Observateur = 10°* : avec cette option, on joue sur le diamètre de la zone d'observation des rayons réfléchis. Il existe une seule autre option ici, qui est de 2°. Mais pour exploiter au maximum la fenêtre de mesure, qui n'est déjà que de 3 mm, il est plus intéressant de prendre l'option

d'observation de 10° , qui intègre ainsi un plus grand nombre d'informations de couleurs perçues par la lentille de 3 mm.

- *Affichage = Diff / Abs* : ce paramètre concerne le contrôle de la bonne marche des mesures. L'option Diff & Abs permet l'affichage sur le petit écran du spectrocolorimètre des données de valeur absolue et de différence de couleur par rapport à la couleur de référence, pour chaque mesure. La détection d'une valeur semblant aberrante est alors immédiate, et la mesure peut être refaite, pour vérification. Ce paramètre n'a aucune influence sur les mesures, mais permet de les contrôler.

- *Espace couleur = $L^* a^* b^*$, ΔE^** : cette option permet de choisir l'espace colorimétrique de référence dans lequel on veut avoir nos mesures. Il en existe plusieurs dont un fait strictement référence à la nomenclature de Munsell bien connue des pédologues [Munsell, 1994] ; mais tous font référence à des nomenclatures internationales bien définies. L'espace choisi situe les mesures selon quatre critères. L^* correspond à la clarté, elle est exprimée ici sur une échelle allant de 0 (le noir) à 100 (le blanc). Les critères a^* et b^* caractérisent la teinte, avec a^* variant entre le rouge (+60) et le vert (-60), et b^* variant entre le jaune (+60) et le bleu (-60). Le paramètre ΔE^* indique la différence colorimétrique dans l'espace de couleur sélectionné (CIELAB), et par rapport à la couleur de référence. L'espace choisi est un de ceux qui permet une lecture assez simple et directe des variations de colorimétrie.

- *Moyenne automatique = 1* : ce modèle de spectrocolorimètre offre la possibilité de faire des moyennes sur les mesures de colorimétrie. Il suffit de préciser au bout de combien de mesures une moyenne doit être automatiquement calculée. En spécifiant « 1 » pour ce critère, on précise qu'on ne fait pas de moyenne, qu'on considère les mesures prises isolément.

- *Délai = 0,3 s* : ce dernier critère permet de jouer sur les influences causées sur le mouvement des mains, qui peuvent amener un peu d'imprécision sur les mesures. Le délai est le temps qui s'écoule entre le déclenchement de la mesure par l'opérateur, et la mesure effective. La mesure étant déclenchée par un bouton situé sur le spectrocolorimètre, il n'est pas exclu que l'appareil bouge au moment où on appuie. Le délai de 0,3 seconde est donc destiné à éviter ce problème. Il n'est pas nécessaire de demander un délai plus long car l'opérateur gardant l'appareil en main, il peut toujours le faire bouger. Un délai plus long est donc au moins aussi inadapté que l'absence de délai.

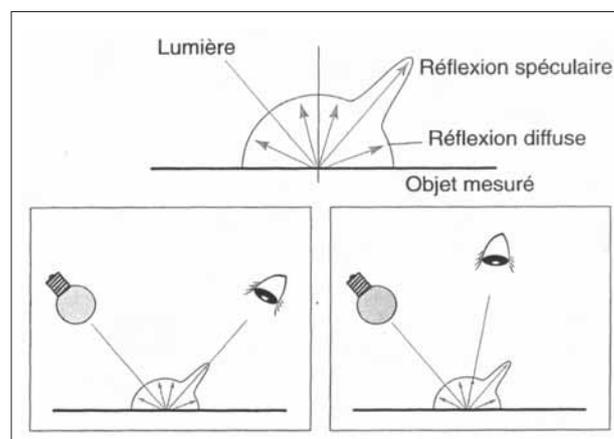


Figure II.7 : Les composantes de la réflexion lumineuse totale : la réflexion diffuse et la réflexion spéculaire (d'après documentation constructeur).

Le choix de ces différents paramètres réalisé, des mesures de calibrage sont effectuées. Elles se déroulent en deux temps : d'abord un zéro, l'appareil est placé dans un boîtier noir spécifique donnant

une réflectance nulle, puis à l'aide d'un blanc spécialement adapté à l'appareil, fourni par le constructeur. Comme pour les techniques d'acquisition de données précédentes, le fichier de données constitué est aisément transférable vers les logiciels de traitements classiques. On obtient avec la spectrorimétrie plusieurs courbes relatant l'évolution sédimentaire d'une carotte, qui peuvent être croisées avec les autres données.

Ces trois méthodes d'acquisition de données permettent de travailler avec une bonne résolution et de disposer de plusieurs clés de lecture complémentaires.

3. Etude dynamique : caractérisation du piégeage sédimentaire

a) Utilisation directe des données de granulométrie

Les données extraites de l'analyse granulométrique peuvent être traitées selon plusieurs entrées. En premier lieu, les spectres granulométriques et leur évolution apportent des renseignements de fond sur la dynamique sédimentaire responsable du transport et du dépôt. La comparaison des courbes granulométriques et leur analyse en fonction des lois de distribution peut renseigner sur l'évolution des dynamiques de dépôt [Sun *et al.*, 2002]. La représentation de ces spectres sous forme d'une surface offre une meilleure lecture graphique (figure II.8), et permet de saisir l'évolution granulométrique de toute une carotte pour chaque classe, et de mettre en avant des fonctionnements parallèles ou opposés, dans la dynamique de dépôt des différentes classes granulométriques, notamment lors des crues [Beierle *et al.*, 2002].

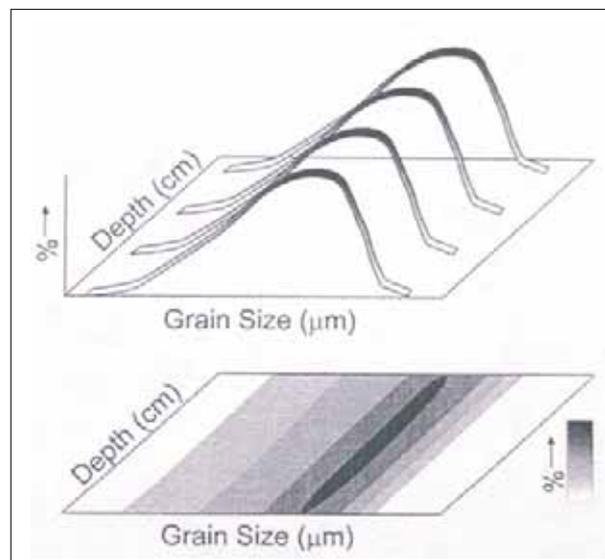


Figure II.8 : La représentation des courbes granulométriques sous la forme d'un diagramme surfacique (d'après Beierle *et al.*, 2002).

Les courbes granulométriques peuvent aussi caractériser un type, une source de particules. On peut alors faire des recoupements entre les courbes granulométriques d'un dépôt et les mêmes courbes réalisées à partir des sources de matières supposées. Des relations et des connexions par les écoulements sont ainsi mises en évidence. Par rapport au domaine karstique, cet aspect de la granulométrie est très utile pour identifier les connexions hydrologiques passées comme actuelles [Lacroix *et al.*, 1998 et 2000]. Les données de granulométrie les plus élémentaires, à travers les pourcentages de classes, sont donc de précieux indicateurs.

Les données granulométriques calculées sont également riches d'enseignements. Les valeurs de kurtosis¹, d'asymétrie² et de classement³ fournissent des données « comportementales » et structurales sur la composition d'un échantillon. La qualité d'un tri et la prépondérance de particules fines ou grossières renseignant sur la dynamique de transport et de dépôt [Rivière, 1977 ; Sorriaux, 1982 ; Lignier et Desmet, 2002]. Les données statistiques plus courantes, comme le mode⁴, la médiane⁵ et le grain moyen⁶ complètent l'information sur les dynamiques de transport et leur succession (figure II.9 ; annexe1). La plupart de ces valeurs de granulométrie sont basées sur les percentiles⁷.

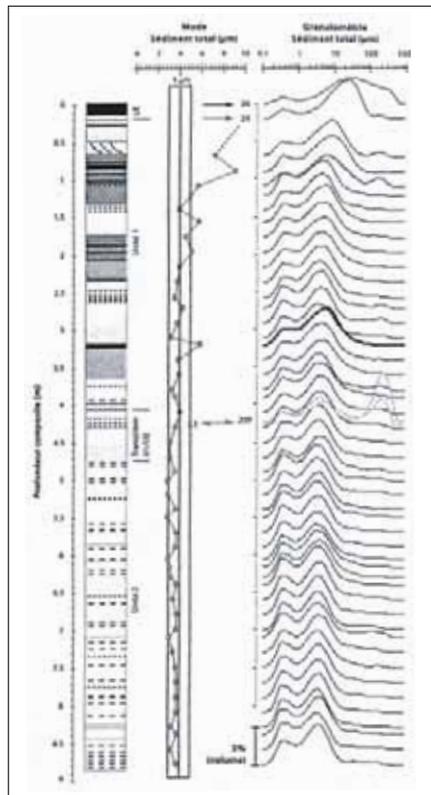


Figure II.9 : Exemple d'évolution de la granulométrie sur une carotte du Lac du Bourget (d'après Arnaud, 2003).

b) Images de Passega et autres croisements de données

Les paramètres qui régissent la sédimentation, à travers sa continuité et/ou ses perturbations (exemple des crues) peuvent être appréhendés par d'autres modes d'exploitation des données granulométriques.

La réalisation de graphiques croisant les critères granulométriques peut être une bonne indication des conditions de la sédimentation. Plusieurs données sont utilisées sous cette forme, comme par exemple le classement et l'asymétrie (diagrammes So/Sk), mais aussi le classement en fonction du mode

¹ Le kurtosis K (ou acuité) est un coefficient d'aplatissement. Il compare l'aplatissement d'une distribution de probabilité à l'aplatissement d'une distribution normale. $K = (Q_{75} - Q_{25}) / 2(Q_{90} - Q_{10})$ d'après Krumbain et Pettijohn [Rivière, 1977].

² L'asymétrie Sk (ou skewness) renseigne sur la prépondérance de particules fines ou de particules grossières sur les autres fractions granulométriques en présence. Si elle est supérieure à 1, elle indique la prépondérance de fines alors que si elle est inférieure à 1, elle indique la surabondance de particules grossières. $Sk = (Q_{25} + Q_{75}) / (Q_{50})^2$ d'après Trask [Rivière, 1977].

³ Le classement So (ou Sorting Index) indique la dispersion de la taille des grains par rapport à la médiane de l'échantillon. Un classement inférieur à 2,5 est considéré comme bon, alors qu'un classement supérieur à 4,5 est mauvais. Si le classement est égal à 1, il est parfait. $So = (Q_{75} / Q_{25})^{0.5}$ d'après Trask [Rivière, 1977].

⁴ Le mode correspond à la valeur granulométrique la plus représentée quantitativement, en volume.

⁵ La médiane indique la taille des particules pour un volume cumulé de 50 % de sédiment. $Me = Q_{50}$

⁶ Le grain moyen permet d'apprécier la taille moyenne des particules. $Gm = (Q_{10} + Q_{30} + Q_{50} + Q_{70} + Q_{90}) / 5$

⁷ Le percentile Q_n : Q_n est la dimension en unités Φ d'un fractile correspondant à un pourcentage cumulatif de n % de grains dont les dimensions sont inférieures à Q_n . [Rivière, 1977].

ou encore le kurtosis en fonction du grain moyen [Sorriaux, 1982 ; Peiry, 1997 ; Lignier et Desmet, 2002]. Les images de Passega sont un autre cas de croisement de données, qui a retenu plus particulièrement notre attention. A la fin des années 1950, les travaux de Passega sur la rivière Mississippi [Passega, 1964] l'on conduit à proposer un modèle global de sédimentation, croisant deux critères granulométriques du sédiment analysé : la médiane et le percentile le plus grossier. La représentation de ces deux données sur un diagramme bi-logarithmique (figure II.10) lui a permis d'établir des modèles de sédimentation, en fonction des différents secteurs d'accumulation de sédiments existant dans un système hydrographique (figure II.11). Le domaine de validité de ce diagramme concerne donc avant tout l'hydrographie et les systèmes sédimentaires de surface. Nombre de travaux menés dans ce domaine ont recours à ce diagramme quasi-incontournable pour toute analyse morpho-fluviale de surface [Bravard, 1983 ; Arnaud-Fassetta et Provensal, 1993 ; Peiry, 1997 ; Bravard et Peiry, 1999 ; Salvador, 1999 et 2001 ; Sediek et Amer, 2001 ; Maleval et Jigorel, 2002].

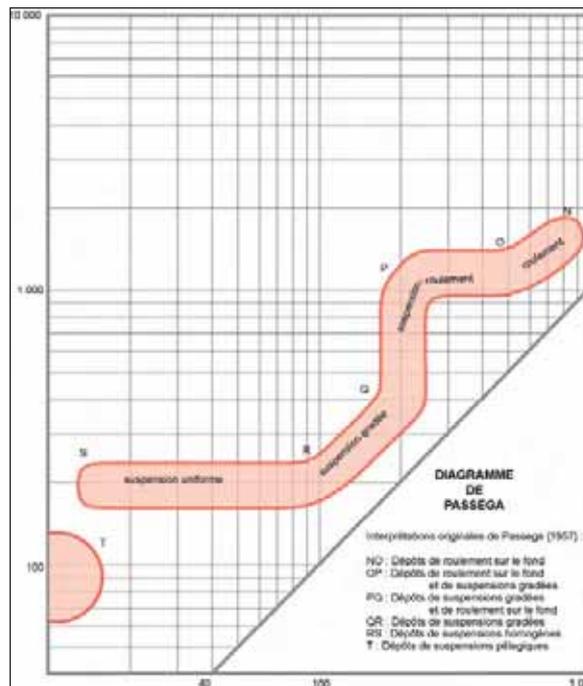


Figure II.10 : Diagramme de Passega, permettant de travailler sur la mise en place de sédiments en hydrologie de surface (d'après Passega, 1964).

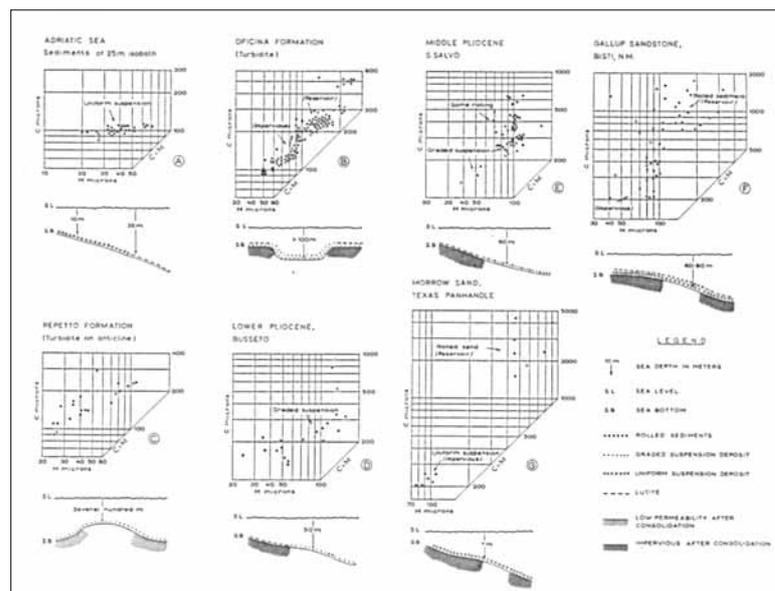


Figure II.11 : Exemples d'environnements sédimentaires caractérisés par la disposition des points sur le diagramme de Passega (d'après Passega, 1964).

Le croisement des valeurs de médiane (en abscisse) et du percentile le plus grossier (en ordonnée) permet de donner une « carte d'identité » du sédiment et de renvoyer aux modalités de dépôt. Différentes zones sont identifiées ; chacune étant individualisée des autres par son propre comportement sédimentaire. Ces images de Passega sont abondamment utilisées pour identifier et caractériser les contextes de dépôt. Nous les utiliserons dans ce même but, mais en tenant compte de la spécificité induite par le milieu karstique, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut (cf. *supra* : Partie I, Chap. II).

c) Statistiques multifactorielles

Enfin, d'autres traitements comme les Analyses en Composantes Principales (ACP) et les Classifications Ascendantes Hiérarchiques (CAH), notamment lorsqu'elles sont couplées, donnent des indications sur les relations de dépendance entre les variables soumises à l'analyse [Escoffier et Pagès, 1998 ; Cibois, 2000 ; Lebart *et al.*, 2000 ; Bouroche et Saporta, 2002]. L'explication, le principe mathématique de ces traitements de données sont fournis en annexe, nous ne les développons pas ici (annexe 2 ; annexe 3). Ces analyses de données peuvent être faites très facilement avec des logiciels de traitements de données adaptés, comme SPSS™ ou XLSTAT™. Par ces traitements sur les données granulométriques de toute une carotte, on peut identifier des groupes de sédiments et/ou des types de données en forte relation (fonctionnements liés et comparables), en totale indépendance ou en opposition (fonctionnements liés et opposés). Pour une variable de nature granulométrique telle que le grain moyen par exemple, les niveaux de la carotte correspondant à des dépôts de crues se trouvent en opposition avec les dépôts de décantation. Ces méthodes de traitement offrent des analyses de données à la fois graphiques et numériques, complémentaires des autres méthodes d'extraction de l'information sédimentologique.

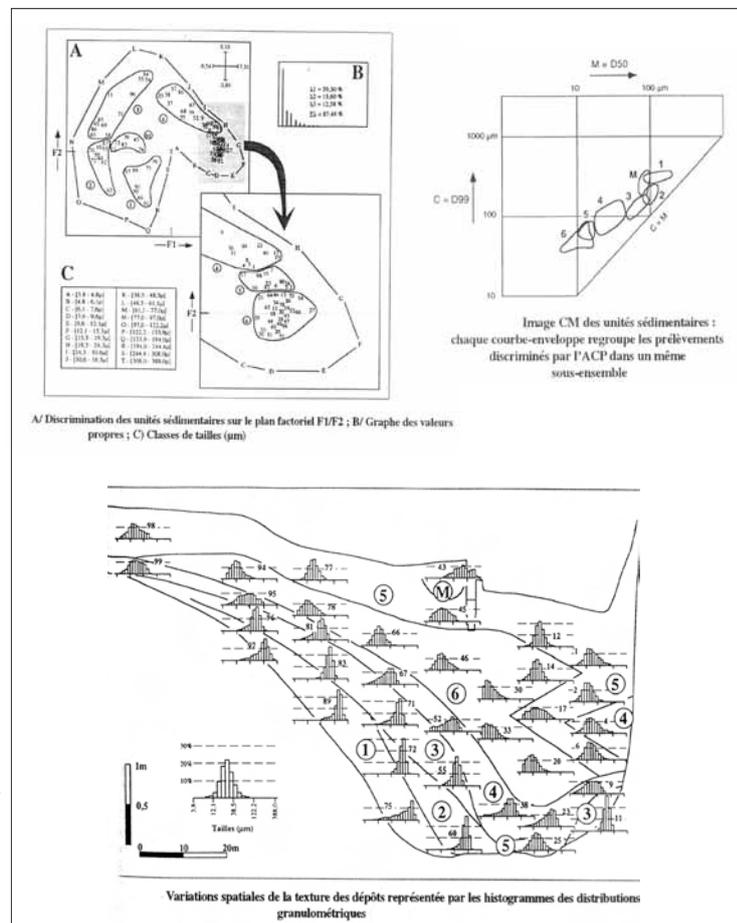


Figure II.12 : L'association des différents traitements cités : le cas d'un méandre de la plaine alluviale du Rhône en amont de Lyon (d'après Peiry, 1994).

Ces traitements et analyses des données granulométriques sortent du cadre des analyses classiquement faites sur des sédiments lacustres. Ils sont plus largement utilisés en hydrologie fluviale [Roditis et Pont, 1993 ; Arnaud-Fassetta, 1996 ; Peiry, 1994 et 1997] et ils fournissent des informations sur les sources de matières et les conditions de transport et de dépôt (figure II.12). C'est pourquoi nous avons choisi de les exploiter et de les développer dans ce travail.

4. Etude dans les domaines temporel et fréquentiel

Les méthodes présentées ci-dessus fournissent autant de données et signaux sédimentaires complémentaires qu'il est important de croiser, et que l'on peut soumettre, pour leur analyse, à un certain nombre de traitements plus ou moins sophistiqués. Outre la construction des images de Passega et des ACP que nous avons présentées à travers la granulométrie, il existe d'autres techniques d'analyses que l'on peut mettre à exécution sur les données obtenues par les trois méthodes d'acquisition de signaux sédimentaires expliquées ci-dessus. Nous en dirons quelques mots ici, dans le simple but de préciser les types d'informations que l'on peut espérer obtenir avec tel ou tel traitement. Ce point est une présentation non exhaustive essentiellement destinée à mettre en avant des méthodes de traitement des données qui ont été rarement, voire jamais utilisées jusqu'ici sur les sédiments détritiques endokarstiques par rapport à leur potentiel informationnel sur les évolutions climatiques et environnementales.

L'ensemble des données acquises par les méthodes présentées dans ce chapitre, si elles sont observées en continu sur toute la longueur d'une carotte, peuvent être assimilées à des séries chronologiques. Chaque variable considérée à l'échelle de la carotte relate en effet l'évolution au cours du temps, de un ou plusieurs paramètre(s) de la sédimentation. Deux grands types de traitement peuvent s'appliquer à de telles séries, les corrélations et le traitement de signal. Ces méthodes de traitement de données sont d'ailleurs largement utilisées en sédimentologie, et également dans le karst mais sur la base de données hydrologiques le plus souvent. Pour nous, l'exploitation de ces méthodes apporte des informations sur le fonctionnement hydrodynamique et sur les contrôles de la sédimentation.

a) Comparaisons et corrélations : domaine temporel

En premier lieu, les courbes résultant de ces différentes méthodes d'acquisition permettent une approche comparative visuelle. L'observation attentive des différents signaux peut mettre en évidence des similitudes, des oppositions, ou des indépendances quasi-totales entre deux paramètres. Sur des séries sédimentaires, cette première observation se révèle assez riche notamment par rapport aux événements particuliers dans les apports de matières, comme les crues [Vandenberghe *et al.*, 2003]. Ce travail préliminaire de lecture permet donc de faire un premier « tri ». Des comparaisons mathématiques peuvent ensuite être proposées par l'intermédiaire des méthodes de corrélations et d'autocorrélations.

Les analyses corrélatrices permettent d'étudier, de décrire l'évolution chronologique des paramètres mesurés dans le sédiment. Ce travail de description et d'analyse met en évidence des composantes agissant sur tel ou tel paramètre, composantes qui peuvent être mises en relation avec des mécanismes de fonctionnement, en l'occurrence, des mécanismes de transport et/ou de dépôt [Mangin, 1984]. La mise en œuvre de ces analyses nécessite de choisir une fenêtre de lecture des données pour procéder à la corrélation. Par exemple, sur des séries de 200 données, on peut choisir de générer les courbes de corrélations en prenant pour chaque valeur les deux données qui la précèdent et les deux données qui la suivent, soit une fenêtre de cinq valeurs. On peut faire varier la largeur de cette

fenêtre jusqu'à l'obtention d'une courbe de corrélation assez fine. Un autre critère dans les corrélations doit être contrôlé, c'est la marge d'erreur que l'on autorise. Celle-ci est généralement fixée à 5 %. Les analyses corrélatives peuvent être pratiquées à partir de différentes formules et différentes règles. En l'occurrence, nous avons utilisé les corrélations de Pearson [Chadule, 1994]. Le choix de la fenêtre et du mode de calcul est lié à l'orientation que l'on souhaite donner à l'étude. Les corrélations de Pearson (annexe 6) sont particulièrement adaptées aux données des milieux naturels et permettent de remonter à des informations de fonctionnement et éventuellement de cycles.

Enfin, nous précisons que les analyses corrélatives peuvent être exploitées à différents niveaux. Les corrélations sont pratiquées sur les données brutes de deux paramètres différents : elles permettent alors la mise en évidence de leur évolution, et donc des fonctionnements qu'ils traduisent, selon que les paramètres comparés se trouvent en phase (corrélation positive, reflet d'un comportement identique par rapport à un mécanisme de fonctionnement) ou en opposition de phase (corrélation négative, expression d'un comportement différent par rapport à un mécanisme de fonctionnement). Le principe des autocorrélations est le même, mais on compare l'évolution d'un paramètre à lui-même. Dans ce second cas, en faisant varier la largeur de la fenêtre de corrélation, on peut voir apparaître des structures plus ou moins nettes ou régulières sur la courbe d'autocorrélation. On obtient alors des informations sur la régularité des mécanismes qui régissent la sédimentation, ce qui peut conduire à une première mise en évidence de cycles ou de fluctuations rythmées pouvant être en rapport avec les évolutions climatiques et environnementales extérieures.

b) Traitement du signal et ondelettes : domaine fréquentiel

D'autres types de traitements, souvent couplés aux analyses corrélatives, sont les analyses spectrales et les ondelettes. Elles permettent une exploration des données par l'entrée fréquentielle, abstraction faite du temps.

Le principe de l'analyse spectrale consiste en l'observation d'une série de données non plus dans le domaine temporel (évolution du paramètre au cours du temps) mais dans le domaine fréquentiel (fréquence d'apparition, de fonctionnement du paramètre considéré dans un temps donné). L'analyse des données par les transformées de Fourier est une des méthodes les plus connues pour la mise en œuvre de ce genre de traitement. Graphiquement, ce type d'analyses permet la construction de périodogrammes (figure II.13) où un certain nombre de pics traduisent une structuration du signal étudié. Idéalement, ces structures donnent des périodicités (période = 1/fréquence) qui sont intégrées dans l'évolution du paramètre considéré. Ces périodes peuvent être raccordées à des rythmes ou des fluctuations climatiques ou environnementales locales [Mangin, 1984 ; Larocque *et al.*, 1998 ; Perrette *et al.*, 1999]. Ce type de traitement permet donc de déceler d'éventuelles structurations pouvant apparaître plus ou moins régulièrement dans les mécanismes constitutifs de la mémoire naturelle étudiée.

Cette méthode peut-être utilisée selon deux modes, soit en représentation fréquentielle, la plus classique, soit en échelles bi-logarithmiques. La clé de lecture de ces représentations devient alors la pente générale de la courbe. Cette pente est nommée pente β , et c'est sa valeur qui fournit des renseignements sur la façon dont le signal se comporte, à travers des notions de déterminisme et/ou de persistance du signal [Hardy et Beier, 1994 ; Mandelbrot, 1997 ; Price et Newman, 2001 ; Lu et Molz, 2001].

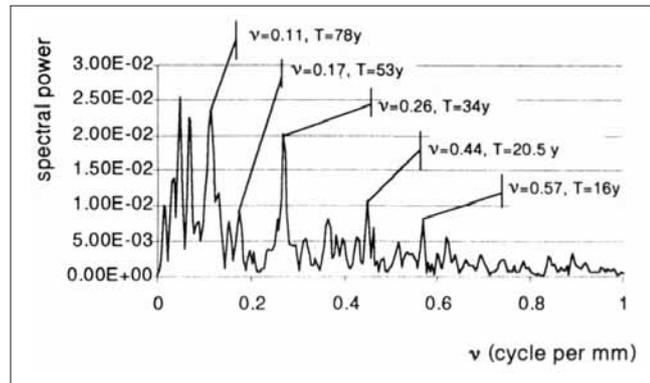


Figure II.13 : Analyse spectrale des taux de croissance sur une stalagmite du Gouffre Berger – Vercors (d'après Perrette *et al.*, 1999).

L'analyse en ondelettes, dernière méthode de traitement que nous présentons, est en complémentarité avec les analyses corrélatoires et spectrales. Elle permet en effet des analyses plus fines des signaux étudiés dans la mesure où on peut alors observer leur comportement à différentes échelles. Le signal est donc décomposé par une ondelette, en plusieurs spectres selon différentes échelles de temps, dépendantes de la longueur totale de la série de données. Différentes ondelettes existent pour ce genre de traitement, elles sont nombreuses et nous n'en parlerons pas ici [Max et Lacoume, 1996 ; Torrence et Compo, 1998]. Nous précisons simplement que l'ondelette utilisée dans ce travail est l'ondelette de Daubechies (figure II.14). Par cette méthode, les pulsations qui ont pu être mises en évidence sont alors considérées sur différentes échelles de temps, et on peut observer quelle est l'échelle à laquelle une pulsation apparaît le plus nettement. Cela permet donc d'affiner les hypothèses environnementales, avancées grâce à l'analyse spectrale, en soumettant à la comparaison l'échelle de temps où s'exprime la pulsation étudiée et l'échelle de temps suggérée par chaque possibilité de connexion avec des évolutions environnementales [Labat *et al.*, 1999a et 1999b].

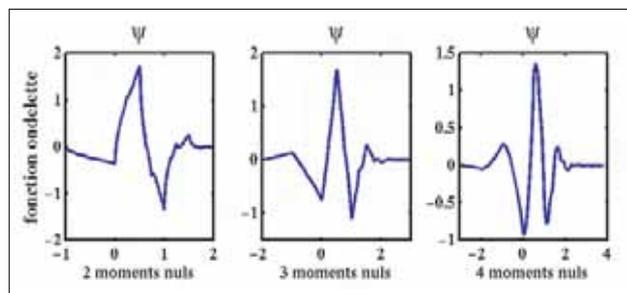


Figure II.14 : L'ondelette de Daubechies éditée par le logiciel Matlab™.

Un exemple purement théorique nous permettra de mieux saisir les apports de ces deux traitements complémentaires (figure II.15). Imaginons l'étude de l'évolution du paramètre « mode granulométrique ». Sur une courbe représentée dans un graphique bi-logarithmique, cette donnée granulométrique montre une pente β de -1. Cette valeur numérique de la pente β indique que le mode granulométrique est essentiellement contrôlé par les processus anti-persistants. A ce stade de l'étude, on peut avancer que le mode est particulièrement affecté par des phénomènes de sédimentation irréguliers et discontinus qui peuvent être en relation avec les épisodes de crues, ou d'étiages sévères. Mais on voit bien que ce niveau d'interprétation conduit à la formulation de deux hypothèses environnementales pour le moins différentes. La décomposition en ondelettes devrait permettre de lever l'incertitude. Si cette décomposition montre que les variations du mode granulométrique interviennent sur une petite échelle temporelle, alors c'est l'hypothèse des crues, agissant sur quelques heures généralement, qui peut être privilégiée. Par contre, si la décomposition montre que les variations du mode granulométrique

interviennent sur une des plus grandes échelle de temps, alors c'est l'hypothèse des phases d'étiage (devant durer plusieurs mois pour réellement affecter la sédimentation) qui devient la plus valable.

L'exemple que nous venons de donner reste purement théorique, voire idéal. Il était destiné à illustrer le type d'informations que ces traitements peuvent apporter, et de fait à préciser pourquoi nous avons choisi de les utiliser. Ces méthodes sont en effet particulièrement adaptées à des séries chronologiques acquises à haute résolution. Mais nous verrons dans les applications (cf. *infra* : Partie III, Chap. II.3) que la réalité est bien plus complexe, et que même ces méthodes pourtant performantes et sophistiquées ne sont pas toujours suffisantes. En effet, si un signal sédimentaire est régi par un grand nombre de paramètres externes et internes à l'endokarst, les différents traitements que l'on peut appliquer donnent des courbes toujours assez complexes, réduisant d'autant le niveau et la finesse des interprétations.

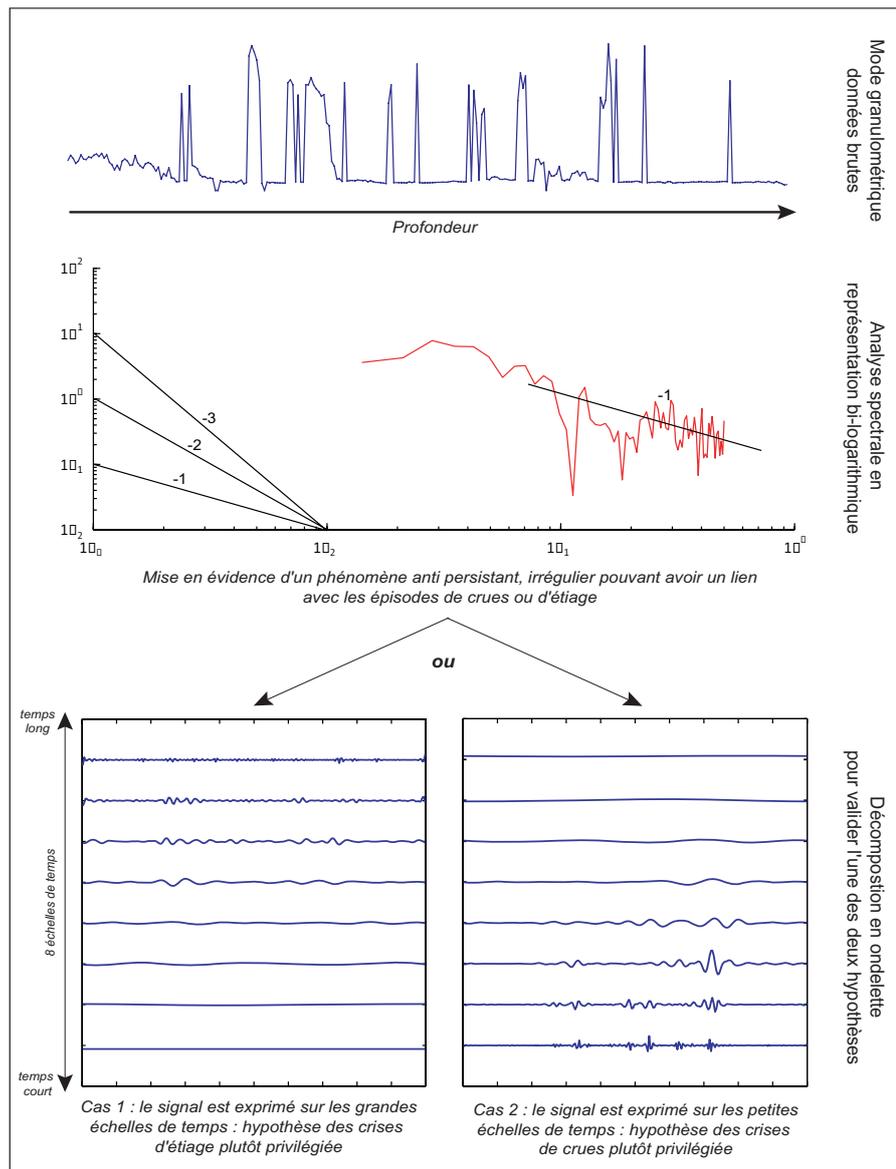


Figure II.15 : Schéma théorique du raisonnement produit grâce aux analyses spectrales et aux ondelettes.

Nous avons souhaité expliquer plus longuement ces différentes approches car elles ont été rarement abordées dans l'étude des sédiments détritiques endokarstiques. En les présentant, nous espérons que le lecteur aura saisi l'essentiel du principe de ces traitements et pourquoi nous les avons choisis. Cette présentation contribue également à préciser et argumenter un peu plus l'originalité de

notre travail. C'est délibérément que nous n'avons pas détaillé plus avant les explications car cela aurait forcé à de longues et rébarbatives discussions mathématiques, ce qui n'est pas le cœur de ce que nous devons exposer dans ce manuscrit. La bibliographie pourra guider le lecteur intéressé vers d'abondantes publications sur le sujet.

5. Les autres méthodes utilisables

Dans ce dernier point du chapitre, les autres méthodes couramment utilisées dans le cadre d'études sédimentologiques et paléoenvironnementales sont rapidement abordées. Dans notre propre travail, ces méthodes n'ont pas toujours été mises en œuvre, ou parfois reprises de travaux antérieurs. En effet, elles apportent des données pouvant apparaître comme « secondaires », par rapport aux problématiques et objectifs fixés, sur les dynamiques de sédimentation endokarstique. Par souci d'exhaustivité, ces méthodes sont rapidement listées ici, en précisant leur intérêt.

a) L'identification des argiles

La reconnaissance des argiles composant un sédiment est une donnée importante pour traiter de l'origine des sources de matières et du contexte bio-pédologique (pédogenèse). Les argiles sont constituées par l'empilement de feuillets ; c'est d'ailleurs ces différents empilements de couches tétraédriques (T) et octaédriques (O) qui ont conduit à la classification des argiles en trois grands groupes (figure II.16).

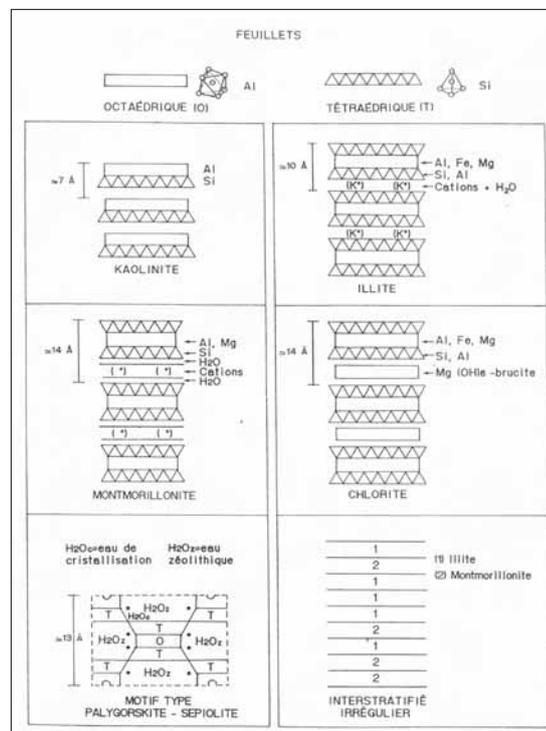


Figure II.16 : Terminologie et structure des principaux minéraux argileux (d'après Cojan et Renard, 1999).

Les argiles présentes dans les sédiments peuvent être identifiées par diffractométrie aux rayons X (annexes 4 et 5). Chaque argile ayant une origine bien précise, on obtient donc par cette méthode d'analyse des données sur leurs conditions de formation et de là, sur les sources de matières impliquées. Par exemple, la kaolinite (caractérisée par un pic à 7 Å) peut être liée à des sols intensément lessivés, ou

à de l'hydrothermalisme [Caillère *et al.*, 1982]. En fonction du site étudié, les différentes hypothèses de formation des argiles sont donc triées et on retrouve ainsi l'origine de cette composante du sédiment, indiquant un contexte géologique, ou diagénétique à un moment donné.

Pour la compréhension des dynamiques en jeu dans la sédimentation endokarstique, l'identification des argiles n'est pas primordiale. Mais elle est un complément tout à fait intéressant pour l'identification et la localisation des sources de matières, celles-ci provenant des sols (actuels ou anciens) ou de sédiments piégés dans l'endokarst et remobilisés. Sur le site que nous avons étudié, ces méthodes ont été exploitées lors d'un travail antérieur à notre propre recherche [Blois, 2000]. Dans le souci de privilégier les méthodes d'études centrées sur les dynamiques sédimentaires, nous n'avons pas pratiqué d'autres analyses de ce type dans le cadre de la thèse. Dans ce mémoire, nous reprendrons les analyses diffractométriques déjà effectuées par Blois [2000] comme une donnée supplémentaire à nos interprétations (annexe 5).

b) Observations au microscope et à la loupe

L'observation d'une partie des sédiments au microscope ou à la loupe binoculaire peut apporter des informations de premier ordre (photo II.8). Par exemple, on peut étudier à la loupe les niveaux de crue, mis en évidence par les données granulométriques. Outre l'identification minéralogique des grains, de telles observations permettent de travailler sur le degré d'usure des grains, et d'en déduire la nature et la longueur du transport subi. De plus, des grains peuvent montrer des degrés d'usure très différents, au sein d'une même couche. On peut alors en déduire que plusieurs sources de matières ont alimenté simultanément le dépôt, à des distances différentes de la zone de piégeage. On a donc là un moyen d'observation très simple des sédiments, et pourtant particulièrement intéressant quant au transport des particules détritiques par l'eau et/ou par l'air. L'observation au microscope polarisant, grâce à la double observation en lumière polarisée naturelle et en lumière polarisée analysée, permet l'identification des minéraux de façon fiable [Roubault, 1982 ; MacKenzie et Guilford, 2000].

Enfin, il est possible de fabriquer des lames minces d'une partie du sédiment (photo II.8). Il s'agit cette fois de prélever plusieurs centimètres de sédiments, sans les déstructurer, pour pouvoir justement en étudier la stratigraphie, la structure et l'organisation internes. A l'observation à la loupe, ou au mieux, au microscope, la structure interne des sédiments devient accessible. On peut alors étudier la relation entre une sédimentation fine plus ou moins régulière et un dépôt de crue. Si la limite entre les deux est érosive, caractérisée par nombre d'irrégularités, on peut mettre en évidence un départ de matière lors de la crue, avant sa propre couche de dépôts grossiers. De la même manière, une lame mince dans une zone de sédiments fins de décantation peut permettre l'identification d'une lamination des sédiments qui ne se révélait pas à l'œil nu.

Tous les moyens d'observations des sédiments à plus fine échelle apportent donc leur contribution en terme de données sur les sources de matières, leur mode de transport et de dépôt. Ces méthodes d'observations, dont la préparation est relativement simple à réaliser, sont très intéressantes et complètent très bien ce que l'on peut tirer des données granulométriques notamment, et de leur traitement.

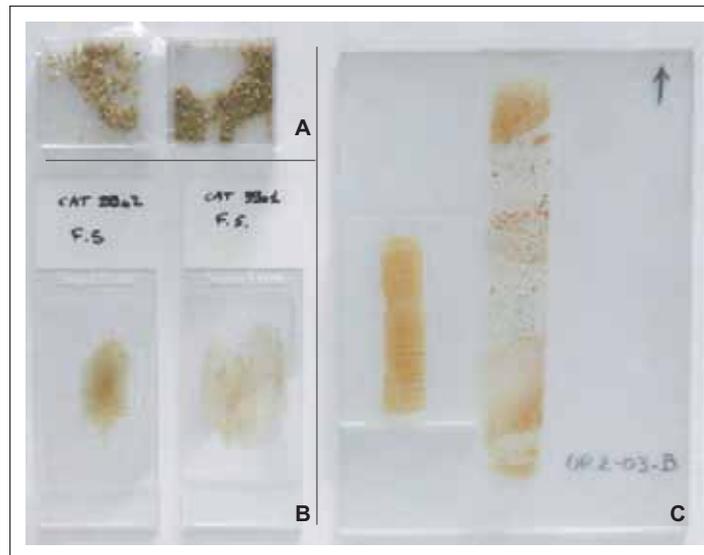


Photo II.8 : Les différents supports pour les observations à la loupe et au microscope (cliché A.S. Perroux).

c) Le contenu en éléments non détritiques

Dans tous les cas d'observation cités ci-dessus, et même parfois à l'œil nu à la surface de la carotte, on peut être amené à identifier des éléments non détritiques comme des charbons ou des coquilles de microfaune aquatique (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.5.a.1). Les coquilles d'ostracodes, par exemple, sont de précieux indicateurs des conditions biologiques, et environnementales, au moment du dépôt.

Le contenu en éléments de nature biologique est généralement décelé lors de toutes les analyses sédimentologiques décrites ici. Il importe d'en faire état et de les localiser précisément dans la carotte (profondeur) lors de l'étude sédimentologique. Mais leur propre analyse fait appel à d'autres méthodes bien définies, soit pour leur identification (palynologie, anthracologie et micropaléontologie), soit pour les soumettre à des datations (notamment le ^{14}C).

d) Les datations

Toute étude sédimentologique est basée sur la compréhension des différents paramètres régissant la sédimentation, et sur l'étude de leur évolution au fil du remplissage. La notion de temps, à travers celle de profondeur ou d'épaisseur des sédiments, est donc toujours sous-tendue dans de telles recherches, ce qui rend les datations indispensables. Pour les sédiments, différentes méthodes de géochronologie sont disponibles. Nous donnons quelques éléments d'explications ici sur trois moyens de datation : le Plomb 210 (^{210}Pb) et le Carbone 14 (^{14}C), basés sur la loi de décroissance radioactive (figure II.17), et les isotopes 137 et 134 du Césium (^{137}Cs et ^{134}Cs) qui sont plutôt des marqueurs ponctuels. Ces datations étant pratiquées par des spécialistes, nous développons surtout les apports de ces techniques.

1. Plomb 210 et Césium 137 et 134

Le Plomb 210, produit de la désintégration de l'Uranium 238 naturellement présent dans les roches, est un radionucléide (ou isotope radioactif) qui est contenu dans les particules sédimentaires. Par l'intermédiaire du Radon 222 notamment, présent dans l'atmosphère, le ^{210}Pb est rapidement incorporé aux sédiments grâce aux précipitations, aux ruissellements et aux retombées sèches. Sa demi-vie est de

22,1 ans. Sa détection dans les sédiments est importante pour les calculs des taux de sédimentation voire les modèles âge/profondeur [Baskaran et Illiffe, 1993 ; Pourchet *et al.*, 1997].

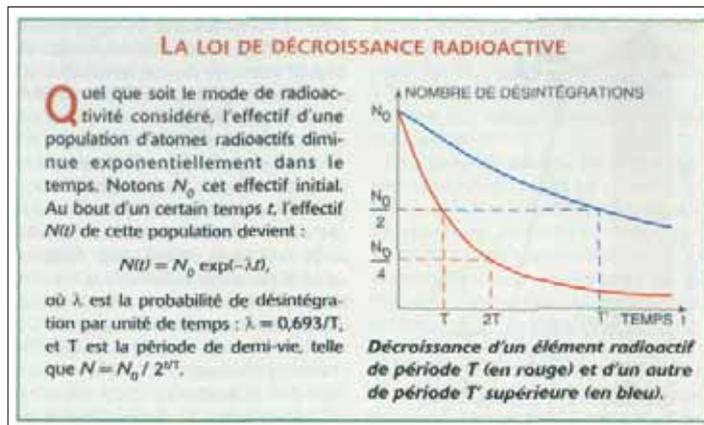


Figure II.17 : La loi de décroissance radioactive (d'après Bimbot, 1996).

Les isotopes radioactifs du Césium sont également piégés par le sédiment, toujours par la voie atmosphérique. Ils ont une origine artificielle, liée aux activités nucléaires. Leur détection dans les sédiments détritiques, apporte un très performant élément de calage des dépôts car ces isotopes, partout où ils ont été mesurés, montrent deux pics essentiels : les tests nucléaires des années soixante (particulièrement en 1962/63) et l'accident de Tchernobyl en 1986 [Lorius, 1991 ; Baskaran *et al.*, 1996 ; Pourchet *et al.*, 1997]. Le Césium est donc un bon marqueur chronostratigraphique.

2. Carbone 14

Ce radioélément est notamment présent dans les restes végétaux et animaux que le sédiment peut contenir. On peut donc avoir, avec ces différents restes (os, charbons, tufs...) des datations ponctuelles, à différents niveaux du remplissage sédimentaire, qui sont autant de points de calage supplémentaires pour fixer et préciser le cadre chronologique absolu. Cette méthode de datation est également précieuse pour l'Archéologie [Woillard et Mook, 1982 ; Evin, 1994 ; Bard *et al.*, 2004]. Sur le plan technique, cette méthode de datation nécessite de calibrer les résultats (figure II.18). En effet, dans la méthode de datation, on considère que l'activité spécifique du ^{14}C dans le CO_2 atmosphérique ($^{14}\text{CO}_2$) a été constante durant les 40 derniers millénaires. Or, l'activité du ^{14}C atmosphérique varie avec le temps. De nombreux travaux ont contribué à éclaircir ce problème, et aujourd'hui, il existe un programme de calibration simple et régulièrement actualisé [Stuiver et Reimer, 1993 ; Taylor *et al.*, 1996]. Sur les sédiments que nous étudions, nous avons pu faire dater quelques fragments de charbons. Pour la calibration des dates, nous avons utilisé le programme Calib4.4TM et la courbe d'ajustement nommée Intcal98. Le programme de calibration propose d'autres courbes mais celle-ci, construite à partir d'âges ^{14}C issus de la dendrochronologie (cernes des arbres) est recommandée pour tous les sédiments non marins.

Enfin, la manipulation des dates obtenues peut se faire de plusieurs façons, ce qui nécessite quelques précisions. Les dates peuvent être exprimées en différentes unités. Pour devancer toute ambiguïté, nous les rappelons en donnant également leurs correspondances (tableau II.1).

Les différentes techniques de datations dont nous venons de traiter et les données qu'elles fournissent sont donc des clés essentielles au bon positionnement de « l'histoire » racontée par un remplissage sédimentaire dans son cadre chronologique absolu. Le repositionnement du site étudié

dans son contexte environnemental et climatique local offre une garantie supplémentaire quant à la qualité des interprétations formulées sur l'évolution de la sédimentation. Les reconstructions paléoclimatiques et environnementales en ressortent affinées et plus réalistes. Toutefois, de ces trois méthodes, seuls le Carbone 14 et les isotopes 134 et 137 du Césium peuvent être utilisés sans problème pour les sédiments du milieu endokarstique. Les datations au Plomb 210 peuvent fournir des résultats biaisés par le fait que l'on se trouve sous terre. En effet, le plomb atmosphérique est généré par filiation du radon atmosphérique. Mais le radon est un élément qui est aussi naturellement présent dans les roches. Dans le karst, son dégagement si faible soit-il, peut tout de même apporter un biais dans les mesures. Le plomb contenu dans les sédiments souterrains peut subir cette « contamination » [Pourchet *et al.*, 1997]. Cette méthode de datation appliquée au karst donne donc des résultats qu'il faut examiner en détail, pour éventuellement déceler l'existence éventuelle de cette source en plomb interne au karst. D'autres moyens de datation sont applicables au karst. Ils sont variés mais nécessitent des roches ou des dépôts endokarstiques autres que les remplissages détritiques [Bosak, 2003].

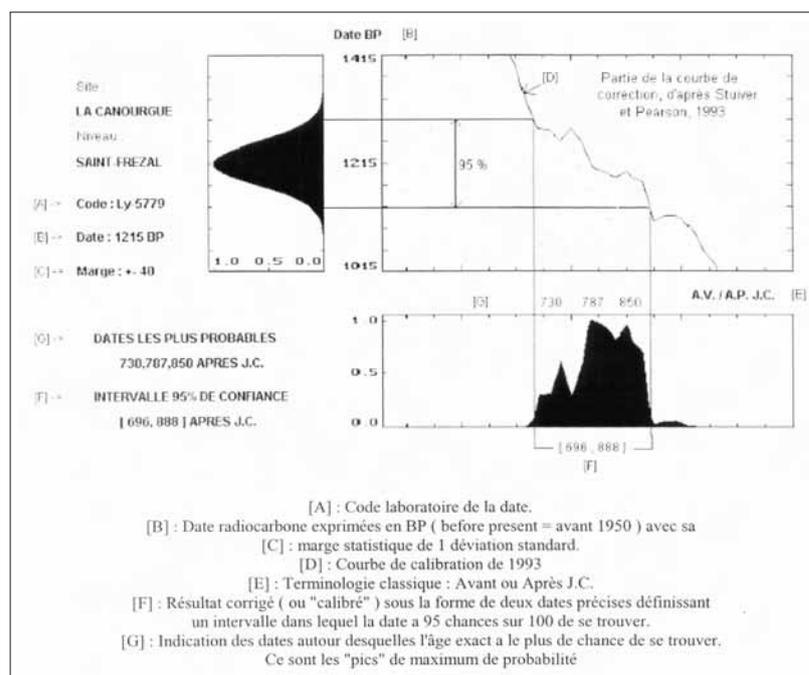


Figure II.18 : La calibration des âges carbone – Explication graphique.

<p>Cal AD : Calendrier en années réelles = dates calibrées après J.C. et intervalles de dates calibrées après J.C. à 1, 2 ou 3 sigma.</p> <p>Cal BC : Calendrier en années réelles = dates calibrées avant J.C. et intervalles de dates calibrées avant J.C. à 1, 2 ou 3 sigma.</p> <p>Cal BP : Calendrier radiocarbone = dates en années radiocarbone dont l'origine du calendrier est l'année 1950 du calendrier en années réelles. Une date exprimée en Cal BP est une date radiocarbone calibrée à laquelle il faut retirer la valeur 1950 pour avoir son équivalent sur le calendrier en années réelles (av. et/ou ap. J.C.).</p> <p>BP : Before present = Age carbone 14 BP conventionnel non calibré.</p> <p>BC : Age carbone 14 BP non calibré laquelle la valeur 1950 est soustraite. Utilisation rare car source d'ambiguïté et d'erreur.</p>
--

Tableau II.1 : Les unités d'expression des âges ¹⁴C.

e) Les minéraux lourds et les éléments majeurs

Ces deux dernières méthodes que nous présentons relèvent de la géochimie. Elles permettent une analyse des échantillons de sédiments, passant par le dosage de ces deux types de traceurs

particuliers qui participent à la composition du sédiment. En travaillant sur ces éléments clés que sont les minéraux lourds et les éléments majeurs, on peut en effet remonter vers les sources de matières à l'origine du dépôt, et quantifier leurs contributions respectives. Nous n'avons pas eu recours à ces méthodes durant la thèse. Par rapport à notre priorité de travailler sur les dynamiques de dépôts, ces analyses géochimiques n'étaient pas fondamentales. Mais dans une étude sédimentologique et à des fins de reconstitutions environnementales ou paléogéographiques, ces méthodes ont leur place. C'est pourquoi nous donnons les grandes lignes de leur mise en œuvre.

En ce qui concerne les minéraux lourds¹ (Zircon, Rutile, Apatite, Tourmaline, Grenat...), ils sont dosés et séparés dans des ampoules de décantation, grâce à l'utilisation du bromoforme dont la densité avoisine 2,885, selon les cas. La séparation effectuée, l'identification des minéraux lourds peut être faite par des observations au microscope ou à la loupe binoculaire [Dill, 1998 ; Frihy et Dewidar, 2003 ; Hounslow et Morton, 2004].

Dans le cas des éléments majeurs², leur dosage est effectué par les méthodes de spectroscopie à absorption atomique (ICP-AES) ou à fluorescence X. En amont, la préparation des échantillons consiste en un broyage puis un passage à l'étuve. Les solutions soumises au spectromètre, sont finalisées par attaque à l'acide chlorhydrique en bombe à téflon. Grâce à des solutions étalons (une par élément dosé), la mesure de tel ou tel élément majeur dans l'échantillon pourra se faire par passage au spectromètre [Desmet et Schaaf, 1998 ; Arnaud, 2003 ; Hjorth, 2004].

Enfin, nous terminerons ce point en ajoutant que les méthodes de fluorescence développées sur les stalagmites [Perrette, 2000] ont été testées sur les sédiments détritiques. Il semblerait que leur utilisation sur les remplissages non carbonatés de l'endokarst soit envisageable, ce qui apporterait alors des données sur les quantités de matière organique en présence dans le sédiment, également avec une très bonne résolution. Dans la mesure où nous n'avons pas dépassé le cadre des essais de cette méthode durant la thèse, nous nous contentons simplement de signaler l'existence et le potentiel de cette méthode sur la mémoire naturelle endokarstique que constituent les remplissages détritiques ; nous espérons pouvoir développer cela dans l'avenir.

§§§§§§§§

Nous avons passé en revue les différentes méthodes disponibles pour notre travail de recherche sur les sédiments détritiques endokarstiques. En nous basant sur les méthodes exploitées pour les sédiments de surface, et particulièrement pour les sédiments lacustres, nous avons pu faire quelques parallèles entre les méthodes utilisées en surface, et celles que nous avons pu effectivement mettre en œuvre pour nos sédiments lacustres souterrains. D'autre part, cette description des méthodes utilisées a permis également de montrer leur originalité et tout l'intérêt de leur mise en commun pour l'analyse de données (tableau II.2).

La présentation de notre problématique à travers l'explication des méthodes d'étude employée met encore plus en avant le caractère original et nouveau de notre approche des sédiments détritiques

¹ Ensemble des minéraux de densité supérieure à 2,87 se concentrant naturellement dans les roches.

² Les 12 éléments majeurs interviennent pour 99,4 % dans la composition de la croûte terrestre. Les éléments majeurs sont (par ordre d'abondance décroissante) : O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P et Mn.

endokarstiques. La fonction de transfert et celle de piégeage sont abordées de front, et ce avec des méthodes rarement exploitées dans l'endokarst.

	Méthode Traitement	Type de données	Informations acquises par rapport à notre problématique
ACQUISITIONS DE DONNÉES	Granulométrie	Taille des particules et données statistiques	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt
	Niveaux de gris	Signal sédimentaire synthétique	Evolution globale de la sédimentation
	Susceptibilité magnétique	Signal sédimentaire centré sur les minéraux ferro-magnétiques	Identification et contribution de différentes sources de matières, repérage d'événements particuliers dans l'évolution de la sédimentation
	Spectro- colorimétrie	Signal sédimentaire centré sur la colorimétrie	
ETUDE DYNAMIQUE	Images de Passéga et autres croisements	Composition du sédiment Contribution des classes granulométriques	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt Qualité du sédiment (tri, classement...)
	Statistiques multifactorielles	ACP et CAH comme indicateurs du comportement des classes granulométriques entre elles	
ETUDE DOM. TEMPOREL	Comparaisons et Corrélations	Croisement des données en fonction de la profondeur	Comparaison de la structure des différents signaux et recherche de liens éventuels
ETUDE DOM. FREQUENTIEL	Analyse spectrale	Structure globale et décomposition des signaux	Mis en évidence de structures de fonctionnement et/ou de rythmicités contrôlant la sédimentation, raccord aux connaissances sur l'environnement
	Ondelettes		
METHODES COMPLEMENTAIRES	Diffraction des argiles	Identification des minéraux argileux	Origine de ces composantes (état des sols, conditions géologiques et/ou climatiques)
	Observations microscope et loupe	Identifications minéralogiques	Sources de matières par rapport à la géologie locale et au bassin versant > Spatialisation
	Autres éléments	Identification flore et faune (charbons, coquilles, pollens) Datations au ^{14}C (charbons)	Etat du couvert végétal et forestier, qualité des eaux et impacts humains, Points de calage chronologique
	Datations	Dates ponctuelles sur d'éventuels restes végétaux (^{14}C) ou plus nombreuses sur le sédiment (^{210}Pb)	Cadre chronologique Calage des différentes évolutions sédimentaires mises en évidence, raccord avec le contexte climatique et environnemental local
	Géochimie	Identification et quantification des éléments majeurs et/ou des minéraux lourds	Reconnaissance des sources de matières et modalités de leur contribution à l'accumulation sédimentaire détritique

Tableau II.2 : Récapitulatif des méthodes présentées et de leur intérêt pour notre étude des dépôts détritiques endokarstiques.

Mais le rapprochement fait ici sur les moyens d'analyse entre lacs de surface et lacs endokarstiques mérite d'être nuancé. La sédimentation endokarstique ne doit pas être simplement assimilée à celle des lacs de surface, ces deux types de pièges sédimentaires ne se comportant pas de façon analogue. Nous verrons de plus que les méthodes exposées dans ce chapitre ne se substituent en aucune façon aux techniques d'étude de l'endokarst plus habituelles ou plus adaptées à la spécificité du milieu.

CHAPITRE II : APPLICATION AU MILIEU ENDOKARSTIQUE - UNE DÉMARCHE METHODOLOGIQUE SPECIFIQUE.

Le transfert des méthodes appliquées en surface vers le milieu souterrain est ici discuté plus en détail. Il est indispensable de mener une telle réflexion à l'amont des applications sur le terrain ; le domaine karstique recelant un certain nombre de spécificités, tant au niveau de sa structure que de son fonctionnement. Pour la mise en application de chacune des méthodes envisagées, il importe donc de bien cerner les différences et/ou les difficultés qui pourraient être rencontrées, afin de prévoir une démarche méthodologique adaptée. Nous devons donc préalablement nous poser cette question : est-ce qu'une simple « translation » des méthodes de la surface vers l'endokarst est possible, ou doit-on tenir compte de conditions particulières impliquant une adaptation de tout ou partie de nos outils ? Les différences peuvent d'ailleurs intervenir à plusieurs niveaux de notre travail, tant sur l'application strictement pratique de tel ou tel outil d'analyse, que sur la qualité des résultats que l'on est en droit d'attendre.

Nous consacrons donc ce chapitre à la question du transfert des méthodes au milieu endokarstique. Nous reviendrons sur quelques aspects des méthodes évoquées, afin de montrer que leur application au domaine karstique peut se faire mais implique parfois des ajustements. Cette réflexion sur les méthodes utilisées va nous permettre de reconsidérer notre problématique, et de poser les dernières notions essentielles, au cœur de notre approche des dépôts détritiques endokarstiques.

Enfin, à travers une discussion sur la mise en œuvre de ces différentes méthodes dans le karst, un regard plus critique sera porté, qui mettra en exergue la démarche méthodologique finalement adoptée, compte tenu de nos propres contraintes. En traitant des limites ou des inconvénients de ces techniques d'étude transférées au milieu souterrain, nous montrerons donc tout l'intérêt qu'il y a à coupler ces analyses avec des méthodes plus adaptées, ou plus couramment utilisées dans les recherches sur le karst et sa fonction mémoire. La notion de complémentarité méthodologique et les questions de la reproductibilité de l'approche selon les sites étudiés (passage de l'étude des sites actifs à l'étude des sites hérités notamment) seront ainsi déjà esquissées à l'issue de ce chapitre, avant d'être illustrées par nos analyses, présentées dans la suite de ce mémoire.

1. La pression de l'endokarst sur la sédimentation souterraine

Cette notion a déjà été exposée dans ce manuscrit, mais il convient d'en dire un dernier mot ici. Elle doit en effet être prise en compte sur le plan méthodologique, dans la mesure où le rôle de filtre exercé par le karst est d'une grande complexité. Il intervient notamment dans le transfert des informations environnementales, et de ce fait, il a une influence sur la valeur des mémoires naturelles endokarstiques. La connaissance, ou tout au moins l'estimation de l'impact produit par cet effet de filtre sur les sédiments détritiques doit donc être appréhendée en amont des analyses.

a) Le filtrage endokarstique : conséquences méthodologiques

Le karst, en engrangeant des mémoires naturelles en son sein joue donc un double rôle : protection des archives constituées, et filtrage, tri de l'information qui y est mémorisée (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.3). Cette double fonction repose sur le fonctionnement même du karst, à travers l'hydrologie et le degré de hiérarchisation des réseaux, eux-mêmes contrôlés par l'augmentation de la profondeur et le degré d'évolution du système karstique. Cette propriété du milieu endokarstique sous-tend une autre notion importante pour l'étude que l'on se propose de faire sur les sédiments détritiques : la localisation des pièges sédimentaires dans les réseaux.

En effet, plus l'éloignement entre le piège endokarstique et la source d'informations est élevé, plus les informations vont être, *a priori*, filtrées. Le tri des données environnementales se fait naturellement pendant le parcours des sédiments dans les réseaux, par un piégeage partiel des particules transportées qui peut être plus ou moins durable. La circulation des écoulements devient alors aussi une intégration, une synthèse d'éléments informationnels « prélevés » en surface, au niveau des sources sédimentaires, mais aussi dans l'endokarst, de place en place au gré du parcours souterrain de l'eau. Plusieurs variables peuvent alors contribuer à cette intégration de données environnementales, comme le type de karst (unaire ou binaire), le degré d'hydrodynamisme et la complexité du réseau de drainage karstique. L'ensemble des conditions hydrodynamiques est donc un paramètre important pour saisir le transfert des données environnementales et la valeur des pièges souterrains.

Ces particularités propres aux archives endokarstiques impliquent que les méthodes d'investigation utilisées auront une réponse spécifique, et probablement assez différente de ce que l'on obtient sur des sédiments détritiques de surface. Ainsi, la mise en œuvre technique des méthodes d'acquisition de signaux peut se faire à l'identique de ce qui est fait pour les archives de surface (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2). Mais par contre, le signal ainsi obtenu sera vraisemblablement d'une complexité différente. Les clés de lecture des informations environnementales et éventuellement climatiques contenues seront plus difficiles à mettre en évidence. Ce cryptage spécifique des données environnementales est une des principales raisons qui nous ont poussé à utiliser ces méthodes d'acquisition de signal, mais aussi la granulométrie, avec la plus grande résolution possible. Nous espérons qu'avec des données de haute qualité, le décryptage de l'information contenue pourra se faire dans les meilleures conditions.

b) Le fonctionnement particulier du lac endokarstique

Nous avons insisté sur le fait que la qualité du piège à sédiment était liée à la garantie d'un archivage relativement continu et peu perturbé (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.3). Nous avons donc opté, en fonction de ces critères, pour l'étude d'un piège de type lacustre, localisé à l'aval du système de drainage. Dans le premier chapitre de cette partie, nous avons présenté les méthodes utilisées dans l'étude des sédiments des lacs de surface. Ce parallèle « méthodologique » entre lacs de surface et souterrains a ses limites, nous les développons ici.

En effet, l'étude des sédiments lacustres repose aussi sur la connaissance du fonctionnement des lacs de surface, l'hydrologie contrôlant en grande partie la sédimentation. Mais pour les lacs de surface, l'hydrologie et son évolution sont directement liées aux variations climatiques avec lesquelles elles sont en contact direct. A l'évidence, les lacs souterrains ne subissent pas, eux, une pression aussi directe. Lacs

souterrains et lacs de surface ont donc des fonctionnements très différents, exerçant des contrôles bien distincts sur leur sédimentation. Il convient de présenter en quelques mots ces deux types de lacs et leur fonctionnement ici, afin de saisir plus précisément les influences produites - ou non - sur la constitution de l'archive sédimentaire endokarstique.

La sédimentation des lacs de surface est fortement soumise à la saisonnalité. Dans une année, un lac à ciel ouvert connaît deux grandes phases de fonctionnement : une liée à la saison chaude, une liée à la saison froide. Concrètement, cette saisonnalité s'exprime sur un lac en terme de stratification thermique des eaux. Cette stratification exerce un contrôle de la sédimentation (figure II.19), notamment à travers la présence de la thermocline¹, en été. Lors de la saison chaude, les eaux superficielles sont chaudes et oxygénées. Cette masse d'eau peu dense contrarie les échanges verticaux et la descente vers le fond des particules est en grande partie interrompue au niveau de la thermocline. Au cours de l'automne, cette stratification s'atténue peu à peu par le refroidissement et l'alourdissement des eaux superficielles. Le mélange des eaux se produit, faisant progressivement disparaître la thermocline. Le dépôt des particules peut alors se faire totalement dans le fond du lac [Chamley, 1988].

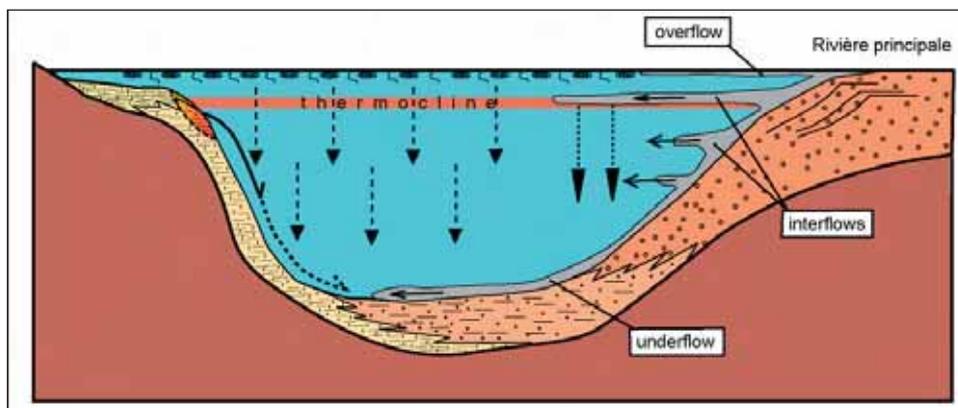


Figure II.19 : La stratification thermique des eaux dans un lac de surface et la sédimentation qui en découle (d'après Sturm et Matter, 1978).

Cette stratification, qui se remet en place chaque année, rythme et structure la sédimentation dans les lacs de surface. L'influence du climat est donc ici un critère majeur agissant directement sur la sédimentation. Mais cela n'est pas transposable aux lacs souterrains, où les variations de température de l'eau sont beaucoup trop faibles pour introduire cette dynamique.

Dans un lac souterrain, les variations climatiques extérieures ne s'expriment pas aussi directement. Le mode de sédimentation dans un lac souterrain est soumis à d'autres contraintes, à d'autres influences. On a donc ici une différence majeure entre les systèmes sédimentaires lacustres, selon qu'ils sont aériens ou souterrains. Dans l'endokarst, c'est essentiellement le débit des eaux qui va intervenir et contrôler la sédimentation. En particulier pour un système lacustre, la saisonnalité en température est exprimée de façon beaucoup plus atténuée qu'en surface. C'est ici l'hydrodynamisme, à travers une alternance hautes eaux/basses eaux, qui va exercer un contrôle sur la sédimentation. La transmission des données climatiques extérieures au lac souterrain ne se fait donc pas par le paramètre thermique, mais par la dynamique des écoulements. Le paramètre température n'intervient pas et la stratification des eaux n'existe pas dans un système lacustre souterrain (figure II.20). C'est d'ailleurs une donnée que nous avons vérifiée dans le lac étudié. Nous avons pu constater que sur environ 7 m de

¹ La thermocline est une discontinuité entre les eaux chaudes superficielles d'un lac (épilimnion) et les eaux profondes, plus froides (hypolimnion) [Chamley H. - 1988 - *Les milieux de sédimentation* - Ed. BRGM, coll. Tec&Doc, 173 pages].

profondeur, la température de l'eau du lac était parfaitement homogène, au centième de degré près ($t^{\circ} \approx 8,35^{\circ}\text{C}$).

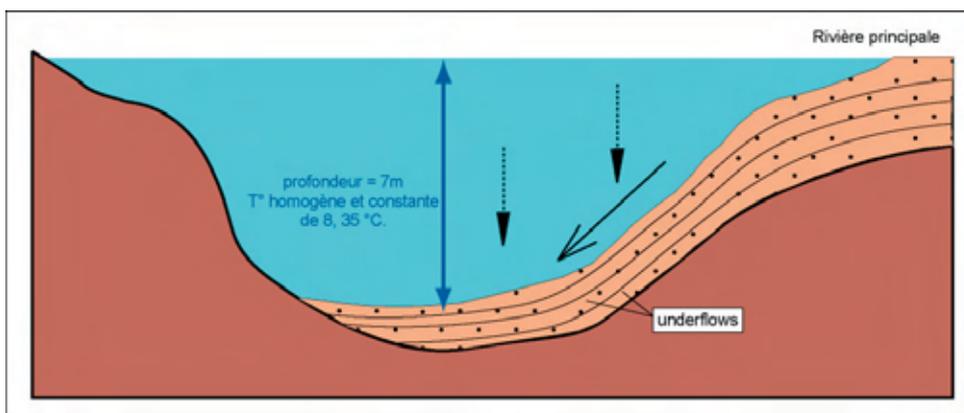


Figure II.20 : La sédimentation dans un lac endokarstique, ne subissant pas de stratification thermique (modifié d'après Sturm et Matter, 1978).

Si le piège endokarstique de type lacustre est sans doute le plus efficace pour ce travail, il présente aussi une sédimentation particulière, qui est encore, par rapport aux connaissances actuelles, une source de brouillage de l'information. C'est donc un paramètre dont il faut tenir compte et qui justifie là encore le fait d'avoir travaillé sur les carottes avec une bonne résolution. A travers les données de granulométrie par exemple, seule une grande quantité de mesures suivant au plus près l'évolution des sédiments avec le temps (fonction donc de la profondeur), peut permettre d'avoir une lecture fine et détaillée de l'évolution de la sédimentation. C'est également avec une haute résolution dans l'acquisition des données que l'on pourra tenter de voir si la sédimentation est contrôlée par une quelconque rythmicité, pouvant se raccorder aux influences saisonnières hautes eaux/basses eaux, par analogie avec la température pour les sédiments lacustres de surface.

Cette saisonnalité éventuelle sur la base de l'hydrodynamisme est toutefois nettement moins stable, et donc *a priori* peu fiable. En effet, au niveau de la « lecture » sur les carottes sédimentaires, la moindre crue en période de basses eaux peut venir perturber cette saisonnalité. Il y a donc de fortes présomptions sur la faiblesse de cette « rythmicité » supposée, et les signaux sédimentaires que nous obtiendrons à partir des carottes seront probablement contrôlés par des processus moins constants, moins réguliers dans le temps, et donc plus difficiles à faire ressortir.

La spécificité du domaine karstique est donc présente à tous les niveaux de notre recherche, et la pression, les contraintes ainsi exercées produisent des mémoires naturelles dont la lecture est originale, voire unique. Pour nous, l'examen de ces archives environnementales sera un moyen d'estimer, de quantifier plus précisément l'impact produit par le karst sur les mémoires naturelles qu'il renferme.

2. Approche karstologique : des méthodes complémentaires

La spécificité des archives karstiques, en particulier des sédiments détritiques dont nous traitons dans cette thèse, oblige donc à aborder ces mémoires avec une grande prudence et un certain recul. Les méthodes que nous avons présentées dans le chapitre précédent, et que nous venons de « pondérer » dans la discussion ci-dessus, devraient nous permettre d'appréhender avec une précision intéressante le fonctionnement des sédiments détritiques en tant que mémoire naturelle, *via* les fonctions

de transfert et de piégeage. Mais justement parce que le karst est un milieu particulier, ces méthodes ne se suffisent pas à elles-mêmes. Nous devons replacer les résultats obtenus dans le cadre de la karstologie plus « traditionnelle », en nous appuyant sur les méthodes de travail et d'étude plus appropriées à la karstologie.

a) Nécessité de méthodes d'études spécifiques au karst

Les méthodes d'étude plus classiquement utilisées dans le karst n'ont encore été que peu abordées dans ce mémoire, car nous voulions en premier lieu insister sur les particularités et l'originalité de notre approche des dépôts détritiques endokarstiques. Pourtant, ces méthodes plus « conformes » et plus adaptées aux études karstologiques ne doivent être en aucun cas occultées de notre travail. Bien au contraire, elles sont d'un grand secours, et cela à deux titres principaux.

Tout d'abord, ces méthodes permettent d'acquérir une connaissance générale des sites étudiés. Il semble en effet capital, en regard de l'originalité de notre travail, d'avoir un terrain d'application par ailleurs bien connu. Le fait de travailler sur une cavité étudiée par d'autres moyens contribue à fixer un cadre de connaissances sur le réseau karstique et sur son environnement, plus ou moins étendu. Un minimum de connaissances sur ce cadre karstique et sur son environnement est donc indispensable, pour nous aider dans l'exercice du décryptage des archives, au bon positionnement de nos propres résultats. Ainsi, les méthodes originales que nous avons présentées n'ont de valeur, d'intérêt réel que si l'on peut en recadrer, en calibrer les données par rapport à un système karstique dont le fonctionnement au moins global est connu. Envisager notre approche des sédiments détritiques endokarstiques sur une cavité vierge de toute étude serait voué à l'échec.

Notre étude, dans la mesure où ce travail de thèse consiste en grande partie à évaluer l'intérêt informationnel des dépôts détritiques endokarstiques, se doit donc d'avoir des points de comparaisons, de recadrage. Cela passe par une mise en application sur un site étudié et connu, pouvant au besoin servir de guide, de référentiel géographique, climatique et environnemental. On ne peut concevoir ce travail sans connaissances préliminaires acquises par le biais des méthodes classiques, et ce pour chaque site étudié. Sans ce minimum de données générales, l'analyse et l'interprétation des données acquises à haute résolution seraient exposées à de nombreux risques d'erreurs.

De plus, nous avons soulevé le problème de la reproductibilité de notre approche aux sites anciens (cf. *supra* : Partie I, Chap. II). Dans ce cas, l'identification des différents pièges sédimentaires à étudier est moins évidente à cause de l'absence d'eau, mais aussi parfois par l'abondance des sédiments qui masque le contexte d'accumulation (morphologie des vides). Là encore, c'est en ayant recours aux moyens d'étude propres à la karstologie que ces questions pourront être tranchées. Pour l'étude de sites dits « fossiles », intéressante entre autres choses pour la possibilité d'aborder des secteurs de paléo-zones noyées du karst, la karstologie est donc le moyen de cerner le fonctionnement général d'un système karstique, à un moment donné, actuel comme passé. Ces apports en connaissances variées sur un système sont indissociables de notre propre approche. Ils contribuent à une meilleure connaissance des sédiments détritiques en tant qu'archives naturelles.

b) Exemples d'études complémentaires

Nous citons ici quelques exemples de méthodes d'étude utilisées en karstologie. La présentation faite ici n'est pas exhaustive, elle permet simplement de montrer l'intérêt de ces méthodes plus classiques

de la karstologie auxquelles nous avons eu recours, comme autant de moyens de contrôler et de valider une démarche de travail plus originale, telle que celle que nous avons choisie.

1. L'hydrologie

L'étude des sites endokarstiques par le biais de leur hydrologie est un des moyens les plus efficaces pour comprendre le fonctionnement des systèmes. C'est une méthode d'étude qui ne peut être mise en œuvre que sur les sites actifs, et qui nécessite une instrumentation des rivières souterraines. La mesure de la qualité des eaux, de la température, des débits en entrée et en sortie du système de drainage, peut se faire grâce aux stations automatiques de façon quasi continue. Sur une année hydrologique complète, de telles données permettent la compréhension du fonctionnement hydrologique du karst, en fonction de conditions extérieures variées (fonte nivale, épisodes orageux et fonctionnement des rivières en crue, temps de transfert...). Cette analyse, couplée à des données issues de stations météorologiques en surface, apporte un maximum d'informations actuelles sur la nature du drainage du réseau karstique étudié et ses temps de réponses par rapport aux fluctuations extérieures [Delannoy *et al.*, 1999]. Cette approche permet de saisir le fonctionnement du drainage, et prend en compte le degré d'évolution du système karstique. Ces deux aspects ont en effet un impact important sur les modes d'écoulements en jeu, et donc sur les capacités de transport de matières en suspension.

Le site actif des Grottes de Choranche, retenu pour notre étude, fait l'objet depuis de nombreuses années de ce type de recherches. Avec une instrumentation riche au niveau du système de drainage, mais aussi en extérieur avec des stations météorologiques, le fonctionnement de ce système est aujourd'hui assez bien décrit. Nous bénéficions ainsi d'un contexte relativement bien établi quant au fonctionnement des rivières souterraines. En ce qui concerne les apports de matière détritique à notre piège lacustre, le lac de la Cathédrale, ces connaissances sont du plus grand intérêt.

2. La cartographie morphologique

Pour l'étude des sites anciens, la première difficulté consiste à identifier les différents pièges à sédiments. Ce travail implique une observation poussée des formes, qu'elles soient marquées par la roche encaissante, par le concrétionnement ou par les accumulations de sédiments détritiques. Cette lecture approfondie peut se faire, pour être menée de façon complète et précise, par l'intermédiaire d'un travail de cartographie morphologique.

La cartographie morphologique appliquée aux sols est un outil permettant d'étudier la répartition spatiale des formes et des dépôts, ainsi que leur succession chronologique [Delannoy *et al.*, 2001]. L'un des objectifs de la cartographie des phénomènes souterrains est de formaliser, au travers d'une légende adaptée (figure II.21), les différentes étapes qu'une cavité a connues depuis le creusement des conduits jusqu'à la configuration observée. Cette cartographie a été mise au point par J.-J. Delannoy lors de ses travaux sur le Vercors septentrional [Delannoy, 1981]. Dans le cadre de l'étude karstologique de la Grotte Chauvet en Ardèche, cette approche cartographique a été réadaptée et développée [Delannoy *et al.*, 2001 ; Debard *et al.*, 2002]. Mais cet exercice de cartographie peut aussi servir à identifier des phases de création de vides, qui sont autant de pièges potentiels. La reconnaissance de cette phase, parmi d'autres que la cartographie a permis de mettre en évidence, autorise donc quelques hypothèses quant au fonctionnement de ces pièges et de l'accumulation de sédiments qui y est ou non constituée. En fonction de l'environnement direct d'un piège supposé (formes, disposition...), on peut éventuellement

reconnaître sa forme (marmite, lac, chenal...) et donc le type d'accumulation de dépôts qu'il a pu permettre.

Objet	Figuré	Intérêt
généralisations		
Colonne		Permet de définir les zones où débouche dans la galerie les infiltrations saturées en carbonates
Stalagmite		idem
Stalactite		idem
Stalagmite corrodé		Permet de montrer le sens de l'écoulement remodelant des stalagmites (syn ou post dépôt).
Stalactite cassée		Permet de montrer des ruptures de stalactite et donc de s'interroger sur leurs origines anthropiques ou tectoniques.
Stalagmite cassée		idem
Micro gours		Montre le fonctionnement hydrologique actuel dans un contexte d'écoulements saturés.
Micro gours étagés		idem
Ruptures de pente		Permet la mise en évidence de la topographie "stable" de la cavité et des différentes phases d'érosion ayant modelé le
Concrétionnement de surface lié à l'évaporation		Indicateur des écoulements faibles et du caractère confiné de la cavité
Fleur de calcite		Révéle la stabilité des conditions physico-chimiques régnant lors du concrétionnement.
Encroûtement de surface (pelliculaire)		Permet de décrire l'état des sols et les zones pouvant être partiellement en eau.
Dépôt stalagmite (e.g. plancher)		Permet de mettre en évidence les types de sols anciens ainsi que les différentes phases de morphogénèse de la cavité.

Objet	Figuré	Intérêt
généralisations		
Corrosion		Permet de montrer une phase d'érosion liée à des écoulements libres ou non.
Coupoles de voûte		Permet de montrer une phase d'érosion liée à des écoulements non-libres (zone noyée).
Erosion en marmite		Permet de montrer une phase d'érosion liée à des écoulements libres.
Impact de goutte		Ces micro-formes permettent de montrer le caractère moule du sol et parfois sa stratigraphie.
Formes liés à un écoulement en nappe		La reconnaissance de ces fonctionnements hydrologiques permet de comprendre l'origine de la disposition de certains vestiges (e.g. ossements).
Morphologie liée à une cascade		Permet de montrer une phase d'érosion liée à des écoulements libres.
Ruptures de pente		Permet la mise en évidence des différents fonctionnements hydrologiques actuels et anciens.
Circulations hydrologiques (linéaires)		
Circulations hydrologiques (anastomose)		Ces informations permettent de déterminer l'état en place ou non de certains sols (hydrologie actuelle et sub-actuelle) et de décrire les paléocirculations contribuant à la morphogénèse de la cavité.
Zone en eau		
Zone de soutirage		

Dépôts détritiques en place		Permet de décrire le type de sédiment et son évolution en rapport avec la morphogénèse
Dépôts détritiques remaniés		
Poudre de calcaire		Permet de décrire l'évolution récente des parois (dessiccation, thermoclastie).
Clastes de desquamation		
Mottes de sédiments détritiques		Permet de montrer à la fois les zones anciennes et récentes de remobilisation des parois, des sédiments détritiques et carbonatés (selon couleur intrinsèque).

Apex		Topographie
Cicatrice d'arrachement		Mise en évidence de zones d'arrachements, naturels ou non.
Ossements		Paléontologie
Vestiges anthropiques		Archéologie
Bauge d'ours		Paléontologie
Pistes ou traces d'animaux		Paléontologie, anthropologie

Figure II.21 : La légende de la cartographie morphologique appliquée à la Grotte Chauvet (d'après Delannoy *et al.*, 2001).

La cartographie morphologique est un outil relativement simple à utiliser, et très performant pour l'analyse des formes actuelles et héritées. C'est un moyen d'appréhender les différentes phases de formation de la cavité, et donc, de recenser un certain nombre d'éléments sur son histoire karstogénétique [Lopez, 2002 ; Sadier, 2004]. La cartographie contribue donc à la reconstitution des données élémentaires dont on a besoin, en guise de référentiel, sur le contexte géographique et environnemental local de la cavité. Mais la cartographie est aussi un moyen de repérer les anciens pièges à sédiments devenus invisibles. On peut ainsi en faire une sélection, et après quelques prélèvements, procéder à leur analyse telle que nous l'envisageons dans notre approche.

3. La tomographie électrique

La prospection géophysique par tomographie électrique est également un moyen de reconnaître d'anciens pièges à sédiments détritiques, dans des sites fossiles. C'est une méthode qui permet d'évaluer la quantité de remplissages détritiques contenue dans un secteur de cavité.

Le principe de cette méthode repose sur la différence de résistivité entre des matériaux en contact les uns avec les autres, par l'envoi d'impulsions électriques le long d'un profil [Gautam *et al.*, 2000 ; Kaufmann, 2002]. Or, le contraste de résistivité entre la roche calcaire massive et les sédiments comblant les cavités est assez élevé. La mise en œuvre de cette méthode d'étude dans le karst apporte donc la plupart du temps des résultats d'une bonne lisibilité. Sur le terrain, on place une série d'électrodes équidistantes qui sont parcourues par un courant (photo II.9). Les électrodes fonctionnent en quadripôles mesurant à la fois l'intensité du courant injecté *via* le circuit d'émission (I), et la différence de potentiel générée entre les électrodes (V) de réception (figure II.22). La profondeur d'investigation du courant électrique injecté est directement dépendante de la longueur du profil.

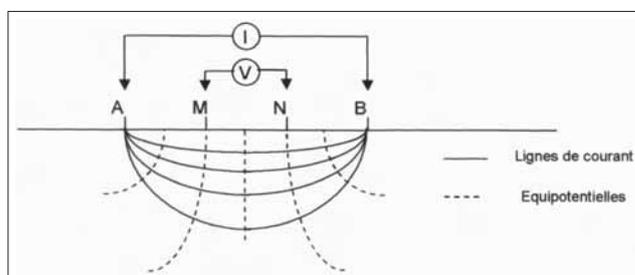


Figure II.22 : Modèle du quadripôle Wenner, lignes de courant et équipotentielles dans un milieu homogène (d'après Kaufmann, 2002).

Par cette méthode d'investigation, on peut avoir accès à la géométrie du remplissage et à son contenu (une concrétion enfouie n'a pas la même résistivité que les sédiments détritiques, elle peut donc être décelée par la tomographie), et à la géométrie de la roche encaissante, plus en profondeur. Par rapport à notre approche, en particulier sur la reproductibilité de la méthode sur les sites fossiles, la tomographie, au même titre que la cartographie, a un double intérêt. En donnant une « image » d'un remplissage, elle peut permettre de mettre en évidence différentes phases de genèse de la cavité. Si un colmatage détritique révèle, grâce à la tomographie, la présence de blocs effondrés et/ou de concrétions plus en profondeur, on peut définir plusieurs épisodes dans la sédimentogenèse dont il reste ensuite à déterminer les causes. La tomographie est dans ce cas un moyen de compléter les informations sur le contexte local et son évolution, informations qui nous servent de référentiel géographique. De même, si la tomographie permet d'atteindre le « fond » du remplissage, on a aussi accès à la morphologie de la roche encaissante au plancher de la galerie. On peut alors y reconnaître éventuellement des formes de pièges endokarstiques.



Photo II.9 : Le dispositif nécessaire pour la méthode de prospection géophysique par tomographie électrique (cliché A.S. Perroux).

§§§§§§§

La mise en œuvre des méthodes choisies, appliquées au karst, aura donc dans certains cas des implications tout à fait originales, liées au fonctionnement particulier d'un système karstique. Les relations complexes entre un karst et son environnement sont des sources de brouillage éventuel pour la mémoire d'une archive naturelle endokarstique. Leur identification, et leur décodage nécessitent donc une connaissance solide du contexte géographique, environnemental et climatique. Sans ce « bagage » de données locales, sans ce *référentiel*, l'analyse fine des archives endokarstiques, et en l'occurrence des sédiments détritiques lacustres peut s'avérer complètement décalée par rapport aux réalités locales.

C'est pourquoi notre démarche méthodologique est une association de méthodes nouvelles pour l'endokarst avec des méthodes plus courantes en karstologie, ou plus adaptées et qui ont fait leurs preuves. C'est sur cette indispensable *complémentarité méthodologique* que reposent l'intérêt et la validité de notre étude à haute résolution des remplissages détritiques endokarstiques. Il en va de même pour la *reproductibilité* de notre approche sur les sites fossiles, et bien au-delà, pour la reproductibilité à d'autres sites, actifs ou non, sous d'autres climats, dans des environnements naturels pouvant être très différents.

En règle générale, et de façon bien plus large que dans les exemples donnés ici, le type d'étude que nous proposons ne peut se dispenser d'une étude globale sur l'environnement local, de façon à avoir un minimum d'éléments sur le contexte géographique du site étudié et sur son évolution au cours des âges. Ce référentiel est indispensable à une bonne analyse des données, et permet de considérer ces dernières à leur plus « juste » valeur informationnelle.

CONCLUSION

L'ensemble de cette seconde partie du rapport a permis de développer les différents aspects constitutifs de la démarche méthodologique élaborée. La présentation des différentes méthodes nouvellement utilisées dans le karst, sur la base des études menées sur les sédiments des lacs de surface, fut nécessaire pour expliquer leur principe de mise en œuvre et pour montrer leurs apports. Chaque méthode ainsi présentée et argumentée quant à nos objectifs, a donc trouvé sa place dans notre problématique.

Mais la question du transfert de ces méthodes vers le milieu endokarstique a du être abordée, afin de construire une démarche méthodologique la plus réfléchie et la plus fiable possible. Par ce travail, nous avons pu montrer que l'analogie avec les lacs de surface avait ses limites. Nous les avons expliquées et nous avons pu ainsi anticiper sur la qualité, la pertinence des méthodes de surface utilisées. Cette réflexion théorique sur l'application des méthodes présentées aux sédiments détritiques endokarstiques a mis en exergue une notion capitale, causée par l'effet filtreur du milieu endokarstique, et qui conditionne toute la démarche analytique : la notion de *réponse spécifique et inédite* des outils d'analyse appliqués aux archives de l'endokarst.

Ainsi, la nécessité de pallier à cette difficulté de lecture apparaît comme indispensable. Pour cela, la démarche méthodologique se complète tout naturellement par l'acquisition de données sur les sites étudiés, à travers des moyens plus couramment mis en œuvre en karstologie. Différentes techniques plus proches de la karstologie « classique » ont donc été présentées dans ce sens. Elles permettent la constitution d'un cadre de connaissances sur le site et son environnement. Ce cadre informationnel pourra servir de support et de guide aux méthodes plus atypiques, en permettant le décryptage des mesures dans un référentiel karstologique, géographique, environnemental et climatique.

La démarche méthodologique finalement élaborée pour la mise en application de notre problématique repose donc sur la *complémentarité* entre :

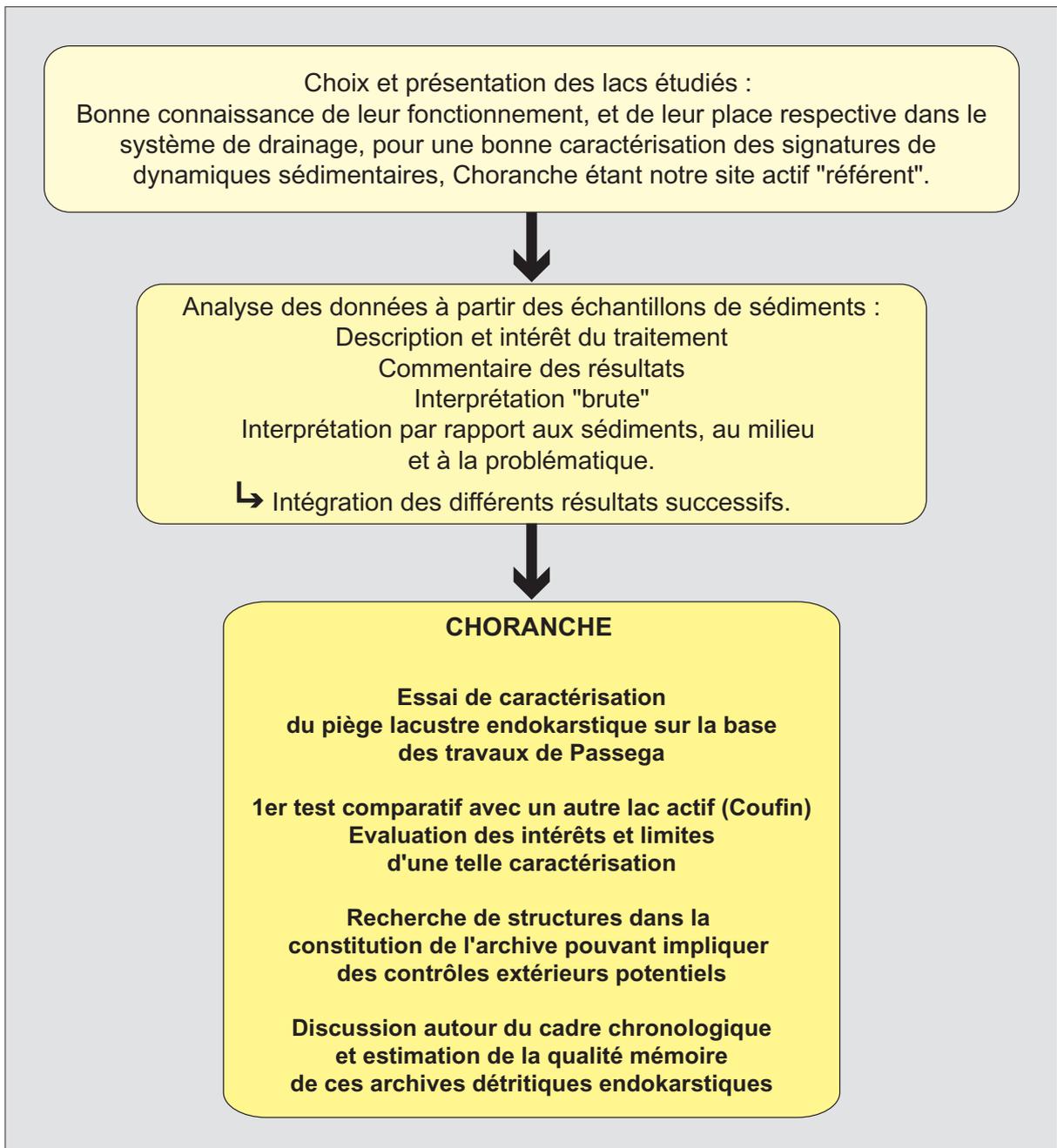
- des méthodes issues des études sur les sédiments des lacs de surface, que l'on souhaite éprouver sur les sédiments détritiques endokarstiques. Elles permettront de travailler à haute résolution même si leur décodage est pressenti comme assez complexe ;
- et des méthodes classiques et/ou adaptées au milieu endokarstique qui permettent la construction d'un référentiel sur le contexte du site étudié et son évolution. Ce référentiel servira de contrôle aux interprétations issues des résultats du premier groupe de méthodes.

PARTIE III
ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES
ACTIFS - LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).

**PARTIE 3 : ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES ACTIFS -
LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).**

Démarche globale :

Analyse sédimentologique et fonctionnelle des archives détritiques de ces lacs selon le protocole exposé en partie 2. Etudier ainsi les accumulations détritiques du point de vue de leur fonctionnement et de leur relations avec l'environnement.



INTRODUCTION

Les deux premières parties avaient pour objet de poser et d'explicitier les entrées conceptuelles et les outils sur lesquels repose notre recherche. Cette troisième partie correspond à une première mise en application sur un site fonctionnel : les grottes de Choranche. La méthodologie précédemment exposée est ainsi mise en oeuvre sur un site karstique actif dont le fonctionnement général est connu.

Pour répondre aux critères de choix d'un piège à sédiments de type lacustre – puisque nous avons mis en avant, sous forme d'un postulat qui reste à démontrer, que c'est un des pièges endokarstiques le plus pertinent – nous avons choisi comme site d'application les grottes de Choranche, situées dans le quart nord-ouest du Vercors (massif des Coulmes). Ce site répond à nos attentes et à notre démarche analytique. Les grottes de Choranche sont des grottes actives, étudiées depuis de nombreuses années pour leur spéléogénèse, la géomorphologie, l'hydrologie, et le concrétionnement en tant qu'archive naturelle. Dans leur partie aval, ces grottes contiennent trois lacs, le lac de la Cathédrale, le lac de Coufin et le lac de Gournier, alimentés de façon permanente et en connexion directe avec les écoulements karstiques. Leur position dans le réseau est conforme aux critères que nous nous sommes fixés : ces lacs se situent à l'extrémité aval des réseaux, se confondant parfois avec l'exutoire. La présence de trois lacs sur un même site est extrêmement avantageuse, offrant une première possibilité de comparaison des résultats obtenus. Nous avons travaillé sur les lacs de Coufin et de la Cathédrale. Sur le seul site de Choranche, nous aurons donc la possibilité de tester la méthode d'étude proposée. De plus, grâce à un grand nombre de connaissances accumulées sur ce site, nous disposons de différents points de calage et de comparaison, afin de bien calibrer nos propres résultats. Nous pourrons ainsi évaluer la pertinence des méthodes utilisées en comparant les données issues des deux lacs ; la question de la validité de la méthode et de sa reproductibilité piège à piège pourra dès lors être discutée.

Le plan de cette partie sera développé en trois temps. Dans un premier chapitre, nous proposerons une présentation du site d'étude, et de son contexte géologique et géomorphologique. Ce chapitre est destiné à fournir au lecteur les données environnementales et morphogéniques nécessaires à la démonstration que nous voulons mettre en avant : l'intérêt des remplissages de pièges lacustres. Les deux lacs étudiés seront dans un premier temps présentés, puis nous les replacerons successivement dans le cadre du réseau de drainage, puis dans le contexte vercoisien.

Dans le second chapitre, tous les résultats des différents traitements effectués sur les dépôts des deux lacs seront exposés. Après une description des différents échantillons prélevés dans les lacs, les résultats de notre travail seront développés en deux grands volets. Le premier fera la synthèse de tous les traitements opérés sur les données de granulométrie, et une première approche du fonctionnement des lacs pourra ainsi être proposée. Le second volet sera consacré à la présentation des résultats provenant des autres signaux sédimentaires étudiés, et à leur confrontation avec les données de la granulométrie. Cette deuxième grande partie du chapitre II permettra d'aborder les questions relatives aux paramètres environnementaux qui contrôlent les modalités de la sédimentation. Le commentaire des résultats permettra d'apporter quelques précisions. Ce second chapitre s'achèvera par un point plus court sur des datations de charbons piégés dans le sédiment. La chronologie du remplissage pourra alors être envisagée.

Enfin, dans un troisième et dernier chapitre, nous ferons une synthèse des différents résultats visant à proposer un modèle de sédimentation des pièges lacustres endokarstiques, modèle dont la validité sera bien sûr discutée. Des éléments de reconstitution de l'histoire du remplissage seront également présentés. Puis, nous tenterons de mieux cerner quels sont les forçages environnementaux ayant éventuellement un rôle dans la structuration l'archivage sédimentaire. A travers cet exercice d'interprétation plus global des différentes données collectées, nous pourrons faire une première évaluation de la capacité mémoire de ces dépôts endokarstiques, de leurs qualités et leurs limites en tant qu'archive naturelle.

CHAPITRE I : LE CHOIX DU SITE DE CHORANCHE ET LE CONTEXTE VERCUSIEN.

Nous faisons ici une présentation détaillée du site de Choranche, site particulièrement bien adapté à notre problématique par la présence de trois lacs situés à l'aval du système de drainage. Une description détaillée des deux lacs retenus est proposée, en s'appuyant sur leurs principaux caractères (dimensions, particularités...), et sur leur hydrologie. Des données historiques récentes sur ces lacs seront également rapportées ici pour compléter la description. C'est sur la base de l'existence et de la connaissance de ces caractères que c'est porté notre choix de travailler sur deux lacs de Choranche.

Ce réseau, étudié depuis plusieurs années, offre en effet un référentiel solide pour les études environnementales *via* le karst. Nous aborderons les données générales physiques, géologiques et anthropiques concernant ce site. L'ensemble de cette présentation du contexte vercusien apportera un éclairage supplémentaire à la lecture des archives sédimentaires endokarstiques.

1. Les lacs souterrains de Choranche

Par rapport aux critères fixés en terme de piège sédimentaire, les grottes de Choranche présentent trois lacs possibles pour notre étude. Le lac de Gournier, distant des deux autres, n'a pas été échantillonné dans le cadre de ces recherches. Par contre, nous avons retenu pour ce travail les lacs de la Cathédrale et de Coufin, proches l'un de l'autre, et qui correspondent en tous points aux conditions optimales de travail pour nous (figure III.1).

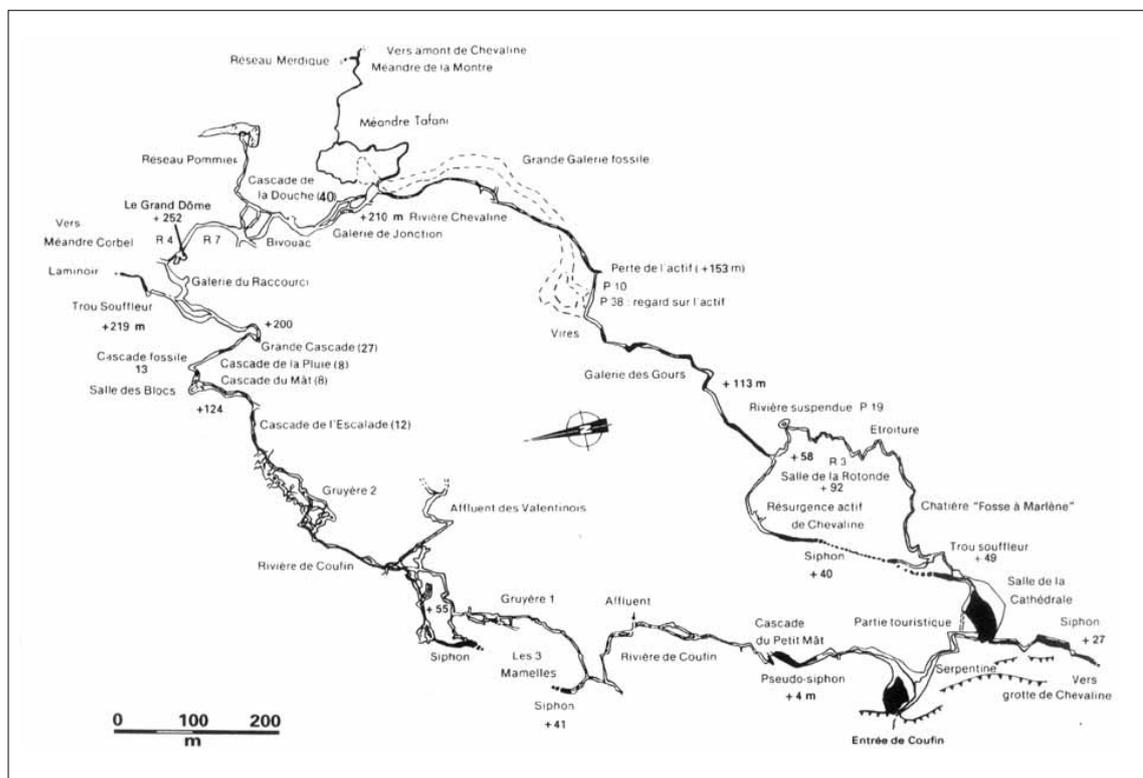


Figure III.1 : Topographie partielle du système Coufin-Chevaline des grottes de Choranche : partie aval (topo GSV, d'après Caillault *et al.*, 1997).

a) Le lac de la Cathédrale

Ce lac correspond quasiment au terme aval d'une des trois rivières du système karstique de Choranche : la rivière Chevaline. D'une soixantaine de mètres de long pour environ cinquante de large, il comporte sur tout son flan Sud une grande banquette argileuse (figure III.2). La rivière Chevaline s'écoule sur les derniers mètres avant le lac sur un système cascasant de gours, et la salle est richement concrétionnée, notamment par des stalagmites massives (photo III.1). Le lac, observé en section, présente un profil très fortement conique avec un point bas à une profondeur de 7 m. Cette disposition, associée à la morphologie de la salle et au parcours de la rivière fait qu'une partie de la berge Nord est vierge de tout dépôt (figure III.2).

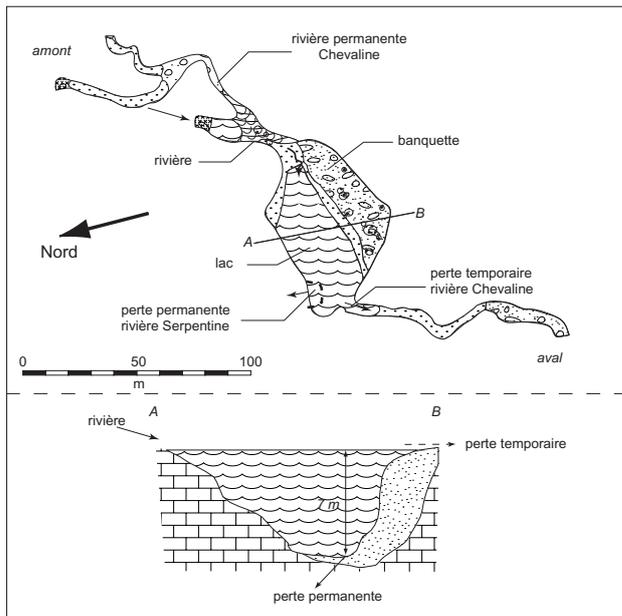
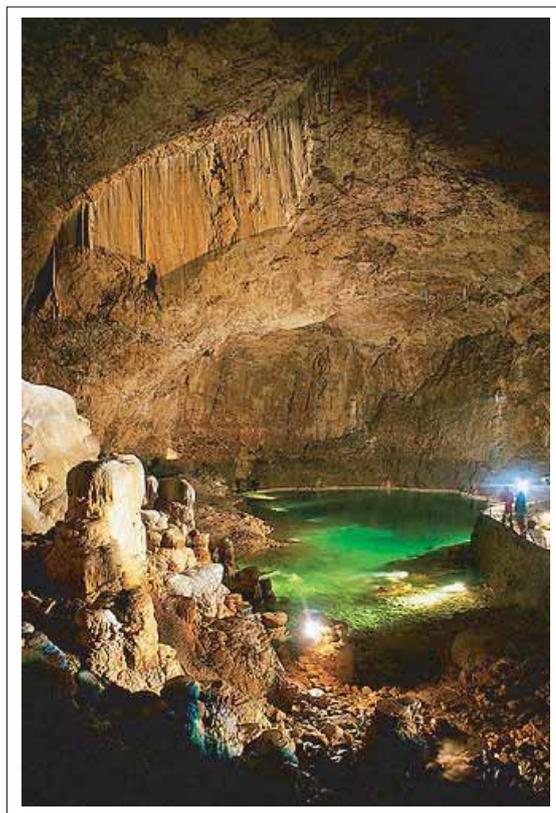


Figure III.2 : Le lac de la Cathédrale vu en plan et en coupe.

Photo III. 1 : La salle de la Cathédrale et le lac vu depuis l'amont (cliché Grottes de Choranche/EdyCP).



Le dispositif hydrologique de ce lac est assez original. Il est alimenté par la rivière Chevaline, dont les concentrations en Ca^{2+} sont de 78 mg/l en moyenne (évaluation de la minéralisation) et un flux moyen de matières en suspension de 32 kg/h environ [Delannoy *et al.*, 1999a]. Les débits de cette rivière sont très contrastés, avec des phases d'étiage sévère, voire de quasi-sécheresse durant l'été, qui peuvent produire une baisse importante du niveau du lac de l'ordre de plusieurs mètres. Par contre, durant les saisons automnales et printanières, les écoulements sont abondants, Chevaline drainant la partie la plus élevée, et donc la plus enneigée du plateau sus-jacent. Le lac possède deux pertes différentes : une perte permanente au fond du lac, qui alimente la rivière Serpentine, et une perte temporaire dans la partie sud-ouest de la salle ; cette dernière alimente la partie aval de la rivière Chevaline, et ne fonctionne qu'en périodes de hautes eaux ou lors de violentes crues estivales. La perte permanente, localisée au point bas du lac, ne produit pas de perturbation majeure sur les eaux du lac proprement dit. En effet, nous avons pu constater que les eaux du lac ne sont que très peu brassées. En écoulement « normal », les eaux sont limpides et le lac, par son volume, joue donc bien son rôle de perte d'énergie hydrodynamique et d'inertie autorisant le dépôt de particules. Au niveau de la perte de Serpentine, de taille réduite, les eaux s'écoulent donc sous la simple pression de la colonne d'eau, sans générer d'agitation violente.

Ce système lacustre se situe à proximité des aménagements (tunnel), dans la partie aujourd'hui touristique de la cavité ; il a donc été l'objet de quelques réaménagements qui ont produit deux grands événements dans le lac, et vraisemblablement perturbé les dépôts associés. En janvier 1980, suite à des travaux sous le lac (amont de la rivière Serpentine), une vidange accidentelle et complète s'est produite, par la perte sous lacustre de Serpentine. Nous n'avons malheureusement pas pu avoir de photos du lac avant cette vidange. Mais les personnes connaissant le site avant et après cette spectaculaire vidange s'accordent à dire que cela a produit un important départ de sédiments au centre du lac. Une épaisseur d'au moins deux mètres de sédiments aurait été remobilisée à ce moment là, fragilisant du même coup les banquettes du bord sud [G. Mantovani, B. Lismonde et L. Garnier, comm. pers]. Après d'importants travaux de colmatage de la perte pour qu'elle retrouve son débit initial, le lac a retrouvé son niveau d'eau originel en mars de la même année 1980. De plus, des seuils ont été placés en aval, pour que la hauteur d'eau dans le lac soit maintenue. Mais G. Mantovani précise que pendant les quatre années qui suivirent, les talus qui étaient restés en place, ou qui n'avaient été que peu affectés lors de la vidange se sont régulièrement effondrés lors de crues et de périodes d'étiage. Il subsiste encore aujourd'hui des pans de la banquette argileuse en équilibre instable, partiellement détachés de la masse du colmatage. Lors des aménagements touristiques du secteur de la Cathédrale en 1986 (creusement du tunnel), le lac a connu une autre vidange accidentelle *via* le tunnel. Celle-ci a été partielle et a eu un impact mineur sur les remplissages sédimentaires [G. Mantovani, comm. pers].

Ces deux épisodes dans l'histoire récente de la sédimentation dans ce lac, notamment la vidange de 1980, ont façonné le remplissage tel que nous l'observons aujourd'hui. Ils sont pour nous tout à fait intéressants car les dépôts actuels en ont vraisemblablement gardés l'empreinte. Cela constituerait un point de calage chronologique de premier ordre, à partir duquel le(s) taux de sédimentation depuis ces vingt dernières années pourrai(en)t être évalué(s).

b) Le lac de Coufin

Ce lac, situé à l'aval du système de Coufin, est alimenté par la rivière souterraine de Coufin, et par les eaux du lac de la Cathédrale, *via* la rivière Serpentine (figure III.1). Légèrement plus petit (30 m de large par 55m de long environ), et à la morphologie beaucoup plus douce, il possède un

remplissage de sédiments détritiques qui tapisse tout le fond. La profondeur totale de ce lac, incluant l'épaisseur des dépôts détritiques, n'est d'ailleurs pas connue (figure III.3). Sa position dans l'ensemble du réseau karstique est idéale pour nous puisque son exutoire coïncide exactement avec l'émergence de la rivière de Coufin. Il est, en effet, situé au point extrême du système, dans la salle d'entrée de la partie touristique. La fonction intégratrice que nous avons mise en évidence précédemment (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.2.b) ne peut donc être mieux servie. La salle est beaucoup plus vaste que la salle de la Cathédrale, avec un concrétionnement riche mais beaucoup moins massif, notamment illustré par les plafonds de fistuleuses, si caractéristiques de cette grotte (photo III.2).

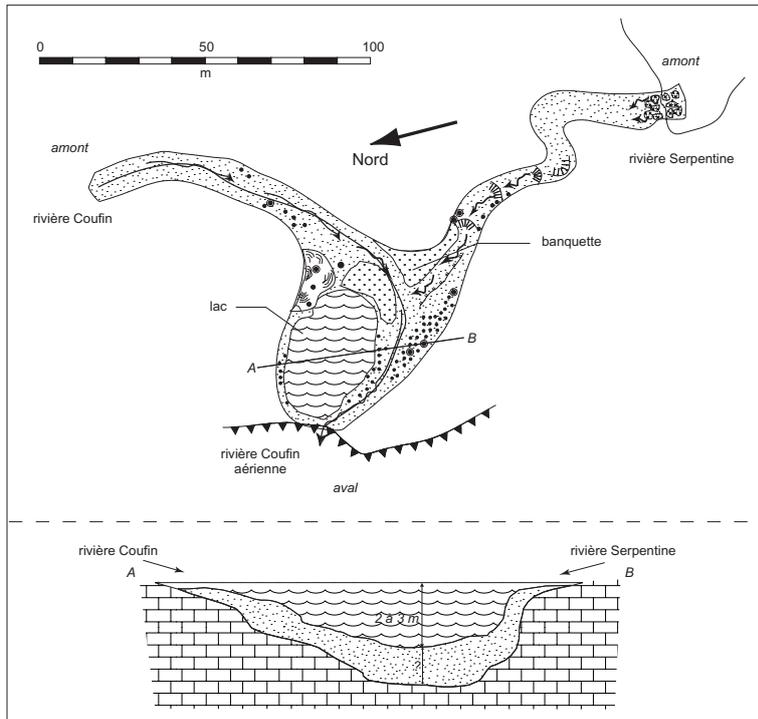


Figure III.3 : Le lac de Coufin vu en plan et en coupe.

Photo III. 2 : La salle d'entrée et le lac de Coufin vu depuis l'amont de la rivière de Coufin (cliché Grottes de Choranche/EdyCP).



L'hydrologie qui régit ce lac ne ressemble en rien à celle du lac de la Cathédrale. Les apports arrivant au lac proviennent de deux rivières : Serpentine, dont nous avons déjà parlé et qui est la « jonction hydrologique » entre les deux lacs présentés ici, et Coufin, rivière provenant d'une toute autre partie des réseaux, localisée plus au nord. Le lac n'a qu'un seul exutoire qui n'est autre que l'émergence de la rivière Coufin. La complexité pouvant résider dans les remplissages détritiques de ce lac est donc plutôt liée aux apports qu'aux pertes (nous avons une configuration inverse avec le lac de la Cathédrale : une rivière responsable des apports et deux pertes). D'autre part, l'arrivée des deux rivières dans le lac, et la perte, ne produisent pas de perturbations gênantes sur l'inertie de l'eau. Cela s'explique en grande partie par la géométrie et les volumes en jeu. Les deux rivières s'écoulent dans de larges conduits sub-horizontaux qui impliquent une faible énergie hydrodynamique. Cette dernière, en étant peu turbulente, a un impact très limité, sur la masse d'eau du lac de Coufin. On retiendra à titre d'exemple que le débit moyen de la rivière de Coufin avoisine les 72 l/s, avec des concentrations en Ca^{2+} de 89 mg/l en moyenne et un flux moyen de matières en suspension de 22 kg/h. Coufin est d'ailleurs la plus minéralisée des rivières de Choranche (selon les mesures de Ca^{2+}), devant Chevaline puis Gournier [Delannoy *et al.*, 1999a]. Des travaux sur la sédimentation de ce lac ont été entrepris en 2000 [Blois, 2000]. Notre étude s'appuie en partie sur ces résultats.

Enfin, contrairement à la Cathédrale, ce lac a apparemment beaucoup moins souffert des aménagements de la cavité. Il a par contre du subir indirectement les effets des deux vidanges accidentelles du lac de la Cathédrale en 1980 et 1986. Ainsi, si le premier est susceptible d'accuser des lacunes de sédimentation, éventuellement marquées par des limites érosives dans la stratigraphie, le second devrait plutôt, *a priori*, montrer des phases contemporaines de crues ponctuelles mais franchement marquées dans la sédimentation. On précise pour terminer que d'après les personnes connaissant bien le site, le lac de la Cathédrale avant sa grande vidange de 1980, en terme de quantité de dépôts, devait être relativement semblable au lac de Coufin tel qu'on peut le voir aujourd'hui [L. Garnier, comm. pers.].

c) Pertinence des pièges lacustres du système karstique de Choranche

En fonction des critères que nous avons fixés (cf. *supra* : Partie I, Chap. II), les deux lacs de Choranche répondent parfaitement aux besoins de notre étude, et ce à plusieurs titres :

- *les deux lacs assurent le rôle de piège.* Par rapport aux écoulements responsables des apports de matière, leur taille est suffisante pour permettre, *via* le volume d'eau, la perte d'hydrodynamisme et le temps de résidence qui caractérisent de tels systèmes sédimentaires. Etant de plus alimentés par des rivières pérennes, les archives détritiques qui y sont constituées sont donc le fruit d'une sédimentation continue et régulière, ce qui leur confère de fait une qualité certaine. Les notions de transfert (hydrodynamisme) et de mémoire (piégeage) sont donc très bien exprimées.
- *les deux lacs sont situés à l'aval d'un réseau karstique actif.* Par rapport à la fonction complexe de filtre exercée par l'endokarst, ils répondent également à tous les paramètres. Vis-à-vis de l'extérieur, ils subissent un tri de l'information acheminée par les écoulements. Dans le même temps, le dépôt des particules est une riche intégration de données diverses collectées par les eaux au fur et à mesure de leur cheminement en surface puis sous terre.
- *les deux lacs sont accessibles.* En regard de certaines considérations méthodologiques, ces deux lacs, situés dans la partie touristique des grottes de Choranche, offrent des conditions de travail, notamment pour l'accessibilité et les prélèvements, particulièrement confortables.
- *les deux lacs sont complémentaires.* L'avantage d'avoir deux lacs sur le même site, faiblement

distants et en plus, en connexion hydrologique est un atout supplémentaire non négligeable pour croiser de l'information. En effet, même si nous nous sommes consacrés en priorité à l'étude du lac de la Cathédrale, l'étude du lac de Coufin pourra déjà se révéler un bon test préliminaire, quand à la validation et la reproductibilité de la méthode.

Enfin, nous avons sur ce site un bagage de connaissances et de données de différentes natures, qui en s'ajoutant les unes aux autres, constituent un référentiel de qualité pour positionner notre propre recherche et en guider les interprétations. Nous avons pu l'illustrer ici à travers les cas de vidange du lac de la Cathédrale qui sont dans la mémoire collective, mais nous allons voir dans ce qui suit que la connaissance de ce site karstique va bien au-delà.

2. Les grottes de Choranche : un véritable laboratoire souterrain

Voilà un peu plus d'une vingtaine d'années maintenant que ces grottes font l'objet d'études variées et suivies en terme de karstologie, de morphogenèse, mais aussi sur le rôle joué par le karst comme mémoire environnementale. Après une rapide description plus globale des ces grottes, nous verrons en quoi elles constituent un référentiel de très grande qualité pour y tester une approche nouvelle.

a) Présentation karstologique du réseau des grottes de Choranche

Le réseau karstique des grottes de Choranche est vaste et complexe. C'est un système drainé par des circulations pérennes, qui s'individualisent au fil du réseau en trois rivières : Gournier, Coufin et Chevaline (figure III.4). Gournier est ici considérée comme un système karstique différent de Coufin et Chevaline, qui sont en connexion hydrologique (figure III.1). C'est pourquoi les réseaux de Coufin et Chevaline sont souvent regroupés dans les descriptions. De ces trois émergences, seule Chevaline est temporaire.

Ces trois rivières ont creusé leur réseau karstique dans l'ossature urgonienne. La base des circulations (aval du système) se situe au contact Urgonien/Hauterivien (calcaires/marnes). Gournier est un réseau de plus de 15 km, développé sur 680 m de dénivellation. Coufin et Chevaline forment un système d'un peu plus de 29 km, avec respectivement 411 et 380 m de dénivelé (figure III.5 ; figure III.6) [Caillaud *et al.*, 1997 ; Delannoy, 1997]. Par contre, ces trois composantes du système des grottes de Choranche présentent un étage des réseaux similaire, faisant référence aux phases très anciennes d'encaissement de la Bourne [Delannoy, 1997] ; rivière qui s'écoule aujourd'hui en contrebas des falaises (figure III.4 ; photo III.3). Nous en donnons une brève description ici, simplement pour compléter la présentation des lacs souterrains et pour les resituer dans le contexte endokarstique plus global.

En effet, on reconnaît globalement dans les réseaux une première phase de creusement en régime noyé. Elle correspond aux galeries fossiles situées parfois à plus de 100 m au dessus des réseaux actifs et dont la forme en conduite forcée ne laisse aucun doute sur la nature du creusement. Cette phase coïncide avec l'époque où la Bourne était nettement plus haute qu'actuellement, d'au moins 450 m [Delannoy, 1997]. Après cette première phase ancienne, antérieure au Pléistocène moyen, l'étagement des réseaux progresse au fur et à mesure de l'encaissement de la Bourne. On peut observer trois étapes de cette migration des écoulements dans les réseaux de Coufin-Chevaline (figure III.5). La première

phase d'encaissement correspond à l'ensemble « Hyménée-Gours-Taupe modèle », environ 100 mètres en dessous du drain initial. Une seconde étape de la migration peut être identifiée au niveau des secteurs « Gruyères-Rivière suspendue » alors que les réseaux actifs correspondent à la troisième phase d'enfoncement [Delannoy, 1997]. Cette dernière phase introduit un nouveau niveau de base pour les écoulements endokarstiques. Ils ne sont plus contraints par l'encaissement de la Bourne qui creuse ses gorges, mais par les marnes hauteriviennes qui jouent le rôle de couche imperméable. Dans le système ainsi constitué, le point bas de ces réseaux correspond à l'exutoire de Coufin, au contact avec l'Hauterivien et perché à 300 m au dessus de la Bourne, niveau de base hydrologique actuel (figure III.6).

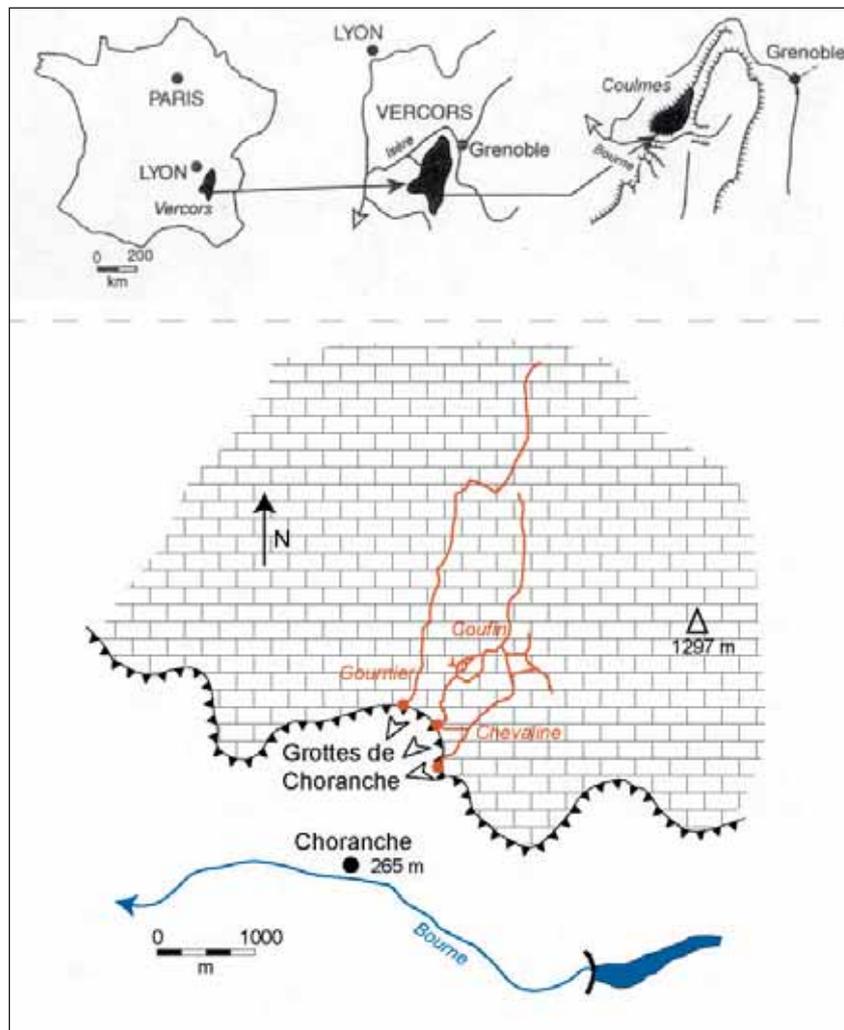


Figure III.4 : Vue en plan de la disposition générale des réseaux du système de Choranche dans le massif calcaire.

Les trois rivières qui constituent le système des grottes de Choranche ont donc connu une histoire similaire. Ce sont des réseaux dont le développement et l'évolution ont été dépendant de l'enfoncement du niveau de base hydrographique matérialisé par la Bourne. Mais dans un second temps, niveaux de base karstique et hydrographique sont dissociés ; le niveau karstique étant bloqué à hauteur des assises hauteriviennes du massif. Le caractère perché de ces systèmes karstiques revêt une importance réelle car la « stabilité » des exutoires (contrainte par le substratum hauterivien) a favorisé le développement du système karstique (absence de zone noyée, système transmissif...).

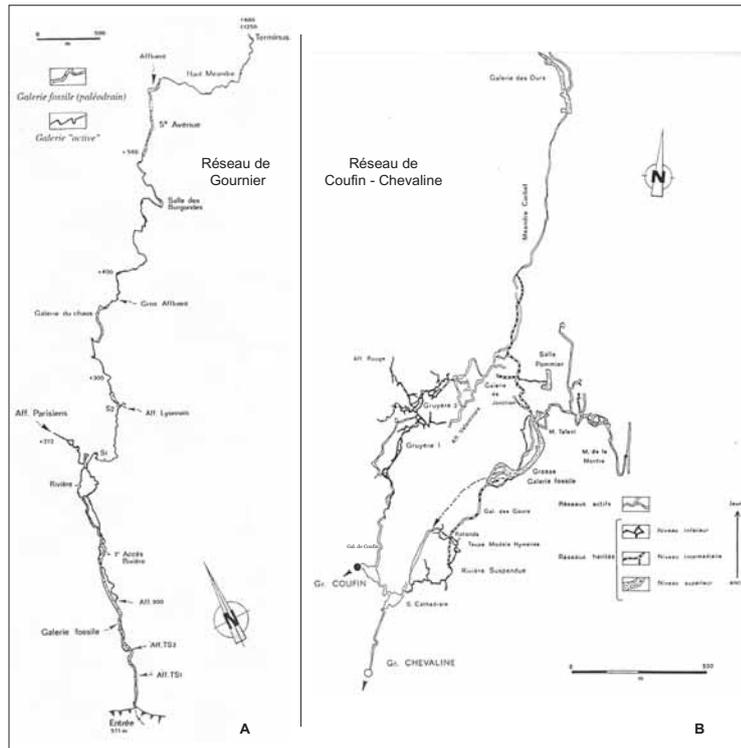


Figure III.5 : Détails des réseaux de Gourmier et de Coufin-Chevaline et localisation des différentes phases de creusement (d'après Delannoy, 1997).

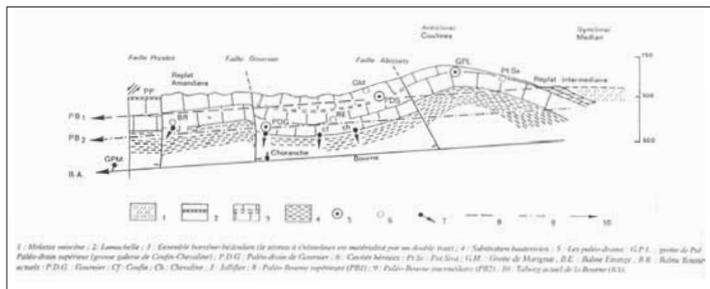


Figure III.6 : Evolution de la distribution des paléo-drains et des circulations actuelles du système de Choranche (d'après Delannoy, 1997).

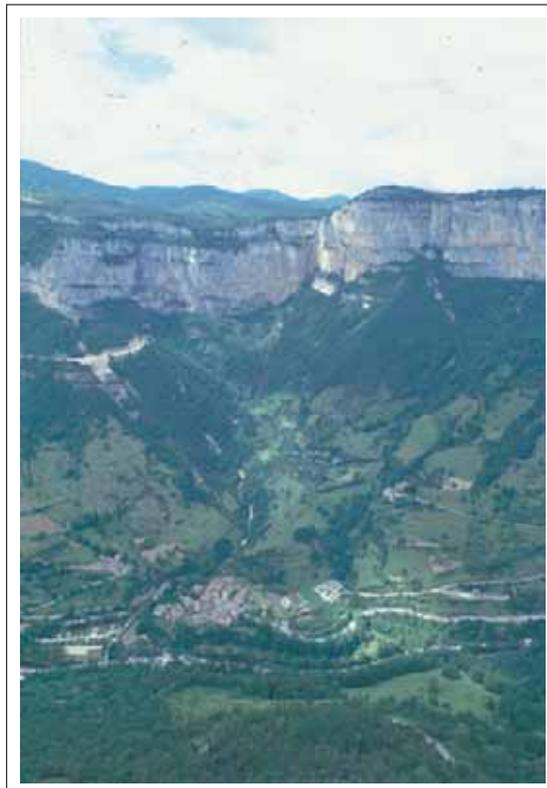


Photo III.3 : Les gorges de la Bourne, dominées par les falaises urgoniennes au niveau du village de Choranche (cliché J.J. Delannoy).

b) Les connaissances accumulées sur ce système karstique

Nous avons insisté à plusieurs reprises dans ce rapport sur l'importance de la mise en œuvre de notre recherche sur un site par ailleurs connu et bien décrit sur le plan de son fonctionnement, de sa karstogenèse et de l'histoire environnementale locale. Les grottes de Choranche sont en cela un terrain qui convient tout à fait car il a fait l'objet de nombreuses études. Nous en dirons quelques mots ici afin de montrer que le référentiel nécessaire à notre travail existe bel et bien, et qu'il est particulièrement riche et diversifié.

Trois grands axes de recherche ont été – et sont toujours – étudiés dans les grottes de Choranche. C'est tout d'abord les questions relatives à la morphogenèse endokarstique mais aussi exokarstique qui ont été abondamment étudiées. Les travaux de J.-J. Delannoy notamment [1981, 1997] ont grandement éclairés les connaissances sur ce sujet et en particulier pour cette région du Vercors. Les données brièvement exposées ci-dessus, sur l'histoire de la cavité et son évolution n'en sont qu'un modeste témoignage. La reconstitution karstogénétique qui a pu être élaborée, par des observations et des analyses dans les réseaux et à l'extérieur, va beaucoup plus loin que les quelques grandes étapes que nous avons reprises ici. La connaissance de ce karst est donc très précise, richement argumentée, et les phases de karstification individualisées sont également calées chronologiquement. Par exemple, grâce aux datations sur les concrétions, on a pu établir que l'extrémité aval des réseaux de Coufin-Chevaline (partie touristique des grottes) avait globalement la morphologie actuelle dès le Tardiglaciaire. Les datations sur des colonnes et des stalagmites de cette partie de la cavité s'échelonnent en effet entre 21 300 BP (salle de la Cathédrale) et 9 700 BP (Galerie de Coufin) [Delannoy, 1997]. Ces études autour de la morphogenèse ont en effet été complétées par des datations de concrétions notamment. Le passé des grottes de Choranche a donc pu être ainsi reconstitué.

Mais l'actuel est également un objet d'étude. Par l'installation de nombreuses stations de mesures, (une station est placée à l'aval, voire à l'exutoire, de chaque rivière) un suivi hydrologique des trois rivières souterraines est mené, et l'évolution de paramètres tels que la température, le débit, la conductivité des eaux sont analysés avec une grande précision (tableau III.1). Par l'équipement de stations de mesures en extérieur, sur le plateau sus-jacent, les données météorologiques, entre autres les précipitations, sont également connues. La confrontation des données hydrologiques en entrée et en sortie du système est alors riche en enseignements sur les conditions d'écoulement de chaque rivière, leur temps de réaction face à une crise hydrique ou à l'inverse, à un épisode pluvieux important (figure III.7). La dynamique karstique de ce système actif est donc étudiée de près depuis plusieurs années [Delannoy, 1986a ; Delannoy *et al.*, 1999a].

Nom de la station	Date d'installation	Altitude	Nature des mesures	Périodicité des mesures
Charnell	Juillet 1998 et pluie depuis 1997	850 m	Pluie, Vent (direction et orientation), température, humidité relative, radiation solaire, pression atmosphérique, Evapotranspiration potentielle (Méthode de Penman)	10 secondes avec stockage horaire des données - Intensité pluie : 1 minute
Pétouze	Novembre 1990	1150 m	Pluie, température, humidité relative	5 minutes avec stockage des données toutes les 1/2 heures
B.V. supérieur	Juin 1999	1350 m	Pluie, température, humidité relative	5 minutes avec stockage des données toutes les 1/2 heures
Chevaline	Décembre 1998	-	Hauteur d'eau, conductivité, température de l'eau, concentration des matières en suspension (turbidimètre infra-rouge)	5 minutes avec stockage des moyennes toutes les 1/2 heures, ainsi que la hauteur d'eau maximum et l'heure
Coufin	Août 1996	-	Hauteur d'eau, conductivité, température de l'eau	idem
Goumier	Septembre 1998	-	Hauteur d'eau, conductivité, température de l'eau	idem

Tableau III.1 :
Récapitulatif des stations de mesures hydrologiques et météorologiques placées en entrée et sortie du système karstique de Choranche (d'après Delannoy *et al.*, 1999a).

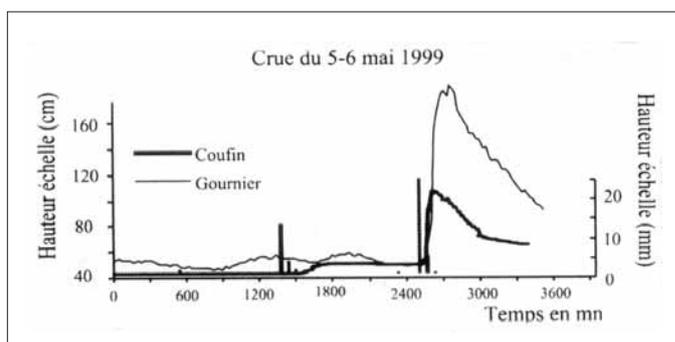


Figure III.7 : Réaction des rivières de Coufin et de Gournier à la crue de mai 1999 (d'après Delannoy et al., 1999a).

Enfin, les grottes de Choranche sont également étudiées à travers les spéléothèmes. Là aussi, les recherches sont menées à la fois sur le passé de la grotte et sur le présent, l'évolution actuelle. Les travaux de Y. Perrette [1999, 2000] ont en effet cette double orientation. Des stalagmites ont été prélevées, ou carottées en différents endroits de la grotte afin d'en étudier la calcite (lamination, cristallisation...). Ce type de travail permet de proposer des reconstitutions sur l'histoire de la cavité (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.4) et son environnement à un moment donné. Un des exemples les plus illustratifs dans le cas des grottes de Choranche est la présence de niveaux à charbons dans des concrétions, témoins de l'activité charbonnière sur le plateau des Coulmes au XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles notamment [Perrette *et al.*, 1997a et 1999]. Mais les études menées à Choranche vont plus loin, des concrétions ont en effet été équipées de compte-gouttes, afin de comprendre leur fonctionnement et leur croissance actuelles [Perrette, 2000]. Avec de tels outils, c'est aussi les différents comportements du réseau de fissures, en regard des variations météorologiques extérieures, qui sont appréhendés et comparés aux circulations (rivières) pérennes.

A travers ces axes de recherche, les grottes de Choranche, richement instrumentées, et étudiées depuis de nombreuses années, constituent un véritable laboratoire souterrain. D'autres travaux ont été menés sur d'autres aspects de ces grottes, qui tendent à compléter encore un peu toutes ces connaissances. C'est notamment le travail sur les remplissages détritiques de W. Blois [2000] mais aussi beaucoup d'autres [Huraut, 1997 ; Terranova, 1997 ; Aubineau, 1998 ; Devaux, 1999]. L'ensemble des données collectées par ces approches diverses a donc permis de constituer peu à peu un cadre de connaissances particulièrement étoffé sur ce site karstique, mais aussi sur son indissociable environnement immédiat. Ces connaissances locales seront pour nous précieuses et permettront d'ajuster à bon escient les méthodes employées pour faire ressortir les informations environnementales contenues dans ces pièges sédimentaires.

3. Le Massif des Coulmes et le Vercors Septentrional : grands traits

Les différentes études menées dans les grottes de Choranche ont conduit à évoquer le cadre environnemental de ce système karstique. En effet, la morphogénèse, l'hydrologie et les concrétions sont autant de moyens de comprendre une histoire karstogénétique. Mais cette histoire ne peut être dissociée des conditions environnementales locales. Afin de compléter la présentation, quelques éléments sur le Massif des Coulmes sont ici présentés pour positionner le cadre naturel et anthropique du site de Choranche (figure III.8).

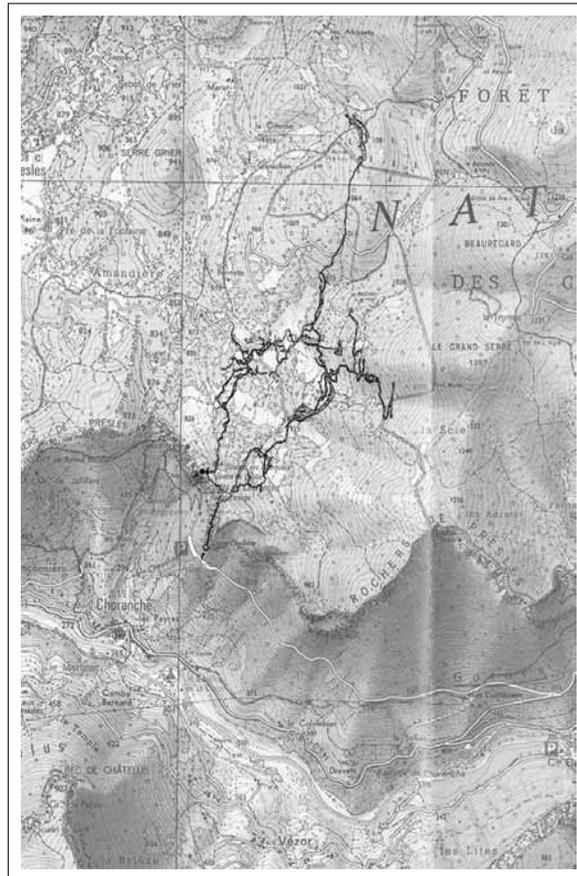


Figure III.8 : Localisation du système karstique de Choranche (Coufin-Chevaline) par rapport à la topographie actuelle.

a) Localisation et grands traits géologiques

Le Vercors est le plus important massif des Préalpes françaises du Nord, avec une superficie de 1350 km² et un point culminant, le Grand Veymont, à 2341 m. Il peut être subdivisé en deux grandes parties Nord et Sud, clairement délimitées par les gorges de la Bourne et son écoulement Est-Ouest. L'ensemble de ce massif est caractérisé par d'imposantes falaises calcaires, pouvant atteindre 500 m d'épaisseur et dont les structures sont essentiellement Nord-Sud. Ces calcaires caractéristiques sont d'âge barrémo-bédoulien (environ 125 MA) et de faciès urgonien [Arnaud-Vanneau, 1980 ; Arnaud, 1981 ; Debelmas, 1983 et 1995 ; Delannoy *et al.*, 1999b]. Le massif des Coulmes correspond à la pointe Sud-Ouest du Vercors septentrional. C'est un massif d'une cinquantaine de kilomètres carrés, délimité à l'Est par le val des Ecouges/Romeyère/Rencurel, à l'Ouest par la vallée de l'Isère, au nord par la dépression de Malleval et au Sud, par la partie aval des gorges de la Bourne (figure III.9).

Le massif des Coulmes de structure anticlinale d'axe Nord-Sud (photo III.4), est perturbé par de nombreux accidents tectoniques (figure III.9), dont la faille de Presles, qui joue en décrochement senestre et est à l'origine de failles secondaires [Delannoy, 1997]. Du point de vue hydrogéologique, les écoulements de surface, sur le plateau des Coulmes, sont extrêmement réduits au profit des circulations souterraines. Les principales sources (Pétouze, Bury...) se perdent dans la masse calcaire. Seul le ruisseau de Presles a un réel parcours aérien avant de se perdre dans les calcaires, dans des ponors [Delannoy, 1997]. La tectonique du massif joue un rôle important sur l'hydrogéologie et les circulations souterraines. Le drainage karstique des Coulmes peut se subdiviser en cinq unités, délimitées par les accidents tectoniques, qui sont d'Ouest en Est [Delannoy, 1997] (figure III.10):

- l'unité de Presles-Goule du Pylône ;
- l'unité de Fauries-Jallifier ;
- l'unité de Choranche avec ses trois sous-unités, Gournier, Coufin et Chevaline, dont nous avons déjà parlé ;
- l'unité de Bury-Pré Martin ;
- l'unité orientale.

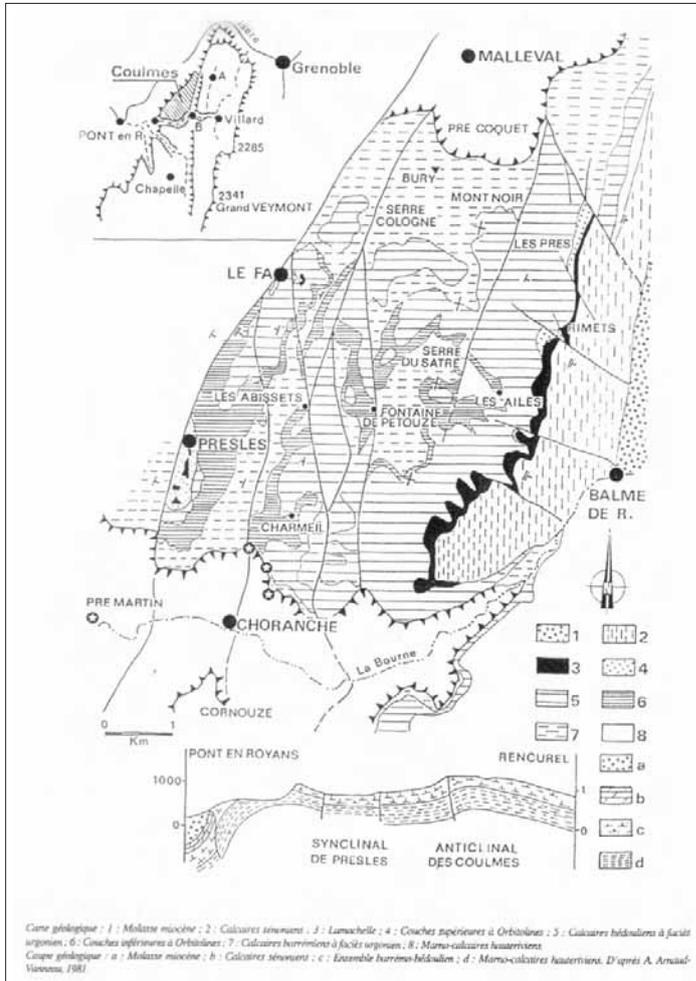


Figure III.9 : Carte et coupe simplifiées du Massif des Coulmes - Vercors (d'après Delannoy, 1997).

Photo III.4 : Le massif des Coulmes vu depuis le sud du Vercors (cliché J.J. Delannoy).



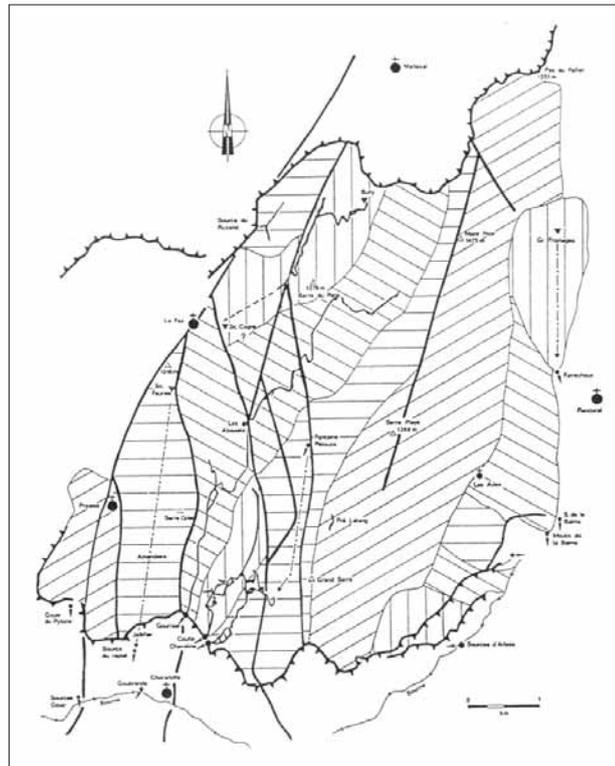


Figure III.10 : Les grandes unités hydrogéologiques et karstiques des Coulmes – Exutoires et bassins d'alimentation (d'après Delannoy, 1997).

L'unité de Choranche qui nous intéresse ici draine la retombée occidentale de l'anticlinal des Coulmes. Les écoulements sont dirigés vers le sud, sous l'influence de l'encaissement de la Bourne, et ressortent au niveau de trois exutoires : Gournier, Coufin et Chevaline respectivement à 571 m, 591 m et 621 m d'altitude. L'organisation du drainage karstique de l'unité de Choranche, et plus généralement de l'ensemble du massif des Coulmes est donc conditionnée par la structure géologique en premier lieu. Son évolution, elle, est plutôt sous la dépendance de l'incision de la Bourne. Cette incision, pour le réseau qui nous concerne, a toutefois aujourd'hui un rôle limité du fait de la présence des assises hauteriviennes qui jouent le rôle de substratum. Celles-ci, à un moment donné de l'évolution du drainage, prennent le relais en tant que niveau de base karstique (figure III.11). La situation perchée de ces réseaux, vis-à-vis de la Bourne, remonte en effet au Pliocène supérieur [Delannoy, 1997].

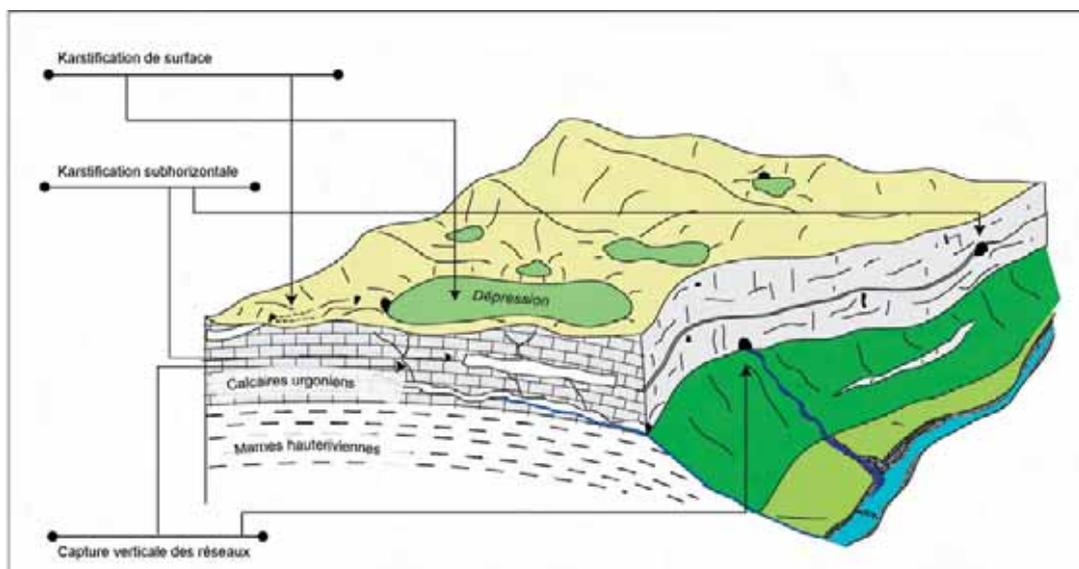


Figure III.11 : Le Massif des Coulmes et les grandes étapes de sa karstification (dessin, Y. Perrette).

b) La « contribution » humaine et ses effets sur l'environnement local

Nous rappelons ici quelques points sur ce que l'on sait de la présence humaine autour de ce site naturel. Les grottes de Choranche, et quelques grottes voisines, correspondent à des sites préhistoriques majeurs du Vercors, qui ont fait l'objet de nombreux travaux [Vital et Bintz, 1991 ; Bintz et Picavet, 1995 ; Bintz et Vital, 1995]. Les recherches préhistoriques, raccordées aux données sédimentologiques locales complètent les connaissances sur les conditions environnementales locales. L'étude de coupes telles que Balme Rousse ou le porche de Coufin, dans le cirque de Choranche, a permis d'identifier, entre autres, des restes de faune wurmienne ainsi que des vestiges d'industrie mésolithique [Delannoy *et al.*, 1988]. Mais en l'occurrence, ces données ne sont pas les plus pertinentes pour nous car elles correspondent à une occupation humaine qui s'est produite à l'aval des réseaux (porches d'entrée), n'impliquant alors qu'un impact faible, voire nul, sur les réseaux karstiques à l'amont. En revanche, des données anthropiques issues de l'étude du plateau sus-jacent des Coulmes sont pour nous cruciales. En effet, dans ce second cas, l'impact produit par les hommes est transmis, d'une façon ou d'une autre, à l'endokarst. Sur le plateau des Coulmes, pendant plusieurs siècles (notamment au XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, en relation avec les forges à canon de St Gervais-sur-Isère), l'exploitation des forêts sous forme de charbonnières a été si intense que le couvert végétal du plateau s'en est trouvé grandement modifié. D'autres secteurs du Vercors connurent d'ailleurs le même type de pression de l'Homme sur le milieu [Blache, 1931]. La présence de charbons dans le karst a déjà été constatée, notamment dans les concrétions, et les datations sont en bon accord avec l'époque de l'exploitation des charbonnières [Perrette *et al.*, 1997a]. Un travail de recherches en extérieur, sur le plateau et à l'aide de documents d'archives, a permis d'étoffer ces connaissances sur les activités humaines sur le plateau [Villard, 1997].

Cette information sur l'environnement local à un moment donné vient donc compléter les connaissances sur ce site. Elle n'est pas anecdotique, bien loin de là. La présence de charbons dans l'endokarst, et en particulier dans les sédiments détritiques lacustres sur lesquels nous nous pencherons peut être un bon moyen de calage chronologique, mais peut aussi, en tant que « traceur » permettre de mieux saisir les modalités de transfert et de dépôt de matière. Enfin, les charbons de bois peuvent être soumis à des identifications et à des datations [Thiébaud *et al.*, 1995], complétant encore le référentiel par des données supplémentaires sur l'évolution du couvert végétal du plateau des Coulmes.

§§§§§§§§

Ce chapitre a permis de fixer le cadre du site et de son environnement, ainsi que de présenter les différents éléments sur lesquels s'appuie notre recherche et nos interprétations. En élargissant le cadre de la présentation au système de drainage complet, les grottes de Choranche, puis à l'unité géologique, le massif des Coulmes, nous avons pu montrer que l'ensemble du secteur étudié est bien décrit, et ce à travers des apports variés. Il sera donc un référentiel particulièrement efficace pour cadrer cette nouvelle étude des dépôts détritiques.

CHAPITRE II : L'ETUDE DES CAROTTES DE CHORANCHE – MISE EN APPLICATION DE NOTRE APPROCHE.

Dans ce chapitre, sont développées les études, analyses et traitements qui ont été réalisés sur les sédiments détritiques des lacs de Choranche, et plus particulièrement sur le lac de la Cathédrale. Appliquées aux sédiments détritiques endokarstiques, les méthodes présentées (cf. *supra* : Partie II, Chap. I) apportent des éclairages et des éléments de compréhension sur les modalités de mise en place des remplissages lacustres endokarstiques.

Après la description des carottes de sédiments prélevées dans les dépôts lacustres de Choranche, les résultats des analyses seront exposés. Les apports de l'approche granulométrique à haute résolution seront mis en avant. Puis nous traiterons des autres signaux sédimentaires acquis à partir des carottes et une première comparaison « visuelle » de ces données sera discutée. Nous présenterons ensuite les résultats des analyses par traitement du signal, puis les datations qui ont été faites sur les sédiments. Au fur et à mesure de ce chapitre, un tableau synoptique des méthodes employées et de leurs apports sera construit en cinq étapes. Tout en guidant la lecture, il reprendra et synthétisera notre cheminement méthodologique et ses articulations.

L'objet de ce chapitre, essentiellement d'ordre analytique, est de mettre en avant les données environnementales enregistrées dans les sédiments lacustres souterrains, et de discuter de leur valeur à partir d'exemples concrets, issus de nos travaux et de ceux de W. Blois [2000]. L'ensemble des données de ce chapitre sera ensuite repris et synthétisé dans le chapitre suivant. Des interprétations plus étoffées sur les modalités de la sédimentation souterraine et sur les conditions environnementales locales seront alors développées.

1. Prélèvements effectués et description des carottes

La localisation et une première description « visuelle » des sédiments étudiés constituent la première étape du travail.

a) Echantillons du lac de la Cathédrale

Cinq carottes ont été prélevées dans le lac de la Cathédrale, en deux campagnes. En 1999, deux carottes ont été échantillonnées, au carottier tube par plongée (opérateurs : J. -J. Delannoy, V. Lignier et M. Desmet), sur les parties des banquettes immergées, et en partie fragilisées par la vidange accidentelle de 1980. Ce sont les carottes CAT 9901 et CAT 9902. En décembre 2001, une seconde campagne de prélèvements a rapporté 3 autres carottes (figure III.12) : CAT 0101 prélevée au fond du lac au petit carottier, depuis un bateau ; CAT 0102 et CAT 0103, proches l'une de l'autre et prélevées « à la main » sur la partie de la banquette accessible à pied sec (opérateurs : M. Desmet, J. -J. Delannoy, F. Arnaud, J. Nomade, L. Garnier, A. -S. Perroux).

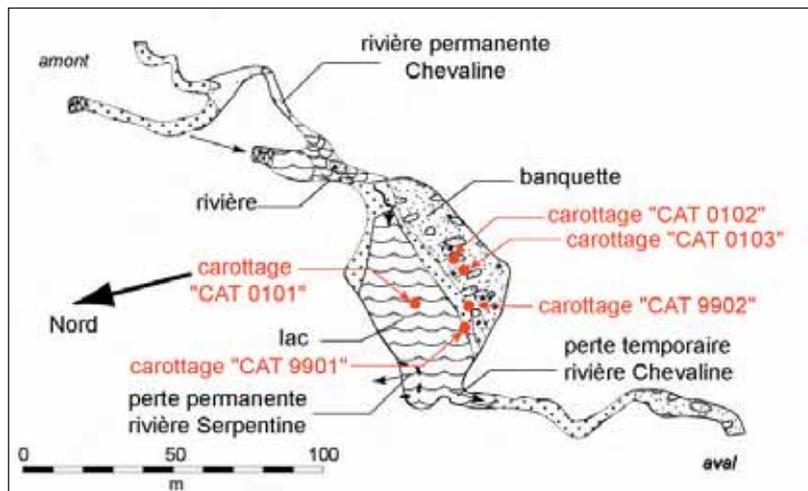


Figure III.12 : Localisation des prélèvements dans le lac de la Cathédrale – Grottes de Choranche – Vercors.

1. CAT 9901

Carotte située à la base des banquettes démantelées, sous 2 à 3 mètres d'eau environ. C'est un prélèvement de 32,5 cm de long, où trois unités successives se distinguent (figure III.13 ; annexe 7) :

- de 0 à 4 cm : sédiments fins, argilo-silteux.
- de 4 à 22 cm environ : sédiments nettement plus grossiers, avec quelques graviers et des niveaux remaniés, marquant un changement net dans la carotte.
- de 22 à 32,5 cm : retour à des sédiments fins, à dominante argileuse, avec toutefois quelques passées plus grossières, mais sans commune mesure avec l'unité entre 4 et 22 cm.

La subdivision proposée se cale sur deux limites qui semblent érosives, respectivement à 3-4 cm et à 20-22 cm. De plus, des fragments de charbons, de taille millimétrique à infra-millimétrique sont présents sur toute la longueur de la carotte. Leur répartition est diffuse et homogène, il n'y a pas de concentration particulière de ces éléments.

2. CAT 9902

Cette carotte est également localisée à la base des parties affaissées de la banquette au sud du lac. Localisée sous environ 1,5 mètres d'eau, ce prélèvement de 45,3 cm montre une sédimentation globalement plus homogène que celle de CAT 9901. Trois grandes unités peuvent s'individualiser (figure III.14 ; annexe 8) :

- de 0 à 9 cm : sédiments montrant des alternances de dépôts fins, argileux, et de dépôts plus grossiers. Trois passées grossières se voient très bien.
- de 9 à 29 cm environ : unité intermédiaire à sédiments fins, argilo-silteux, et réguliers, sans aucune perturbation remarquable à l'œil nu.
- de 29 à 45,3 cm : sédiments à alternances semblables en tous points à la première unité décrite pour cette carotte.

Les niveaux remaniés et les graviers sont nettement plus rares que dans la carotte CAT 9901. Des fragments de charbons sont également présents dans cette carotte, toujours de petite taille et avec une répartition diffuse, relativement uniforme dans tout l'échantillon.

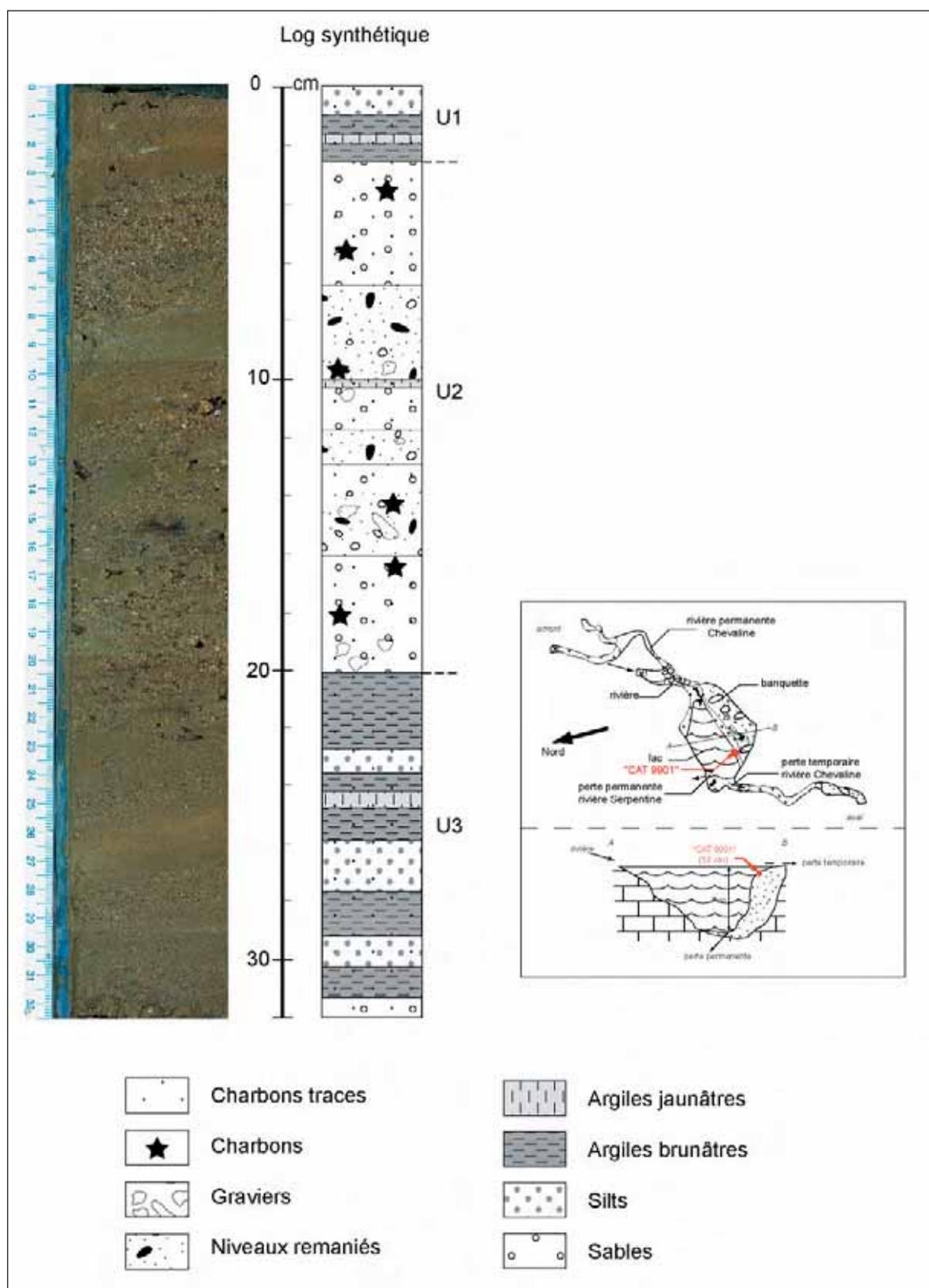


Figure III.13 : Schéma descriptif de la carotte CAT 9901.

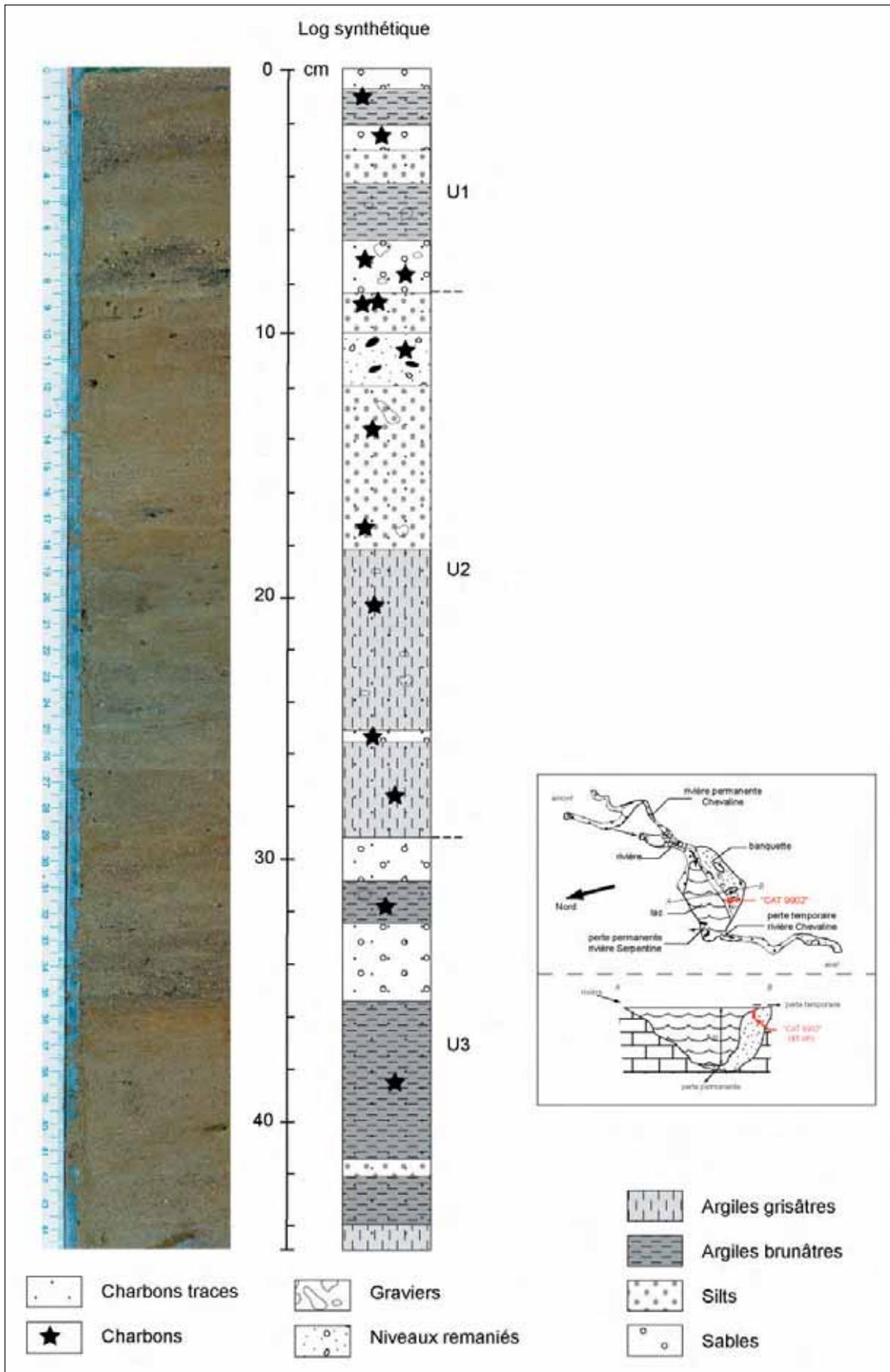


Figure III.14 : Schéma descriptif de la carotte CAT 9902.

3. CAT 0101

C'est le seul prélèvement issu du fond du lac de la Cathédrale. Carotté sous environ 7 mètres d'eau, ce prélèvement mesure 31 cm de long. Nous avons été confronté, pour ce prélèvement, à la difficulté de travailler « à distance » (carottier à piston), mais aussi à la compacité élevée du sédiment. La pénétration – mais aussi l'extraction - du carottier dans le sédiment était donc particulièrement difficile, d'où la taille réduite de la carotte récupérée. Les sédiments que l'on observe sur cette carotte sont homogènes, et fins (figure III.15 ; annexe 9). En dehors d'un niveau grossier, entre 26 et 27 cm à la base de la carotte, on ne distingue pas d'unités sédimentaires différentes.

Nous retiendrons à ce stade que cette carotte se différencie clairement des autres par sa position, et par une sédimentation particulièrement fine et homogène. Des fragments de charbons y sont également présents, toujours uniformément répartis, mais plus rares que dans les autres carottes.

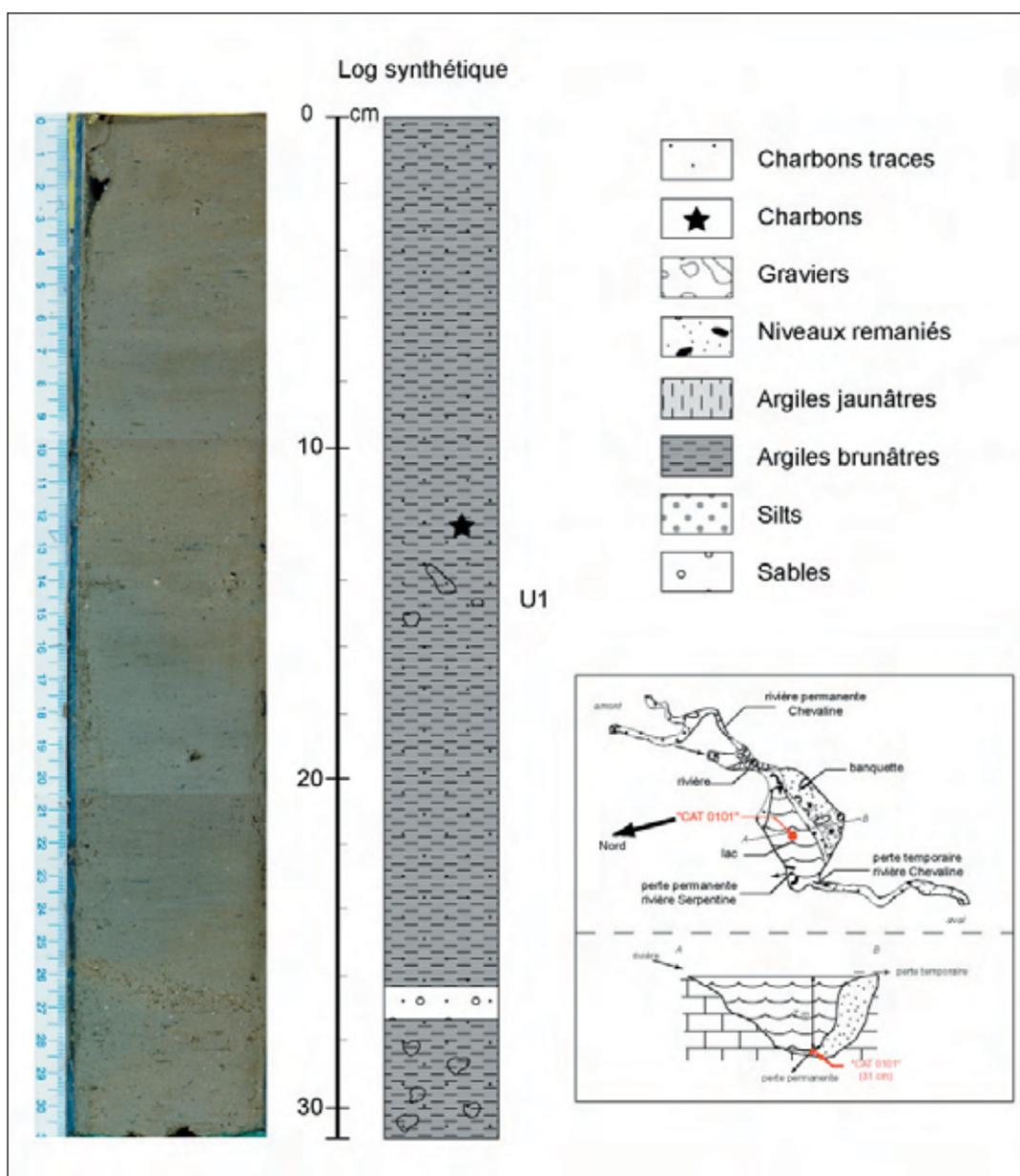


Figure III.15 : Schéma descriptif de la carotte CAT 0101.

4. CAT 0102

Carotte de 85,4 cm de long prélevée sur les parties accessibles de la banquette, sous quelques centimètres d'eau seulement. Son sommet est un point de calage puisqu'il correspond à la sédimentation actuelle. C'est un prélèvement montrant une sédimentation contrastée, oscillant entre des dépôts fins plus ou moins continus, et des niveaux plus grossiers. On peut identifier trois unités sédimentaires successives (figure III.16 ; annexe 10) :

- de 0 à 14 cm : sédiments fins, non perturbés.
- de 14 à 69 cm : sédiments légèrement plus bruns que sur le reste de la carotte. Cette unité montre une succession rapide de niveaux fins et grossiers.
- de 69 à 85,4 cm : sédiments semblables à la première unité décrite, à savoir un dépôt fin, argileux, et très peu perturbé.

Comme sur les autres carottes de ce lac, on relève la présence de charbons de bois, millimétriques et infra-millimétriques, dans l'ensemble de la carotte.

5. CAT 0103

Carotte également prélevée sur les parties accessibles de la banquette, sous quelques centimètres d'eau seulement, et très proche de CAT 0102. Le sommet de la carotte correspond à la sédimentation actuelle. On y observe, sur 109 cm de long, des sédiments très variés, comparables à ce qui est observé pour CAT 0102. Les fragments de charbons sont toujours présents dans cette carotte. On identifie trois unités sédimentaires successives, sensiblement identiques au découpage proposé pour la description de CAT 0102 (figure III.17 ; annexe 11) :

- de 0 à 16 cm : sédiments fins et homogènes.
- de 16 à 70 cm : succession rapide de niveaux fins et grossiers.
- de 70 à 109 cm : sédiments similaires à la première unité décrite, toutefois perturbés par quelques niveaux silteux.

A l'exception de CAT 0101, et sur la base de cette première description visuelle, toutes ces carottes présentent *a priori* trois unités sédimentaires distinctes. Seul CAT 9902 se distingue des autres : il est le seul à présenter une unité à sédimentation fine et calme intercalée entre deux unités plus contrastées. Sa description ressort donc comme atypique par rapport aux échantillons CAT 9901, CAT 0102 et CAT 0103 qui présentent des successions d'unités sédimentaires comparables.

b) Echantillons du lac de Coufin

Deux carottes ont été prélevées dans le lac de Coufin lors de la campagne de 1999, en plongée et en utilisant le carottier-tube (J. -J. Delannoy, V. Lignier et M. Desmet). Leur localisation dans le lac est précisée grâce à la figure ci-dessous (figure III.18). Le premier, COU 9901, a été étudié par W. Blois [2000] ; nous reprendrons les éléments de sa propre description. Cette carotte n'a malheureusement pas pu être conservée et nous n'avons pas pu y appliquer nos propres méthodes d'analyses. Nous nous contenterons donc de restituer les résultats apportés par W. Blois [2000]. La seconde carotte, COU 9902, a été étudiée dans le cadre de notre recherche.

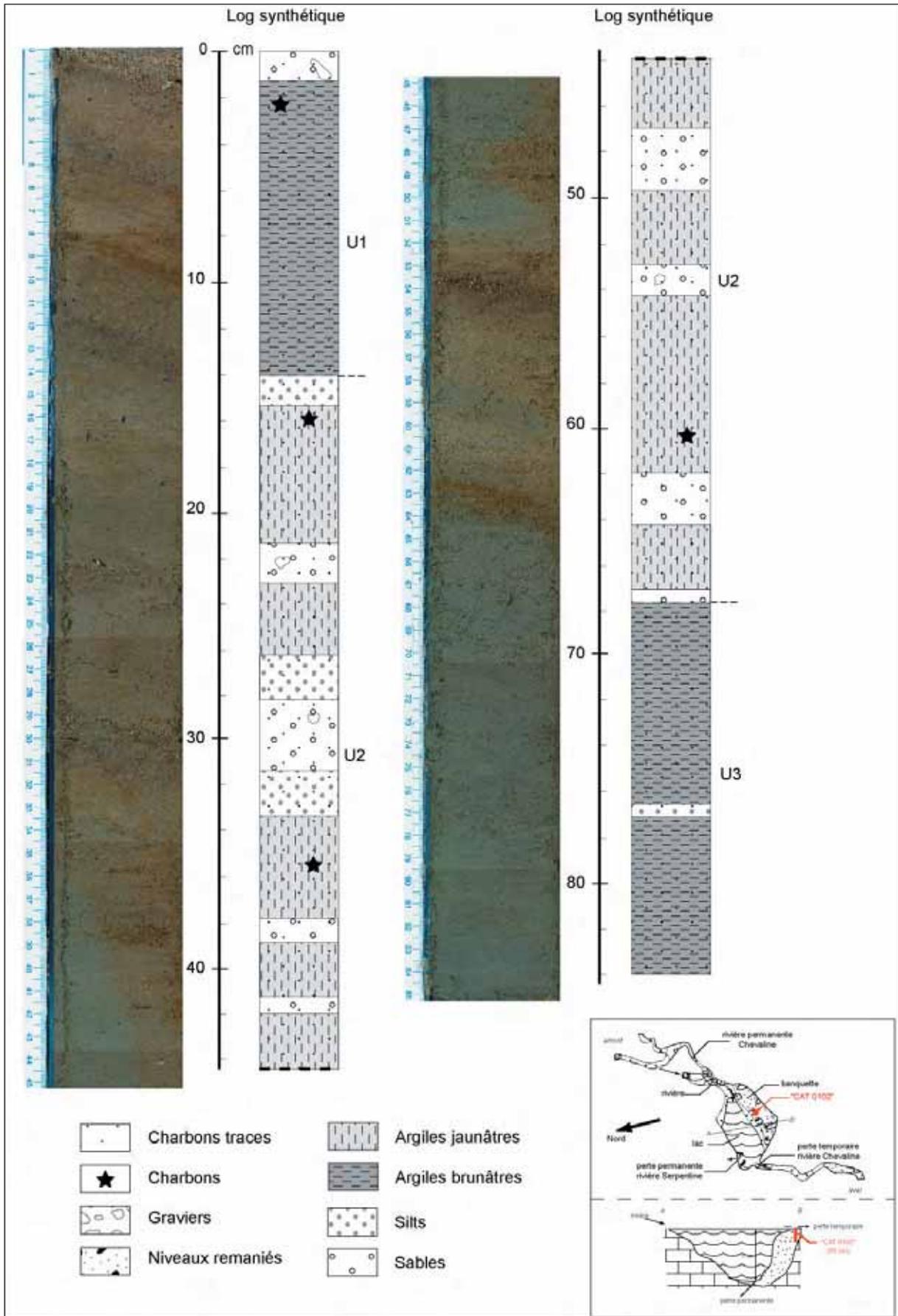


Figure III.16 : Schéma descriptif de la carotte CAT 0102.

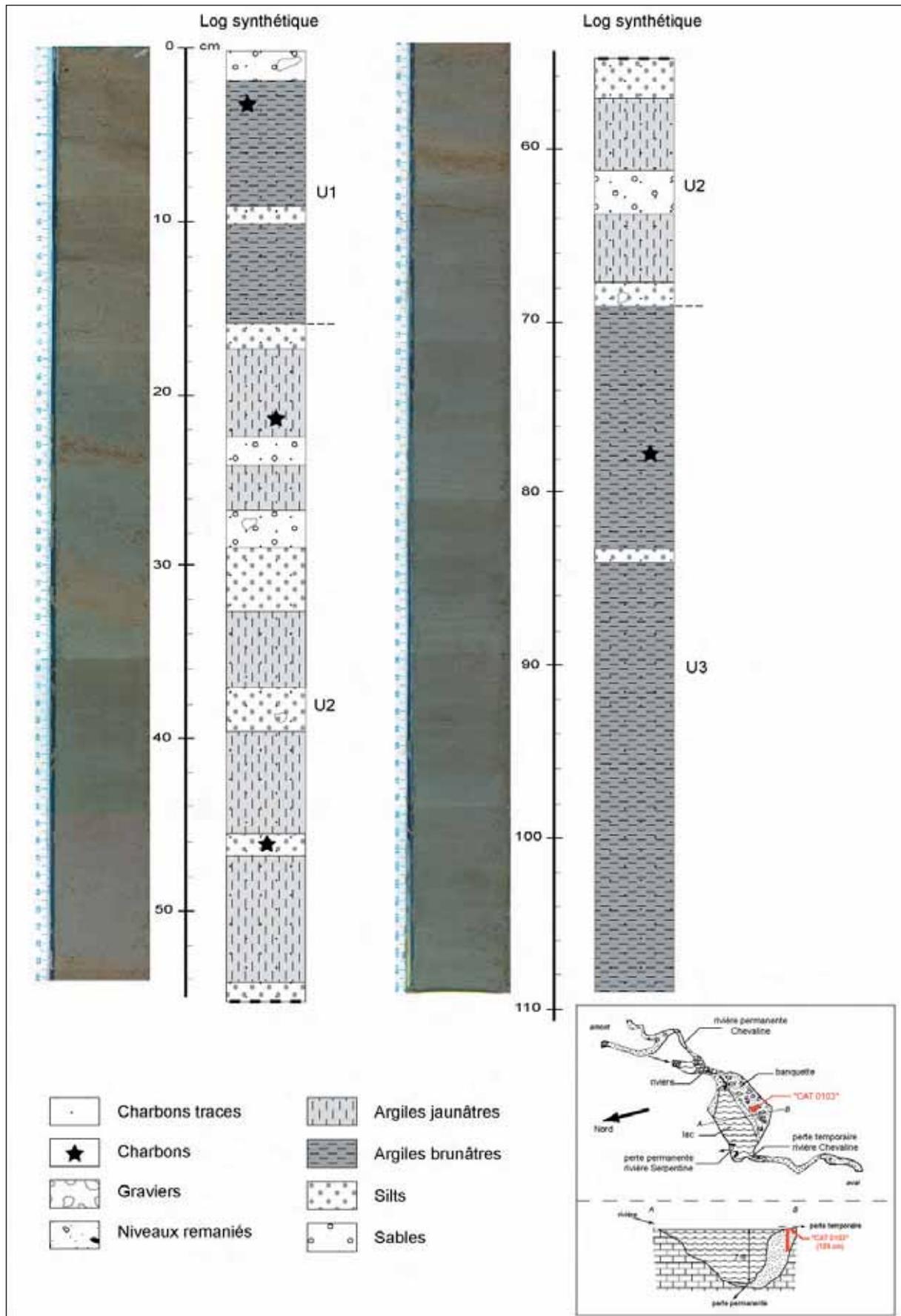


Figure III.17 : Schéma descriptif de la carotte CAT 0103.

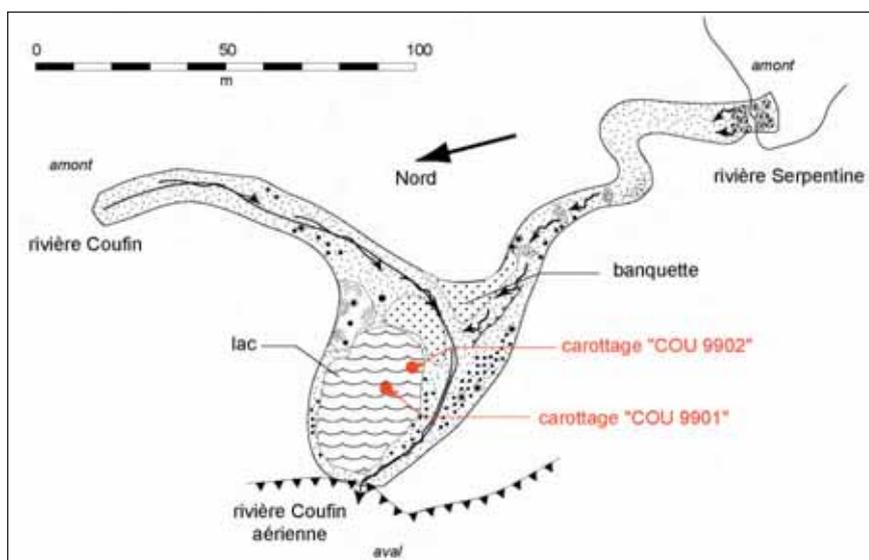


Figure III.18 : Localisation des prélèvements dans le lac de Coufin – Grottes de Choranche – Vercors (modifié d'après Blois, 2000).

1. COU 9902

C'est une carotte de 49 cm prélevée sous une faible tranche d'eau, au sud du remplissage de ce lac. Des charbons infra-millimétriques sont également présents de façon diffuse dans cette carotte. Les sédiments, notamment par les teintes et la granulométrie, apparaissent assez différents de ce que l'on observe dans les remplissages du lac de la Cathédrale. Plus contrastée en couleurs, de composition nettement plus argileuse et quasiment sans sables, cette carotte peut se décrire par deux unités sédimentaires successives (figure III.19 ; annexe 12) :

- de 0 à 16 cm : unité à sédiments très fins mais très variés en teintes, avec des niveaux grisâtres, brunâtres et jaunâtres. Deux passées sableuses minces et très blanches se distinguent nettement à 7 cm et 1,5 cm.
- de 16 à 49 cm : sédiments très fins et très homogènes, à dominance brunâtre.

2. COU 9901

C'est une carotte de 76 cm de long, qui a été prélevée au fond du lac de Coufin, sous une tranche d'eau d'environ 2,5 m d'épaisseur. A partir des travaux de W. Blois [2000], on peut voir que cette carotte est très semblable à COU 9902, et on y retrouve les deux unités sédimentaires décrites (figure III.20) :

- de 0 à 15 cm environ : les deux passées grossières et blanchâtres se distinguent bien sur cet échantillon aux environs de 5 et 9,5 cm. Les teintes de sédiments sont assez variées, à l'instar de ce qui a été dit pour COU 9902.
- de 15 à 76 cm : pas de variations importantes sur l'image de la carotte. Sédiments majoritairement argileux à dominante brunâtre.

Sur les documents dont nous disposons [Blois, 2000], la présence de charbons n'apparaît pas clairement. Mais compte tenu de leur omniprésence dans COU 9902 et les autres carottes, on peut supposer que des charbons soient également présents dans COU 9901. De plus, Blois [2000] signale que des fragments de matières organiques sont visibles dans cette carotte ; le plus important est localisé à environ 5 cm, au niveau d'une des passées grossières.

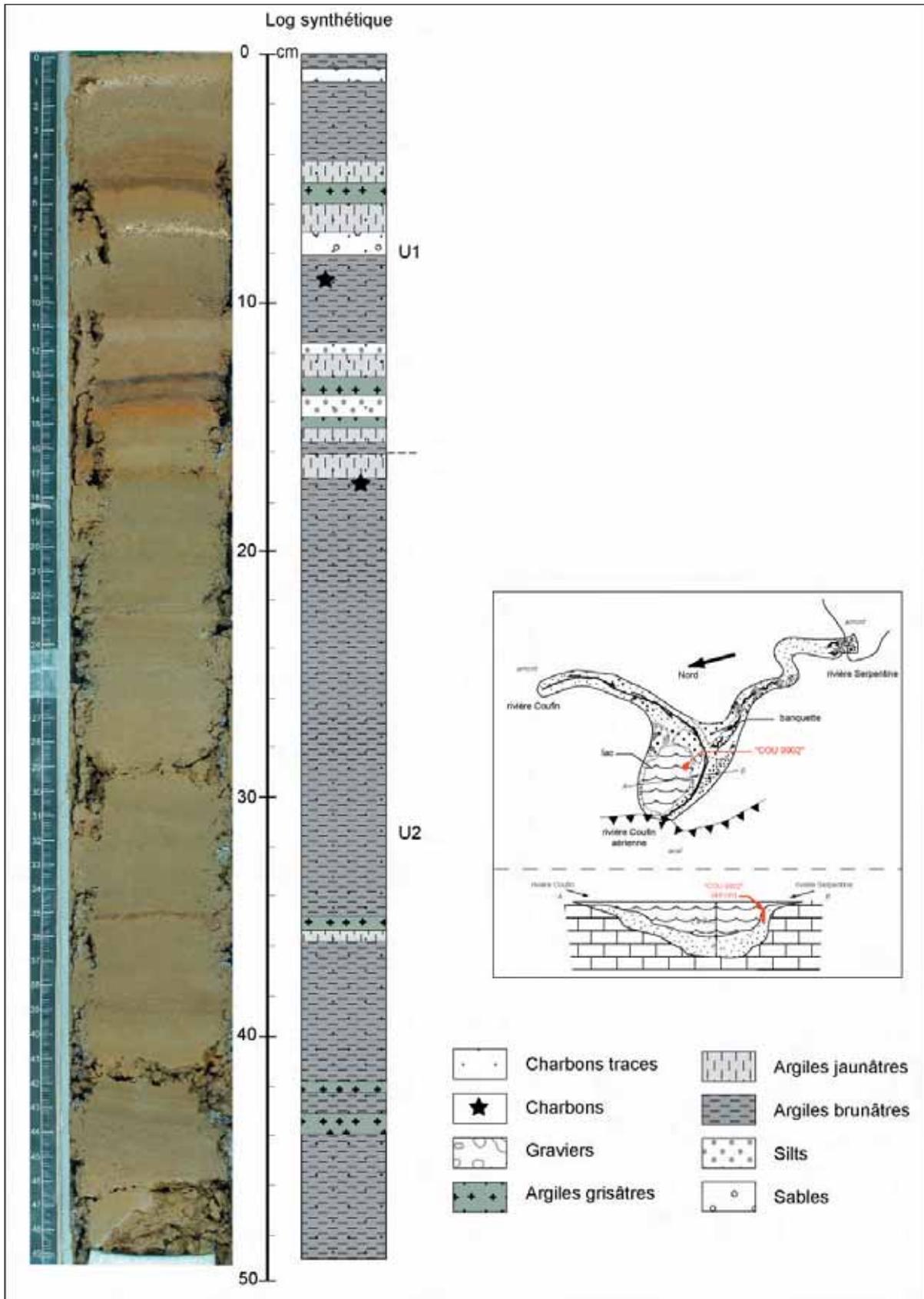


Figure III.19 : Schéma descriptif de la carotte COU 9902.

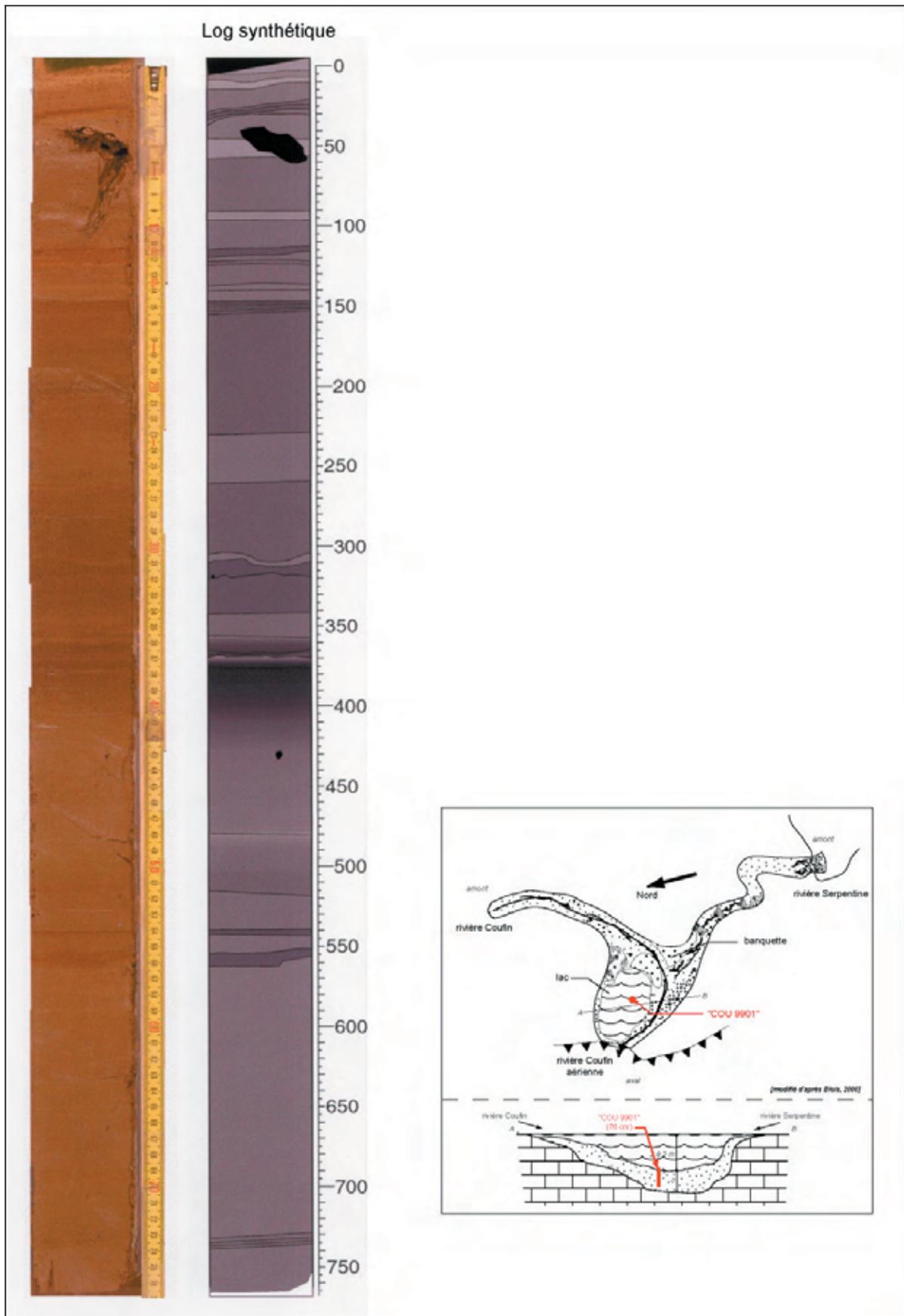


Figure III.20 : Schéma descriptif de la carotte COU 9901 (d'après Blois, 2000).

En dehors de cette particularité, les quelques éléments de description dont nous disposons sur COU 9901 ne vont pas à l'encontre de ce qui a été dit sur COU 9902. Dès cette description, la

sédimentation exprimée à travers ces deux carottes apparaît globalement plus fine que dans le lac de la Cathédrale. La différence de fonctionnement des lacs exposée plus haut (cf. *supra* : Partie III, Chap. I.1) semble donc se retrouver assez bien dans la nature et l'organisation des sédiments détritiques qui y sont piégés.

2. Les analyses granulométriques

La description préliminaire de chaque carotte a permis de révéler les principales variations sédimentaires. L'objet des analyses granulométriques est ici de préciser la nature de ces variations, notamment les tailles des particules, et de discuter des conditions de transport et de sédimentation. Nous discuterons en premier lieu de quelques données « brutes » et de quelques traitements classiques. Nous présenterons ensuite les traitements statistiques et les images de Passega (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.3.b) afin d'aborder les aspects dynamiques de transport et de dépôt des sédiments.

Nous rappelons ici que les mesures de granulométrie ont été faites à haute résolution, avec un pas d'échantillonnage le plus petit possible, en l'occurrence 3 mm. Cela représente 104 mesures pour CAT 0101 (31 cm), 285 pour CAT 0102 (85,4 cm), 362 pour CAT 0103 (109 cm), 105 pour CAT 9901 (32,5 cm), 150 pour CAT 9902 (45,3 cm) et 158 pour COU 9902 (49 cm).

a) Etude directe des données granulométriques

1. Evolution de quelques données en fonction de la profondeur

Les données fournies par la granulométrie sont nombreuses. Nous présenterons ici une comparaison des trois grandes contributions granulométriques que sont les argiles, les silts et les sables (délimitées selon la classification de Wentworth ; cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2.a), puis nous passerons en revue les paramètres synthétiques tels que le mode, la médiane et le grain moyen afin de saisir quelle est la qualité de chaque mesure et ce que l'on peut en tirer.

L'observation des différentes contributions granulométriques et de leur évolution est déjà une première lecture intéressante. Sur l'exemple ci-dessous, qui correspond à la carotte CAT 0103 (lac de la Cathédrale), l'évolution des fractions argileuses (taille $< 3,9 \mu$), silteuses (taille comprise entre $3,9 \mu$ et $62,5 \mu$) et sableuses (taille $> 62,5 \mu$) permet déjà de faire plusieurs remarques (figure III.21) :

- la fraction argileuse est la plus faiblement représentée. Elle ne participe qu'à 15 % en moyenne dans la composition du sédiment (au mieux 22 % et au plus faible 5 %).
- la fraction silteuse apparaît d'ailleurs comme la composante dominante du sédiment malgré d'importantes fluctuations puisque les pourcentages varient entre 15 et 65 %. On vérifie aussi que l'évolution de cette fraction est en phase avec la fraction argileuse.
- la fraction sableuse est également richement représentée, avec des pourcentages variant entre 15 et 80 %. Ses variations sont exactement inverses de celles des fractions argileuse et silteuse.

Par rapport à la description des carottes, il s'avère donc que les unités sédimentaires décrites comme homogènes et à sédimentation fine correspondent à une sédimentation plutôt mixte, argilo-silteuse, et non strictement argileuse. Ces deux fractions sont donc soumises aux mêmes influences au

sein du karst (transport) et du piège (dépôt) endokarstique. La symétrie entre les courbes argiles/silts et sables est tout a fait logique : les sables subissent les mêmes influences que les deux autres fractions, mais ont, de part leur taille, une réponse diamétralement opposée.

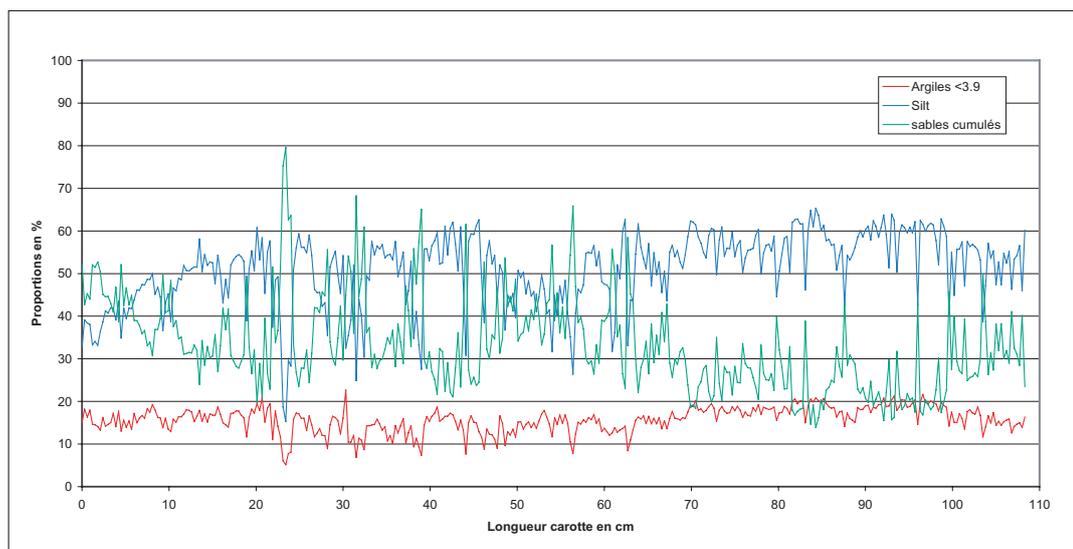


Figure III.21 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques sur CAT 0103.

Cette lecture graphique peut être complétée par des tests de corrélation entre ces trois fractions granulométriques considérées deux à deux (tableau III.2). Nous avons fait ces calculs en utilisant le test paramétrique de Pearson, avec un seuil de signification de 5 %. Les valeurs de corrélation viennent conforter les observations graphiques sans la moindre ambiguïté. En effet, la valeur positive de corrélation entre argiles et silts, à 0,738, atteste bien du « phasage » de ces deux fractions dans la sédimentation. De même, les corrélations fortes en valeur absolue, mais négatives entre argiles et sables d'une part (-0,848) et silts et sables d'autre part (-0,984) confirment bien le fonctionnement fortement lié de ces fractions (exprimé par les fortes valeurs absolues, très proches de 1), mais en parfaite opposition ou déphasage (valeurs négatives).

Test de corrélation de Pearson (test paramétrique) :	
Seuil de signification total :	0,050
Tests de corrélation entre argiles et silts	
Valeur observée :	0,738
Tests de corrélation entre argiles et sables	
Valeur observée :	-0,848
Tests de corrélation entre silts et sables	
Valeur observée :	-0,984
Conclusion :	
Au seuil de signification total $\alpha=0.050$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation	
Autrement dit, les corrélations sont significatives	

Tableau III.2 : Les tests de corrélation entre les trois composantes granulométriques de CAT 0103.

Les autres carottes du lac de la Cathédrale donnent exactement les mêmes résultats, en terme de contributions granulométriques. Nous ne les détaillons donc pas mais les données graphiques et numériques correspondantes sont regroupées dans la figure ci-dessous (figure III.22). Seules les données de CAT 0101 montrent une légère différence au niveau de la corrélation entre argiles et silts, qui apparaît toujours positive mais moins forte.

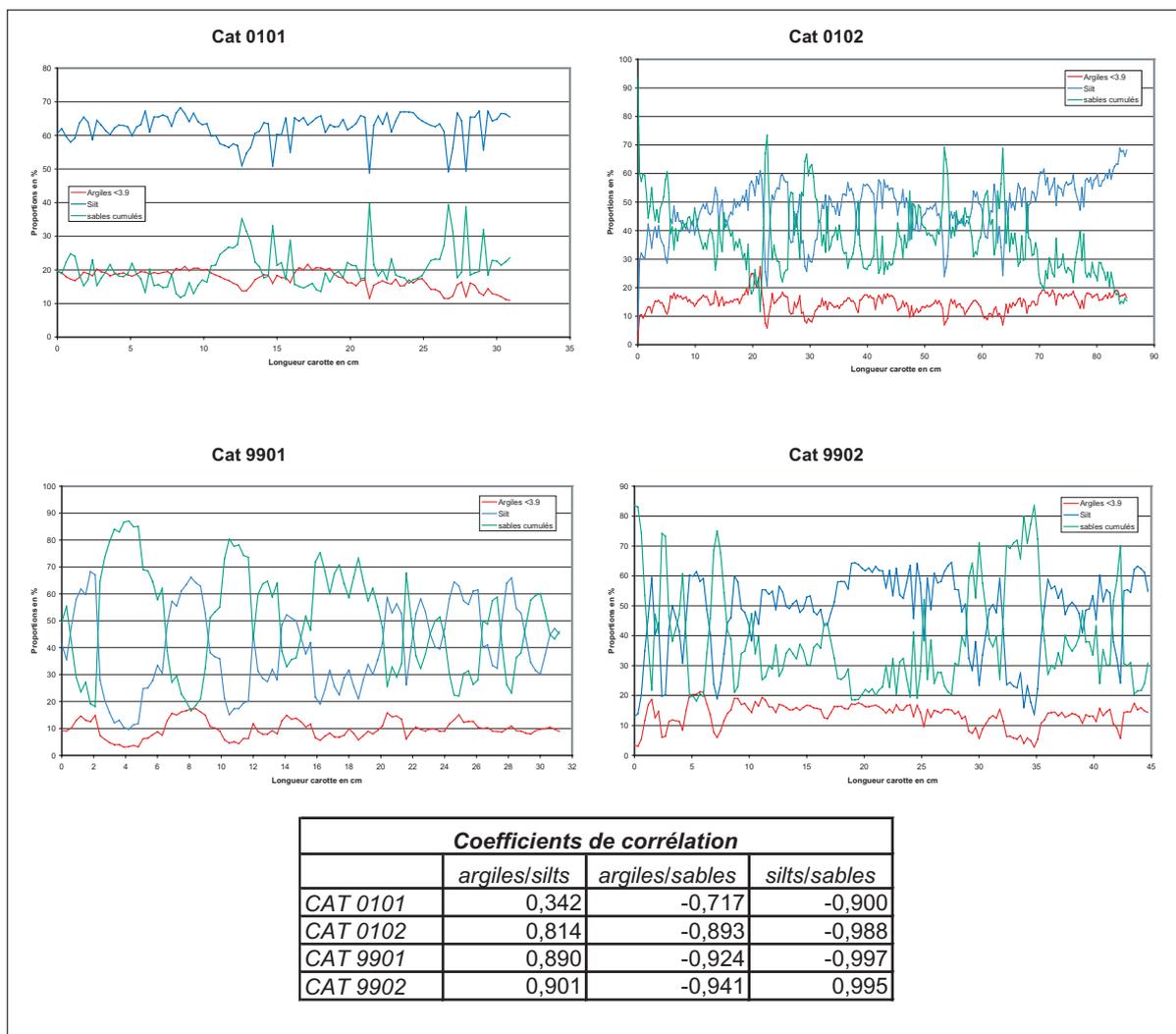


Figure III.22 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques pour les quatre autres carottes du lac de la Cathédrale et leurs valeurs de corrélation correspondantes.

Si on fait ces mêmes observations sur la carotte du lac de Coufin, quelques différences doivent être signalées (figure III.23) :

- la fraction argileuse est globalement plus abondante que dans les échantillons du lac de la Cathédrale avec un pourcentage moyen de 25 %. Mais cette composante est aussi plus fluctuante, sa contribution oscillant entre 11 et 50 %.
- la fraction silteuse reste, comme pour les sédiments de la Cathédrale, la composante majoritaire des dépôts. Cette prédominance est d'ailleurs nettement plus marquée ici, avec des pourcentages qui ne descendent pas en dessous de 36 % et pouvant atteindre 80 %.
- la fraction sableuse apparaît pour ce lac nettement moins importante, étant même pour toute l'unité 2 de la carotte inférieure aux argiles. Mis à part un pic à 52 %, vers 7 cm et certainement en rapport avec les niveaux grossiers blanchâtres mentionnés dans la description, la contribution des sables reste inférieure à 30 % et peut même tomber à 1 %.

On constate un apport plus important des argiles dans ce second lac. En revanche, la similitude entre les courbes des argiles et des silts est moins prononcée, montrant même une très nette opposition de phase aux environs de 37,5 cm. Enfin, la symétrie, l'opposition de phase avec la courbe des sables dans ce second lac est moins affirmée que pour la Cathédrale.

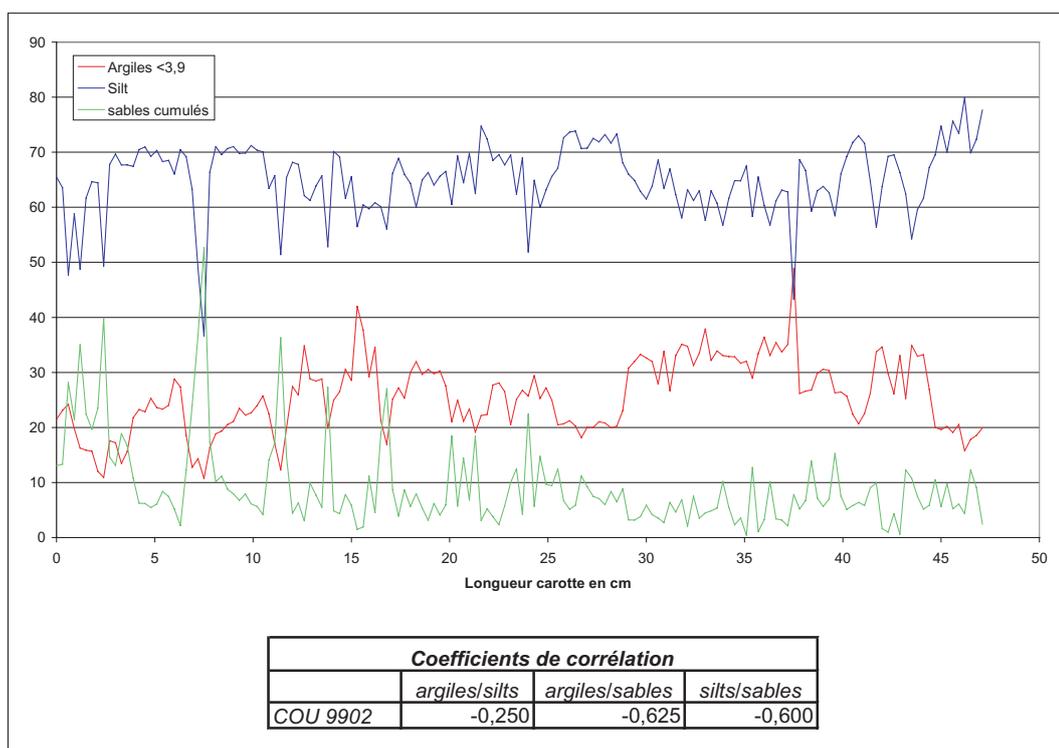


Figure III.23 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques sur COU 9902 et les tests de corrélation associés.

Les valeurs absolues des trois coefficients de corrélation sont nettement moins élevées que pour la Cathédrale. Cela confirme donc le fait que les similitudes et/ou symétries entre les trois composantes granulométriques soient moins marquées. De plus, le coefficient de corrélation entre fraction argileuse et fraction silteuse est beaucoup moins significatif ; la valeur de 0,250 étant très basse. Cette valeur est aussi négative, comme les deux autres, traduisant alors une anti-corrélation, c'est-à-dire un fonctionnement opposé des deux fractions. Outre la faiblesse de la fraction sableuse, cette anti-corrélation, par ailleurs peu significative est sans doute la différence la plus remarquable avec les sédiments du lac de la Cathédrale.

Les observations rassemblées sont une expression des différences qui résident dans les deux lacs au niveau de leurs apports en particules susceptibles de se déposer. En effet, la forte corrélation qui réside entre les trois classes granulométriques pour les sédiments du lac de la Cathédrale est tout à fait logique, et atteste que le lac n'est alimenté que par une seule source de matières, en l'occurrence la rivière Chevaline. Les différentes contributions sont donc étroitement liées entre elles, et sous la seule dépendance de la dynamique des écoulements de Chevaline. A l'inverse, les apports au lac de Coufin se faisant par deux rivières, les proportions granulométriques qui en résultent au niveau du lac intègrent les deux sources, et apparaissent donc moins liées. Les comportements sédimentaires de chaque composante sont donc plus distincts, et moins dépendants les uns des autres. Leur indépendance, exprimée par des corrélations faibles, voire mauvaises, est attestée.

D'autre part, nous pouvons aussi d'ores et déjà avancer des hypothèses quant à la diminution des apports en sables entre les deux lacs. En effet, nous avons vu lors de la présentation de ces pièges lacustres endokarstiques qu'ils occupaient des salles aux formes assez différentes. Ainsi, le lac de la Cathédrale occupe le fond d'une salle aux parois assez redressées, et la profondeur du lac est telle (7 m), que l'inertie de la masse d'eau (poids statique) permet le piégeage de toutes les particules, y compris les

sables. A l'inverse, le lac de Coufin situé à l'extrémité du système karstique, occupe une vaste salle à la morphologie très douce, subhorizontale et très ouverte. Cette disposition suggère donc des écoulements vers le lac plus diffus et de moindre énergie hydrodynamique. De plus, les deux rivières responsables des apports dans le lac de Coufin présentent des zones de piégeage à l'amont : le lac de la Cathédrale côté rivière Serpentine, et une zone siphonnante côté rivière Coufin. Cela pourrait expliquer en partie la faible participation des sables dans le remplissage détritique de Coufin. Cette fraction grossière, piégée en amont n'est plus ou peu remobilisée vers le lac terminal de Coufin. De plus, le lac de Coufin est beaucoup moins profond, et l'inertie de la masse d'eau est plus difficilement préservée. Si des sables sont apportés dans ce lac, il est probable que l'agitation de l'eau reste suffisamment forte pour empêcher la sédimentation sableuse au niveau du lac. Enfin, ce lac est au cœur de la partie aménagée de la grotte, et il est possible que l'anthropisation de cette partie de la cavité produise un impact sur la sédimentation dans ce lac.

D'autres données telles que la médiane, le mode et le grain moyen résument l'éventail granulométrique des particules présentes. L'évolution comparée de ces données sur l'exemple de CAT 0103 permet de dire que (figure III.24) :

- *les trois courbes* permettent un repérage aisé et efficace des niveaux grossiers. Les phénomènes responsables de ces niveaux grossiers restent à définir, il peut s'agir de crues ou de périodes de hautes eaux, ou encore de vannage¹.
- *le mode granulométrique*, correspondant à la valeur granulométrique la plus représentée, est le plus synthétique des trois paramètres. Le rôle de la fraction intermédiaire est estompé et la courbe passe sans transition des fractions fines aux sables. Ce paramètre est celui qui retrace le plus grand nombre d'évènements. Mais cela peut présenter un inconvénient, car le moindre artéfact de mesure prend alors des proportions considérables.
- *la médiane*, taille des particules pour un volume cumulé de 50 % de sédiment, offre une courbe plus nuancée. La fraction intermédiaire reste présente, offrant une représentation de l'évolution granulométrique plus fine, moins synthétique. Mais la précision est relative, elle semble, par rapport aux deux autres courbes, un intermédiaire assez insatisfaisant qui compile trop ou trop peu l'évolution de la granulométrie.
- *le grain moyen* semble être le critère granulométrique qui retrace l'évolution de la taille des grains avec la plus grande précision. Traduction de la taille moyenne des particules à chaque mesure, il semble être le paramètre le plus « réaliste ». C'est celui qui représente l'évolution granulométrique avec le plus de détails, en gardant tout de même une certaine lisibilité, notamment pour les niveaux grossiers.

La comparaison de ces trois critères permet donc d'aborder l'évolution granulométrique de la carotte avec différents degrés de précision. L'ambiguïté existant au niveau du repérage des évènements les plus forts peut être en partie levée par la mise en commun de ces trois courbes et par des méthodes de corrélations croisées. En effet, si un pic est présent sur seulement une des trois courbes, la réelle présence d'un évènement sédimentaire particulier peut être remise en question ou discutée. Les tests de corrélation, à l'identique de ceux présentés pour les courbes de contribution des classes granulométriques, permettent de vérifier numériquement les observations faites à partir des courbes (tableau III.3). Là encore, la forte cohérence des valeurs obtenues, pour les cinq carottes du lac

¹Vannage : Entraînement des éléments les plus fins d'un sédiment meuble par le courant d'un fluide (eau ou vent), [Foucault A. et Raoult J. -F. - 1995 - *Dictionnaire de Géologie* - Ed. Masson, 4^{ème} mise à jour, 324 pages].

de la Cathédrale apparaît très nettement, la plus forte corrélation étant toujours entre médiane et grain moyen. Cela est probablement dû à une distribution granulométrique proche de la symétrie (de type gaussienne, selon la loi normale), et où les valeurs extrêmes restent rares. Les pourcentages moyens des trois classes granulométriques donnés plus haut le confirment. Pour CAT 0102 et CAT 0103, la corrélation entre mode et grain moyen est cependant très proche. Seul COU 9902 fait encore exception, avec une corrélation plus forte entre mode et grain moyen qu'entre médiane et grain moyen.

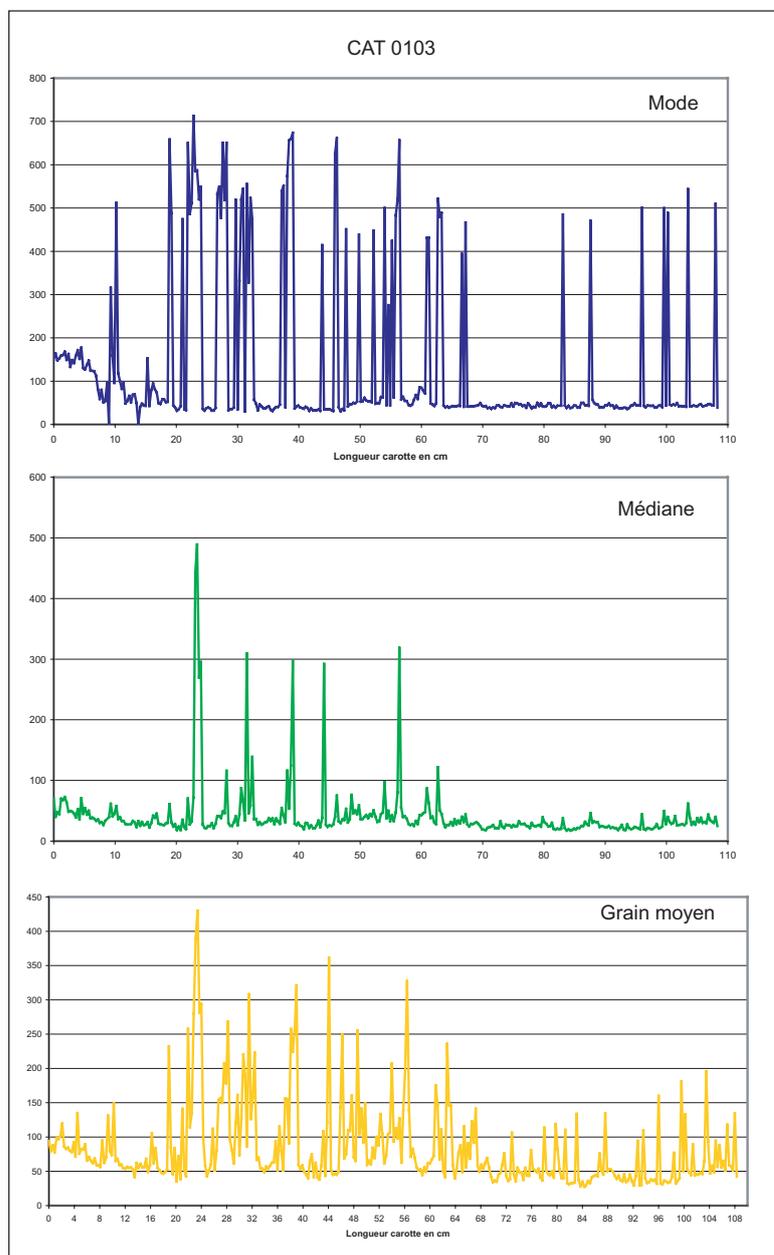


Figure III.24 : La comparaison de trois critères synthétiques de l'information granulométrique : mode, médiane et grain moyen pour CAT 0103.

Coefficients de corrélation			
	<i>mode/médiane</i>	<i>mode/grain moyen</i>	<i>médiane/grain moyen</i>
CAT 0101	0,451	0,654	0,860
CAT 0102	0,644	0,856	0,879
CAT 0103	0,523	0,810	0,812
CAT 9901	0,842	0,938	0,957
CAT 9902	0,730	0,873	0,934
COU 9902	0,235	0,817	0,589

Tableau III.3 : Les tests de corrélation entre les trois paramètres synthétiques des six carottes.

Les courbes de ces paramètres pour les autres carottes, y compris celle de Coufin, sont rassemblées dans la figure suivante (figure. III.25). Elles présentent sensiblement les mêmes caractéristiques que ce qui a été décrit sur la base de CAT 0103, les valeurs de corrélations le confirment. CAT 0102, carotte très proche de CAT 0103, est semblable pour ces trois variables. La carotte du lac de Coufin se distingue, mettant ainsi en avant le caractère insatisfaisant de la médiane que nous avons déjà évoqué. L'ensemble de ces courbes et les valeurs de corrélation associées montrent bien la bonne représentativité du grain moyen. A l'opposé, le mode apparaît encore plus clairement comme le plus générique, le plus simpliste de ces trois critères, mais cela peut avoir son intérêt. La comparaison de ces paramètres granulométriques (mode, médiane et grain moyen) permet de montrer la variabilité de l'information restituée, selon les paramètres considérés. Ces observations préalables seront utiles, lorsque nous aurons besoin de critères discriminants pour d'autres analyses.

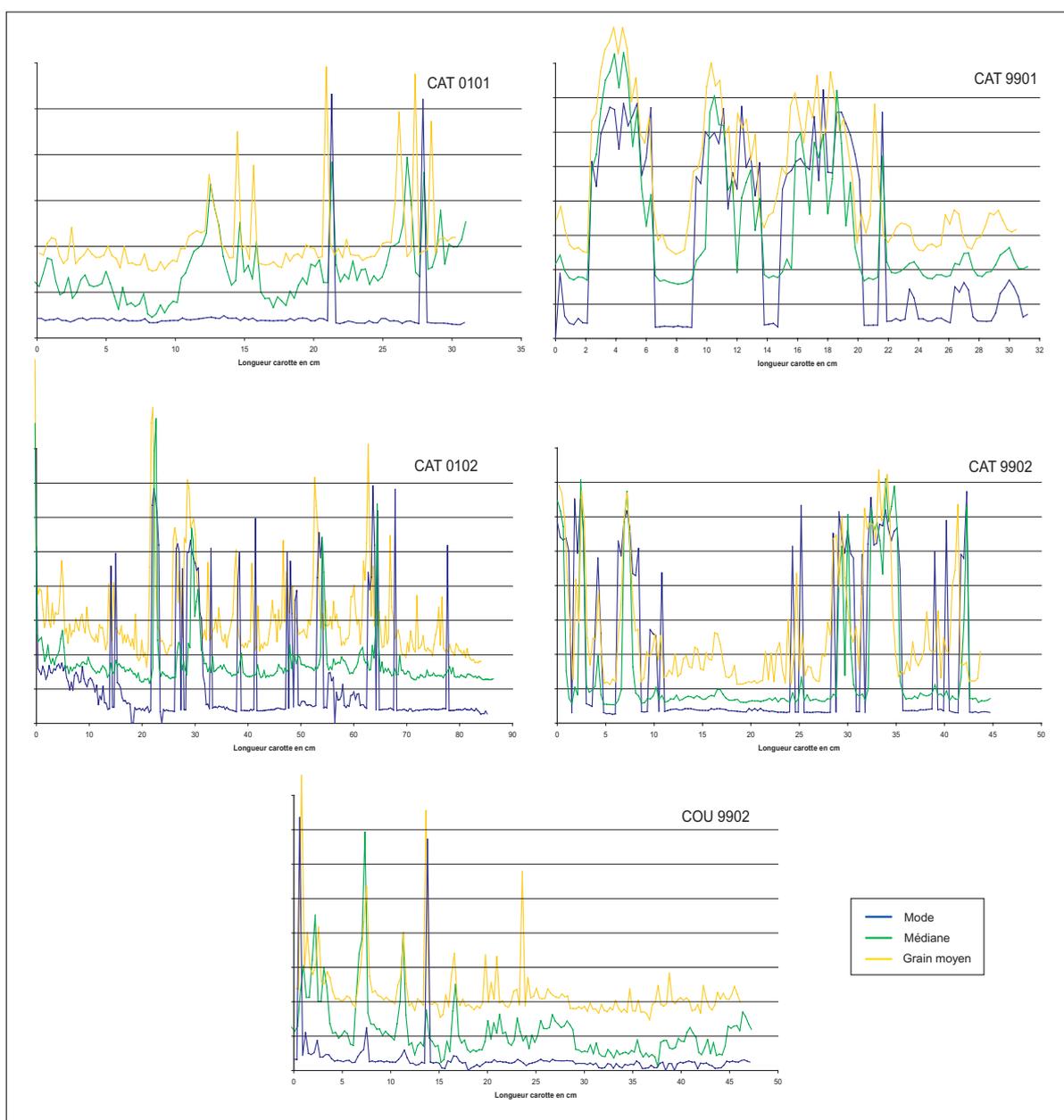


Figure III.25 : Les courbes de mode, de médiane et de grain moyen pour les autres carottes prélevées à Choranche.

Par ces observations, nous pouvons également donner le panel des tailles de grains en présence dans les sédiments. Le grain moyen apparaissant comme la donnée la plus représentative, nous

l'utilisons pour fournir les gammes granulométriques. Ainsi, les six carottes peuvent être identifiées en deux groupes : CAT 0102, CAT 0103, CAT 9901 et CAT 9902 ont toutes les quatre des valeurs de grain moyen comprises entre 25 et 450 microns, autrement dit des particules dont la taille moyenne varie des silts moyens aux sables moyens. Le second groupe est formé par CAT 0101 et COU 9902, avec des valeurs de grain moyen à partir de 10 microns, mais ne dépassant pas les 150 microns, soit des particules allant des silts fins aux sables très fins. Il s'agit bien ici de valeurs moyennes. Cela n'exclut donc pas la présence de particules plus fines et plus grosses. Nous avons d'ailleurs vu que la fraction argileuse, c'est-à-dire des particules de taille inférieure à 3,9 microns, n'était pas négligeable.

Des premières observations faites ici sur les sédiments, il ressort que :

- les contributions des trois classes granulométriques traduisent les *apports et/ou départs de matière (nombre de sources, morphologie des pièges lacustres)*. Ces contributions marquent ainsi assez bien les différences entre chaque lac.
- les contributions permettent également une *estimation de la taille des particules* en présence, et de leurs proportions respectives, renvoyant déjà vers des aspects de dynamique de mise en place.
- les paramètres synthétiques sont particulièrement intéressants pour le *repérage d'évènements hydrologiques*, mais doivent être utilisés avec discernement compte tenu de leur *variabilité informationnelle* intrinsèque, et pouvant également varier d'un piège à l'autre.

2. Analyses de données granulométriques croisées

Il s'agit d'étudier la granulométrie par le croisement de certaines données (diagrammes triangulaires, croisement asymétrie/classement...). Dans ces traitements, la notion de profondeur, et donc le rapport au temps ne sont plus considérés. Ces méthodes graphiques permettent de caractériser le dépôt à travers sa structuration. Trois types de représentations sont discutés ici.

Proches des courbes de contributions des classes granulométriques, les diagrammes triangulaires permettent d'appréhender les composantes granulométriques sans tenir compte de l'évolution chronologique. Ils offrent ainsi une vision plus synthétique de ces données et permettent de faire rapidement des comparaisons entre les carottes (figure III.26).

On retrouve très bien la forte similitude entre CAT 0102 et CAT 0103, avec une prédominance silteuse, et une association marquée entre sables et argiles, dans la mesure où le nuage de points ne montre qu'une seule orientation. La ressemblance avec CAT 9901 et CAT 9902 est évidente, toutefois, ces deux autres carottes montrent une plus grande importance des sables, pour environ un tiers des points. Quant à l'échantillon CAT 0101, il se distingue toujours par l'absence quasi-totale de la fraction sableuse. Même si cela est moins net pour CAT 0101, ces cinq diagrammes du lac de la Cathédrale montrent bien, par l'organisation des points en une seule direction globale, que les apports de sédiments au lac de la Cathédrale se font par une seule source.

Le diagramme triangulaire de la carotte COU 9902 vient lui aussi conforter les hypothèses déjà avancées par l'analyse des précédentes courbes. La disposition générale des points dans le triangle traduit la quasi-absence de sables, à part quelques points disséminés qui correspondent aux deux passées grossières de la première unité sédimentaire, à 1,5 et 7 cm. La prépondérance des silts, et le décalage vers une participation plus forte de la composante argileuse sont également attestés. Par

contre, le nuage de points présente une forme globale difficile à interpréter. L'interdépendance des composantes granulométriques dans ce lac n'est donc pas plus vérifiée par cette représentation que par les courbes précédemment discutées. Cela confirme l'hypothèse, pour ce lac, d'apports plus complexes liés à l'existence de deux rivières et aussi peut-être à une plus forte anthropisation.

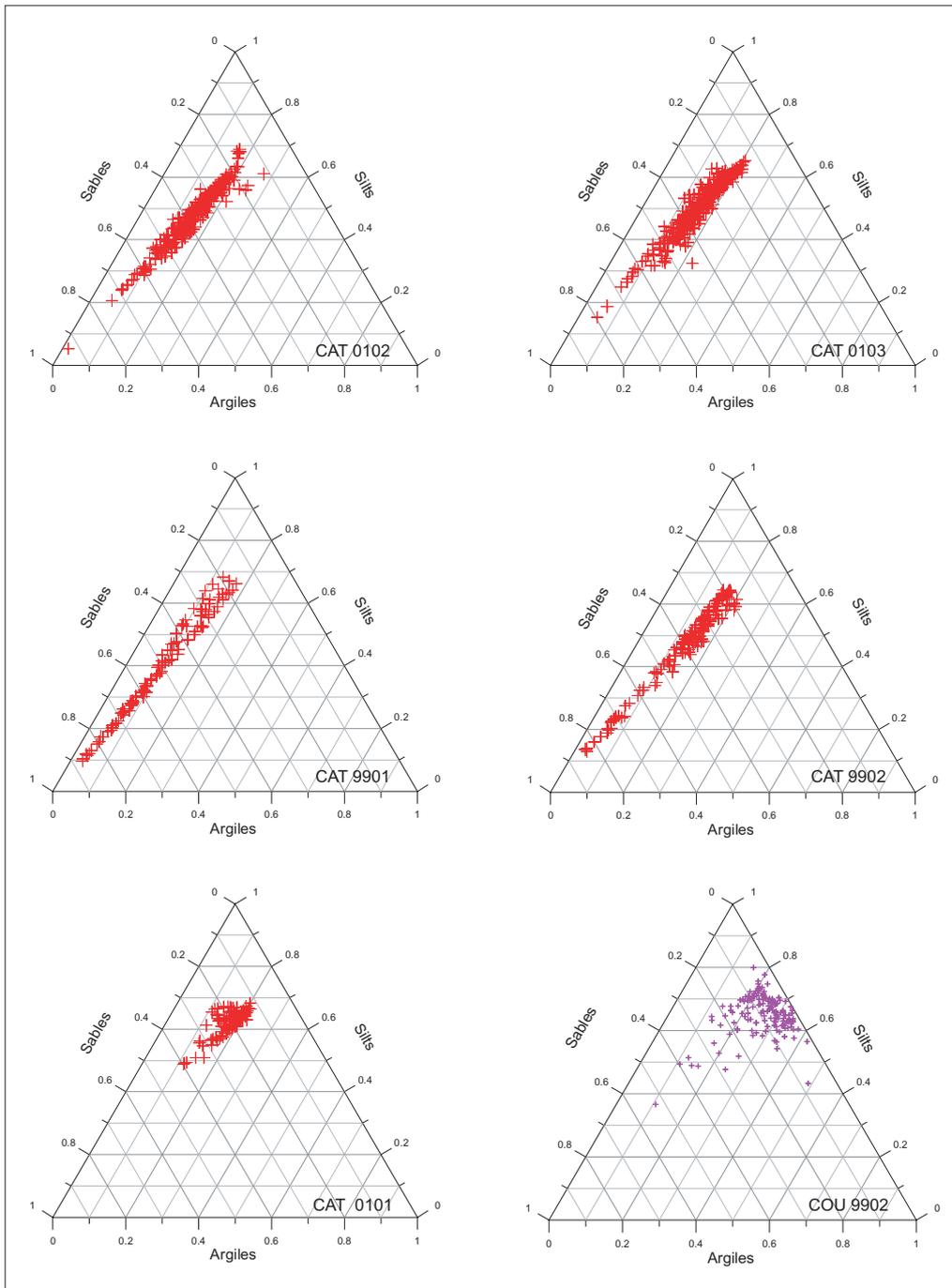


Figure III.26 : Les diagrammes triangulaires des trois grandes classes granulométriques pour les six carottes étudiées.

La deuxième série de données croisées que nous avons utilisée est le rapport entre le classement et l'asymétrie (figure III.27), ainsi que le rapport entre le mode et le classement (figure III.29). Ces deux représentations renseignent sur la qualité du sédiment déposé, qui est différente pour les niveaux grossiers et fins. Des distinctions de dynamisme au moment du dépôt peuvent alors être proposées [Lignier et Desmet, 2002].

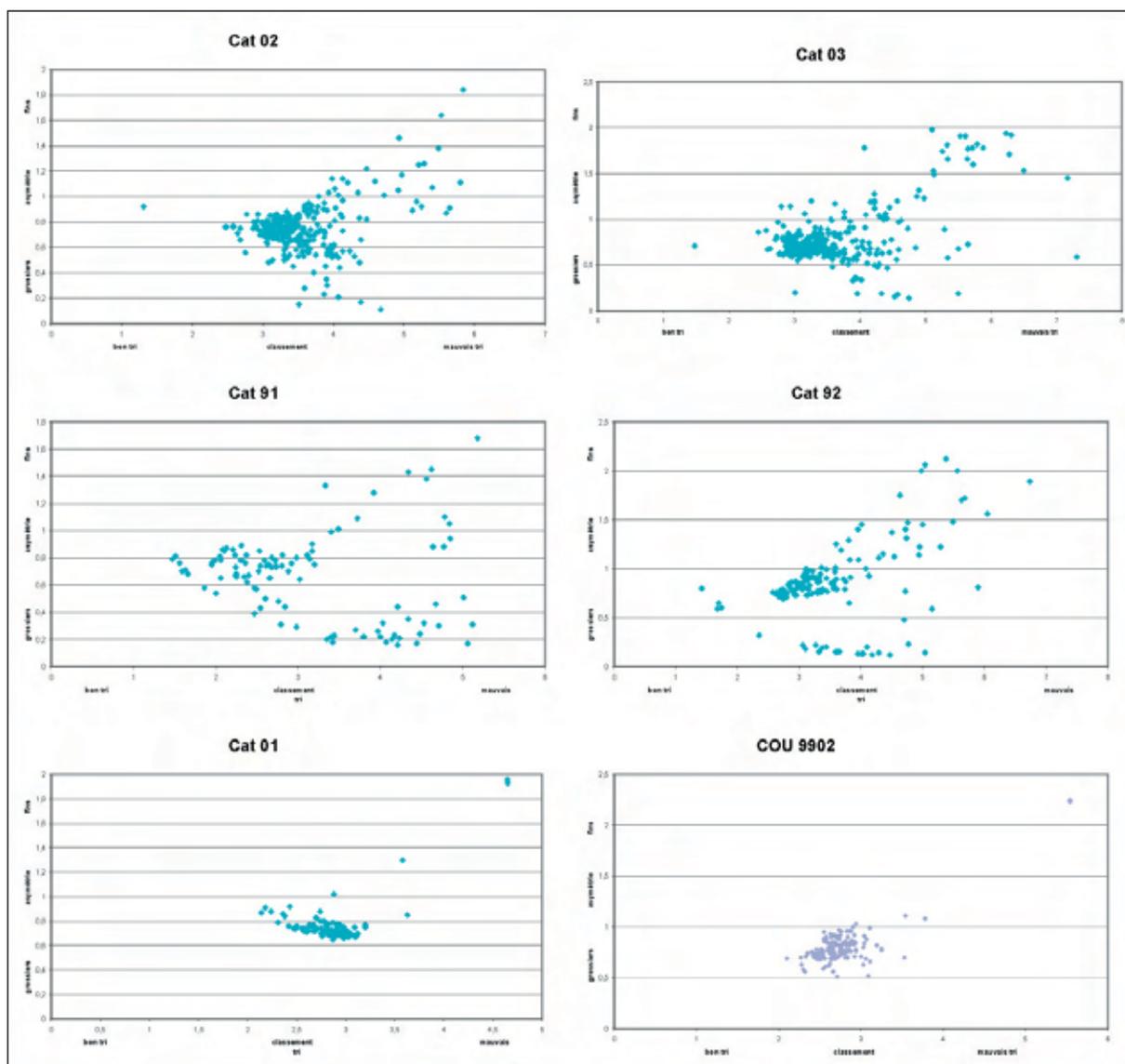


Figure III.27 : Les graphiques asymétrie/classement des six carottes étudiées à Choranche.

Ce croisement de données évalue la qualité du tri des particules en regard de la taille des particules les plus abondantes [Rivière, 1977]. Pour les carottes du lac de la Cathédrale, les mêmes subdivisions que celles montrées par les diagrammes triangulaires s'observent. CAT 0102 et CAT 0103 donnent des graphes très semblables ; CAT 9901 et CAT 9902 sont également similaires mais cela est moins net que sur les diagrammes triangulaires, et CAT 0101 reste à part, illustrant la sédimentation au fond du lac. Une lecture plus détaillée, appuyée sur les variations de grain moyen (figure III.28a), permet de faire un découpage de ces nuages de points en trois zones.

Le premier nuage se situe au centre des graphiques. Il regroupe de façon très resserrée tous les points correspondants à la sédimentation fine, dont on a vu qu'elle était silto-argileuse. Ce nuage est visible pour les cinq carottes du lac de la Cathédrale. Il se place toujours dans des valeurs d'asymétrie comprises entre 0,5 et 1, traduisant une légère prédominance de particules grossières. Par contre, pour CAT 9902, 0102 et 0103, on relève un tri assez moyen avec des valeurs entre 3 et 4. Pour CAT 9901 et 0101, le classement est relativement meilleur avec des valeurs entre 2 et 3. Le deuxième nuage correspond aux niveaux grossiers bien caractérisés. Absent pour CAT 0101, il se situe dans la partie basale des graphes. Avec une asymétrie toujours inférieure à 1 voire très faible, il caractérise une forte prépondérance des particules grossières. La qualité du classement est elle beaucoup plus variable, allant de tris très bons,

pour les niveaux les plus grossiers à des tris de mauvaise qualité pour les niveaux moins marqués. Enfin, le troisième groupe de points correspond aux situations intermédiaires entre les deux autres nuages bien caractérisés. Le classement y est médiocre, et l'asymétrie supérieure à 1 indique une dominance des fines. Plus les points de ce nuage sont distants du nuage central (qui regroupe les particules les plus fines), plus ils tendent vers une granulométrie grossière, la qualité du tri s'altérant. Ainsi, sur CAT 0101, en l'absence d'une réelle fraction grossière, les quelques points localisés dans ce nuage correspondent en effet aux rares valeurs de grain moyen les plus élevées. Enfin, pour COU 9902, la disposition des points rejoint celle de CAT 0101. Le classement est moyen et l'asymétrie ne descend pas en deçà de 0,5. Avec l'absence de la fraction grossière qui a déjà été constatée, les quelques niveaux grossiers apparaissent dans le nuage 3, avec un classement médiocre.

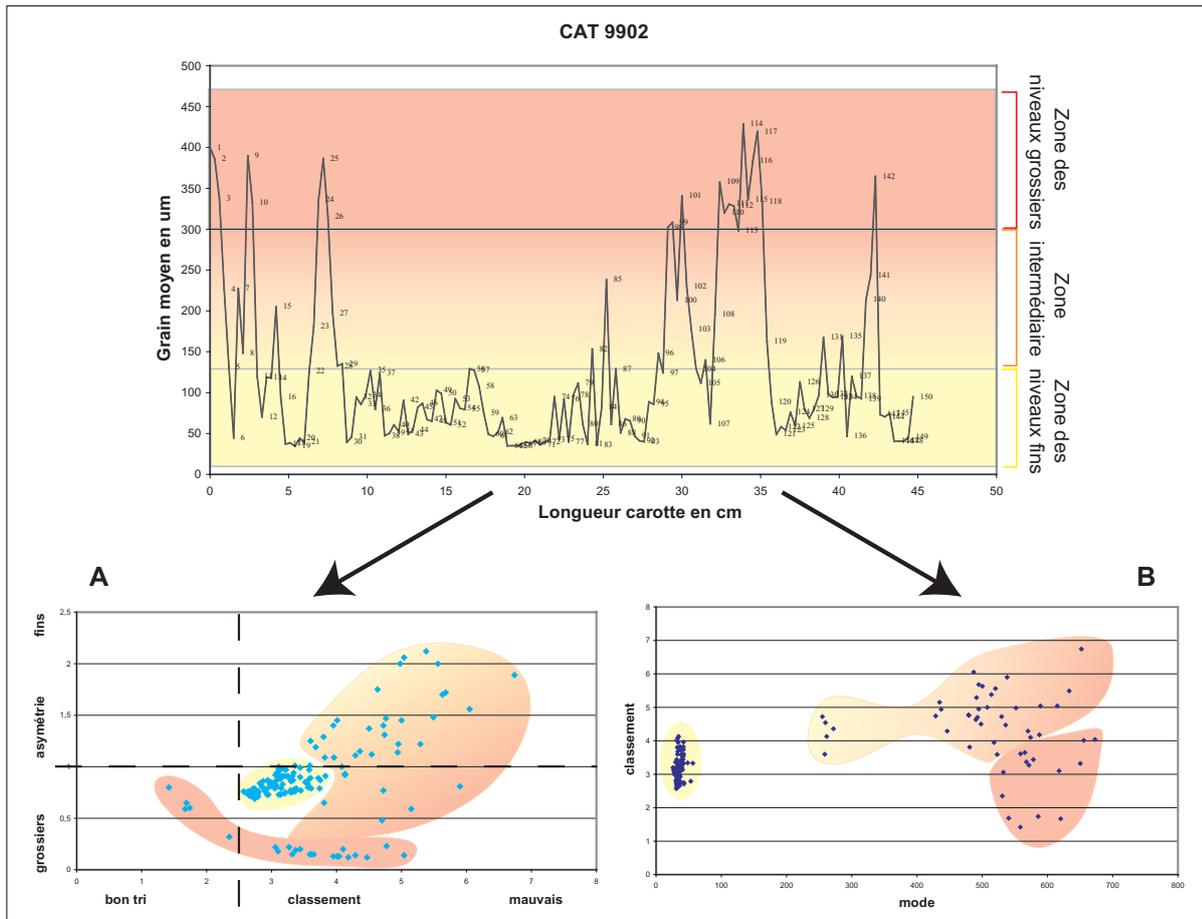


Figure III.28 : Relations entre le grain moyen et la qualité du classement vue à travers les représentations classement/asymétrie (A) et les représentations mode/classement (B) pour la carotte CAT 9902.

Les graphiques montrant le classement en fonction du mode granulométrique complètent très bien ce qui vient d'être montré. Ils sont rassemblés dans la figure III.29 et le recouplement avec les fractions granulométriques est également expliqué par la figure III.28b. Les mêmes regroupements s'observent, entre CAT 0102 et 0103, et CAT 9901 et 9902. CAT 0101 et COU 9902 restent un peu en marge. De plus la subdivision du nuage de points en trois parties fonctionne également selon les mêmes critères. Le premier nuage est celui pour lequel le mode est le plus bas, regroupant les points de sédimentation fine, avec toutefois un classement de qualité moyenne. Puis, au fur et à mesure que le mode augmente, la qualité du classement se dégrade légèrement, d'abord au niveau du second nuage qui rassemble tous les points à la composition granulométrique intermédiaire et mélangée, et dans le troisième nuage qui isole les niveaux grossiers bien différenciés. Le 2^{ème} nuage est absent pour CAT 0101 et COU 9902, et le

nuage 3 ne contient que les quelques points pour lesquels la fraction fine n'est pas la seule composante. Enfin, on remarquera que dans l'ensemble de ces deux séries de graphiques, ce que nous avons appelé le 2^{ème} nuage, qui regroupe les niveaux de sédiments les plus variés en granulométrie, est toujours le plus faiblement représenté. En effet, la majorité des mesures de granulométrie ressort soit majoritairement fine, soit majoritairement grossière, mais rarement composite. Sur la base d'une telle observation, on peut supposer que les apports de particules au lac de la Cathédrale sont soumis à des écoulements qui évoluent rapidement, passant sans réelle progression d'un hydrodynamisme faible à fort, et fort à faible. Cette hypothèse sur l'hydrodynamisme s'accorde avec les caractéristiques hydrologiques du système de Choranche, qui est clairement transmissif. Il sera également intéressant de croiser ces observations aux données environnementales du Vercors.

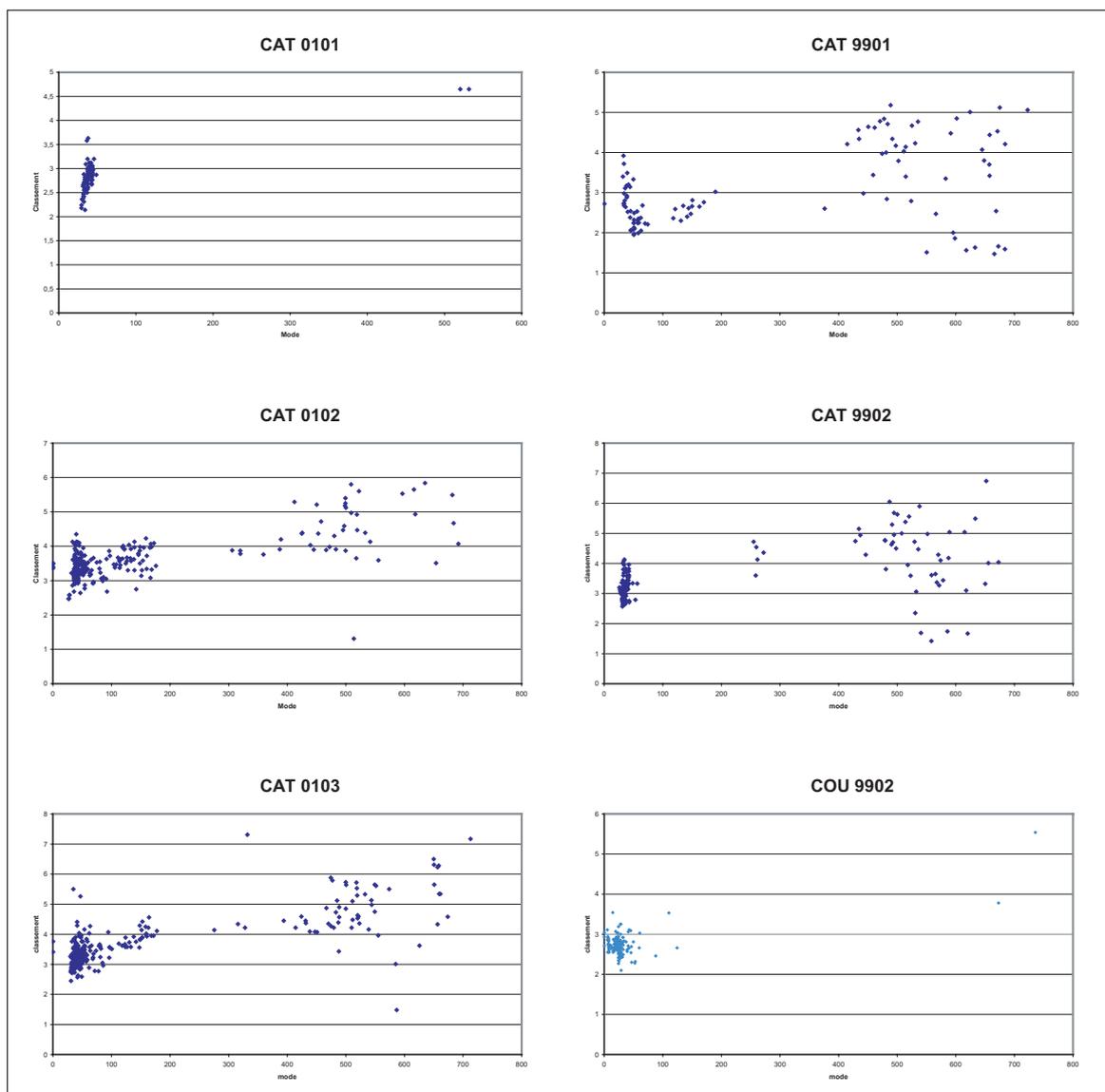


Figure III.29 : Les graphiques classement/mode des six carottes étudiées à Choranche.

Une dernière méthode de croisement de données granulométriques (kurtosis/grain moyen) a été testée car elle apporte des compléments sur l'organisation des sédiments [Sorriaux, 1982]. Inspiré par les travaux de Folk et Ward [1957], il utilise le kurtosis (K), indice granulométrique d'aplatissement permettant de comparer des distributions. Croisé avec le grain moyen, ce paramètre renseigne sur la proportion des constituants d'un échantillon. Ainsi, un mélange en proportions égales de deux constituants se traduit par une distribution dite platykurtic (la courbe de distribution est plus aplatie

que la courbe normale de même écart-type, valeur de K inférieure à 0,45). A l'inverse, l'excès d'une fraction sur l'autre est caractérisé par une distribution dite leptokurtic (courbe de distribution plus pointue que la courbe normale de comparaison, valeur de K supérieure à 0,55) [Sorriaux, 1982]. Le cas intermédiaire, c'est-à-dire une courbe de distribution normale, de type gaussienne, est dénommé distribution mésokurtic. Du point de vue numérique, plus la valeur du kurtosis est élevée, plus la disproportion entre les différentes composantes en présence est élevée.

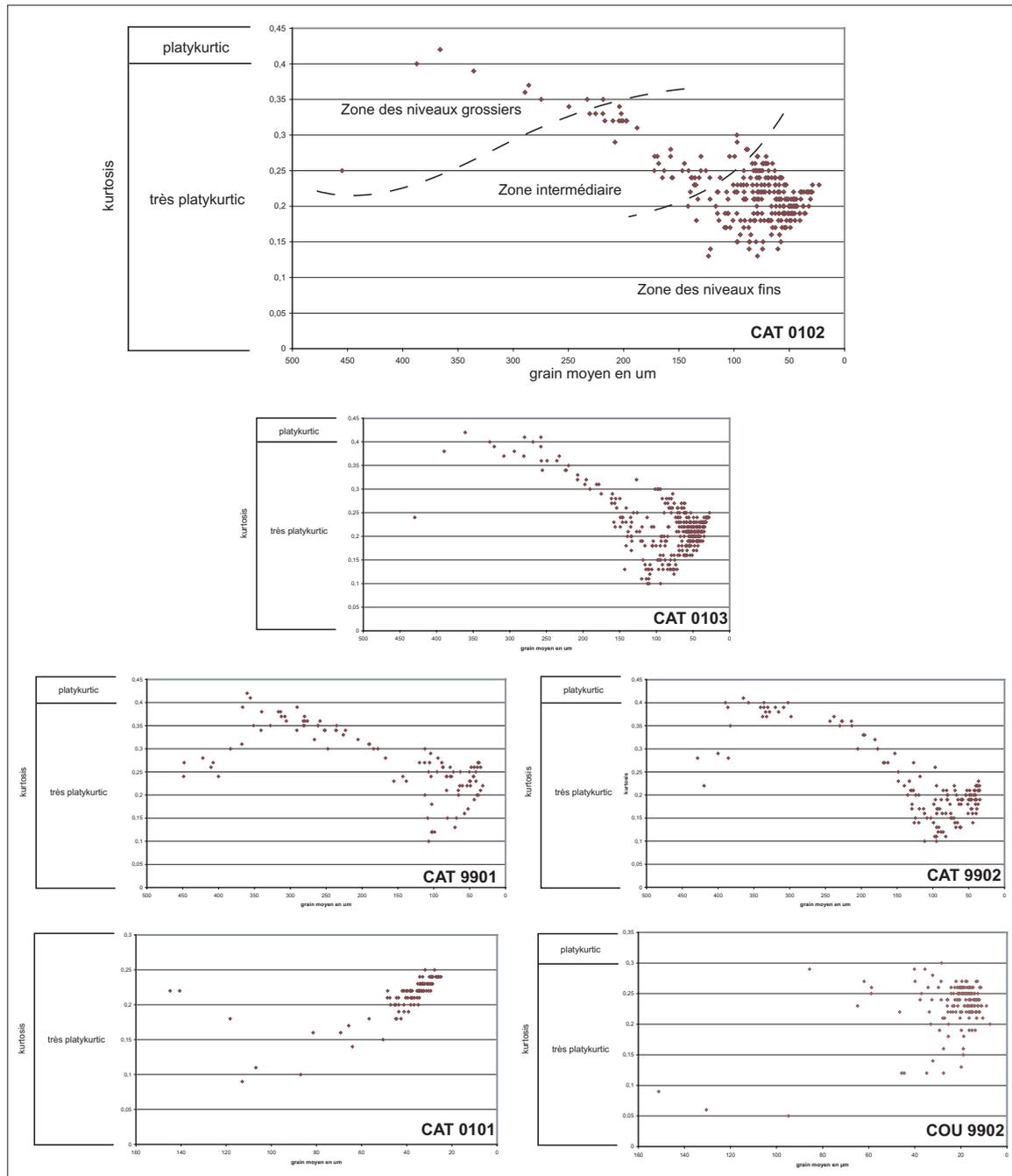


Figure III.30 : Le croisement du kurtosis et du grain moyen comme critère de définition de la qualité d'une distribution granulométrique dans les six prélèvements.

Le kurtosis, confronté aux valeurs de grain moyen, permet donc de réfléchir à la composition de chaque échantillon mesuré. Ici, ces graphiques fournissent tous le même genre de résultats (figure III.30). Tous les points, dans la gamme des kurtosis inférieurs à 0,45, et même à 0,40, permettent de

qualifier la distribution pour chaque carotte de très platykurtic ; ce qui signifie que :

- pour la majorité des points, c'est-à-dire ceux ayant un grain moyen inférieur à 150 μ , la contribution des argiles et des silts s'équilibre bien. Ce groupe de points peut être assimilé au premier nuage défini à l'aide des croisements de données entre asymétrie, classement et mode. Les carottes COU 9902 et CAT 0101 ne font pas, en cela, figure d'exception.
- pour le reste des points, cet équilibre se dégrade avec l'augmentation du grain moyen, indiquant l'augmentation de la part de la fraction sableuse dans le sédiment. Les pics les plus importants se trouvent en effet à l'extrême gauche de ces graphes, se rapprochant d'une distribution strictement platykurtic.

En conclusion, ces différents croisements de données granulométriques permettent d'étoffer notre analyse des sédiments en place. Les principales observations à retenir sont que :

- les diagrammes triangulaires confirment la *participation de chacune des trois grandes catégories granulométriques*, tout en mettant en avant le *contrôle direct exercé par les écoulements* (nombre de sources) sur la dépendance respective de ces contributions. Les différences et/ou recouvrements entre chaque carotte apparaissent aussi plus nettement.
- Les données d'asymétrie, de classement et de mode comparées deux à deux renseignent sur la qualité des dépôts étudiés. *Trois subdivisions* peuvent s'observer, allant des niveaux les plus fins, qui ont un classement moyen, aux niveaux les plus grossiers, probablement en rapport avec des crues ou des périodes de hautes eaux et dont le classement est beaucoup plus variable. La subdivision intermédiaire, par ailleurs la plus faiblement représentée, joue un rôle très limité de transition entre les dépôts fins et grossiers.
- L'étude du kurtosis en fonction du grain moyen confirme les comportements sédimentaires précédents, montrant des *distributions argiles/silts très équilibrées*, perturbées sur les points correspondants aux passées grossières.

3. Les mesures granulométriques après décarbonatation

L'étude granulométrique de sédiments détritiques après décarbonatation peut permettre d'identifier la nature des particules en présence, en particulier les carbonates par comparaison avec les données granulométriques sur le sédiment total [Trentesaux *et al.*, 2001, Arnaud, 2003]. En milieu karstique, cela permet de faire ressortir les apports allochtones ou les apports issus de paléo-colmatage du karst.

Pour les carottes du lac de la Cathédrale, les mesures de granulométrie ont été doublées (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2.a.2) sur le plus grand des échantillons, CAT 0103. Les mesures après décarbonatation ont été faites tous les 3 cm au lieu du pas d'échantillonnage de 3 mm utilisé pour toutes les autres mesures. Grâce aux données globales, cette résolution apparaissait amplement suffisante pour appréhender la fraction carbonatée. Sur cette carotte de 109 cm, cela représente donc 37 mesures. Le plus souvent, la décarbonatation était totale avec 2 à 3 ml de HCl concentré à 5 N¹. Pour le lac de Coufin, nous reprenons les mesures faites sur la carotte COU 9901 par Blois [2000]. Celui-ci avait eu recours à la méthode du calcimètre Bernard, et avait réalisé 39 calcimétries à des pas d'échantillonnage irréguliers, de 2 cm à +0,3 ou -0,7 près.

¹N, la normalité, est une unité d'expression de concentration d'un élément chimique. Elle se rattache au nombre de valences-grammes d'un corps chimique par litre de solution. La valence est elle-même la mesure de la capacité de combinaison d'un élément chimique. Elle permet de prévoir les affinités chimiques de l'élément et ses modes de liaison.

Dans les deux cas, la présence de particules carbonatées apparaît très faible. Pour le lac de la Cathédrale, elle ne dépasse que très rarement les 5 %, et se place surtout au niveau des particules les plus grossières (figure III.31). Pour la plupart des mesures, la fraction carbonatée est donc minime, et présente une répartition granulométrique similaire à celle du sédiment total. Cela permet de dire qu'il n'y a pas de contribution carbonatée ayant une origine autre que celle des apports en particules de la rivière, celle-là même étant très faible. Ces mesures mettent clairement en avant qu'il n'y a pas de production de carbonates interne au lac, et que la majeure partie du matériel détritique dans les lacs de Choranche est issue de remplissages correspondant à d'anciennes phases de colmatage (paléokarst) et/ou de matériel piégé dans l'exokarst (paléocouvertures).

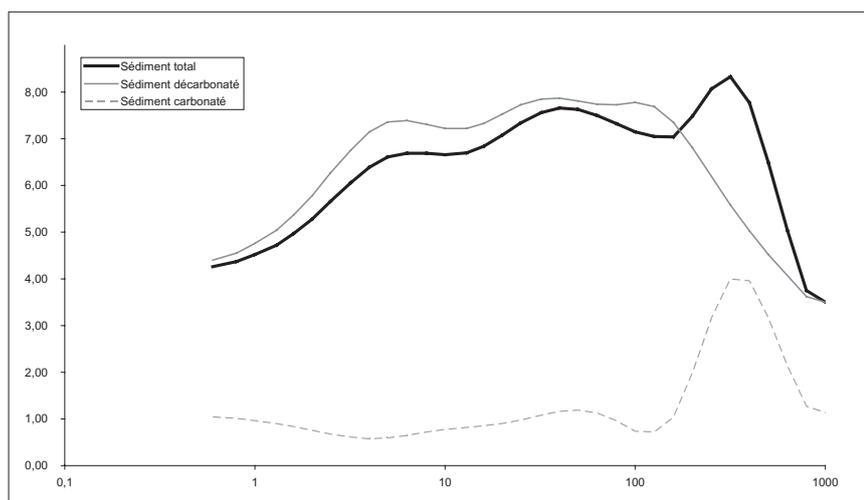


Figure III.31 : Exemple de comparaison des courbes granulométriques pour une mesure, (centimètre 15 de CAT 0103).

Une autre façon de visualiser ces données plus globalement, sur l'ensemble de la carotte, est de représenter les courbes granulométriques toutes ensemble et en deux dimensions [Beierle *et al.*, 2002]. Ce mode de représentation a été préalablement expliqué (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2.a). Il permet d'étudier l'évolution de chaque fraction (totale, décarbonatée et carbonatée calculée) de façon plus globale, et en fonction de la profondeur, donc du temps (figure III.32). Cette figure confirme que les proportions de la fraction carbonatée sont très faibles, le plus souvent inférieures à 5 %. Des participations plus fortes apparaissent seulement au niveau des passées grossières, mais restent alors tout de même inférieures à 10 %. Seule la mesure 10 donne un pourcentage de carbonates compris entre 10 et 20 %. Cette mesure correspond à l'évènement le plus important qui semble être mémorisé dans cette carotte CAT 0103, entre 24 et 27 cm de profondeur. Pour le lac de la Cathédrale, la présence de carbonates dans les sédiments est donc très faible, et uniquement cantonnée aux fractions les plus grossières. Elle joue donc un rôle extrêmement réduit dans la sédimentation. L'analogie très claire entre les graphiques de sédimentation totale et de sédimentation décarbonatée atteste donc du faible impact de la fraction carbonatée dans les sédiments.

Pour la carotte COU 9901 du lac de Coufin, les calcimétries donnent les mêmes résultats. L'auteur a extrapolé les 39 calcimétries réalisées en une courbe reproduite ci-contre (figure III.33). Les taux de carbonates varient entre 28,8 % et 1,3 % ; ils peuvent donc être, très ponctuellement, plus forts que dans la Cathédrale. Là encore, les plus « fortes » contributions en carbonates sont calquées sur les évènements les plus forts repérés sur la courbe du grain moyen [Blois, 2000].

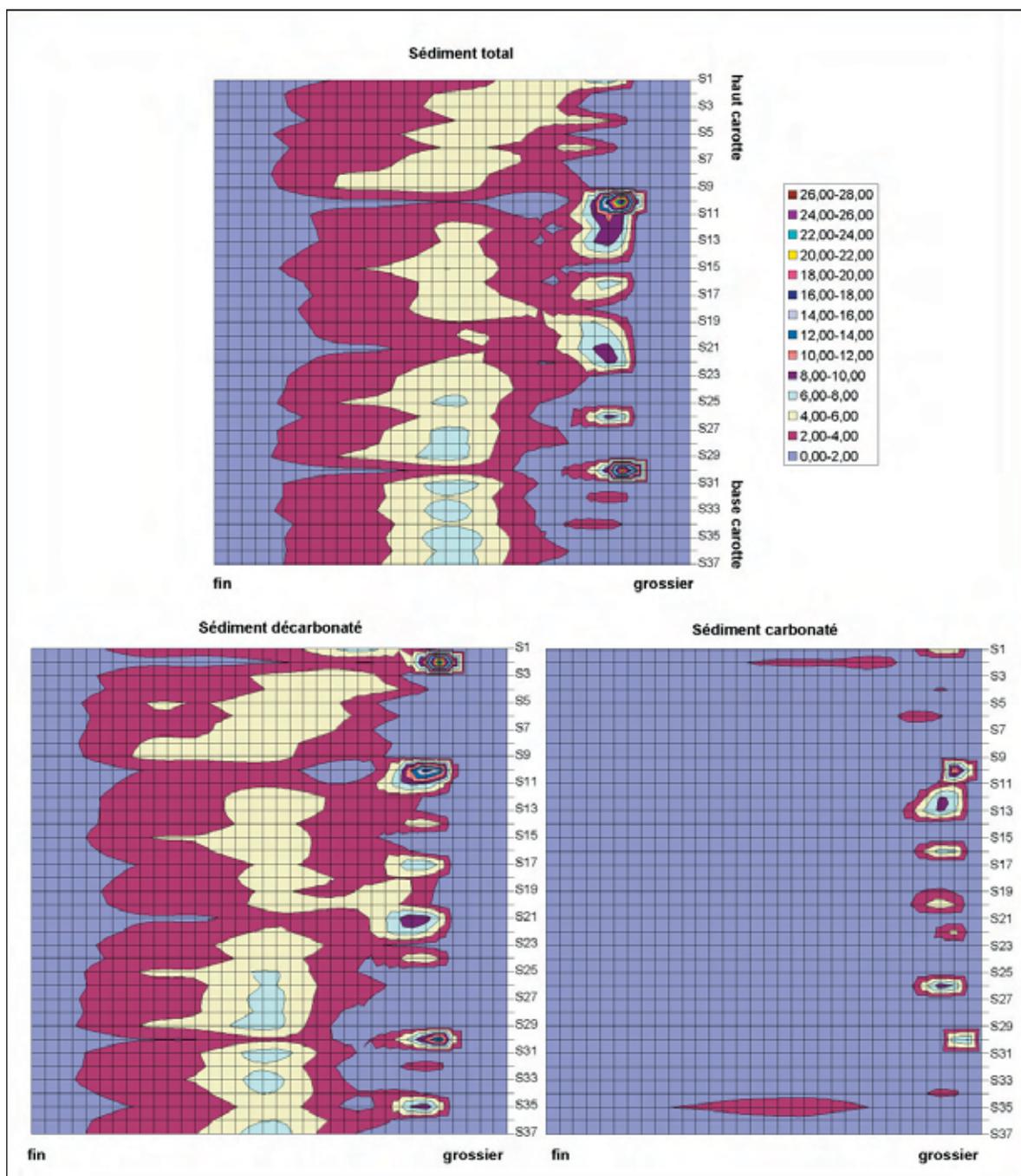


Figure III.32 : Visualisations 2D de la granulométrie de CAT 0103 selon la nature des fractions.

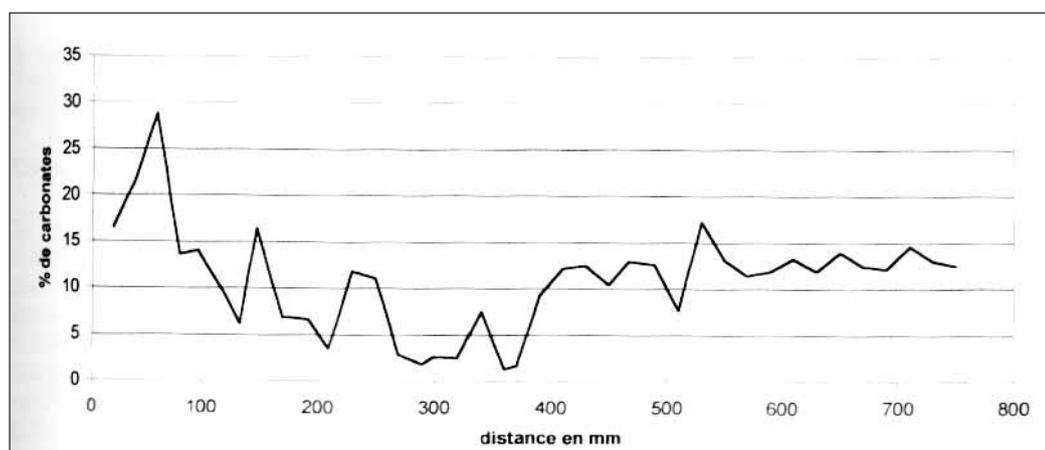


Figure III.33 : Evolution du taux de carbonates dans les sédiments de la carotte COU 9901 (d'après Blois, 2000).

Le comportement de la fraction carbonatée semble similaire dans les deux lacs étudiés. De faible apport (10 à 25 % en moyenne), et uniquement sous la dépendance des arrivées de matières par la ou les rivière(s), cette composante n'intervient que lors des épisodes hydrologiques forts. Au vu de l'indigence du matériel carbonaté, une étude minéralogique des sédiments nous est apparue indispensable, afin de définir leur nature et leur provenance.

4. Les analyses minéralogiques

Ces analyses complètent les connaissances sur la nature des sédiments. Nous donnons donc ici quelques compléments, basés sur les observations à la loupe, au microscope, et sur l'identification des argiles réalisée par W. Blois [2000].

Quelques observations des niveaux les plus fins, au microscope, ont été faites sur les carottes du lac de la Cathédrale. Des frottis étudiés, il ressort que la composition des sédiments est assez homogène, avec prédominance de quartz. Les autres minéraux rencontrés sont la calcite, la glauconie, et plus rarement, de la biotite (famille des micas). Des fragments de charbons sont également présents. Les tailles de ces minéraux sont très variables, et leur degré d'usure peut être très différent au sein d'un même niveau (figure III.34).

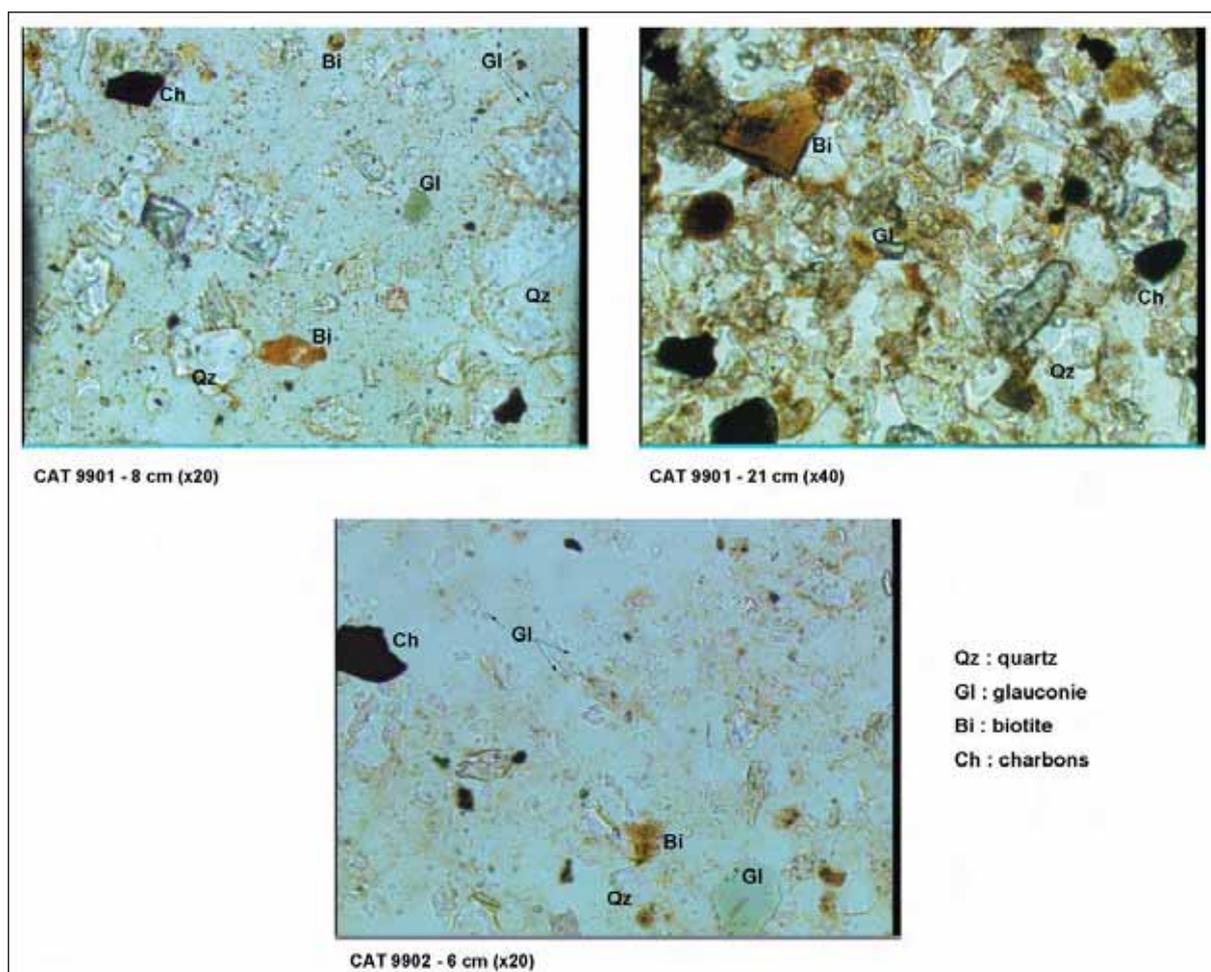


Figure III.34 : Planche photographique de quelques observations au microscope (clichés A.S. Perroux).

Ainsi, les minéraux de glauconie sont les plus petits, participant à la « matrice » microcristalline. Les autres minéraux cités, même les plus rares, sont souvent beaucoup plus gros. La présence de

microfaune n'a pas été identifiée. L'ensemble de ces minéraux est assez caractéristique du détritisme, en particulier la glauconie, typique des niveaux du Gault qui recouvrent les assises urgoniennes, et qui sont aujourd'hui absents sur le massif des Coulmes. L'essentiel des sources de matières sédimentaires correspondrait donc à d'anciennes phases érosives et/ou de karstification qui font que les éléments de la « couverture » urgonienne, aujourd'hui absente des Coulmes, parviennent toujours au karst actuel. Le faible degré d'usure montré par la grande majorité des minéraux est un argument en faveur de sources de matières proches (surface du massif), les particules subissant un transport limité. Ce constat met clairement en avant l'importance du piégeage exo- et endo-karstique de cette couverture. L'étude de la grotte de Pot Siva [Delannoy, 1997] a montré que cette cavité contient des éléments du Crétacé supérieur.

Différentes vues, à la loupe binoculaire, des sédiments grossiers du lac de la Cathédrale (figure III.35) et du lac de Coufin (figure III.36) sont regroupées dans les planches qui suivent. Les minéraux observés sont globalement les mêmes que ceux identifiés dans les niveaux fins. Seules les proportions changent. Ainsi, la calcite est beaucoup plus représentée, ce qui concorde bien avec les résultats de la granulométrie décarbonatée ; la glauconie est beaucoup moins présente. Les degrés d'usure apparaissent toujours très variés, pouvant aller du minéral très anguleux au minéral très émoussé, arrondi et poli. Enfin, quelques restes de coquilles d'ostracodes ont été repérés.

Enfin, pour compléter la description des particules en présence, nous renvoyons le lecteur aux annexes 4 et 5 de ce manuscrit, qui reprennent les résultats d'identification des argiles de W. Blois [2000] sur la carotte COU 9901 du lac de Coufin (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.5.a et annexes 4 et 5). L'auteur identifie des smectites, illites, vermiculites, chlorites, kaolinites, et deux interstratifiés irréguliers : illite/vermiculite et illite/smectite. Les kaolinites sont probablement issues de la roche calcaire encaissante, elles sont donc à mettre en relation avec la dissolution de la masse carbonatée. Les autres minéraux argileux sont vraisemblablement acheminés vers le karst par lessivage [Blois, 2000]. La présence des argiles repose donc sur deux processus qui sont la dissolution de la masse carbonatée (argiles de décalcification), et la pédogenèse, le lessivage des sols.

Dans le souci de privilégier les méthodes plus originales de cette étude des sédiments endokarstiques, nous n'avons pas fait d'autres identifications des argiles dans le cadre de cette thèse. Toutefois, la grande similitude de composition des sédiments de ces deux lacs, perçue à travers les observations au microscope et à la loupe, ainsi que le faisceau de données convergentes que nous venons de développer sur la structuration des sédiments, permet d'émettre l'hypothèse que la fraction argileuse est également assez semblable entre ces deux pièges.

Ces différentes mesures ont permis de poser la question du piégeage des sédiments anciens dans le karst et de leur remobilisation (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.3). Le mélange de minéraux aux degrés d'usure très variés peut en effet renvoyer à des apports directs depuis la surface, simultanément à une remobilisation de dépôts antérieurs, piégés dans le karst. Réalisée en site actif, l'approche granulométrique classique prend déjà une forte valeur. En effet, pouvoir croiser les sédiments avec les conditions hydrologiques connues permet de fixer avec acuité les premières bases des conditions de la sédimentation lacustre sous terre. Quant à la question de l'origine du matériel déposé, ce sont les approches géomorphologique et spéléologique qui permettent de proposer des éléments de réponse.

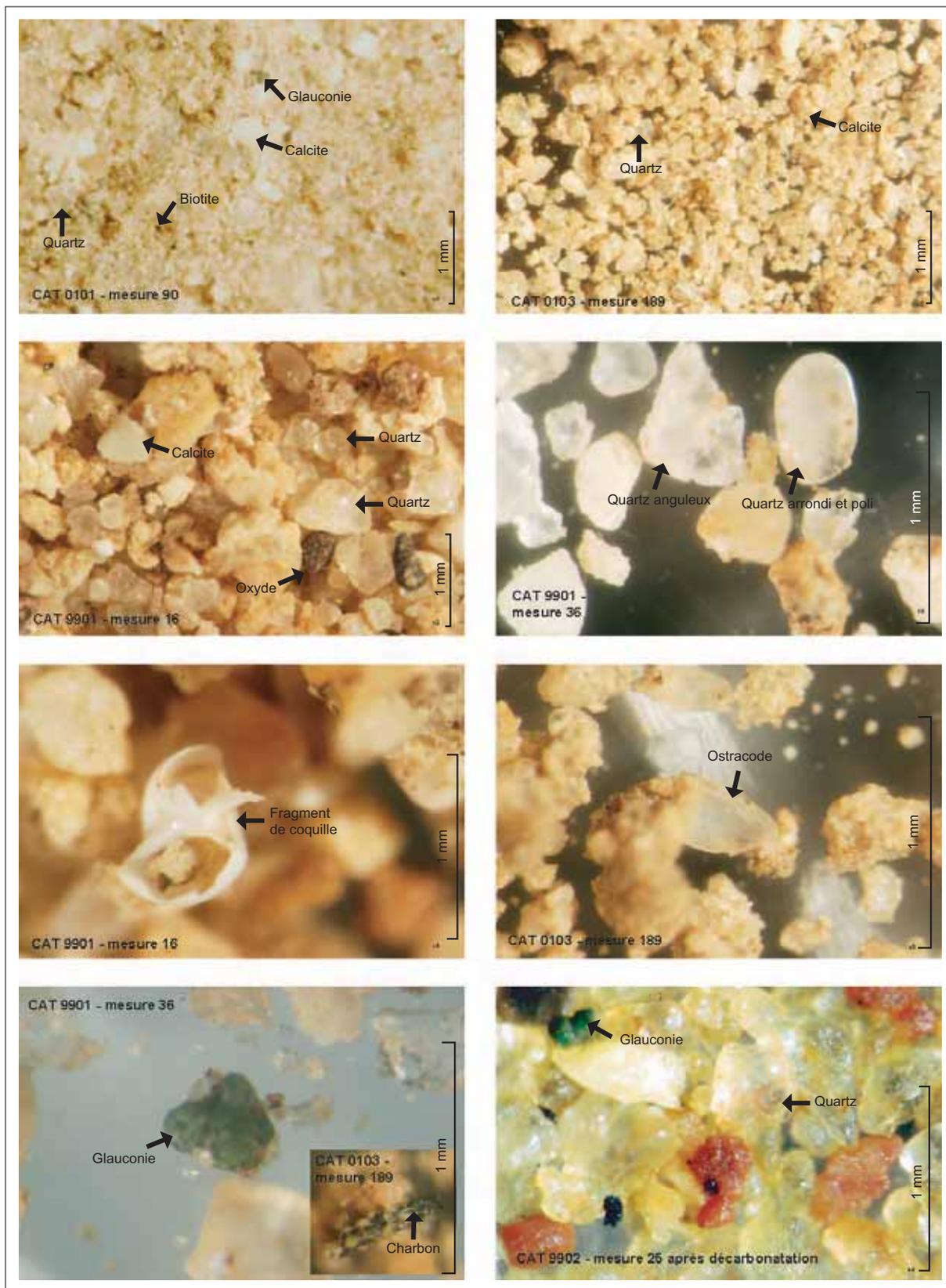


Figure III.35 : Planche photographique de quelques observations à la loupe sur les sédiments du lac de la Cathédrale (clichés A.S. Perroux).

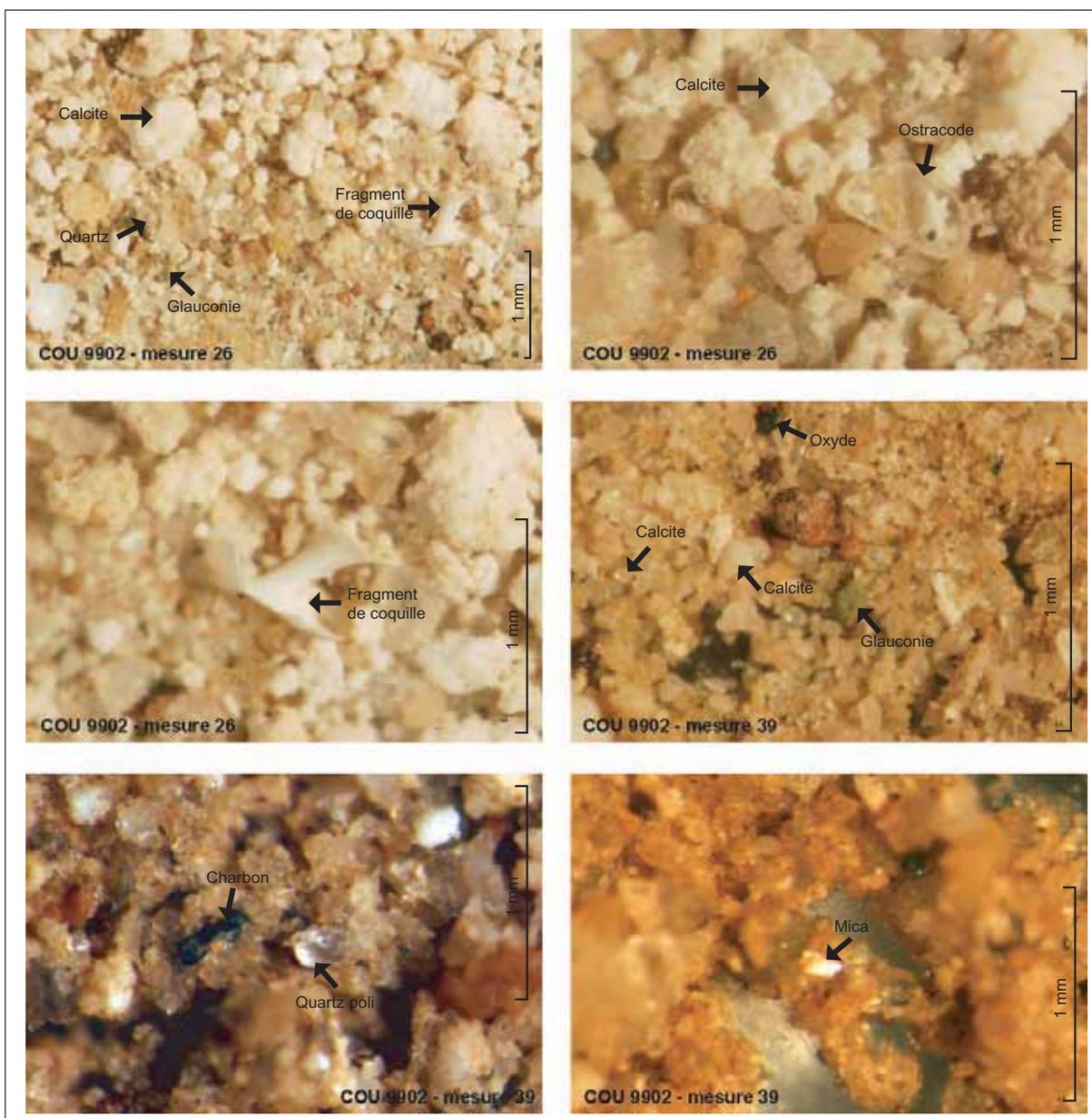


Figure III.36 : Planche photographique de quelques observations à la loupe sur les sédiments du lac de Coufin (clichés A.S. Perroux).

Méthode/ Traitement	Intérêts	Limites	Apports dans le cas des lacs de Choranche
Granulométrie	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt	Pas d'indication sur la composition sauf décarbonatation	Identification des classes granulométriques et de leurs contributions respectives, rôle des écoulements, part et origine de la fraction carbonatée, nature et sources des autres minéraux en présence (usure des minéraux)
Observations microscope et loupe	Sources de matières par rapport à la géologie locale et au bassin versant > Spatialisation	Indicateurs qualitatifs de la composition du sédiment	
Diffraction des argiles	Origine de ces composantes (état des sols, conditions géologiques et/ou climatiques)		

Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 1.

b) Les traitements de données granulométriques : approche dynamique

Toujours en nous appuyant sur les mesures de granulométrie à haute résolution, ce second volet s'articule autour de deux points majeurs : les images C/M et les analyses multifactorielles. Nous utilisons une autre méthode classique en sédimentologie, basée sur le diagramme de Hjulström.

1. Les images C/M d'après les théories de Passega

La réalisation des images C/M est basée sur les travaux de Passega [1964] déjà présentés (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.3.b). En croisant le C 99 ou Q 99 (percentile le plus grossier) et la médiane granulométrique M toujours exprimés en microns, sur un diagramme bi-logarithmique, on obtient une disposition des points que l'on peut raccorder à des dynamiques de dépôt. Ces images ont été construites pour chacune des carottes, afin de compléter les informations issues de l'analyse granulométrique, et pour voir si elles permettent de fournir une caractérisation de la sédimentation dans ces lacs souterrains. Les cinq carottes du lac de la Cathédrale seront analysées et comparées à celles du lac de Coufin.

Sur les cinq graphiques du lac de la Cathédrale (figure III.37), on relève une forte ressemblance des images C/M, hormis celle de CAT 0101 faisant toujours exception. Les quatre carottes prélevées sur le flanc de la banquette donnent des images comparables. Les points s'organisent selon deux directions. La première, sub-horizontale, rassemble les points de granulométrie les plus grossiers. Elle est relayée vers des valeurs de 50 μ pour la médiane par une seconde direction oblique, autour de laquelle se rassemblent les autres mesures de granulométrie plus fine. Pour CAT 0101, seule cette seconde direction existe. Mais cela n'est pas en incohérence avec les autres images C/M. En effet, nous avons déjà pu montrer que la granulométrie de CAT 0101 était plus fine que celle des autres échantillons, et que les passées grossières y sont particulièrement rares. L'image C/M de cette carotte exprime la part de la sédimentation fine dans le lac, et sa nette prédominance dans le fond du lac.

On remarque que la forme globale des nuages de points est éloignée de la trame théorique établie par Passega [1964], qui correspond au tracé rouge rappelé sur chaque image de la figure III.37. La différence majeure se situe au niveau du tronçon « Q-R » défini par Passega et correspondant à la suspension gradée. Les points, à part quelques mesures sur la carotte CAT 9901, en sont très écartés. Une telle disposition générale des points sur le diagramme bi-logarithmique est peu commune. Il y a donc là, dans ces images, une restitution *a priori* tout à fait originale de la dynamique sédimentaire qui pourrait être l'expression de la sédimentation lacustre souterraine.

La forme du nuage de points étant commune aux cinq carottes, nous l'avons donc balisée par le tracé d'une enveloppe globale, très peu contrainte dans un premier temps, afin qu'elle soit valable pour toutes les carottes (figure III.38). Nous avons également cherché à faire un découpage plus fin de l'organisation interne des points de mesures dans l'enveloppe caractéristique, de façon à préciser quels sont les types de sédiments qui s'articulent autour des deux directions préférentielles évoquées pour faciliter la description des images (figure III.38). L'organisation des points de mesure sur l'image C/M est relativement continue, cela rend difficile l'identification directe des sous-groupes. Il est donc nécessaire de rechercher un critère discriminant. Le grain moyen peut constituer ce critère, pour les raisons suivantes :

- comme montré plus haut, l'évolution du grain moyen en fonction de la profondeur semble la plus précise et la plus détaillée, donnant une image assez réaliste de l'évolution des

particules sédimentées ;

- de plus, cet indice granulométrique est, le plus souvent, assez bien corrélé à l'évolution de la médiane (cf. *supra* : Partie III, Chap. II.2.a.1) qui est utilisée pour les images C/M ;

- enfin, en faisant des tests sur les données des images de Passega elles-mêmes, le grain moyen s'est avéré un bien meilleur critère séparateur que le mode, entre autres.

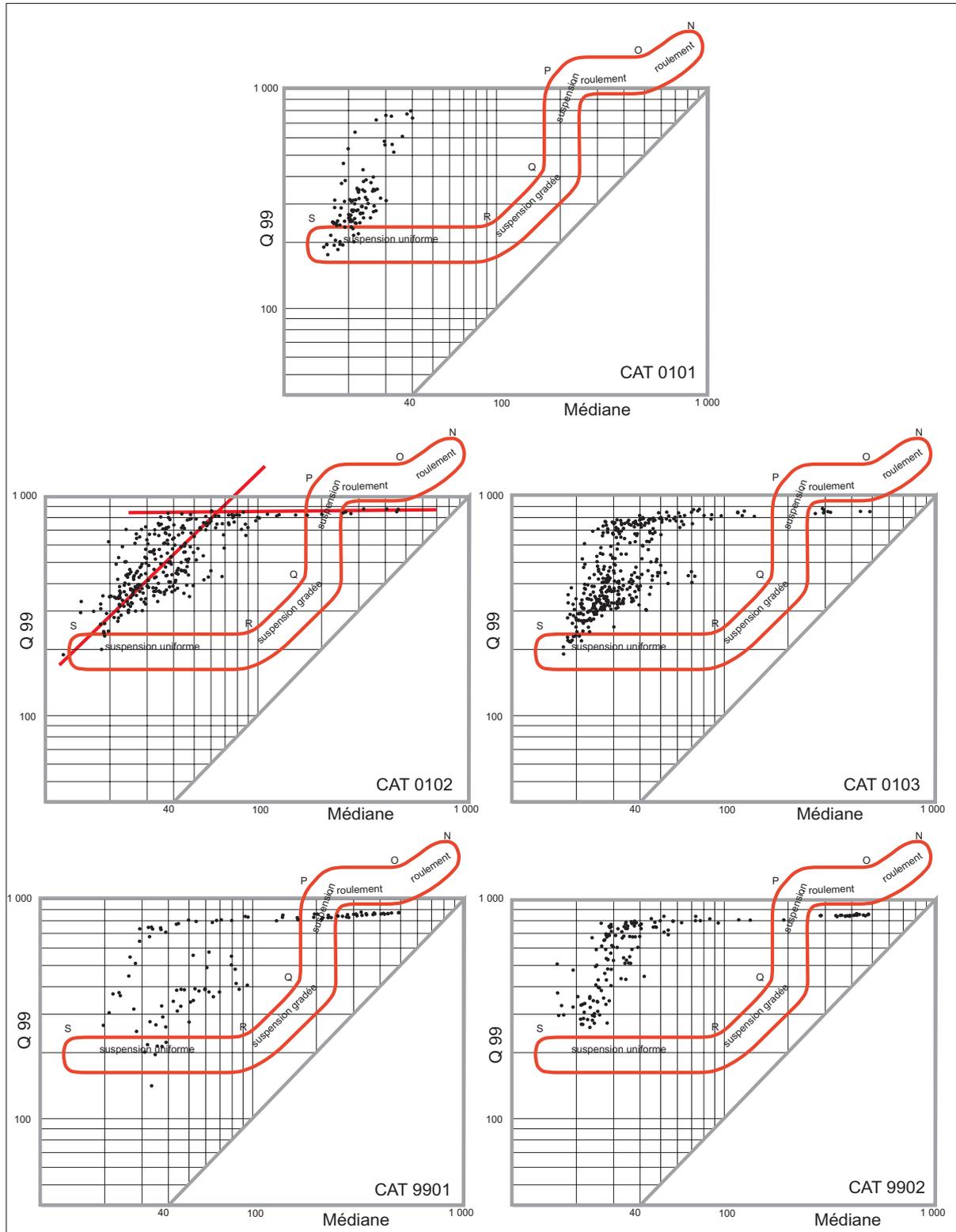


Figure III.37 : Les images C/M pour les cinq carottes du lac de la Cathédrale.

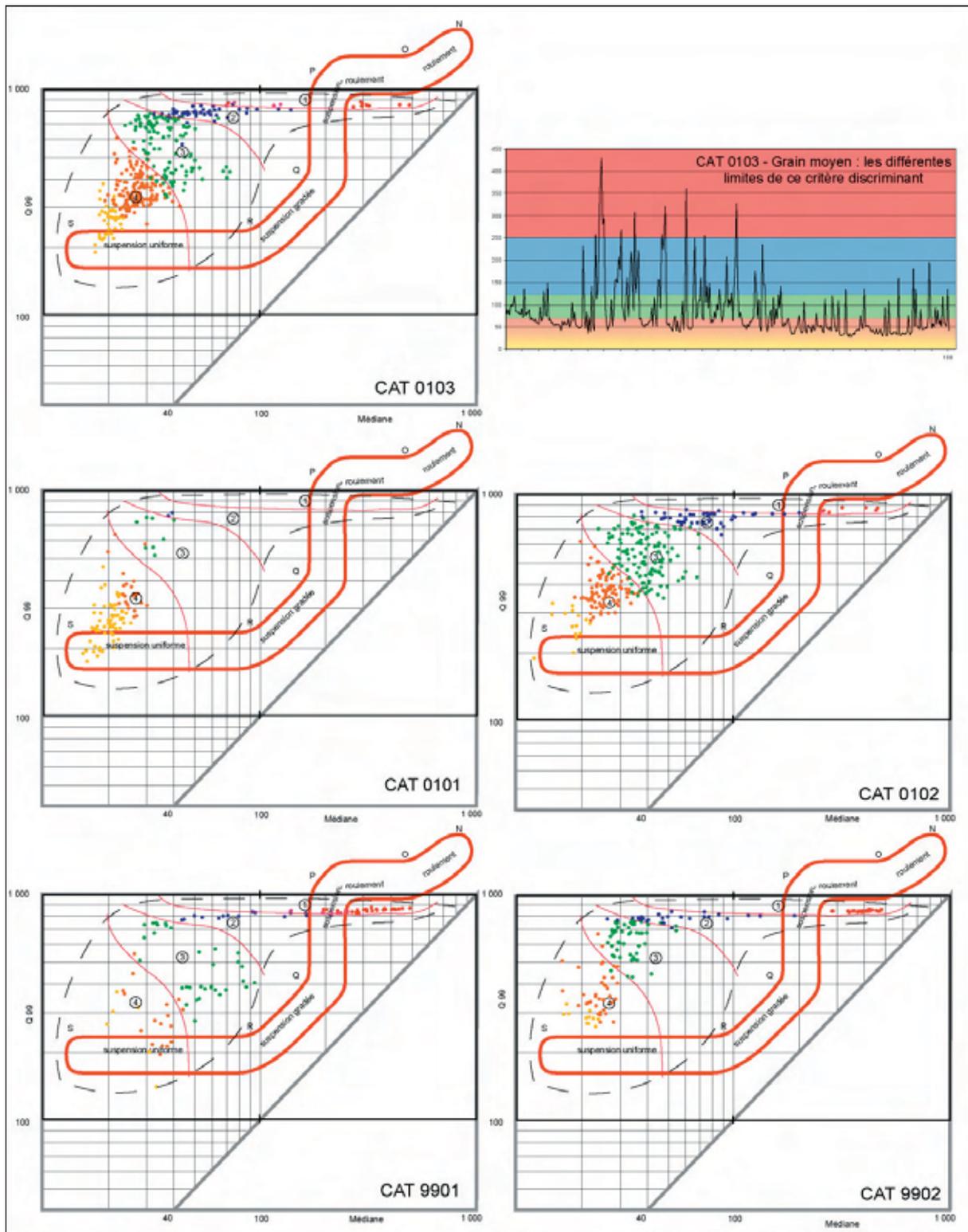


Figure III.38 : Les images C/M du lac de la Cathédrale - essai de caractérisation de la sédimentation lacustre endokarstique.

Les images C/M de la figure III.38 montrent donc une sédimentation dont les différentes dynamiques apparaissent plus clairement. Le grain moyen utilisé comme critère discriminant (subdivisions granulométriques de Wentworth), permet d'identifier quatre grandes zones :

- Zone 1 - Grain moyen $> 250 \mu\text{m}$ ($\Phi 2$) : Zone cantonnée à l'extrémité supérieure du graphique bi-logarithmique, qui isole tous les points correspondants aux passées les plus grossières.

Cette zone est absente dans le cas de CAT 0101. Pour les autres carottes, les points qui y figurent ont donc une médiane assez large, évoluant entre 50 μm et 500 μm . Le Q 99, lui, varie beaucoup moins, restant compris entre 800 et 900 μm . Nous devons préciser ici que quelques unes des mesures ont parfois saturé le granulomètre, avec des particules légèrement supérieures à sa capacité de mesure, si bien que cette zone 1 est quelque peu sous-estimée dans sa partie haute. En effet, quelques rares points placés au-delà de 900 μm , lui donneraient une allure légèrement moins plate. Cette zone est probablement en rapport avec des épisodes de crues et de hautes eaux de la rivière.

- *Zone 2 – 125 μm ($\Phi 3$) < Grain moyen \leq 250 μm ($\Phi 2$)* : Zone comprenant les points de mesure en rapport avec une granulométrie toujours assez grossière. Pour CAT 0101, quelques points se situent dans cette seconde zone, ils correspondent à quelques niveaux de sédiments plus grossiers que le reste de la carotte. Les points cantonnés dans cette seconde zone montrent une variation de la médiane toujours assez élevée, allant de 30 à 110 μm maximum, le percentile le plus grossier restant toujours assez fortement restreint, compris entre 700 et 800 μm . Ces deux premières zones ont donc une organisation globale subhorizontale. Il est probable que la zone 1 ne regroupe que des pics de crues clairement identifiés alors que la zone 2 rassemble des niveaux sédimentaires pouvant avoir des origines hydrodynamiques plus variées : des pics de crues de moindre importance que celles de la zone 1, ou des niveaux de sédiments de « transition » qui encadrent les niveaux grossiers majeurs, ou des épisodes de hautes eaux.

- *Zone 3 – 62,5 μm ($\Phi 4$) < Grain moyen \leq 125 μm ($\Phi 3$)* : Ce troisième groupe de points rassemble des niveaux de sédiments nettement plus fins. L'orientation des points n'est plus du tout subhorizontale mais regroupée en un nuage, avec des valeurs de médiane plus resserrées, entre 20 et 80 μm et un percentile plus mobile allant de 350 à 700 μm . Ici, c'est plutôt CAT 9901 qui est à part, avec une disposition des points dans cette zone beaucoup plus étalée (jusqu'à 100 μm pour la médiane, et un C 99 inférieur à 300 μm pour quelques points). Les bornes du grain moyen positionnent les sédiments de cette zone 3 dans les sables très fins, et l'évolution de la courbe du grain moyen nous montre que ces niveaux ne sont plus du tout en rapport, en connexion avec les niveaux grossiers des zones 2 et 1. On n'est plus, à partir de cette troisième zone, dans un contexte de dépôt de forte énergie hydrodynamique, mais plutôt dans une situation d'écoulement normal, avec un hydrodynamisme plus calme. On peut donc faire l'hypothèse que ces niveaux à sables fins se rapprochent d'une sédimentation par simple décantation dans le lac. Compte tenu de la taille des particules, cette zone 3 est caractérisée par une décantation assez rapide, pouvant subsister en cas de très faible augmentation d'hydrodynamisme.

- *Zone 4 - Grain moyen \leq 62,5 μm ($\Phi 4$)* : Cette dernière subdivision forme le groupe des sédiments les plus fins déposés dans le lac de la Cathédrale. La médiane y est comprise entre 10 et 40 μm alors que le C 99 varie entre 150 et 600 μm . Pour les cinq carottes, on voit aussi que c'est la zone la plus représentée. Pour plus de lisibilité, les points de cette zone ont donc été divisés en deux sous-groupes avec une limite à 31 μm ($\Phi 5$), différenciant ainsi silts grossiers et silts fins. En rapport étroit avec la zone 3 (quelques points se chevauchent et la limite est difficile à placer), cette dernière zone correspond donc à une situation hydrodynamique encore un peu plus calme, permettant une décantation des sédiments de composition majoritairement silteuse, mais parfois assez mal triés (valeurs élevées du C 99). Les zones 3 et 4 traduisent donc un contexte hydrodynamique globalement calme qui prédomine largement dans ce piège lacustre endokarstique.

Ces images de Passega, outre leur caractère original en regard des systèmes sédimentaires de surface, permettent de cerner les différentes dynamiques de sédimentation dans le lac.

La relative « incohérence » existant entre la taille moyenne des particules (on ne descend pas en deçà des silts) et les contextes de dépôts (suspension et donc décantation pour les zones 3 et 4) renseignent donc indirectement sur l'hydrodynamisme à l'amont du piège lacustre. Les dynamiques d'apports et de piégeage ont donc pu être ainsi identifiées et différenciées. La construction des images C/M semble donc être un moyen d'étude assez performant, et le fonctionnement du piège sédimentaire endokarstique actif apparaît plus clairement. Nous pensons donc qu'un lac endokarstique répondant aux mêmes caractéristiques que le lac de la Cathédrale (une seule rivière pour les apports, et une perte permanente au fond lac), devrait pouvoir être identifié grâce à la construction d'une image de Passega. Celle-ci serait semblable, au moins dans l'organisation globale du nuage de points sur le diagramme, à ce que nous avons pour ce lac.

L'étude de ces mêmes images pour le lac de Coufin permet de tester la reproductibilité de ces représentations. Sur les images de Passega du lac de Coufin, des différences majeures apparaissent immédiatement (figure III.39). Même si COU 9901 a une forme globale qui pourrait s'apparenter aux images construites pour le lac de la Cathédrale, la disposition des points présente des différences. COU 9902 montre une distribution beaucoup plus éclatée qu'il est difficile de raccrocher à ce que nous venons de montrer. Le recouplement entre les deux lacs, du point de vue de la ou les dynamique(s) de sédimentation est donc loin d'être évident. Toutefois, en reprenant le découpage précédent et en tenant compte des connaissances du site que nous avons, il est possible de développer quelques hypothèses d'explication (figure III.40).

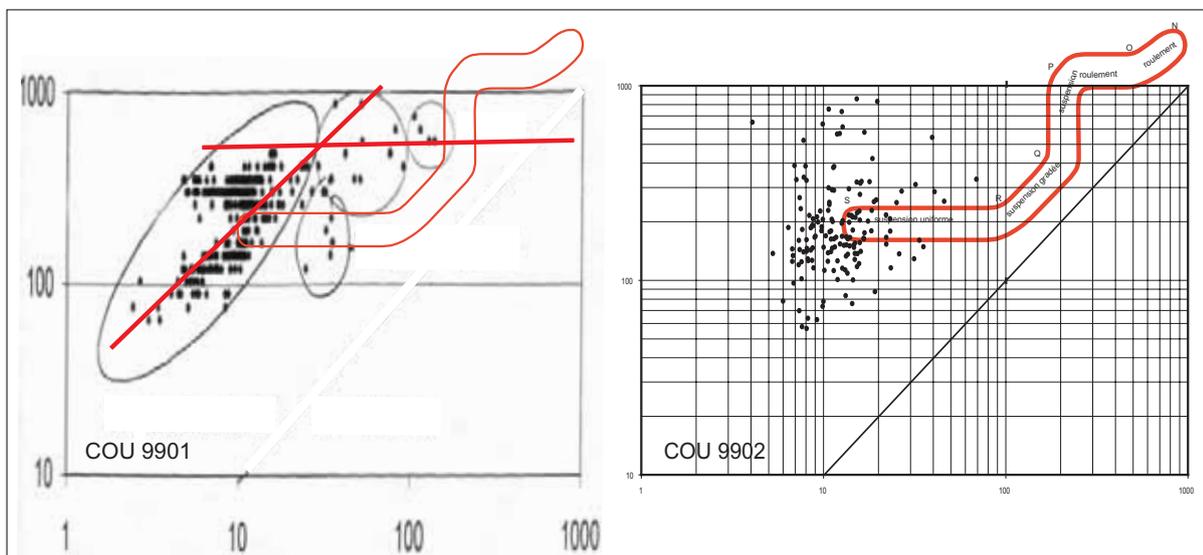


Figure III.39 : Les images C/M pour les deux carottes du lac de Coufin.

Pour COU 9901 [Blois, 2000], la forme globale du nuage de points est ressemblante, avec toutefois un très net décalage vers les fines, et des niveaux grossiers très faiblement représentés (cadre grisé sur les graphes de la figure III.40). En effet, la zone 1 telle que nous l'avons définie n'est pas représentée et quelques points seulement peuvent être assimilés à la zone 2. La zone 3 correspondant aux sables fins regroupe aussi quelques points mais l'essentiel des mesures se localise dans la zone 4 et au-delà, se rapprochant de la décantation purement argileuse. Pour COU 9902, carotte pour laquelle nous avons fait les mesures, nous avons pu appliquer les valeurs de grain moyen comme critère discriminant. La

zone 1 n'est représentée par aucun point. Deux échantillons peuvent être assimilés à la zone 2, mais avec des valeurs de médiane plus basses, entre 15 et 20 microns. La zone 3 est faiblement représentée à l'instar de COU 9901. Des points, étant liés par la valeur du grain moyen, se placent toujours à l'extérieur, du côté des fractions fines. Enfin, la zone 4 est également la mieux représentée, présentant encore toutefois des valeurs se plaçant en dehors, vers les fines. Les points les plus bas de cette carotte, donc les plus fins en granulométrie, se situent à peu près au même niveau que les points les plus fins de COU 9901. Nous les avons regroupés sur COU 9902 grâce au grain moyen. Ils se rassemblent alors en un troisième sous-groupe de la zone 4 (points gris sur la figure III.40), avec des valeurs de grain moyen inférieures ou égales à 15 μm (Φ 6). Cette zone 4, représentative des dynamiques sédimentaires de décantation, devient alors beaucoup plus étendue.

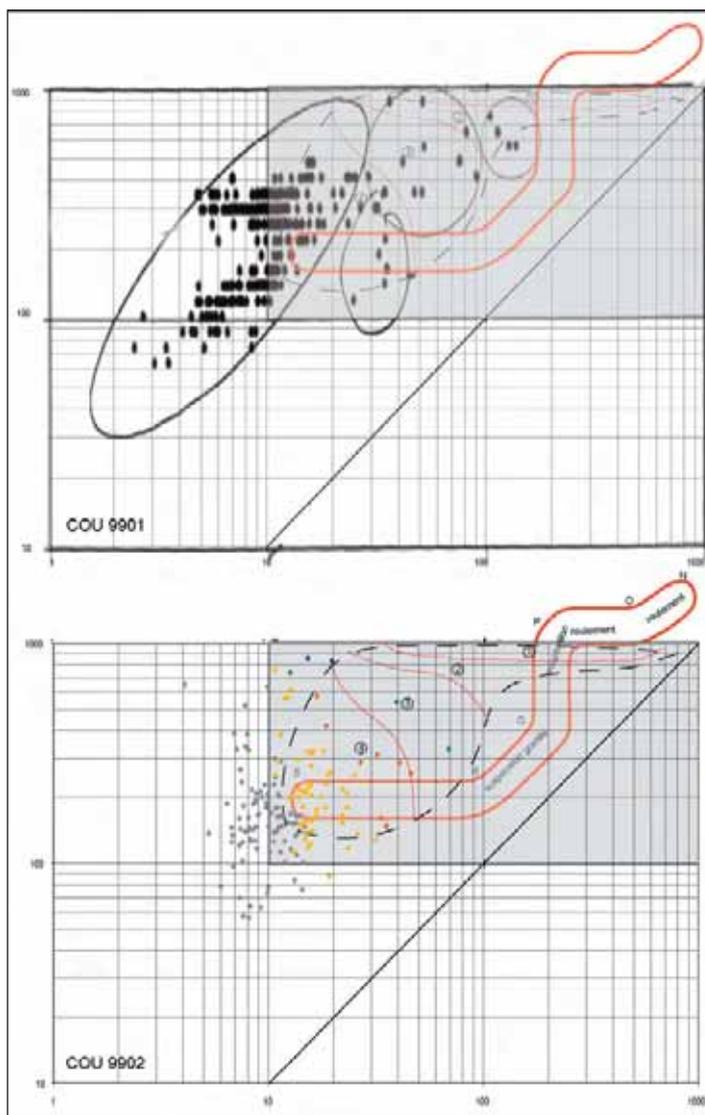


Figure III.40 : Les images C/M du lac de Coufin confrontées au modèle proposé pour le lac de Cathédrale.

Différentes par rapport aux résultats du lac de la Cathédrale, les deux carottes de Coufin révèlent une sédimentation majoritairement fine, avec très peu de niveaux grossiers. Cela est vraisemblablement l'expression d'une dynamique sédimentaire en milieu lacustre globalement plus calme, où la décantation prédomine et pour lequel les sédiments grossiers ont déjà été piégés. La zone Serpentine et le lac de la Cathédrale, en amont de la zone touristique de Coufin, sont en effet des secteurs de piégeage pour la fraction grossière. Les valeurs de C 99, d'une variabilité toujours aussi grande, témoignent d'apports variés et mal triés par les écoulements arrivant au lac.

Les images de Passega et les interprétations, pour chacun des deux lacs, confirment les observations que nous avons déjà faites, à travers la description des carottes et les données granulométriques. Reste à expliquer les deux différences majeures mises en évidence par les images C/M, entre les deux lacs :

- La première est liée au fort décalage vers les fractions fines qui apparaît pour les sédiments du lac de Coufin. D'une manière générale, les sédiments du lac de Coufin sont nettement plus fins que ceux du lac de la Cathédrale. Nous avons déjà constaté cela sur la base des données granulométriques.
- La seconde tient au caractère plus éclaté, plus dispersé des points du lac de Coufin. Cette particularité n'avait pas encore pu être mise en avant. Les images de Passega permettent donc d'apporter une nouvelle source d'informations.

La première différence, le décalage vers les fines, peut s'expliquer en grande partie en considérant la morphologie des salles qui contiennent ces lacs, et qui sont une contrainte sur la dynamique des écoulements. En effet, nous avons vu précédemment (cf. *supra* : Partie III, Chap. I.1) que les salles de la Cathédrale et de Coufin sont très différentes. La première présente des flancs très accidentés et aux pentes fortes au fond desquels le lac s'est formé. A l'échelle de la salle, les écoulements ne sont donc nullement ralentis avant d'arriver au lac, et ce d'autant plus que le parcours est cascading. De ce fait, les particules grossières peuvent être transportées jusqu'au piège lacustre. Dans un piège propice à la décantation, toutes les particules, y compris les particules sableuses, sont donc déposées au niveau du lac. Le dépôt des sédiments de ce lac est donc sous la dépendance de la dynamique de la rivière en amont, elle-même étant fortement liée à la morphologie du réseau de drainage. Pour le lac de Coufin, la morphologie de la salle et de l'amont immédiat du lac est très différente. Il s'agit en effet d'une salle beaucoup plus vaste et aux formes plus douces, où confluent deux rivières souterraines s'écoulant selon une faible pente (Coufin et Serpentine). La très faible pente implique des écoulements plus calmes qui ne prennent en charge les particules grossières qu'en périodes de hautes eaux. En écoulement normal, les grossières se déposent à l'amont, notamment au niveau de la voûte mouillante de Coufin et du lac de la Cathédrale pour Serpentine. Ces deux dispositions morphologiques autour des lacs étudiés sont donc probablement un élément d'explication à cette variation observée dans les images de Passega.

La deuxième différence, exprimée à travers un « étalement » des points sur les images C/M plus ou moins grand, trouve aussi des éléments d'explication dans la comparaison du fonctionnement de chaque lac. Pour le lac de la Cathédrale, les nuages de points des images de Passega sont similaires avec une répartition assez dense. A l'inverse, le rapprochement avec les images du lac de Coufin est moins évident, justement à cause d'une plus grande dispersion des points. On aurait pu s'attendre à des similitudes plus marquées entre les deux lacs, d'autant plus qu'ils sont en connexion hydrologique. Mais leur fonctionnement respectif est différent, et c'est sans doute ce qui ressort dans les images C/M. Ainsi, les images de Passega très homogènes du lac de la Cathédrale relatent, d'une certaine façon la forte cohésion qui existe au niveau des apports de matières ; cohésion qui peut être due au fait que le lac est alimenté par une seule rivière : celle de Chevaline. Pour le lac de Coufin, la sédimentation est différente du fait de la double alimentation de ce lac, par Coufin et par Serpentine.

Appliquée aux lacs de Choranche, l'analyse des sédiments selon la méthode de Passega [1964] a permis de montrer que :

- c'est une méthode qui permet de proposer une « *carte d'identité* » de la sédimentation au sein d'un piège bien identifié. L'utilisation d'un *critère discriminant* bien choisi, ici le grain moyen,

autorise la distinction de différents processus sédimentaires en jeu dans le piège et à l'amont. Les mesures à haute résolution, telles que nous les avons pratiquées, permettent d'accéder à une quantification relative des différents processus sédimentaires identifiés. Nous avons ainsi pu voir que la sédimentation des pièges lacustres étudiés est essentiellement fine (silteuse) et qu'elle n'est perturbée que très ponctuellement par un hydrodynamisme fort produisant des niveaux grossiers surimposés à la sédimentation régulière.

- paradoxalement, c'est aussi un outil d'analyse dont la puissance nuit quelque peu à une reproductibilité aisée et à une caractérisation simple des milieux de sédimentation. Nous avons vu, en effet, qu'on ne peut conclure simplement que les deux lacs ont la même « carte d'identité ». Cela met en évidence le fait que cette méthode doit être utilisée conjointement aux autres moyens d'étude du karst, pour être appliquée raisonnablement. En effet, par notre premier test comparatif entre deux lacs actifs d'un même réseau, nous avons pu constater que la moindre différence de fonctionnement du piège étudié modifie fortement son image. Il est probable que la comparaison de deux lacs parfaitement identiques, du point de vue de leur morphologie, des entrées de matières mais aussi probablement des sorties (problèmes de départ de matières), donne des images de Passega beaucoup plus proches. Cette méthode d'analyse, par la grande variabilité des résultats qu'elle semble pouvoir fournir, est donc une très bonne illustration de la complexité du milieu endokarstique. Cela doit nous inviter à une grande prudence quant à la qualité de la reproductibilité en site actif, et à plus forte raison en site fossile (cf. *infra* : Partie IV, Chap. II). Cette méthode, comme toutes les autres, doit toujours s'appuyer sur une analyse environnementale, replaçant l'objet d'étude dans son contexte.

2. Les outils statistiques multifactoriels : ACP et CAH

Le principe de la méthode a été expliqué plus haut (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.3.c) et les annexes 2 et 3 donnent des exemples de mise en oeuvre. Nous avons souhaité tester ces outils statistiques car ils permettent d'observer les relations entre les différents paramètres considérés. Par rapport aux dynamiques de piégeage sédimentaire, ces analyses peuvent donc apporter des compléments quant à leur part respective dans la sédimentation.

Nous traiterons ici des résultats de ces techniques d'analyses appliquées aux données de granulométrie des six carottes étudiées. N'étant pas en possession des données relatives à la carotte COU 9901 [Blois, 2000], celle-ci n'a pu être traitée par cette méthode. Les principaux résultats sont donnés dans les figures et tableaux ci-dessous, nous invitons le lecteur à se reporter aux annexes 13 à 18 pour consulter la totalité des calculs effectués pour chaque carotte. Avant de mettre en commun les résultats des six carottes, nous faisons un commentaire des résultats pour chacune d'entre elles, en considérant simultanément les Analyses en Composantes Principales et les Classifications Ascendantes Hiérarchiques. Nous détaillerons particulièrement le commentaire de la première carotte, afin que le raisonnement que l'on peut produire sur ce type de traitement apparaisse clairement.

Nous avons appliqué ces traitements statistiques aux données granulométriques subdivisées en 7 grandes classes de taille qui sont : les argiles inférieures à 2 μm , les argiles inférieures à 3,9 μm , les silts, les sables très fins, les sables fins, les sables moyens et les sables grossiers. Ce découpage est toujours basé sur la classification granulométrique de Wentworth ; les 6 valeurs seuils entre ces sept classes sont, en échelle Φ , les niveaux 9, 8, 4, 3, 2 et 1. Les ACP et CAH sur ces classes granulométriques ont

été calculées sur des données centrées et réduites, afin de s'affranchir des problèmes d'échelles pouvant intervenir entre des classes dont les proportions sont très différentes.

- Pour la carotte CAT 0101, localisée au fond du lac de la Cathédrale :

L'ACP, représentée dans le premier plan factoriel (le plus pertinent) montre trois grandes directions principales (figure III.41). Ces directions sont calquées sur les classes granulométriques avec un groupe pour les trois fractions les plus fines (argiles et silts), un groupe pour les deux fractions intermédiaires (sables très fins et fins) et un groupe pour les contributions les plus grossières (sables moyens et grossiers). Ce découpage entre les sept variables donne des informations, résumées grâce aux valeurs de degrés d'indépendance (tableau III.4). En effet, on voit dans ce tableau que les valeurs positives (en vert foncé) correspondent aux sous-groupes cités. Ainsi, les trois fractions fines sont liées par des degrés d'indépendance faibles, autrement dit de forts degrés de dépendance. Dans le vocabulaire propre à l'ACP, on dit que ces trois classes sont donc en conjonction, ce qui traduit une « attraction » mutuelle ; graphiquement, elles sont séparées par un angle inférieur à 90° . En d'autres termes, et pour se rapprocher plus concrètement du milieu d'étude, on peut en déduire que la sédimentation de ces trois fractions fines est soumise au même fonctionnement. Le même commentaire peut se faire pour les deux autres groupes. La conjonction entre sables très fins et fins est également vérifiée numériquement avec une valeur de 0,863 ; il en va de même entre sables moyens et sables grossiers avec une forte dépendance, à 0,857.

Le degré d'indépendance peut également être évalué entre ces trois groupes, et les relations entre les différentes fractions peuvent donc encore être approfondies. On peut alors regarder les angles formés entre les groupes observés deux à deux. On voit que la fraction fine et la fraction intermédiaire sont assez distantes, avec des angles supérieurs à 90° . Numériquement, cela correspond à des degrés d'indépendance négatifs, pour lesquels on parle d'opposition ou de « répulsion », il y a donc une dépendance entre ces deux fractions. Pour la sédimentation de ce lac, cela traduit un fonctionnement en opposition, en déphasage : la sédimentation de la fraction fine empêche celle de la fraction intermédiaire, et inversement. Leur coexistence simultanée est impossible. Toutefois, ce comportement peut être encore précisé grâce à la valeur absolue du degré d'indépendance. En l'occurrence, elle n'est pas très élevée, oscillant entre 0,2 et 0,6. Le fonctionnement opposé de ces deux fractions n'est donc pas très fortement marqué. Le même type de comportement peut être observé entre la fraction fine et la fraction grossière. Compte tenu des valeurs (absolues) du degré d'indépendance, l'opposition entre ces deux fractions apparaît plus marquée. Il y a donc une opposition de fonctionnement plus nette entre la fraction fine et la fraction grossière. Quand l'une des deux se produit, l'autre est impossible, cela est d'ailleurs tout à fait logique. Ce rapport entre la fraction la plus fine et la fraction la plus grossière est toujours le même, c'est la base des lois de la sédimentation. Les fractions grossière et intermédiaire sont plus intéressantes à comparer. Graphiquement, les quatre classes granulométriques correspondantes sont séparées par des angles aigus mais relativement ouverts.

Sur le tableau des degrés d'indépendance, on peut individualiser deux comportements. Le premier est une conjonction faiblement exprimée entre sables fins et sables moyens, ces deux classes pouvant donc avoir, occasionnellement, des comportements similaires. Le second se rapproche plus de ce que l'on appelle une quadrature. En effet, entre sables très fins et sables moyens, sables très fins et sables grossiers, et sables fins et grossiers, les angles sur le graphique se rapprochent de 90° et les degrés d'indépendance sont proches de zéro. Dans ce dernier cas de figure, la quadrature signifie une totale

indépendance entre les variables considérées. Ici, l'indépendance n'est pas parfaite, mais on peut tout de même déduire que les influences exercées entre ces classes granulométriques dans leur sédimentation sont infimes.

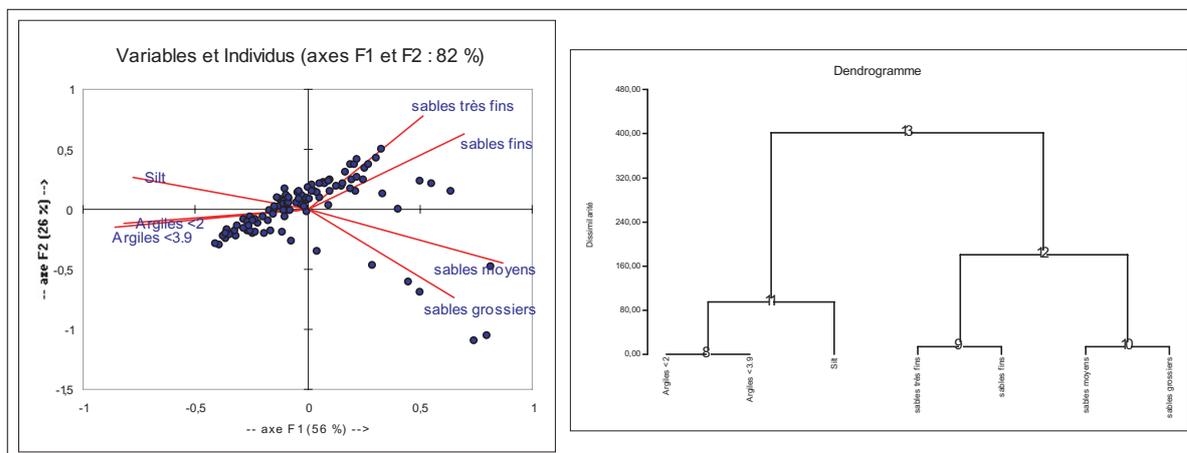


Figure III.41 : L'ACP de CAT 0101 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles							
cat 01	Argiles <2	Argiles <3.9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1						
Argiles <3.9	0,989	1				conjonction	
Silt	0,284	0,342	1			conjonction > quadrature (0,2) opposition > quadrature (-0,2)	
sables très fins	-0,375	-0,435	-0,341	1		opposition	
sables fins	-0,499	-0,559	-0,521	0,863	1		
sables moyens	-0,587	-0,620	-0,857	0,098	0,371	1	
sables grossiers	-0,433	-0,436	-0,713	-0,184	-0,031	0,857	1

Tableau III.4 : Données numériques de l'ACP sur CAT 0101 – Indépendance des variables.

La disposition des points de mesures sur ces différents axes a aussi son importance. On voit que l'essentiel des points est concentré sur une direction, qui se place majoritairement entre les fractions fine et intermédiaire. Seuls quelques points « glissent » vers les axes de la fraction grossière. Cela n'est pas un résultat surprenant, la cohérence avec les tailles de grains représentées dans cette carotte et la rareté des niveaux grossiers apparaît encore ici, simplement sous une représentation différente. En effet, les six points qui se détachent du nuage principal sont les niveaux les plus grossiers (en comparant avec les valeurs du grain moyen) que l'on trouve dans cette carotte.

Enfin, la CAH qui a été faite conjointement confirme en tous points les regroupements et les différences de comportement observées sur la base de l'ACP. Le dendrogramme de la figure III.41 indique le rang de rapprochement entre deux variables ou entre deux groupes de variables. Plus ce rang est faible, plus le lien entre les deux variables concernées est fort. Cela peut aussi être exprimé en fonction de la dissimilarité, qui apparaît ici en ordonnée. En bonne logique, plus la valeur de dissimilarité est faible, plus les similitudes, les liens entre deux variables sont forts. Ainsi, on constate que les deux classes d'argiles sont les plus intimement liées. Viennent ensuite les sables fins et très fins, puis les sables moyens et grossiers. A l'exception près de la fraction silteuse, on retrouve donc ici les trois grands groupes granulométriques bien individualisés, tels que l'ACP avait permis de les définir. Le lien le plus fort qui suit est justement celui qui rattache les argiles aux silts. Le cinquième niveau de hiérarchisation regroupe tous les sables. Enfin, le dernier lien, qui est donc le plus faible, le moins significatif, rassemble les trois classes les plus fines aux quatre classes les plus grossières.

L'ACP permet d'identifier deux grands comportements sédimentaires pour cette carotte. Le premier permet la sédimentation fine, sous un hydrodynamisme calme qui se place en très forte opposition avec le second, qui produit les dépôts grossiers. Plus concrètement, cela suggère que les apports de sédiments au lac sont probablement très contrastés, passant assez brutalement d'une sédimentation fine (hydrodynamisme calme, fonctionnement normal) à une sédimentation grossière (hydrodynamisme fort, évènements exceptionnels). Par un commentaire plus rapide des autres ACP et CAH, nous allons pouvoir étudier les variations de ces comportements sédimentaires sur les autres secteurs du lac.

- Pour la carotte CAT 0102, localisée au sommet de la banquette du lac de la Cathédrale :

Le premier plan factoriel de l'ACP montre les mêmes regroupements de classes granulométriques (figure III.42). On observe donc les trois directions principales, encore plus clairement séparées les unes des autres, la fraction intermédiaire (sables très fins et fins) étant plus distante de la fraction grossière que sur CAT 0101. Les valeurs de degré d'indépendance (tableau III.5) permettent d'affiner ces écarts.

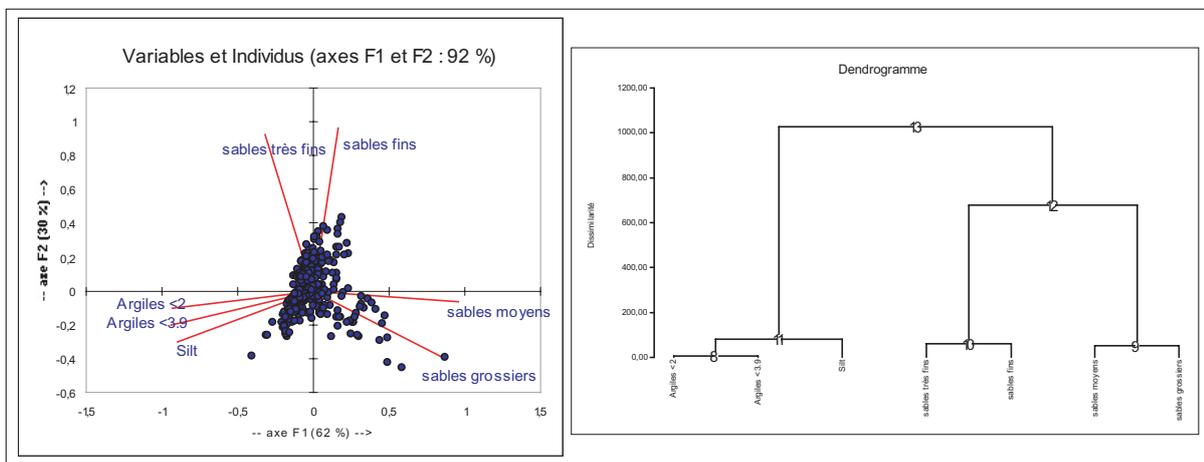


Figure III.42 : L'ACP de CAT 0102 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles							
cat 02	Argiles <2	Argiles <3.9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1						conjonction
Argiles <3.9	0,988	1					conjonction > quadrature (0,2)
Silt	0,752	0,814	1				opposition > quadrature (-0,2)
sables très fins	0,163	0,073	0,035	1			opposition
sables fins	-0,189	-0,295	-0,476	0,785	1		
sables moyens	-0,814	-0,831	-0,878	-0,404	0,122	1	
sables grossiers	-0,731	-0,706	-0,713	-0,624	-0,243	0,816	1

Tableau III.5 : Données numériques de l'ACP sur CAT 0102 – Indépendance des variables.

Argiles et silts sont trois classes en conjonction fortement marquée, il en va de même pour les sables très fins et fins et pour les sables moyens et grossiers. Les oppositions normales entre fractions fines et grossières se retrouvent également pour cette carotte, la plus forte valeur étant entre les sables moyens et les silts (-0,878). En ce qui concerne les deux composantes de la fraction intermédiaire, leur indépendance est également plus prononcée, en particulier pour les sables très fins en regard de la fraction fine. Par rapport à la fraction grossière, les sables fins et très fins conservent des degrés d'indépendance exprimant l'opposition, mais avec des valeurs se rapprochant parfois de la quadrature, notamment entre les sables fins et moyens. Là encore, la disposition des points de mesures sur les

axes suit la même logique que pour CAT 0101. Les points sont concentrés autour des cinq classes granulométriques les plus fines, avec seulement quelques points indiquant les passées grossières qui sont décalés vers les axes correspondants.

La CAH est également peu différente. Les trois rangs les plus forts sont les mêmes avec les deux classes argileuses, toujours en premier, les deux classes les plus grossières occupent ici la seconde place, et les deux classes intermédiaires tiennent le troisième rang. L'individualisation de la sédimentation en fonction de ces trois grandes divisions granulométriques apparaît donc toujours aussi nettement. Les derniers raccordements hiérarchiques se font dans le même ordre que pour CAT 0101, mais sont d'une plus grande dissimilarité (valeurs en ordonnées du dendrogramme) ce qui accentue encore la distinction des trois principaux sous-groupes qu'on retrouve dans l'ACP. C'est tout d'abord le rang 4 qui rattache les silts aux argiles, puis on observe le regroupement des quatre classes sableuses entre elles avant le lien final, le plus faible, entre fraction fine d'une part et fractions intermédiaire et grossière d'autre part.

Ces deux traitements sur CAT 0102 donnent des résultats très proches de ce qui a été dit pour CAT 0101. La différence majeure réside dans la fraction intermédiaire, dont le comportement tend vers plus d'indépendance, aussi bien vis-à-vis de la fraction fine que de la fraction grossière. L'hypothèse de deux grands fonctionnements (antinomiques par nature) entre sédimentation fine et sédimentation grossière est ici plus affirmée, et donne une précision supplémentaire quant à l'indépendance et le faible rôle de la fraction intermédiaire. En effet, celle-ci semble signifier que les phases transitionnelles entre hydrodynamismes fort et faible sont extrêmement réduites, et que les modifications d'écoulement et de sédimentation s'opèrent encore plus brutalement qu'au fond du lac. Cela est d'ailleurs logique, on peut en effet supposer que la profondeur joue alors un rôle tampon : les fortes variations d'écoulement ont un impact limité sur le lac grâce au poids statique de l'eau

- Pour la carotte CAT 0103, localisée au sommet de la banquette du lac de la Cathédrale :

Cette carotte, voisine immédiate de CAT 0102, donne des résultats sur l'ACP et la CAH tout à fait comparables (figure III.43 ; tableau III.6).

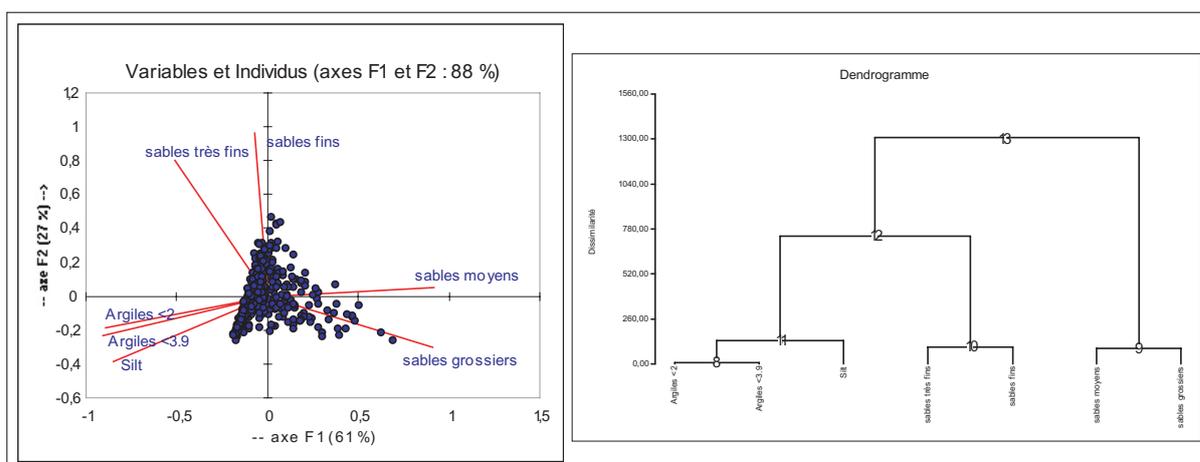


Figure III.43 : L'ACP de CAT 0103 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.

L'ACP, observée dans le premier plan factoriel, ne montre aucune différence majeure. L'ensemble des axes qui représentent les sept fractions granulométriques a une disposition un peu différente, un peu décalée dans le plan factoriel, mais présente des angles identiques à ceux de CAT 0102. Les relations

entre les fractions granulométriques sont donc strictement identiques. Il en va de même de l'orientation des points sur les axes, toujours prononcée en faveur des fractions les plus fines avec un glissement de quelques points vers les sables moyens et grossiers.

degré d'indépendance des variables entre elles							
cat 03	Argiles <2	Argiles <3.9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1						
Argiles <3.9	0,983	1				conjonction	
Silt	0,691	0,738	1			conjonction > quadrature (0,2)	
sables très fins	0,252	0,204	0,160	1		opposition > quadrature (-0,2)	
sables fins	-0,058	-0,097	-0,357	0,734	1	opposition	
sables moyens	-0,719	-0,754	-0,862	-0,496	0,027		1
sables grossiers	-0,733	-0,730	-0,703	-0,669	-0,363	0,750	1

Tableau III.6 : Données numériques de l'ACP sur CAT 0103 – Indépendance des variables.

Seul le dendrogramme de la CAH présente une différence qui mérite d'être soulignée. Les quatre premiers nœuds de la hiérarchisation sont les mêmes que sur CAT 0102, avec des valeurs de dissimilarité très faibles et rapprochées. Les deux derniers rangs de la hiérarchisation sont beaucoup moins forts, avec une dissimilarité élevée, mais surtout, ils sont inversés par rapport à CAT 0102. Les sables fins et très fins sont raccordés à la fraction fine, puis ce sont les cinq classes fines qui sont finalement rattachées aux sables moyens et grossiers.

- Pour la carotte CAT 9901, localisée dans la banquette du lac de la Cathédrale :

Avec cette carotte, on se place à un troisième endroit du remplissage sédimentaire du lac de la Cathédrale, dans la banquette ennoyée. Le premier plan factoriel de l'ACP montre une inversion de la disposition des axes des fractions fine et grossière (figure III.44). Mais une telle disposition, n'est pas significative en soit, elle repose simplement sur des problèmes propres à ce mode de représentation des données, liés aux règles de projection dans le plan factoriel considéré [Bouroche et Saporta, 2002]. La disposition des axes entre eux est toujours caractérisée par les deux principaux groupes que sont la fraction grossière (sables moyens et grossiers) et la fraction fine (argiles et silts). La fraction intermédiaire est moins bien identifiée que sur les autres ACP, les deux classes constitutives montrant des axes plus distants. Ainsi, les sables très fins n'indiquent plus aucune situation de quadrature, étant plutôt en conjonction avec les fines et en opposition avec les sables moyens et grossiers (tableau III.7). Seuls les sables fins présentent une tendance à la quadrature et donc une situation d'indépendance.

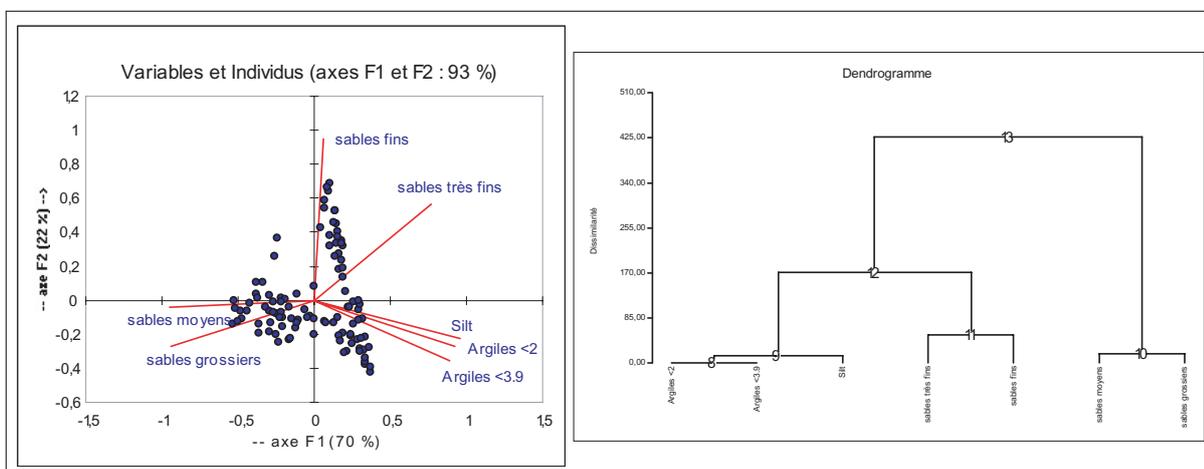


Figure III.44 : L'ACP de CAT 9901 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles							
cat 91	Argiles <2	Argiles <3.9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1						
Argiles <3.9	0,993	1					
Silt	0,907	0,890	1				
sables très fins	0,487	0,404	0,641	1			
sables fins	-0,123	-0,195	-0,200	0,492	1		
sables moyens	-0,801	-0,760	-0,919	-0,825	-0,030	1	
sables grossiers	-0,810	-0,757	-0,841	-0,842	-0,334	0,837	1

Tableau III.7 : Données numériques de l'ACP sur CAT 9901 – Indépendance des variables.

La disposition des points garde une organisation semblable aux précédentes. Les points correspondant aux fractions grossières sont plus nombreux, ce qui est en concordance avec les observations faites sur la taille moyenne des particules.

Enfin, la CAH donne un dendrogramme aux valeurs de dissimilarité moins dispersées, avec quelques différences. Les deux classes argileuses sont toujours le premier nœud de la hiérarchisation, mais les silts y sont immédiatement raccrochés, ce que nous n'avions pas observé sur les autres carottes. Le rang le plus fort qui vient ensuite est le regroupement des sables moyens et grossiers, puis la paire des sables très fins et fins. Comme pour CAT 0103, le nœud qui survient ensuite rassemble d'abord les cinq classes les plus fines avant d'y joindre les sables moyens et grossiers.

Pour cette carotte, la fraction intermédiaire, et en particulier la composante des sables très fins semble montrer un comportement plus proche de la sédimentation fine, donc fonctionnant sous un hydrodynamisme plutôt calme. La sédimentation grossière s'en trouve d'autant plus différenciée, et la transition entre ces deux comportements hydrodynamiques paraît encore plus limitée, voire inexistante.

- Pour la carotte CAT 9902, localisée dans la banquette du lac de la Cathédrale :

Dans ce cas, l'ACP indique que la fraction intermédiaire, constituée par les sables très fins et fins ne montre plus aucune situation de quadrature (figure III.45) et ces deux classes granulométriques sont ralliées aux composantes de la fraction fine (tableau III.8). Il ne reste qu'une très légère tendance à la quadrature entre les silts et les sables fins. Toutes les autres classes fines sont en conjonction. Quant aux points, ils présentent toujours la même organisation, étant clairement concentrés autour d'une ligne joignant les cinq classes fines. Ainsi, l'opposition avec les sables moyens et grossiers apparaît valable vis-à-vis de toutes les autres classes granulométriques. Il n'y a donc plus, pour cette carotte, que deux fonctionnements sédimentaires opposés qui sont clairement décrits. A ce niveau du lac, tant pour CAT 9901 que pour CAT 9902, on peut donc dire que l'hypothèse d'un comportement transitionnel est complètement évacuée.

La CAH confirme ce fait, avec un regroupement des cinq classes granulométriques les plus fines selon des valeurs de dissimilarité plutôt basses, ce qui correspond bien à un fonctionnement fortement lié de ces cinq classes. Les sables moyens et grossiers, par ailleurs très fortement liés entre eux (rang 2), ne sont raccordés aux autres classes qu'avec une valeur de dissimilarité très élevée.

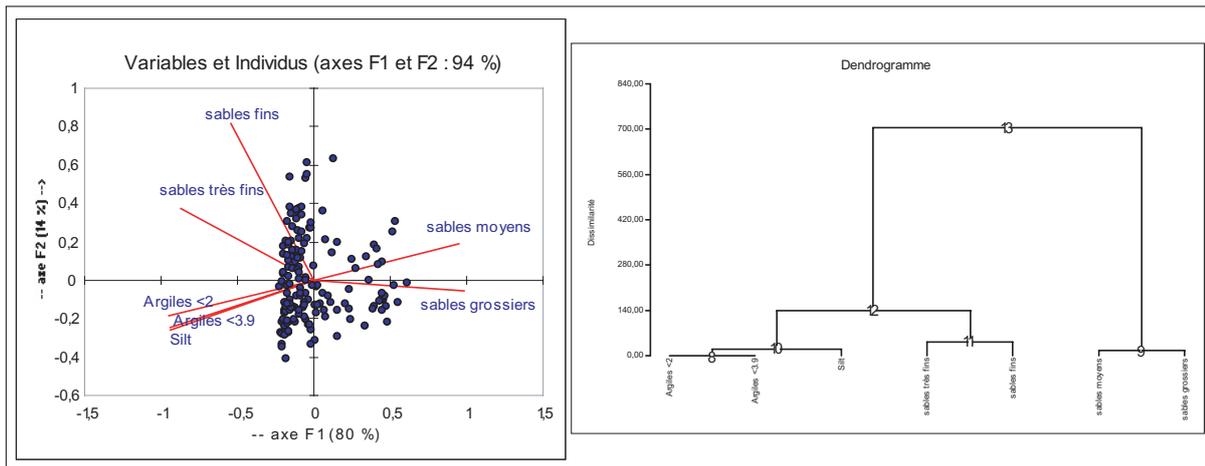


Figure III.45 : L'ACP de CAT 9902 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles							
cat 92	Argiles <2	Argiles <3.9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1					conjonction	
Argiles <3.9	0,996	1				conjonction > quadrature (0,2)	
Silt	0,898	0,901	1			opposition > quadrature (-0,2)	
sables très fins	0,704	0,663	0,749	1		opposition	
sables fins	0,400	0,345	0,281	0,726	1		
sables moyens	-0,896	-0,894	-0,963	-0,807	-0,339	1	
sables grossiers	-0,915	-0,897	-0,930	-0,860	-0,582	0,891	1

Tableau III.8 : Données numériques de l'ACP sur CAT 9902 – Indépendance des variables.

La dichotomie entre une sédimentation de fines sous hydrodynamisme calme et une sédimentation grossière sous hydrodynamisme fort, sans phases transitoires entre les deux, semble donc particulièrement vérifiée à ce niveau du remplissage du lac de la Cathédrale, à savoir sous une tranche d'eau de 2 à 3 mètres. Cela est révélateur d'un fonctionnement hydrologique qu'on pourrait qualifier de binaire. Le large panel granulométrique regroupé sous l'intitulé « sédimentation fine » doit toutefois être expliqué. Ici, c'est l'hydrodynamisme de la rivière qui intervient pour expliquer la présence de ces particules sableuses dans un contexte de décantation. En effet, il est probable que la rivière, dans ces écoulements les plus fréquents, apporte au lac des particules de taille variée allant des argiles aux sables fins. Le lac, par son grand volume d'eau, assure l'inertie nécessaire aux dépôts argileux, mais piège par la même occasion les particules sableuses acheminées par la rivière.

- Pour la carotte COU 9902, localisée dans la banquette du lac de Coufin :

Cette carotte donne des résultats assez différents. Les cas de conjonction sont beaucoup plus rares, se cantonnant aux doublets qui apparaissent dans toutes les autres carottes (figure III.46). On n'a ainsi que quatre cas de conjonction entre les deux classes argileuses, entre sables fins et très fins, entre sables grossiers et moyens, et un cas plus original entre sables fins et moyens (tableau III.9).

Par contre, les situations d'indépendance entre variables sont plus nombreuses. Ici, les deux classes argileuses sont en quadrature avec les deux classes les plus grossières. C'est la seule carotte où ces deux fractions sont caractérisées par une forte tendance à l'indépendance, preuve incontestable d'apports multiples, ici les deux rivières de Coufin et Serpentine. Les sables très fins montrent également des signes de quadrature avec les deux fractions grossières, alors que les sables fins sont en indépendance

seulement avec les sables grossiers. Il est également intéressant de noter que les silts sont en opposition, plus ou moins marquée, avec les six autres classes granulométriques utilisées pour l'ACP. En ce qui concerne la disposition des points de mesures, il n'y a pas de subdivisions clairement identifiables, ni d'organisation préférentielle des points sur l'ACP. Seuls les points correspondants aux niveaux grossiers sont toujours localisés plus à l'écart, vers les axes des sables. La CAH de la carotte COU 9902 se distingue également de tous les autres dendrogrammes commentés jusqu'ici. Dans ce dendrogramme, la place des silts et leur rang de raccordement sont une autre traduction de « l'indépendance » de cette fraction sédimentaire dans le lac de Coufin. Mais compte tenu de la particularité de ce lac, avec ces deux sources de matière interférant l'une sur l'autre, il faut être très prudent car ce qui est représenté comme une indépendance des variables au niveau des analyses multifactorielles ne l'est peut-être pas en réalité.

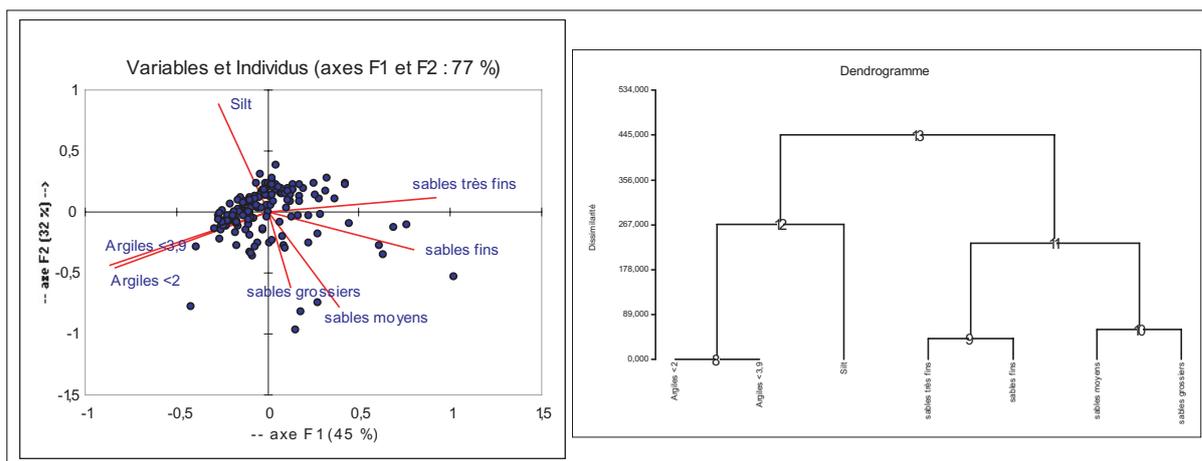


Figure III.46 : L'ACP de COU 9902 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles							
	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1						
Argiles <3,9	0,991	1					
Silt	-0,295	-0,250	1				
sables très fins	-0,729	-0,768	-0,272	1			
sables fins	-0,403	-0,439	-0,621	0,738	1		
sables moyens	-0,066	-0,084	-0,635	0,131	0,421	1	
sables grossiers	-0,010	-0,023	-0,365	-0,067	-0,044	0,624	1

Tableau III.9 : Données numériques de l'ACP sur COU 9902 – Indépendance des variables.

Comme nous l'avons constaté sur l'image C/M de cette carotte, la présence de deux sources de matières, matérialisées par les deux rivières de Coufin et Serpentine, semble apporter son lot de perturbations, en donnant une image de la sédimentation beaucoup plus complexe. L'indépendance existant entre les deux classes les plus grossières et les deux classes les plus fines est probablement la marque de deux fonctionnements différents, mais que l'on peut difficilement attribuer à chacune des rivières. En effet, nous avons vu (cf. *supra* : Partie III, Chap. I.2.a) que le système de Choranche et en particulier le réseau Coufin-Chevaline sont un seul et même système de drainage, ayant le même impluvium. En contexte de crue, on ne peut imaginer que les deux rivières aient une réponse très différente. Elle peut, certes, être décalée dans le temps, mais le pic de crue se produira pour les deux rivières. Nous pensons donc que l'indépendance des deux types de particules qui est relatée ici par l'ACP est plutôt un « brouillage » de l'opposition de phase qui a été mise en évidence dans le lac de la Cathédrale. Ce brouillage du fonctionnement sédimentaire est lié au fait que le lac de Coufin possède deux rivières responsables des apports de matière, avec des temps de réponse différents ; les apports de

Serpentine étant tamponnés par le lac de la Cathédrale. De plus, l'anthropisation du secteur de Coufin et/ou l'existence éventuelle d'autres secteurs de piégeage à l'amont du lac peuvent également contribuer au brouillage de la sédimentation au niveau du lac terminal de Coufin.

3. L'apport du diagramme de Hjulström

Afin de compléter la description des comportements sédimentaires dans les deux pièges lacustres, et par rapport aux rivières souterraines qui les alimentent, nous proposons ici un dernier outil sédimentologique, basé sur le diagramme de Hjulström [1939]. Il permet, en fonction de la taille des particules, d'évaluer une vitesse moyenne des écoulements (figure III.47).

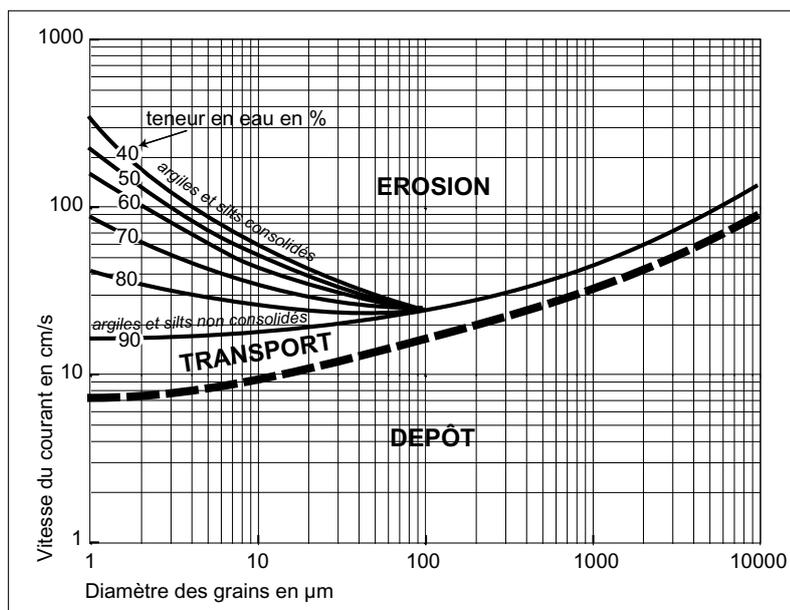


Figure III.47 : Le diagramme de Hjulström (d'après Chamley, 1987).

Nous avons utilisé ce diagramme pour chaque unité sédimentaire décrite lors de la description visuelle des carottes (annexes 7 à 12). Il permet de donner une idée sur les écoulements responsables d'un dépôt ; c'est une donnée purement indicative, mais qui permet de cadrer globalement les contextes hydrodynamiques des différentes unités stratigraphiques. Le choix d'utiliser ce diagramme, graphiquement, pour les unités sédimentaires de chaque carotte nous est apparu satisfaisant grâce aux images de Passega, qui fournissent également des informations sur les dynamiques de dépôt. En effet, lors de la réalisation de ces images, nous les avons testées en utilisant le découpage en unités sédimentaires (cf. *supra* : Partie III, Chap. II.1) comme critère discriminant (figure III.48). Ces images permettent de montrer que le découpage des unités sédimentaires est assez fiable, isolant toujours les niveaux de crue et/ou de hautes eaux dans une seule et même unité. Seule la carotte CAT 9902 répond moins bien à ce découpage, mais on a vu lors de sa description qu'elle est la seule à avoir une unité sédimentaire intermédiaire de composition globalement fine. Dans tous les autres cas, on vérifie grâce aux théories de Passega que les unités sédimentaires définies comme différentes répondent bien à des dynamiques distinctes, ou encore que deux unités considérées comme équivalentes en granulométrie donnent des dynamiques de dépôt comparables.

Les vitesses d'écoulements correspondant à la mise en place de ces unités sédimentaires ont pu être estimées grâce au diagramme de Hjulström, et sont rassemblées dans le tableau III.10.

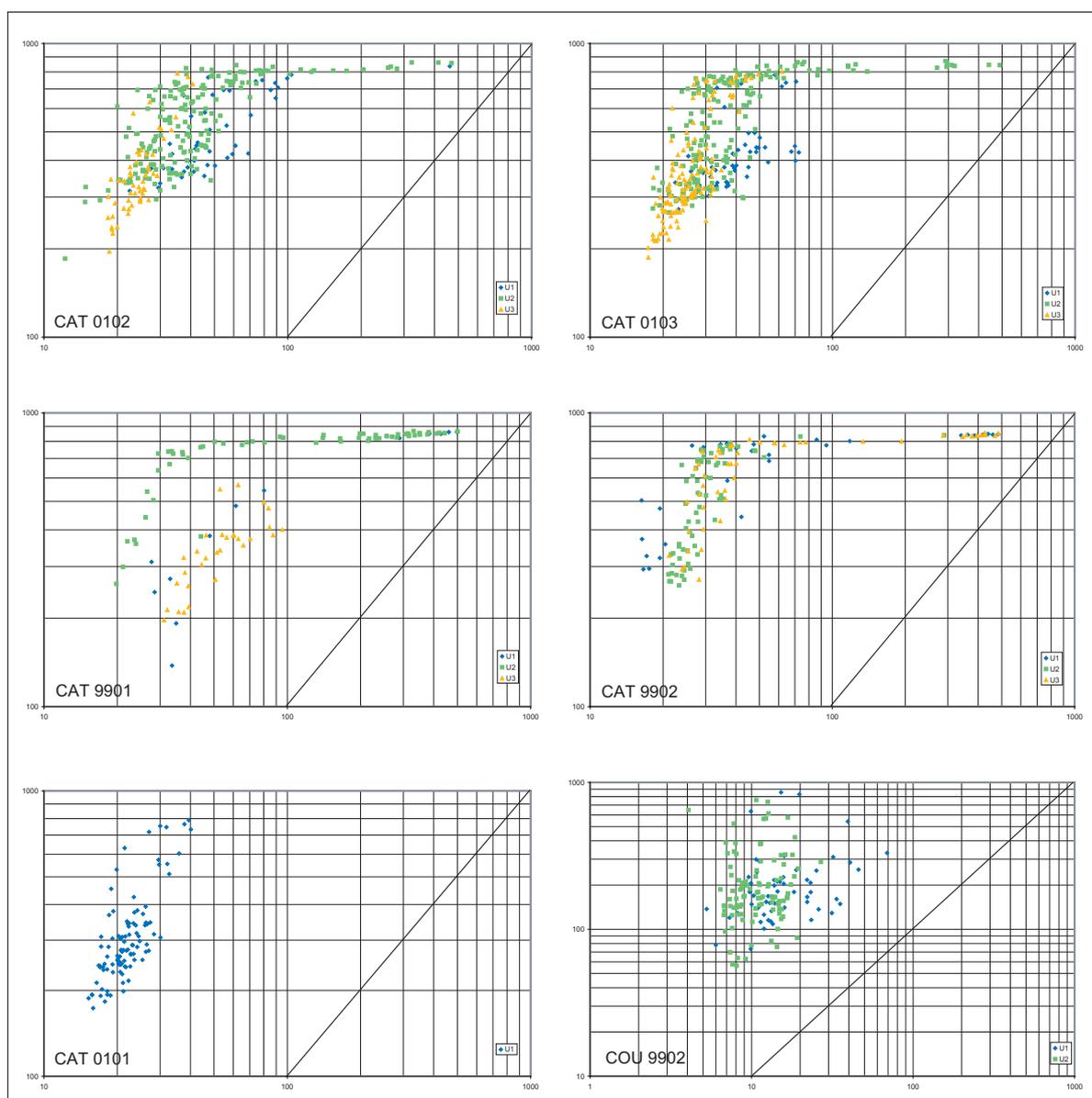


Figure III.48 : Les images C/M avec distinction des différentes unités sédimentaires définies pour chaque carotte prélevées à Choranche.

En nous basant sur les valeurs de mode et du percentile le plus grossier, une fourchette de vitesses a donc pu être donnée pour chaque unité. On se rend compte que les vitesses calculées graphiquement donnent des vitesses minimales et maximales très proches les unes des autres, qu'il s'agisse d'unités à granulométrie grossière comme fine. La distinction entre ces différentes unités subsiste, mais elle est faible, les différences de vitesses d'écoulement se faisant au centième près.

Si on considère ces résultats par rapport à tous ceux donnés par les images de Passega et les analyses multifactorielles, il semble que ces valeurs de vitesses tendent à confirmer un fait : la sédimentation des deux lacs, et en particulier celui de la Cathédrale, présente un fonctionnement binaire, avec une sédimentation fine prépondérante et une sédimentation grossière beaucoup plus ponctuelle. Les deux types de dépôts, et les écoulements en cause se succèdent assez brutalement, sans phase transitionnelle marquée. Les vitesses données ici par le diagramme de Hjulström (tableau III.10), en étant très similaires, précisent la prépondérance de la sédimentation fine sur la sédimentation grossière. En effet, des vitesses restant en moyenne très faibles pour les unités sédimentaires contenant

les niveaux grossiers attestent à la fois de la rareté des épisodes de crue et de la faible intensité des épisodes de hautes eaux.

Catégorie	Unité séd.	Mode moyen en μm	Vitesse min en m/s	Q99 moyen en μm	Vitesse max en m/s
CAT 0101					
	Unité séd. 1	47,8	0,14	324,7	0,23
CAT 0102					
	Unité séd. 1	133,9	0,19	505,1	0,3
	Unité séd. 2	150,5	0,2	563,5	0,3
	Unité séd. 3	47,5	0,14	374	0,26
CAT 0103					
	Unité séd. 1	116,3	0,18	418,6	0,27
	Unité séd. 2	178,6	0,2	569,3	0,3
	Unité séd. 3	67,7	0,15	396,3	0,27
CAT 9901					
	Unité séd. 1	286,6	0,22	546,1	0,3
	Unité séd. 2	396,5	0,27	751,4	0,34
	Unité séd. 3	86,7	0,16	347,1	0,24
CAT 9902					
	Unité séd. 1	342,6	0,24	668,2	0,31
	Unité séd. 2	84,5	0,16	527,3	0,3
	Unité séd. 3	258,8	0,21	665,1	0,31
COU 9902					
	Unité séd. 1	60,1	0,15	222,1	0,21
	Unité séd. 2	20,3	0,11	217,9	0,21
COU 9901					
(cf. Blois, 2000 corrigé)	Unité séd. 1	183,8	0,18	555,7	0,3
	Unité séd. 2	83	0,16	351,5	0,24

Tableau III.10 : Les vitesses d'écoulement estimées pour chaque unité sédimentaire des carottes de Choranche.

Méthode/ Traitement	Intérêts	Limites	Apports dans le cas des lacs de Choranche
Granulométrie	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt	Pas d'indication sur la composition sauf décarbonation	Identification des classes granulométriques et de leurs contributions respectives, rôle des écoulements, part et origine de la fraction carbonatée, nature et sources des autres minéraux en présence (usure des minéraux)
Observations microscope et loupe	Sources de matières par rapport à la géologie locale et au bassin versant > Spatialisation	Indicateurs qualitatifs de la composition du sédiment	
Diffraction des argiles	Origine de ces composantes (état des sols, conditions géologiques et/ou climatiques)		
Images de Passegga et autres croisements	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt Qualité du sédiment (tri, classement...)	Indicateurs strictement granulométriques et plutôt qualitatifs	Identification des mécanismes de transport et des hydrodynamismes par Passegga, relations entre ces dynamiques grâce aux ACP, premiers éléments sur le fonctionnement du piège lacustre.
Statistiques multifactorielles			

Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 2.

3. Le signal sédimentaire à travers d'autres proxy et leurs traitements

Dans ce troisième volet, des données complémentaires à l'approche granulométrique ont été recherchées. Il s'agit des niveaux de gris, de la susceptibilité magnétique et de la colorimétrie. Les techniques d'acquisition de ces différentes données ont été expliquées et détaillées, ainsi que leur intérêt pour notre recherche (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2 et I.4). Nous rappelons que ces données ont été acquises avec la plus haute résolution technique possible, et que le pas d'échantillonnage a été maintenu à 3 mm ; les niveaux de gris étant la seule exception avec un pas, dépendant de l'acquisition des images, nettement supérieur en qualité. Seule la carotte COU 9901 n'a pu être analysée selon ces méthodes, l'échantillon étudié par W. Blois [2000] n'étant plus disponible.

Ce troisième groupe d'analyses sera articulé en trois points. Le premier portera sur la description des données issues des trois méthodes indiquées. Une étude plus poussée des niveaux grossiers sera ensuite proposée, s'appuyant sur une mise en commun des données granulométriques avec les différents signaux sédimentaires présentés ici. Le troisième point portera sur les traitements du signal, et notamment les décompositions en ondelettes.

a) Lecture comparative des différents signaux

1. Pertinence des différents paramètres

La première analyse que nous traitons ici est une ACP sur ces différentes données, et par rapport à quelques indices granulométriques, afin de voir leur degré de dépendance mutuelle. En effet, l'ACP va nous permettre d'évaluer le degré de correspondance ou d'indépendance entre ces nouveaux paramètres et la granulométrie. Nous pourrions ainsi faire une première identification de ces paramètres, de la nature des informations vers lesquelles ils renvoient et de leur complémentarité.

Compte tenu des fortes similitudes qui sont ressorties des ACP sur la granulométrie des cinq carottes du lac de la Cathédrale, nous n'avons fait ici qu'une seule ACP, avec sa CAH associée, sur CAT 0103, et une autre sur la carotte du lac de Coufin COU 9902. Le but de cette analyse multifactorielle étant de montrer les similitudes ou antinomies éventuelles entre ces différents signaux, il n'était pas nécessaire de reproduire le traitement sur les autres carottes. Les variables soumises à cette analyse sont au nombre de 8 : la médiane, le grain moyen, les argiles, les silts et les sables pour la granulométrie, et la susceptibilité, le paramètre L* (mesure de la composante « clarté ») de la spectrorimétrie, et les niveaux de gris (ramenés par interpolation linéaire à une valeur tous les trois millimètres).

Pour CAT 0103, le premier plan factoriel de l'ACP (figure III.49) montre quatre directions principales :

- la fraction fine (argiles et silts),
- la fraction grossière (sables) et les deux indices de médiane et grain moyen,
- les deux paramètres de susceptibilité et de colorimétrie,
- les niveaux de gris.

Il y a donc des phénomènes de conjonction à l'intérieur de chacun de ces quatre grands regroupements. On se rend compte que les trois nouveaux paramètres sont en quadrature assez nette avec les données granulométriques. Cette situation sur l'ACP signifie que les trois nouveaux paramètres

apportent des données complémentaires à la granulométrie. La pertinence de ces paramètres est ainsi avérée. Si la susceptibilité magnétique et la colorimétrie semblent liées (ce qui veut dire ici que ces deux signaux donneront une réponse comparable au niveau du sédiment), il n'en va pas de même des niveaux de gris. Ici, les valeurs numériques de corrélation affinent la lecture graphique de l'ACP. En effet, le premier plan factoriel semble indiquer un comportement des niveaux de gris opposé à la susceptibilité et à la colorimétrie. Mais grâce aux données numériques, on peut vérifier qu'il n'en est rien et qu'il s'agit en fait d'une autre quadrature. Le premier plan factoriel est donc, pour les niveaux de gris, une projection trompeuse. Les niveaux de gris sont à nouveau un critère indépendant de tous les autres, qui offre sa propre signature de l'évolution sédimentaire.

La classification hiérarchique affine les indications fournies par l'ACP (figure III.49). Les premiers rangs de regroupement concernent les critères granulométriques, fortement dépendants (faibles valeurs de dissimilarité). Un seuil de dissimilarité est franchi et le rang 4 associe susceptibilité et colorimétrie. Les niveaux de gris sont ensuite raccordés au pôle des données granulométriques grossières, et le rang 6 rassemble la fraction fine et le doublet susceptibilité-colorimétrie. Le dendrogramme précise donc pour les niveaux de gris une tendance plus prononcée vers les indices granulométriques grossiers, alors que les deux autres signaux tendent plus volontiers vers des similitudes avec la fraction fine.

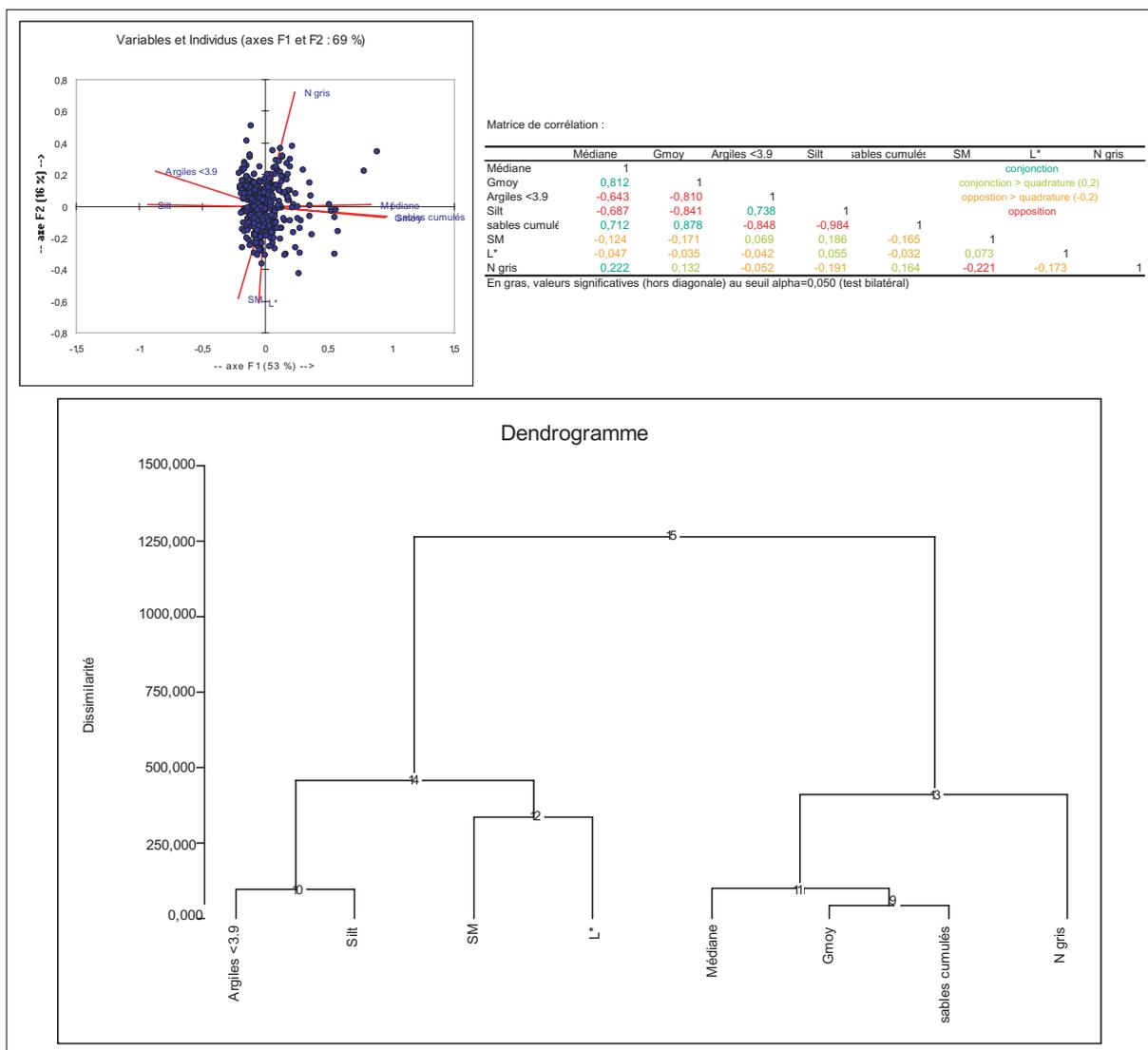


Figure III.49 : Pertinence des différentes mesures effectuées, testée à travers les analyses multifactorielles – Cas du lac de la Cathédrale (CAT 0103).

Le cas de la carotte COU 9902 du lac de Coufin, apparaît assez différent (figure III.50). Quatre directions principales apparaissent sur l'ACP, différentes du lac de la Cathédrale :

- les sables cumulés, la médiane et le grain moyen,
- la susceptibilité et les argiles,
- les niveaux de gris et la colorimétrie
- les silts, restent isolés.

En se reportant à la matrice des corrélations, on remarque que médiane, grain moyen, sables, niveaux de gris et colorimétrie se recourent (conjonction). Ces cinq critères peuvent être considérés comme formant un seul pôle. Concrètement, ces cinq paramètres peuvent être considérés comme des signaux similaires ; ils sont traceurs des mêmes modifications survenant dans la sédimentation. Par rapport au lac de la Cathédrale, le rapprochement avec les évolutions granulométriques, en l'occurrence les sables, est donc plus fort.

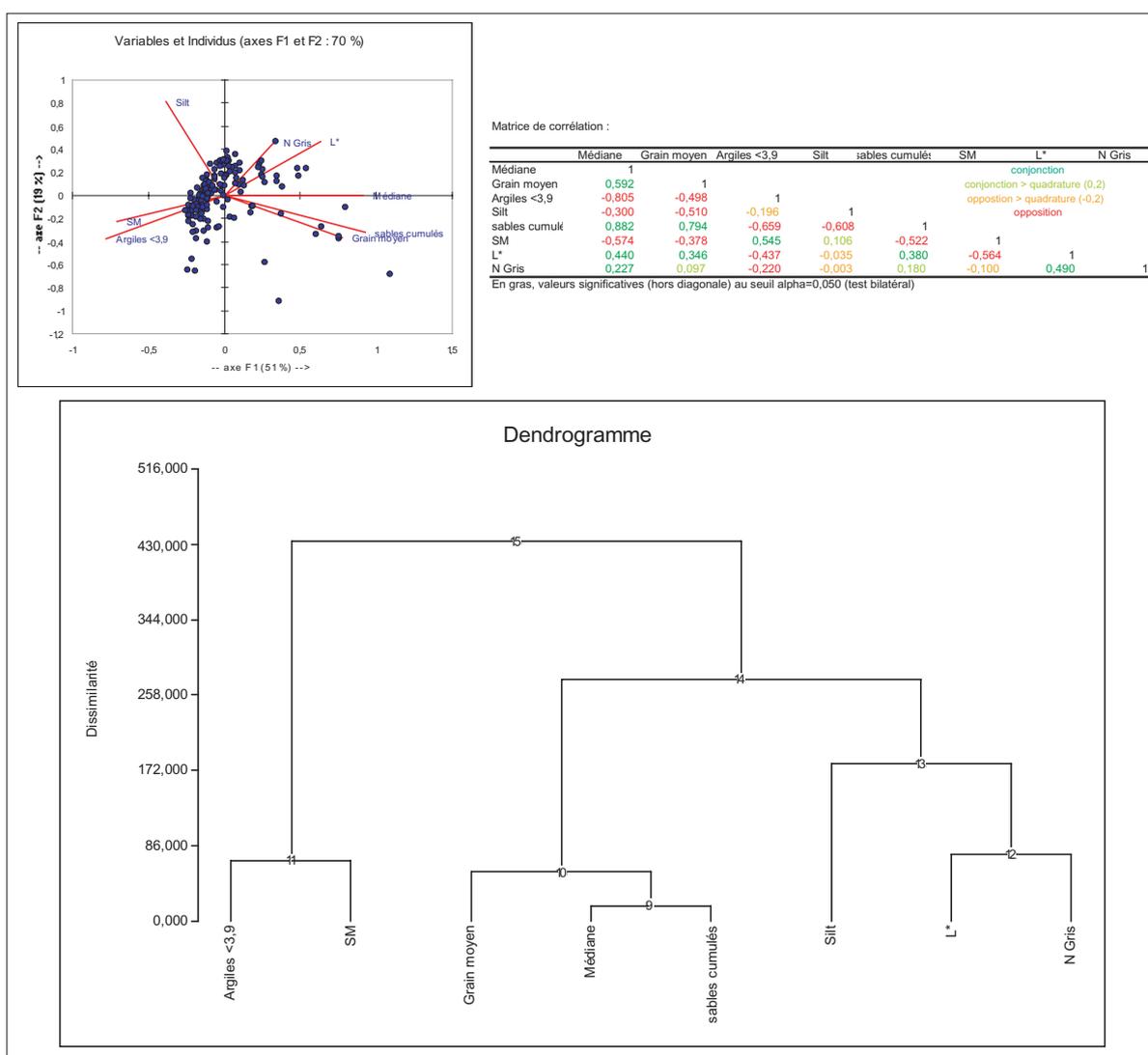


Figure III.50 : Pertinence des différentes mesures effectuées, testée à travers les analyses multifactorielles – Cas du lac de Coufin (COU 9902).

Le dendrogramme (figure III.50) conforte ces indications. Les deux premiers rangs regroupent toujours les sables, la médiane et le grain moyen. Mais dès le rang 3, c'est la susceptibilité qui est rattachée aux argiles. Vient ensuite le doublet niveaux de gris-colorimétrie, qui est avec une forte dissimilarité,

associée aux silts. Le comportement à part de la fraction silteuse, exceptée son opposition avec le pôle grain moyen-médiane-sables, est relativement conforme à ce qui a été observé sur les ACP strictement granulométriques commentées dans le point précédent. Seule son indépendance maintenue également vis-à-vis des trois nouveaux signaux est une information supplémentaire.

Pour synthétiser la pertinence de ces trois nouveaux signaux « non granulométriques », on peut comparer les CAH des deux lacs qui ne montrent qu'une seule différence majeure. En effet, dans les deux cas, les tendances des niveaux de gris et de la susceptibilité magnétique sont les mêmes. Les niveaux de gris (évolution vers le blanc) sont plutôt à rapporter aux fractions granulométriques grossières, alors que la susceptibilité montre plus d'affinités avec la fraction fine. Par contre, le paramètre L^* de la spectrométrie a une signature différente dans les deux lacs. Pour la Cathédrale, son signal est plutôt corrélé aux fractions fines alors que pour les sédiments du lac de Coufin, c'est avec les fractions grossières qu'il présente le plus de cohérence. La comparaison de ces différents paramètres *via* les ACP et les CAH a donc permis de mettre en évidence leur caractère complémentaire, et donc l'intérêt d'en faire une étude croisée. Mais cela montre aussi que selon le lac, la pertinence de chaque paramètre vis-à-vis des autres peut être différente.

2. Comparaisons et qualité de la réponse de chaque signal

L'observation de l'évolution de ces différents signaux en les comparant à l'évolution du grain moyen amène à faire ressortir plusieurs constats, et ouvre quelques discussions (figure III.51).

Les niveaux de gris apparaissent assez mal corrélés aux variations du grain moyen, et aux deux autres signaux également. L'amplitude des variations de ce signal est homogène entre toutes les carottes, et les niveaux grossiers bien caractérisés par le grain moyen sont rarement marqués par la courbe des niveaux de gris. Seuls deux exemples sont remarquables : sur CAT 9902 au niveau du pic de la mesure 25 où grain moyen et niveaux de gris sont en phase, donnant la même signature à la passée grossière ; et sur COU 9902, à la mesure 47 où grain moyen et niveaux de gris ont également un signal fort, mais cette fois en opposition. Comme les analyses multifactorielles l'ont montré, les variations de niveaux de gris sont donc bien un signal « à part », qui donne une information originale sur l'archivage sédimentaire. Le caractère unique de cette signature laisse penser que l'information transmise par les niveaux de gris est probablement assez complexe, intégrant plusieurs paramètres contrôlant la sédimentation. Les analyses par ondelettes devraient nous permettre d'éclaircir ce point.

Avec des valeurs toujours comprises entre 10 et 50 SI ($1 \text{ SI} = 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), qui traduisent une assez grande amplitude, les variations de la susceptibilité magnétique (SM) se prêtent beaucoup mieux à une lecture comparée avec le grain moyen (figure III.51). Sur les cinq carottes du lac de la Cathédrale, la SM donne des évolutions comparables, mais la plupart du temps en opposition de phase avec le grain moyen, que ce soit sur des niveaux grossiers ou sur la sédimentation fine. Les exemples sont nombreux, nous citons trois cas sur la carotte CAT 0103 : à la mesure 235, le grain moyen est bas, il est en opposition de phase avec un pic de SM. Par contre, à la mesure 320, l'augmentation du grain moyen est en correspondance avec une nette baisse de la SM. Cela est encore plus clair au niveau de la mesure 79, toujours sur CAT 0103, où la fraction grossière clairement indiquée par le grain moyen est marquée par une chute brutale de la SM. La susceptibilité devrait donc être un signal intéressant pour nous, en tant que traceur des particules les plus grossières. Les « creux » de SM nous donnent donc les niveaux grossiers, mais permettent de préciser aussi que le contenu en sédiments des passées grossières

est nettement moins riche en minéraux ferromagnétisables. Cela peut être, notamment, une autre expression de la contribution des carbonates. Nous avons en effet montré que celle-ci était très faible (le plus souvent inférieure à 10 %), mais essentiellement cantonnée aux niveaux les plus grossiers. Aussi, il est possible que la diminution de la SM sur les niveaux grossiers soit imputable à la seule augmentation de la fraction carbonatée, les autres apports restant identiques. Mais nous avons vu que la dynamique sédimentaire est binaire. L'évolution de la susceptibilité magnétique permet alors de dire que les apports en minéraux ferromagnétisables peuvent être quasiment interrompus lors des événements hydrologiques de type crue. La chute de SM mesurée dans ces niveaux serait alors la double expression des apports carbonatés et de l'arrêt des apports fins et plus riches en minéraux ferromagnétisables. Cette règle semble toutefois subir quelques exceptions. Ainsi, on remarque sur la carotte CAT 9901, entre les mesures 40 et 48, que grain moyen et SM sont plutôt en corrélation. Un autre contre-exemple est remarquable sur CAT 0101, à la mesure 72, où grain moyen et SM sont parfaitement en phase, sur un niveau de crue. La carotte du lac de Coufin donne les mêmes signes comportementaux de susceptibilité magnétique, à savoir une anti-corrélation assez nette avec les variations du grain moyen (figure III.51, mesures 57, 68 et 133). Mais elle présente aussi une particularité, avec des valeurs de SM négatives sur les 9 derniers centimètres de la carotte (sédiments les plus récents). Ces valeurs négatives caractérisent un phénomène appelé diamagnétisme, qui marque le plus souvent une forte présence de quartz, de carbonates, ou bien encore de matières organiques ou d'eau. Dans le cas présent, il est assez difficile de trancher entre ces quatre possibilités. En effet, la présence de matières organiques ne peut expliquer à elle seule ces valeurs très basses de SM. Lors de l'étude de la carotte, nous n'avons pas constaté une abondance des matières organiques dans ces niveaux. Par contre, la dominance des quartz et des carbonates apparaît plus plausible, appuyée par deux analyses présentées antérieurement qui sont la décarbonatation et les observations à la loupe binoculaire. La décarbonatation [Blois, 2000] donne pour ce lac des résultats semblables au lac de la Cathédrale, avec des contributions carbonatées faibles et limitées aux niveaux grossiers. Or, les 9 derniers centimètres de sédiments sont ceux qui rassemblent le plus de passées grossières. De plus, l'observation à la loupe des sédiments de la mesure 26 (pic grossier, niveau particulièrement blanchâtre) montre la prépondérance des quartz, et surtout des carbonates (figure III.36). La SM négative serait donc plutôt due à des apports particulièrement forts en minéraux non magnétiques, plutôt qu'à la teneur en eau ou en matières organiques.

Enfin, le paramètre L^* de la spectrophotométrie est plus difficile à appréhender, avec de faibles variations, d'une amplitude de 10 à 15 unités tout au plus. Toutes ces valeurs, qui relatent la clarté du sédiment, sont donc assez homogènes, et il n'y a pas de différences majeures dans ce signal, selon les carottes et selon que la sédimentation est fine ou grossière. Dans la colorimétrie, le paramètre de clarté est donc relativement constant, pour l'ensemble des remplissages détritiques (figure III.51). Toutefois, les faibles variations ont des degrés de corrélation très différents selon les carottes. Ainsi, l'essentiel de la fraction fine ne montre pas de lien évident, les valeurs de L^* ne variant que très peu. Seuls les principaux niveaux grossiers indiqués par le grain moyen semblent presque toujours corrélés négativement avec le L^* . On peut l'observer pour la carotte CAT 0102, au niveau des mesures 179 et 213. Mais sur cette même carotte, la mesure 98 fait exception. On ne peut pas parler, pour ce paramètre spectrophotométrique, d'anti-corrélation aussi nette qu'entre la SM et le grain moyen. Le repérage des niveaux grossiers qu'il permet de faire n'est pas infaillible, et des pics parfois très importants, et marqués par les autres paramètres ne laissent aucune signature remarquable au niveau du L^* (cas de la mesure 76 sur CAT 0102, et de la mesure 81 sur COU 9902). La clarté des particules sédimentées ne semble donc pas être un critère très discriminant dans l'archivage sédimentaire.

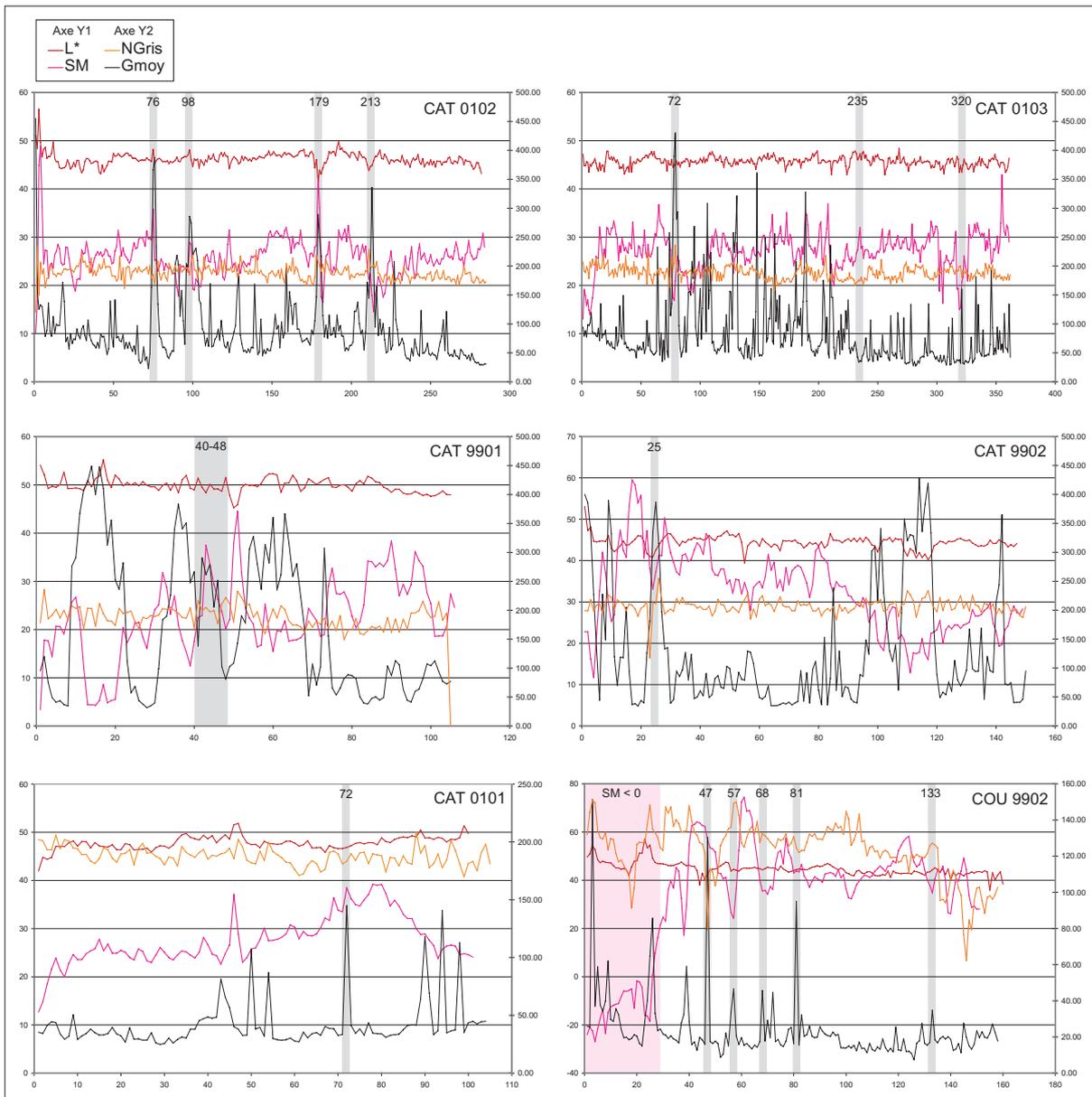


Figure III.51 : Le grain moyen et les trois signaux sédimentaires « non granulométriques » des carottes de Choranche – Evolution comparée.

La colorimétrie est une donnée composée de trois paramètres. Le paramètre L^* , dont nous venons de parler, peut avoir deux expressions, soit en « sci » soit en « sce », qui correspondent respectivement à une mesure de la clarté incluant et excluant le rayonnement spéculaire (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2.d). Lors des mesures de spectrorimétrie, nous avons choisi de faire une double mesure du L^* , de sorte que nous avons la valeur en sci et la valeur en sce. La comparaison de ces deux mesures s'impose donc, afin de déterminer le rôle du rayonnement spéculaire, et de voir s'il est un paramètre discriminant sur les sédiments endokarstiques. Nous avons procédé à des corrélations croisées de ces deux valeurs, sur la carotte CAT 0103 pour le lac de la Cathédrale (figure III.52), et sur COU 9902 pour le lac de Coufin (figure III.53). Ces deux figures donnent en bleu, les courbes brutes du L^* sci et du L^* sce, et en vert, la courbe de corrélation.

Dans les deux cas, il apparaît que la corrélation entre les deux courbes est excellente, avoisinant les 95 %, pour une fenêtre de 10 valeurs. D'autres essais de corrélations ont été réalisés, en faisant varier la largeur de la fenêtre de données entre 5 et 30. Ils ont donné des résultats équivalents, toujours avec

une corrélation significative autour de 95 %. Cette très forte cohérence entre les deux types de mesures atteste du rôle minime de la réfraction spéculaire sur ces sédiments. Cette composante spéculaire, qui correspond au critère de brillance dans la mesure de la clarté des sédiments, semble donc négligeable.

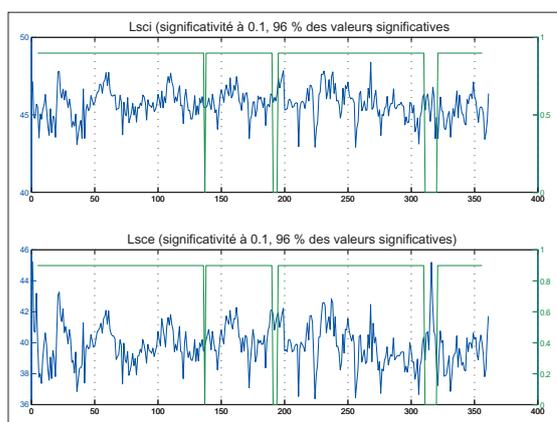


Figure III.52 : Corrélation croisée sur les deux valeurs du L* de CAT 0103 – Lac de la Cathédrale.

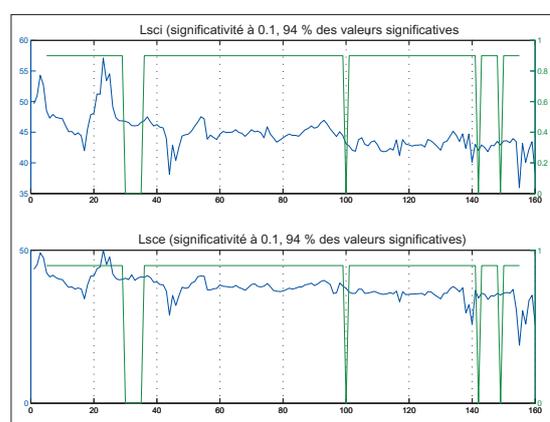


Figure III.53 : Corrélation croisée sur les deux valeurs du L* de COU 9902 – Lac de Coufin.

Enfin, la spectroradiométrie informe aussi sur la « couleur » (combinaison teinte/saturation) des sédiments. Nous avons mesuré celle-ci à travers deux paramètres qui sont a^* et b^* . Ces deux critères caractérisent, avec le L^* , un espace de couleurs (CIELAB) basé sur la variation entre vert et rouge (axe a^*) et entre bleu et jaune (axe b^*). Nous avons observé ces deux paramètres, afin d'évaluer les variations de couleur du sédiment, et d'estimer la valeur de cette donnée (figure III.54). Sur le graphe ci-dessous figurent les paramètres a^* et b^* croisés pour chaque carotte. Les droites de régression et les équations correspondantes sont également données.

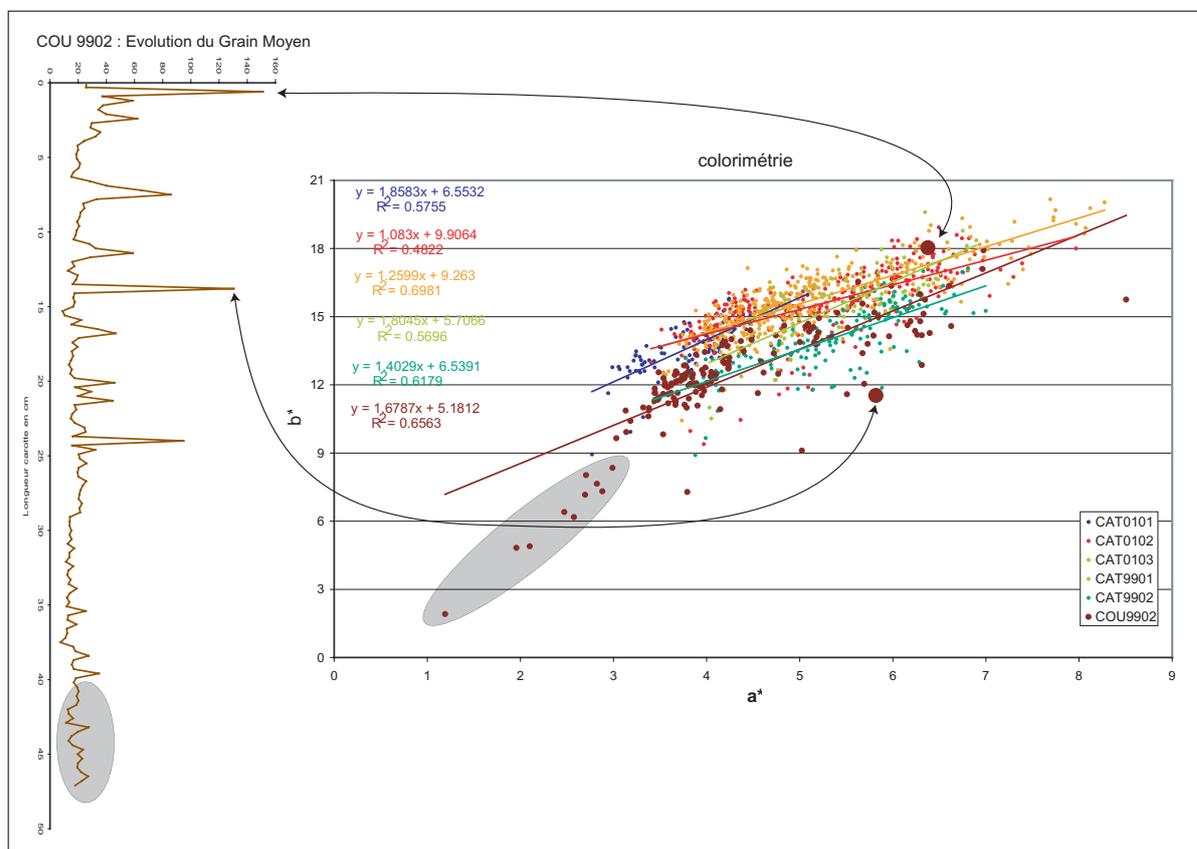


Figure III.54 : La colorimétrie des carottes de Choranche.

Il apparaît que les points de mesures sont étroitement regroupés sur les mêmes valeurs de a^* (entre 3 et 7) et de b^* (entre 12 et 18). Les droites de régression et leurs équations confirment d'ailleurs cela, avec des valeurs très proches. Alors que tous les autres traitements expliqués jusqu'ici montraient des différences assez nettes entre les sédiments du lac de la Cathédrale et ceux du lac de Coufin, sur ces données de colorimétrie, même la carotte COU 9902 est très ressemblante aux autres. Plus en détail, chaque carotte montre un nuage de points dont le pourtour est assez dispersé, les valeurs moyennes du coefficient de régression R^2 s'en ressentent. Il se trouve que ces mesures distantes du nuage de point central de chaque carotte correspondent en partie aux niveaux grossiers. Mais outre les valeurs minimales et maximales du paramètre a^* , les événements hydrologiques ne sont pas clairement caractérisés par ces deux données colorimétriques, et des valeurs isolées peuvent aussi bien renvoyer à une sédimentation assez fine. Ainsi, la carotte COU 9902 montre les données les plus dispersées des six carottes traitées. Sur la figure III.54, on peut identifier deux points particuliers qui correspondent aux deux passées grossières du sommet de la carotte. D'une dynamique probablement équivalente, la colorimétrie de ces deux points est tout de même assez différente. Mais comme nous l'avons dit, les points isolés ne sont pas systématiquement liés à des épisodes importants de la sédimentation. Toujours sur l'exemple de COU 9902, les points entourés sont en fait une partie des mesures du fond de la carotte, qui est le produit d'une sédimentation fine. Ces variations de couleurs ne sont donc pas un paramètre très riche en informations pour nous. En les replaçant dans l'espace colorimétrique complet de a^* et b^* , on se rend bien compte à quel point les variations sont extrêmement faibles sur les sédiments des deux lacs, en dehors de quelques exceptions (figure III.55).

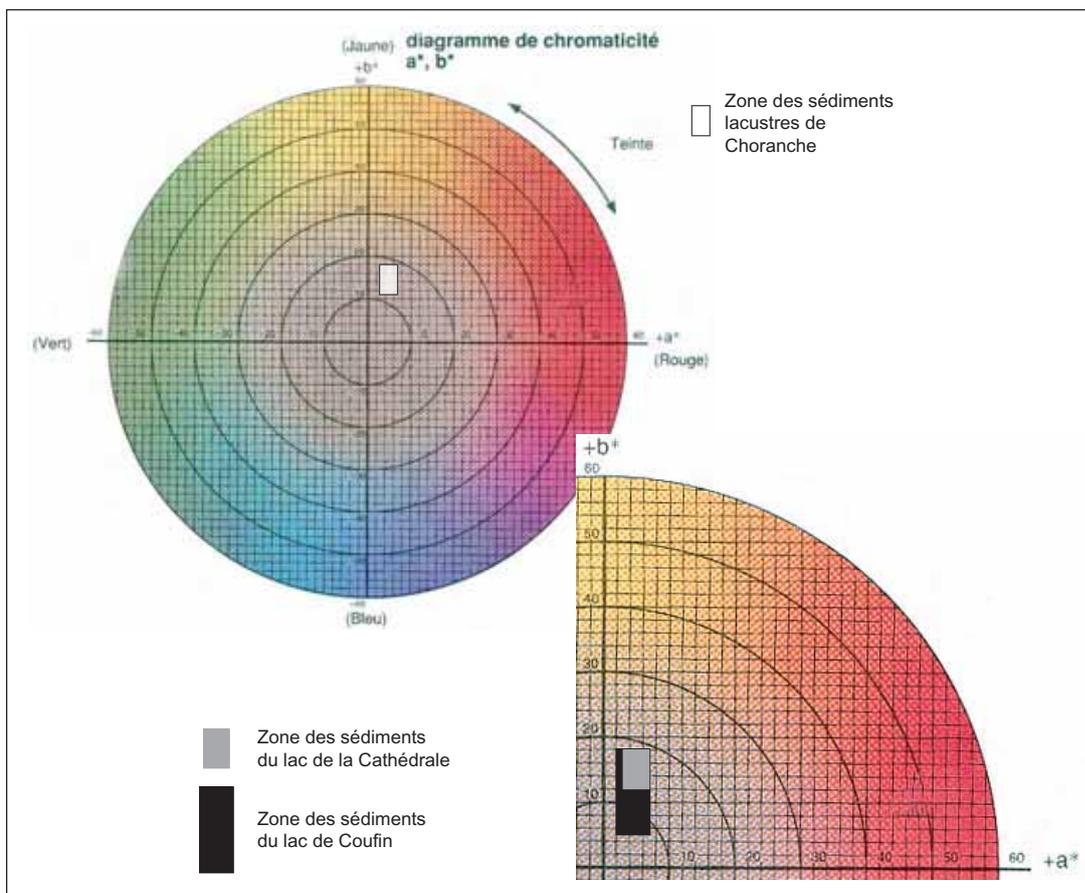


Figure III.55 : Localisation des carottes de Choranche dans l'espace colorimétrique a^*/b^* du spectrocolorimètre utilisé.

Deux informations ressortent de cette étude colorimétrique des sédiments de Choranche :

- Compte tenu des très faibles variations de couleurs, on peut considérer que les apports de

particules sédimentaires vers les deux lacs sont au moins de même nature. Une bonne partie des sources de matière régulières seraient donc identiques, et localisées dans des parties amont du système karstique commun aux deux lacs.

- La relative hétérogénéité des paramètres de couleur serait révélatrice des événements hydrologiques qui sont intervenus tant au niveau de l'énergie des écoulements qu'au niveau de la remobilisation et du parcours des particules dans le réseau.

3. corrélations croisées

Pour clore ce volet sur la comparaison des différents signaux, nous commenterons des corrélations croisées, entre différentes carottes et entre différents paramètres d'une même carotte. En complément des ACP, qui donnent une information plutôt qualitative sur la correspondance entre des variables, nous verrons ici plus quantitativement dans quelle mesure les différents signaux sont complémentaires.

Toutes les corrélations présentées ici ont été calculées selon les mêmes critères, afin que des comparaisons valables puissent se faire. Nous avons donc systématiquement utilisé une fenêtre de corrélation de 10 données. D'autres fenêtres, entre 5 et 30 valeurs ont été testées, mais donnaient des résultats trop hétérogènes. Le risque d'erreur choisi est de 10 %, là encore, parce qu'il nous est apparu, au fil des tests, comme le plus représentatif des données. Les valeurs significatives des corrélations ont donc été triées selon ces deux critères, et en utilisant la table de Bravais-Pearson (annexe 6), pour déterminer le seuil des valeurs significatives. Ainsi, dans les corrélations présentées, toute valeur de la courbe de corrélation supérieure à 0,4973 en valeur absolue est considérée comme significative (avec $\gamma=10$, largeur de la fenêtre de données et $\alpha=0,10$ risque d'erreur). Les corrélations peuvent ainsi être représentées en courbes lissées, ce qui en améliore la lisibilité. Sur les différents doublets de graphes présentés, on retrouvera donc en bleu les deux courbes brutes soumises à la corrélation, et en vert la courbe de corrélation simplifiée, centrée sur zéro (pas de corrélation), et lissée à +1 (phasage) ou -1 (déphasage) si la corrélation est significative, selon les critères donnés par la table de Bravais-Pearson. Les corrélations effectuées s'organisent en deux groupes :

- Le premier porte sur des corrélations entre signaux identiques considérés sur CAT 0102 et CAT 0103. Ces deux carottes ayant été prélevées très près l'une de l'autre dans la banquette du lac de la Cathédrale, il nous a paru intéressant de comparer leurs réponses sédimentaires. Nous avons donc opéré cinq corrélations croisées sur les données suivantes : grain moyen (Gmoy), paramètre colorimétrique L^* (Lum), médiane (Med), susceptibilité magnétique (SM) et niveaux de gris (Ngris).

- Le deuxième groupe de corrélations réunit des croisements de données de 6 types différents, effectués pour chacune des 6 carottes étudiées. Ces six types de corrélation différents sont : entre médiane et SM (type A), entre grain moyen et L^* (type B), entre L^* et SM (type C), entre médiane et grain moyen (type D), entre niveaux de gris et SM (type E) et entre médiane et niveaux de gris (type F). Les résultats de ces calculs de corrélations sont regroupés dans le tableau III.11, qui donne les pourcentages de valeurs significatives et l'allure globale de la courbe de corrélation. Au fur et à mesure de la présentation de ces résultats, un exemple graphique (courbes brutes en bleu et synthèse corrélatrice en vert) sera associé afin d'appuyer le commentaire. Pour ne pas noyer le discours, la totalité des résultats graphiques est placée en annexe (annexes 19 à 25).

Corrélations entre CAT 0102 et CAT 0103						
		% des valeurs	corrélation			
Grains moyens		20	positive			
L*		21	indifférenciée			
Médianes		17	positive			
SM		36	positive			
Ngris		12	indifférenciée			

Données comparées		CAT 0101		CAT 0102		CAT 0103	
		% des valeurs	corrélation	% des valeurs	corrélation	% des valeurs	corrélation
Médiane/SM	A	23	négative	27	positive	22	négative
Grain moy/L*	B	10	négative	21	positive	12	négative
SM/L*	C	25	positive	28	positive	20	indifférenciée
Médiane/Grain moy	D	100	positive	99	positive	99	positive
Ngris/SM	E	8	négative	11	positive	9	négative
Médiane/Ngris	F	7	positive	12	indifférenciée	15	positive

Données comparées		CAT 9901		CAT 9902		COU 9902	
		% des valeurs	corrélation	% des valeurs	corrélation	% des valeurs	corrélation
Médiane/SM	A	25	négative	37	négative	39	négative
Grain moy/L*	B	30	positive	29	négative	15	négative
SM/L*	C	17	négative	30	positive	39	négative
Médiane/Grain moy	D	100	positive	100	positive	78	positive
Ngris/SM	E	9	positive	6	négative	37	négative
Médiane/Ngris	F	16	positive	15	positive	27	indifférenciée

Valeurs significatives données selon la table des coefficients de Bravais-Pearson (annexe 6) pour 10 degrés de liberté (largeur de la fenêtre de données) et un risque d'erreur fixé à 10 %.

Tableau III.11 : Tableau récapitulatif des valeurs significatives des différentes corrélations croisées calculées à partir des données des carottes de Choranche.

Malgré la proximité des échantillons CAT 0102 et CAT 0103, les pourcentages de valeurs significatives apparaissent assez faibles, compris entre 12 et 36 %. De ces cinq corrélations croisées, seules trois donnent une courbe corrélative à dominante positive, les deux autres cas, L* et Ngris sont beaucoup plus variables, et montrent presque autant de corrélations négatives que positives (figure III.56). Ces faibles valeurs de corrélations sont assez inattendues, d'autant plus que les courbes brutes sont au premier coup d'œil, plutôt semblables dans la plupart des cas exposés ici. Cela doit trouver une explication dans la géométrie des couches de sédiments, et dans la position des carottes non pas entre elles, mais par rapport à la source des particules sédimentaires. En effet, CAT 0102 est légèrement plus proche de la rivière que CAT 0103. Cette disposition produit un décalage « altitudinal » inévitable sur des dépôts synchrones, c'est sans doute ce décalage spatial, même s'il est probablement assez réduit ici, qui est exprimé à travers des corrélations assez faibles. Ici, la précision de notre pas d'échantillonnage, de 3 mm, est encore une fois un atout. En effet, ce pas nous permet d'estimer que le décalage des dépôts entre les deux carottes est supérieur à 3 mm. Un pas d'échantillonnage plus large ne nous aurait peut-être pas permis de déceler ce décalage.

Par contre, le fait que ces corrélations ne soient pas systématiquement positives est plus troublant. Seul le grain moyen et la médiane donnent des corrélations essentiellement positives, ce qui semble assez naturel et logique, ces deux évolutions étant à l'évidence liées. Mais la corrélation de la SM, même si ce sont les corrélations positives qui dominent, est déjà beaucoup plus mitigée. Les variations de corrélations sont encore plus fortes pour le L* et les niveaux de gris, avec presque autant de pics négatifs que de pics positifs. Pour expliquer ces différences, il faut ajouter au phénomène du décalage spatial la réponse spécifique qui est donnée par chaque signal étudié et qui a été expliquée

grâce aux analyses multifactorielles. Le décalage des niveaux sédimentaires produit alors pour ces signaux particuliers des corrélations brouillées qu'il est difficile d'interpréter. Les corrélations croisées d'un même signal entre deux carottes, même très proches, n'apparaissent donc pas très pertinentes, en grande partie à cause de la géométrie des dépôts qui ne peut être parfaitement identique entre deux échantillons, à grande comme à petite échelle.

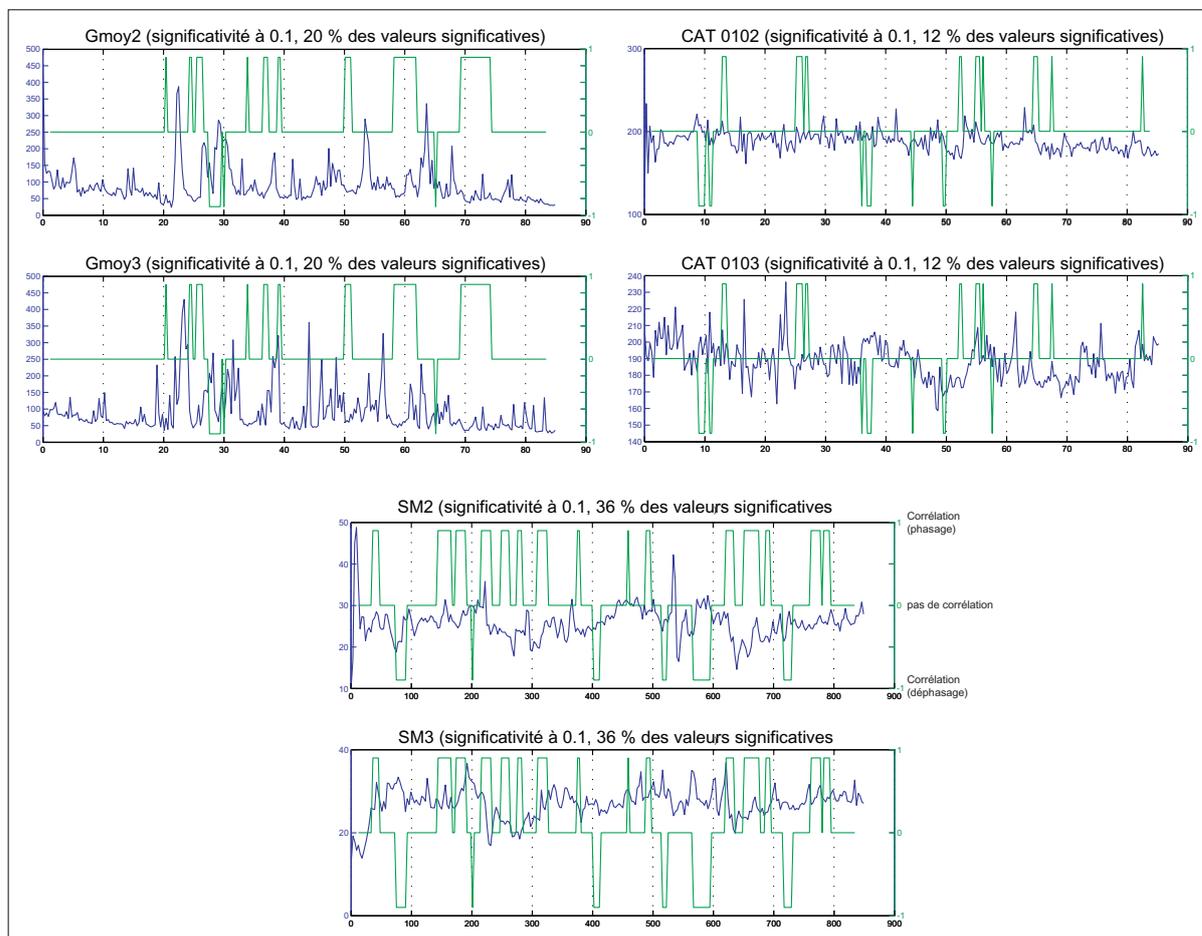


Figure III.56 : Courbes de corrélations entre CAT 0102 et CAT 0103.

Les corrélations de données différentes à l'intérieur d'une même carotte sont plus intéressantes. A partir du tableau III.11 qui recense les six types de croisement de données, plusieurs commentaires peuvent être développés. En premier lieu, on se rend compte que les pourcentages de valeurs significatives sur l'ensemble du tableau n'excèdent pas 39 %. Seules les corrélations de la catégorie D dépassent de loin ces pourcentages, avec pour toutes les carottes, une corrélation positive quasi-parfaite (figure III.57). Mais il s'agit du croisement des deux paramètres granulométriques étroitement liés que sont la médiane et le grain moyen. Ces corrélations parfaites ne font donc que confirmer la forte relation déjà observée entre ces deux paramètres.

Dans tous les autres types de croisements, les corrélations sont basses, et peuvent être subdivisées en deux groupes (figure III.58) : les types A, B et C donnent tous des proportions de valeurs significatives supérieures à 10%, alors que les types E et F peuvent avoir des pourcentages plus bas, jusqu'à 6 %. Ces deux derniers types de corrélations incluent les niveaux de gris. Les corrélations particulièrement faibles de ce paramètre avec les autres, qu'ils soient de nature granulométrique ou non, réaffirment encore que ce signal « niveaux de gris » est un marquage tout à fait original des évolutions sédimentaires, qui n'a pas ou peu de points communs avec les autres signaux. Il apparaît donc de plus

en plus légitime d'envisager que les niveaux de gris soient une intégration complexe et plus ou moins régulière des différents autres paramètres. En effet, les niveaux de gris peuvent être un moyen détourné, indirect, d'appréhender à la fois des variations de couleur, de brillance, et de granulométrie notamment. Ce signal peut être encore plus compliqué, plus brouillé si on imagine que la variation d'un seul des trois paramètres perceptibles par les niveaux de gris modifie indirectement la perception des deux autres.

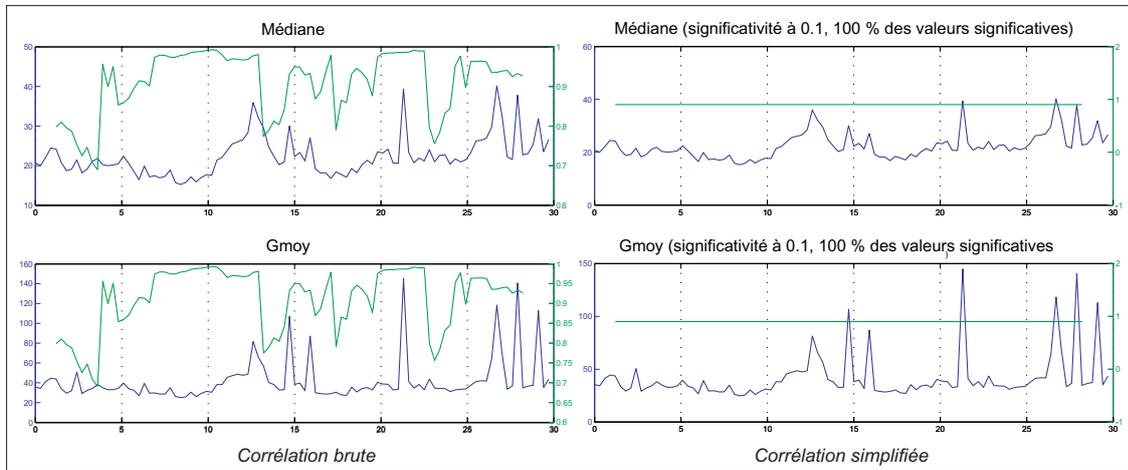


Figure III.57 : Corrélation entre médiane et grain moyen, exemple de CAT 0101.

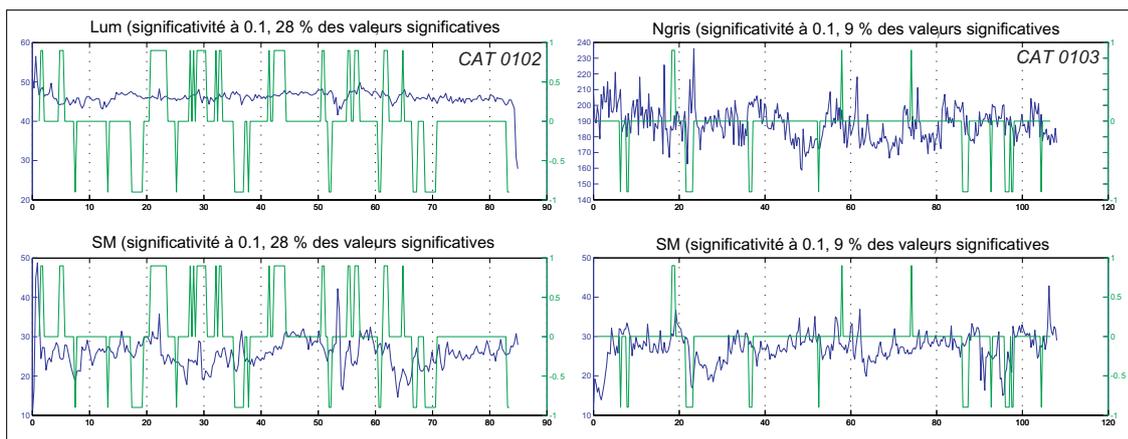


Figure III.58 : Deux exemples de corrélations illustrant respectivement les sous groupes (ABC) et (EF).

Une troisième observation, sur la base des données regroupées dans le tableau III.11, concerne les tendances globales des différentes corrélations. Outre les cas de corrélations indifférenciées (c'est-à-dire présentant à peu près autant de pics positifs que négatifs) qui restent assez rares, il est quasiment impossible d'assimiler une tendance à un type de corrélation (figure III.59). En effet, on peut prendre l'exemple des corrélations de type C, qui confrontent SM et L*. On aurait pu s'attendre à ce que le croisement de ces données donne des corrélations comparables, pour chaque carotte. Il n'en est rien puisque pour les six carottes, le type C présente trois cas de corrélations à dominante positive (CAT 0101, 0102 et 9902), deux cas de corrélations à dominante négative (CAT 9901 et COU 9902) et un cas indifférencié pour CAT 0103 (figure III.60). Il apparaît donc extrêmement difficile de saisir le comportement de chaque signal vis-à-vis d'un autre. En dehors du type D, qui est le seul à présenter une corrélation fortement positive et valable pour les six carottes, seuls deux autres types donnent une idée globale de la corrélation. On voit en effet qu'à part CAT 0102, les corrélations de type A sont globalement négatives. A l'opposé, les corrélations de type F seraient plutôt positives. Pour les autres types B, C et E, il est impossible de trancher. Ces observations recourent l'ACP réalisée sur ces différents

signaux (figure III.49). En effet, on retrouve l'association entre médiane et niveaux de gris, et l'antinomie entre médiane et susceptibilité magnétique. La difficulté à identifier un type de corrélation dans les trois autres cas concorde avec une indépendance des variables attestée par l'ACP. Seule la relation entre niveaux de gris et SM (type E) est ici moins nette, l'ACP montrant une faible opposition entre ces deux variables.

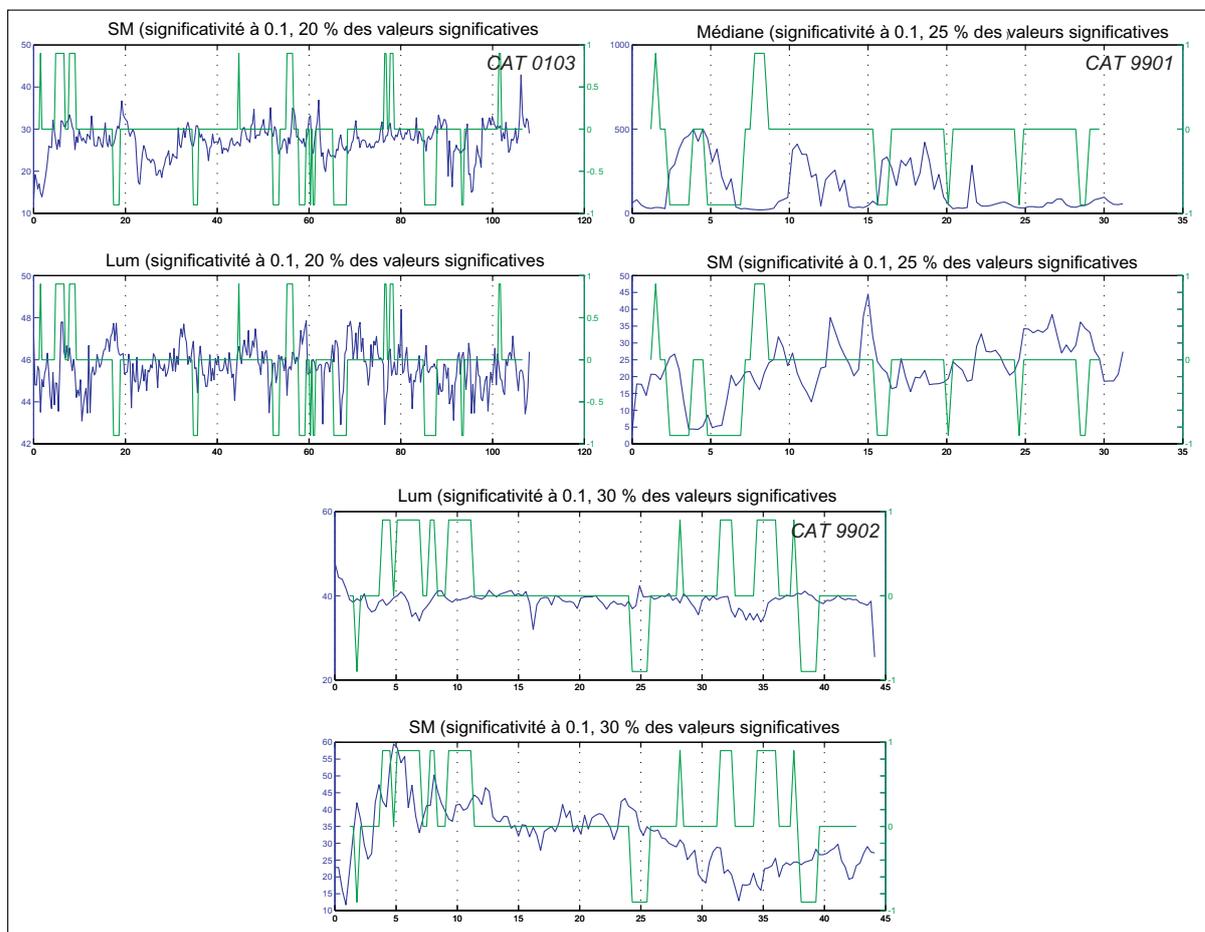


Figure III.59 : Les trois grandes tendances corrélatrices.

Enfin, un quatrième point mérite d'être développé ici, au sujet des valeurs significatives de la carotte COU 9902, seul échantillon étudié pour le lac de Coufin (tableau III.11). Les valeurs significatives des corrélations de cette carotte se distinguent en tous points des échantillons du lac de la Cathédrale. Les corrélations sont supérieures dans la plupart des cas, y compris pour celles des types E et F qui concernent les niveaux de gris. Seule la corrélation du type D, entre médiane et grain moyen, n'a curieusement que 78 % de valeurs significatives (figure III.61). Ces dissemblances permettent d'insister de nouveau sur la différence de fonctionnement de ces deux lacs en tant que pièges sédimentaires. Mais la réponse des signaux ne s'en trouve malheureusement pas plus éclaircie. Il se trouve en effet que mis à part le cas D, toutes les corrélations effectuées pour cette carotte sont à dominante négative, avec une exception pour le type F (niveaux de gris/médiane) dont la corrélation présente autant de pics positifs que négatifs. Il semble donc que chaque signal, pour le lac de Coufin, ait sa propre empreinte de l'archivage sédimentaire, difficilement comparable aux autres. Cela pourrait à nouveau être une illustration du brouillage de l'information causé par la présence de deux sources de matières.

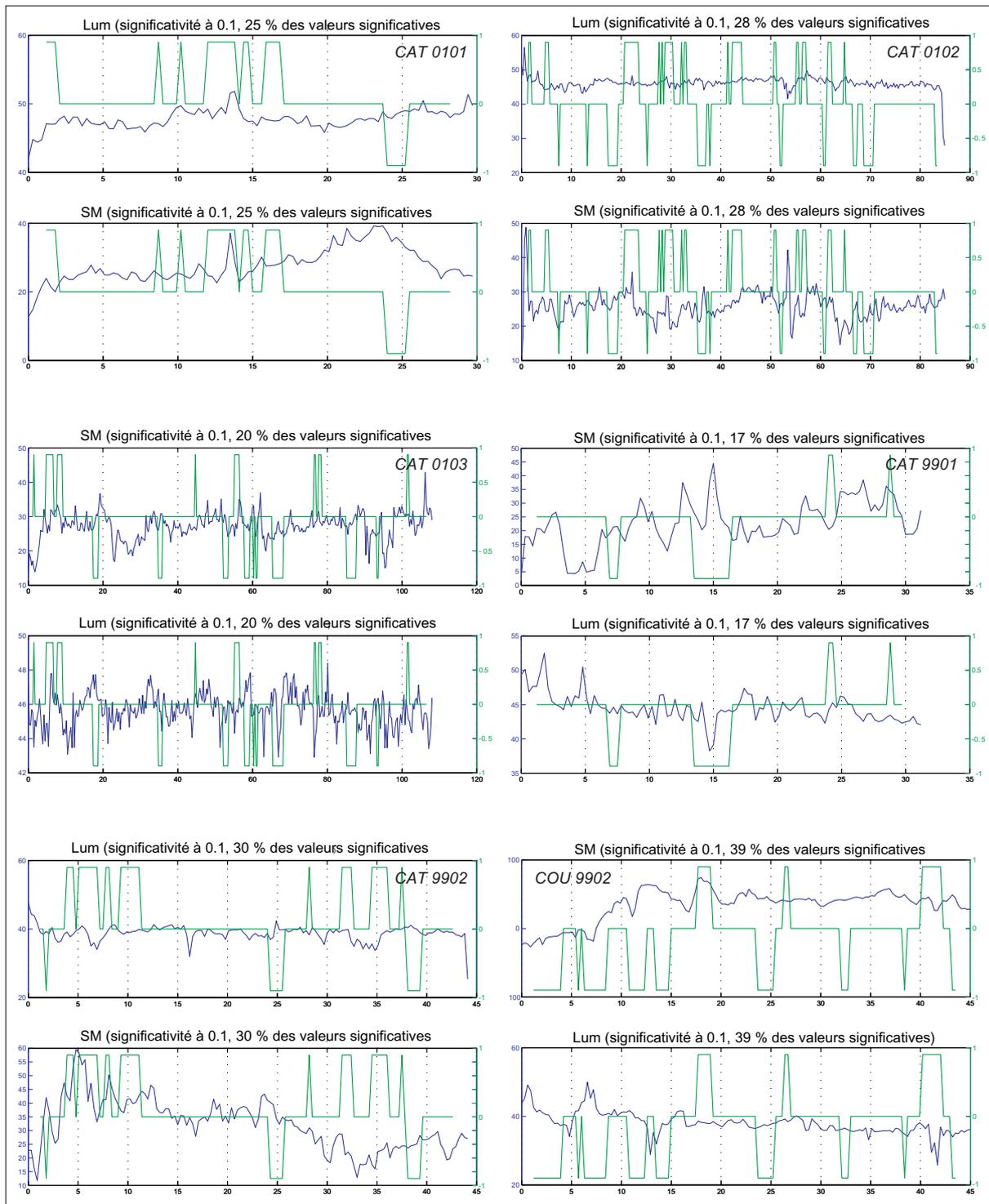


Figure III.60 : Hétérogénéité de la corrélation de type C (SM/L*) à travers les différentes carottes étudiées.

L'ACP croisant ses différents signaux et les indices granulométriques apportent des données qualitatives sur le comportement de ces différents paramètres les uns par rapports aux autres. Les corrélations croisées sur ces mêmes paramètres ne donnent malheureusement que de faibles compléments quantitatifs sur ce qui est perçu, mesuré par chaque paramètre. Les faibles pourcentages de valeurs significatives forcent la prudence quant aux similitudes ou oppositions établies entre chaque critère. Cette difficulté de lecture des corrélations est une représentation de la complexité de l'archivage lacustre endokarstique et de la grande variabilité des transports de matière associés. En effet, un tel milieu naturel offre des conditions de transports et de piégeage suffisamment variées pour que les

différents moyens de décrypter l'accumulation sédimentaire finale ne se recourent pas ou peu. En terme d'informations relatives aux modalités du dépôt, ces corrélations ne sont donc pas d'une grande pertinence, et n'apportent pas beaucoup plus d'informations que ce qui a été tiré des autres traitements commentés jusqu'ici. Mais encore fallait-il le montrer... Ces différents signaux devraient se révéler plus intéressants grâce aux méthodes de traitement du signal et l'utilisation des ondelettes que nous verrons dans le troisième point de cette partie sur les données non granulométriques. Mais avant de traiter de ces outils, nous approfondissons la question des niveaux les plus grossiers de la sédimentation.

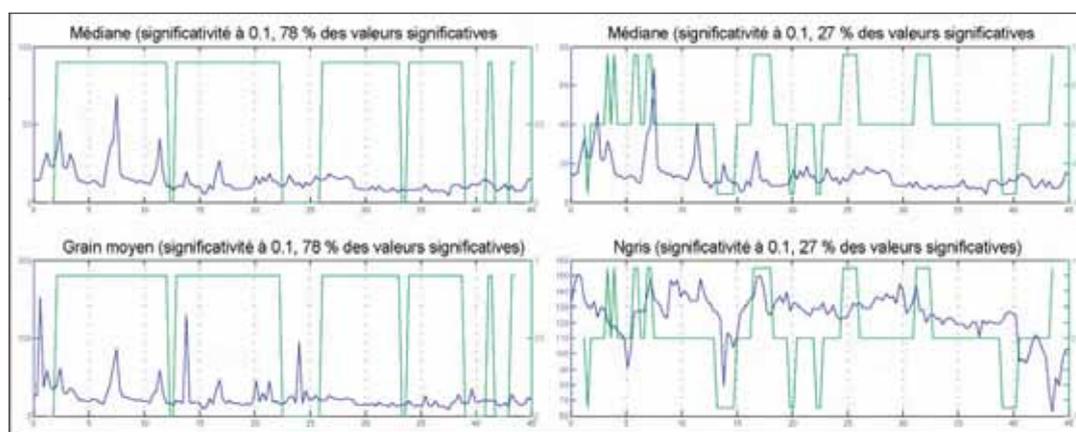


Figure III.61 : Quelques courbes corrélatives particulières de COU 9902.

Méthode/ Traitement	Intérêts	Limites	Apports dans le cas des lacs de Choranche
Granulométrie	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt	Pas d'indication sur la composition sauf décarbonatation	Identification des classes granulométriques et de leurs contributions respectives, rôle des écoulements, part et origine de la fraction carbonatée, nature et sources des autres minéraux en présence (usure des minéraux)
Observations microscope et loupe	Sources de matières par rapport à la géologie locale et au bassin versant > Spatialisation	Indicateurs qualitatifs de la composition du sédiment	Identification des mécanismes de transport et des hydrodynamismes par Passega, relations entre ces dynamiques grâce aux ACP, premiers éléments sur le fonctionnement du piège lacustre.
Diffraction des argiles	Origine de ces composantes (état des sols, conditions géologiques et/ou climatiques)		
Images de Passega et autres croisements	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt Qualité du sédiment (tri, classement...)	Indicateurs strictement granulométriques et plutôt qualitatifs	La comparaison de ces signaux dans une ACP montre leur complémentarité (points communs, recouvrements ou différences) d'un point de vue qualitatif. Ici, les niveaux de gris restituent l'évolution des dépôts détritiques d'une façon particulière. Les corrélations entre ces signaux quantifient cette complémentarité. Ici, les corrélations ont presque toujours des pourcentages très faibles, exprimant l'originalité de chaque signal mais aussi leur grande complexité.
Statistiques multifactorielles			
Niveaux de gris (imagerie)	Evolution globale de la sédimentation	Signaux très spécifiques pouvant masquer une partie des évolutions sédimentaires si considérés isolément	
Susceptibilité magnétique (min. ferro- magnétiques)	Identification et contribution de différentes sources de matières, repérage d'événements particuliers dans l'évolution de la sédimentation		
Spectro- colorimétrie (couleur et clarté)			
Comparaisons et Corrélations	Comparaison de la structure des différents signaux et recherche de liens éventuels	Plus les signaux sont complexes, plus leurs corrélations sont difficiles à établir	

Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 3.

b) Etude approfondie des niveaux grossiers

Cette étude des niveaux grossiers est abordée successivement à partir des images de Passega et de l'étude des particules grossières sur les autres paramètres, afin de mieux appréhender les événements hydrologiques à l'origine de leur présence dans les sédiments lacustres. Nous verrons qu'elle apporte des informations importantes sur la sédimentation lacustre endokarstique, que nous retrouverons par ailleurs dans les traitements par ondelettes (cf. *infra* : Partie III, Chap. II.3.c).

1. Etude par les images C/M

A travers les images de Passega, nous avons constaté que les niveaux grossiers, raccordés aux épisodes hydrologiques plus ou moins forts, s'organisaient autour des zones 1 et 2 des images C/M (cf. *supra* : Partie III, Chap. II.2.b.1). Nous avons réutilisé ces diagrammes de Passega afin d'étudier l'évolution des principales crues identifiées dans chaque carotte, en nous inspirant d'autres travaux variés portant sur l'étude des dynamiques de dépôts [Petts et Foster, 1985 ; Corbonnois, 1991 ; Bravard et Petit, 1997 ; Jaillot, 2000]. En utilisant le grain moyen comme critère complémentaire des données de médiane et de Q 99, nous avons pu identifier deux familles de dépôts grossiers liés aux phases d'écoulements les plus importantes (figure III.62).

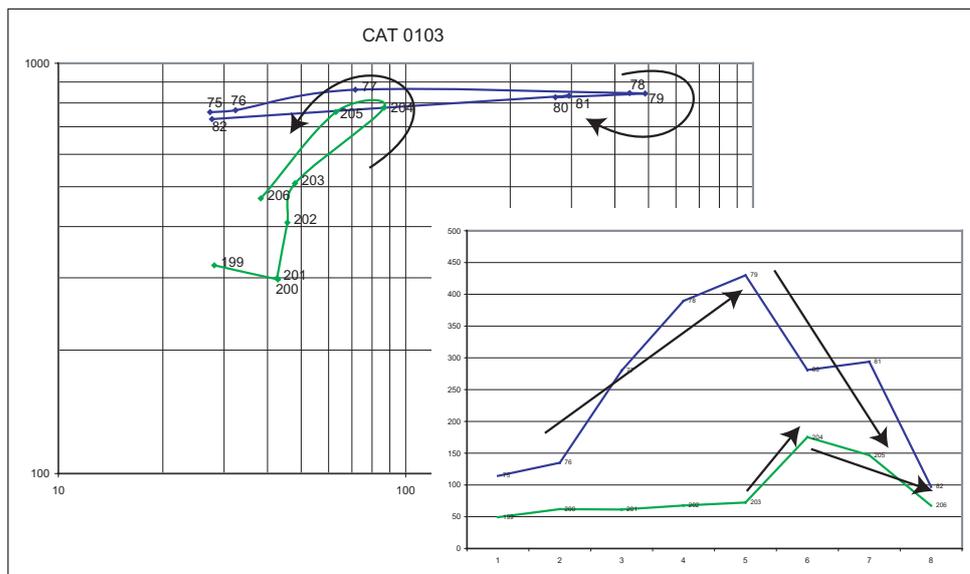


Figure III.62 : Les familles de crue identifiées grâce aux images de Passega - Exemple sur CAT 0103.

Des crues « horaires » et des crues « anti-horaires » selon le sens de leur évolution dynamique sur le diagramme de Passega ont pu être identifiées. Ces rotations cadrent toujours avec l'évolution du grain moyen. Les crues horaires sont caractérisées par des valeurs de grain moyen qui augmentent progressivement jusqu'au pic de crue puis qui chutent brutalement. Le cas des crues anti-horaires correspond à une évolution inverse du grain moyen, à savoir une augmentation brutale de la taille des grains jusqu'au pic de crue puis une diminution progressive jusqu'au retour à la normale. Enfin, il existe un cas intermédiaire, où l'évolution dynamique d'une crue peut avoir, sur l'image de Passega, un tracé entrecroisé assez complexe. La courbe du grain moyen sur les mesures correspondantes montre alors une évolution plus chaotique. Ce cas intermédiaire se retrouve assez souvent, et il est alors difficile d'attribuer à la crue une évolution globalement horaire ou anti-horaire. Mais si on observe plus en détails, « boucle par boucle », alors on retrouve une cohérence parfaite entre le sens de rotation d'une boucle et l'évolution du grain moyen sur les mesures correspondantes (figure III.63).

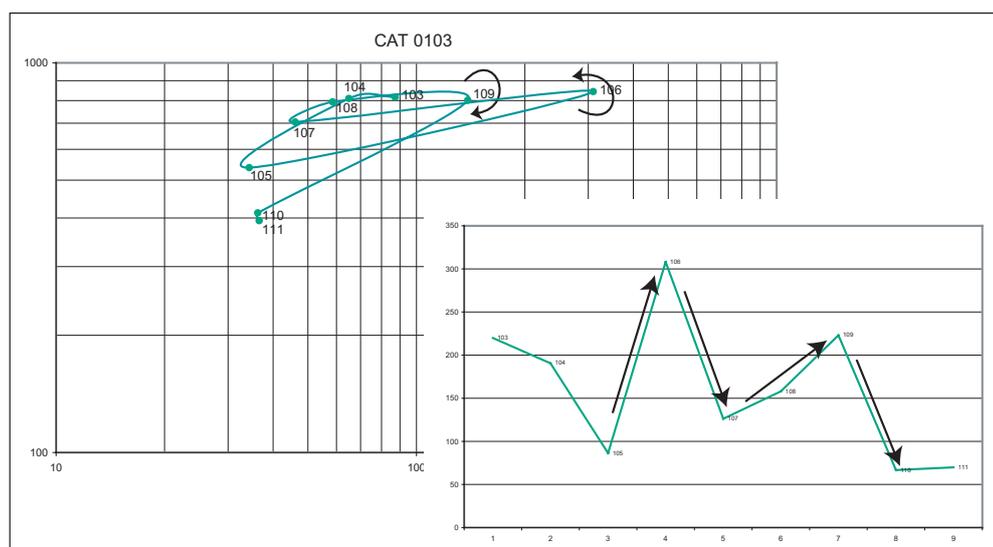


Figure III.63 : Le cas intermédiaire de l'évolution d'une crue - Exemple sur CAT 0103.

Toutes les carottes, y compris COU 9902 du lac de Coufin présentent ces deux familles de dépôt de crue, toujours en cohérence avec les deux évolutions possibles du grain moyen. Les hypothèses précédemment avancées sur le fonctionnement sédimentaire des lacs endokarstiques, à savoir une sédimentation en contexte hydrodynamique calme ponctuellement perturbée par des écoulements plus violents, apparaissant sans transition, semblent ici se préciser : les deux familles de crue ne mettent pas en évidence l'existence d'une phase transitionnelle. De plus, ils permettent de montrer que les crues ont des dynamiques d'apports de matières différentes, ou en tous cas des dynamiques ayant un impact différent sur l'écoulement en régime normal. Cela nous a conduit à émettre l'hypothèse que ces deux types de crues peuvent être le reflet de la dynamique saisonnière des écoulements. En effet, nous avons mis en avant le fait que l'expression de la saisonnalité dans un lac souterrain est tout à fait particulière, et repose sur des alternances hautes eaux/basses eaux, critère très faiblement perceptible y compris au niveau de l'enregistrement sédimentaire (cf. *supra* : Partie II, Chap. II.1.b). Compte tenu de cela, les deux types de dépôts de niveaux grossiers identifiés ici pourraient se rattacher à la saisonnalité de la sédimentation. Les crues horaires, avec une augmentation progressive du grain moyen jusqu'au pic, pourraient être l'expression d'écoulements violents et ponctuels survenant lors de la saison des hautes eaux. En effet, l'hydrodynamisme « normal » durant les hautes eaux serait suffisamment conséquent pour que la crue ne produise qu'un changement assez progressif dans la taille des particules transportées. À l'inverse, les crues anti-horaires seraient plutôt à rapprocher de la saison des basses eaux (orages). Un hydrodynamisme particulièrement faible est alors immédiatement modifié lors d'une crue, produisant sur la taille des particules transportées un changement plus net, plus direct.

2. Par la granulométrie et les évolutions des différents paramètres mesurés

Cette hypothèse sur des crues de deux natures différentes, selon qu'elle surviennent en saison de hautes eaux (printemps et automne) ou en saison de basses eaux (été et hiver), a été testée en confrontant les évolutions du grain moyen aux autres signaux sédimentaires. Ce travail de comparaison, effectué pour les pics les plus remarquables de chaque carotte, pourrait permettre de conforter cette caractérisation des crues en deux catégories. Pour chaque carotte, nous avons donc cherché à voir comment les pics des crues se corrôlaient aux autres signaux (figure III.64).

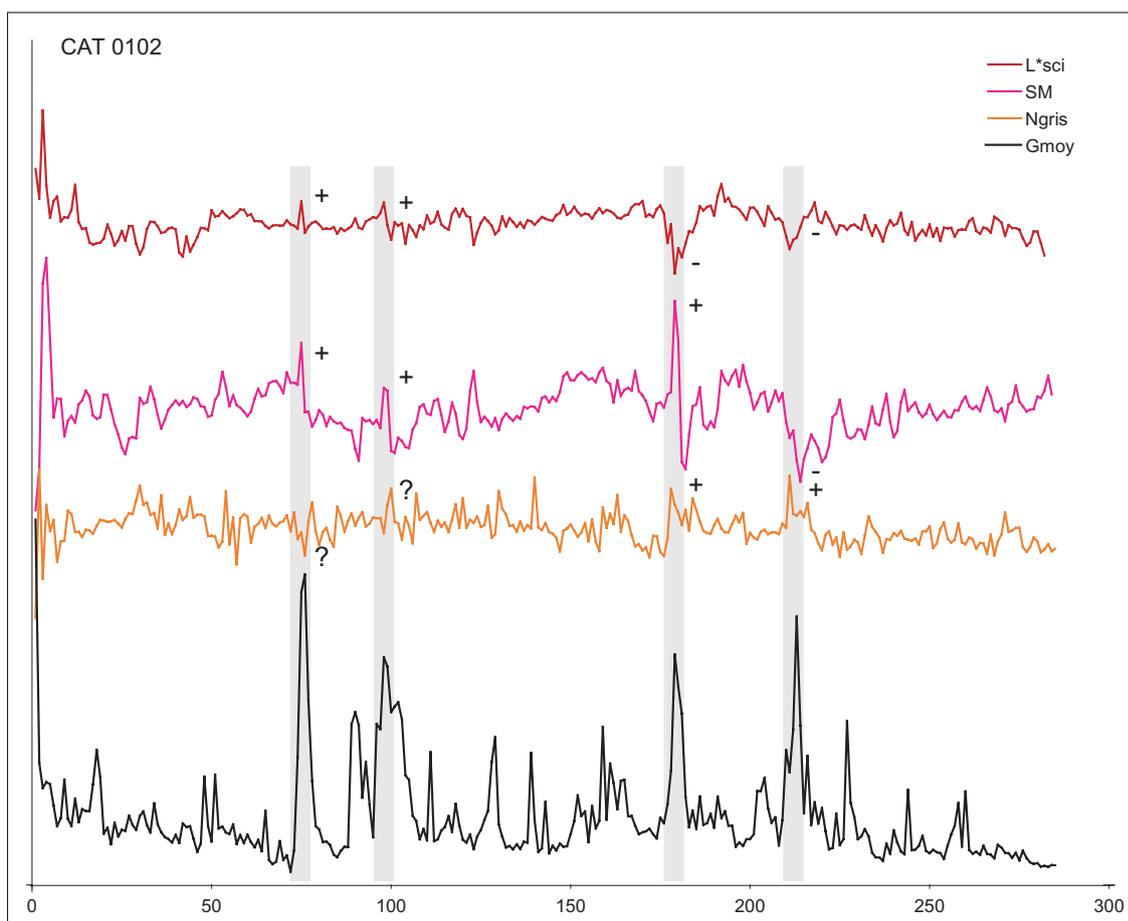


Figure III.64 : La comparaison graphique des différents signaux pour les principales crues de la carotte CAT 0102.

Malheureusement, nous nous sommes heurté au même problème que pour les corrélations croisées. La figure III.64 montre des disparités entre les différents signaux. Ils marquent quatre évènements hydrologiques majeurs aussi bien par des corrélations positives que négatives. Toutes les passées grossières, sur l'ensemble des carottes ont ce type de réponses très variables, et inclassables. La typologie de ces deux types d'évènements mis en évidence grâce aux images C/M n'est donc absolument pas confirmée par le comportement des autres signaux.

Si l'on ne peut conclure de façon plus affirmée sur la représentation de la saisonnalité par les évènements hydrologiques majeurs, (le résultat des images C/M, non conforté par les autres signaux, étant à lui seul trop mince), ce travail plus poussé sur un processus particulier de la sédimentation, les dépôts de « crues », montre à quel point les modalités de la sédimentation souterraine sont complexes. Chaque évènement étant différent des autres, au vu des restitutions des quatre signaux utilisés, il a donc sa propre histoire en termes de transport et de dépôt. Cette complexité peut avoir plusieurs origines, pouvant intervenir plusieurs fois sur un seul évènement hydrologique majeur :

- liée à l'intensité des écoulements pour eux-mêmes, et par rapport à l'hydrodynamisme ambiant (ce point rejoint l'idée d'une saisonnalité possible) ;
- liée aux sources de matières mobilisées ou remobilisées en amont, à partir de pièges moins efficaces que le lac ;
- liée au parcours des écoulements dans le réseau de drainage, qui peut être différent sous l'effet d'un hydrodynamisme puissant.

Ces trois paramètres sont d'ailleurs étroitement liés, l'énergie hydrodynamique influant sur la quantité des sédiments mobilisés et remobilisés, et sur le parcours des écoulements dans le système karstique. Lui-même peut intervenir directement sur le nombre de pièges à sédiments plus ou moins anciens susceptibles d'être remobilisés. Dans un contexte endokarstique, et avec un système de drainage développé comme celui de Choranche, ces trois conditions qui contrôlent la sédimentation et le dépôt de particules grossières peuvent se combiner à l'infini. Les dépôts ainsi constitués ont alors tous une combinaison de signatures différente.

c) Traitement des signaux par analyse spectrale et ondelettes

Le dernier grand point de cette partie sur les signaux non granulométriques et leurs traitements est consacré au traitement du signal, à travers l'analyse spectrale et l'utilisation des ondelettes. Nous avons utilisé ces méthodes sur les différents signaux sédimentaires, dans le but d'affiner les résultats précédents et de voir si des raccords sont possibles avec des fluctuations d'ordre environnemental et/ou climatique. La précision de l'archive « sédiments lacustres endokarstiques » sera ainsi éprouvée.

1. La qualité du signal

Les analyses spectrales permettent de déceler d'éventuelles rythmicités conservées au sein de l'archive sédimentaire. Les résultats sont représentés sous forme de périodogrammes, en fonction du temps ou de la fréquence. Le degré de complexité des signaux, pressenti à travers les analyses précédentes, rend malheureusement ce type de représentation difficilement exploitable. Un exemple est donné ci-dessous, à partir de la carotte CAT 0102 (figure III.65). Sur les deux périodogrammes, les pics ayant une réelle signification sont très difficilement perceptibles. La lisibilité de ces représentations ne permet donc pas une étude correcte des signaux. Elles mettent seulement en exergue un cryptage relativement complexe des mémoires lacustres endokarstiques. La difficulté de lecture de ces représentations est inhérente à la qualité intrinsèque du signal sédimentaire.

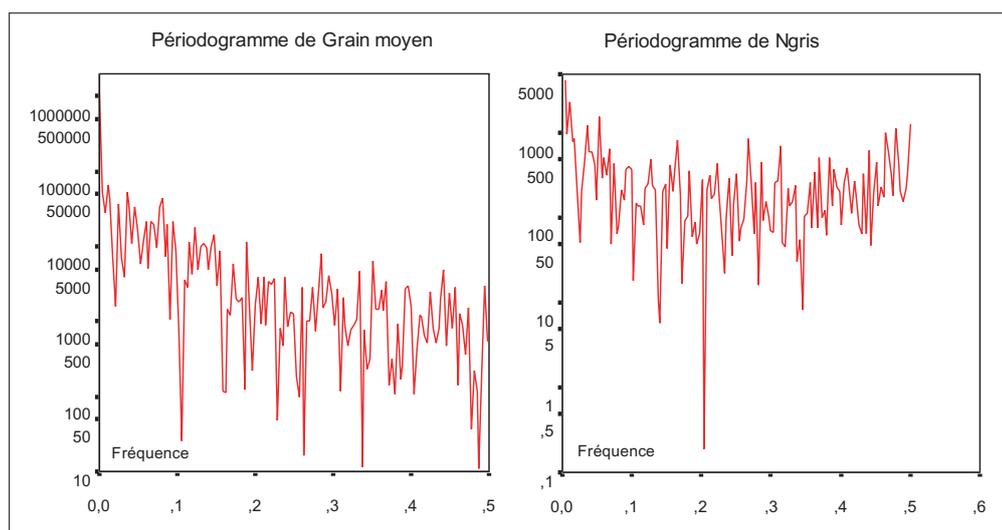


Figure III.65 : Périodogrammes en fréquence du grain moyen et des niveaux de gris de CAT 0102.

Face à ce constat, nous avons opté pour une autre représentation graphique, passant par l'étude des densités spectrales et de leur décomposition à l'aide d'une ondelette. L'analyse des signaux se fait en deux étapes. En premier lieu, la représentation des densités spectrales dans un diagramme

bi-logarithmique va permettre, en mesurant la pente globale, nommée pente β , de donner une indication sur la structuration du signal et sur les influences qu'il subit [Hardy et Beier, 1994]. C'est une première étape dans la description du signal, basée sur les théories multifractales (symétrie entre les grandes et les petites échelles et notion d'invariance d'échelle) [Mandelbrot, 1997]. En second lieu, grâce aux ondelettes, le signal est décomposé selon les différentes échelles de temps qui le constituent. En observant ces composantes de temps, et leur part dans la variance du signal, les rythmicités ou fluctuations archivées par les sédiments pourront être mises en évidence.

Les pentes β évoluent ici entre 0 et -3 ; chaque valeur renvoyant à une indication de structuration ou de non structuration du signal (figure III.66). Une pente β proche de -1 caractérise des phénomènes dits anti-persistants. On parle alors d'effet Noé, qui évoque une discontinuité isolée et brutale. Une pente β proche de -3 indique plutôt des phénomènes se produisant avec une certaine permanence, assez déterminés. Pour ce cas, on parle d'effet Joseph. Dans un système dont on connaît le fonctionnement, pour nous les grottes de Choranche, l'estimation de ces pentes et ce qu'elles suggèrent sur le fonctionnement de l'archive étudiée peuvent donc renvoyer vers des paramètres environnementaux influençant le système. Pour les décompositions par échelles de temps, nous avons procédé à ces analyses en utilisant une ondelette de type Daubechies, dont la forme est donnée, pour différentes échelles, dans la figure ci-dessous (figure III.67). Pour plus de clarté, nous ferons un commentaire particulièrement détaillé du premier résultat présenté ici.

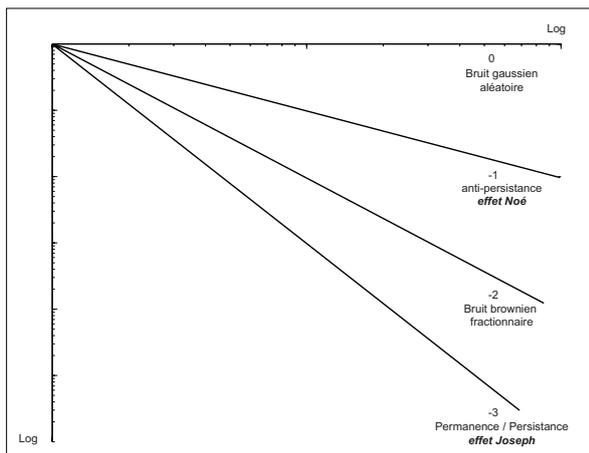
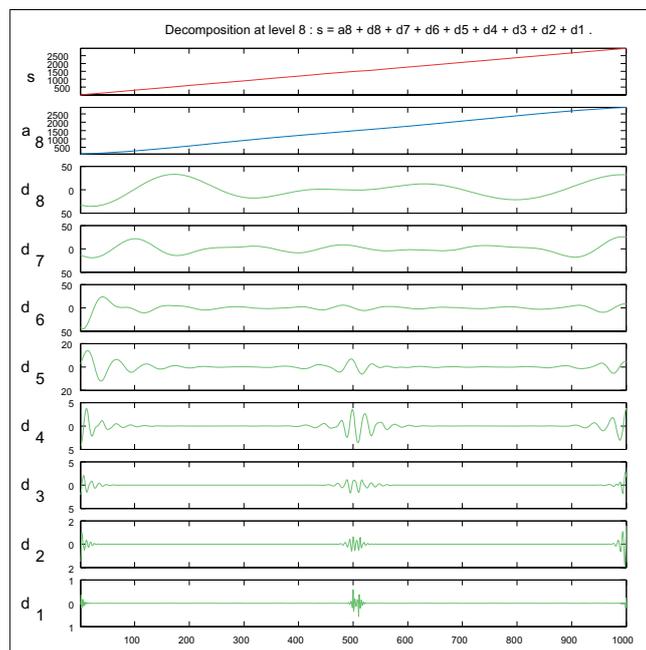


Figure III.66 : Les pentes β des densités spectrales et leur signification sur la constitution du signal (d'après Hardy et Beier, 1994).

Figure III.67 : L'ondelette de Daubechies à travers 9 niveaux de décomposition (réalisé avec le logiciel Matlab™).



2. Résultats et raccords avec les paramètres environnementaux

Après une comparaison des densités spectrales d'un même signal entre les carottes CAT 0102 et CAT 0103, nous présenterons les résultats des densités spectrales et des ondelettes carotte par carotte. Les signaux étudiés par ces méthodes sont au nombre de cinq : les deux indices granulométriques que sont la médiane et le grain moyen, et la susceptibilité magnétique (SM), le paramètre de clarté de la spectrocolorimétrie (L^*) et les niveaux de gris (Ngris).

- Les comparaisons « inter carottes »

Comme pour les corrélations croisées, nous avons testé les densités spectrales des carottes CAT 0102 et CAT 0103. Ces échantillons étant très proches l'un de l'autre, nous avons voulu vérifier la cohérence entre leurs signaux. Celle-ci apparaît bien meilleure sur les densités spectrales représentées en diagrammes bi-logarithmiques que sur les corrélations croisées (figure III.68). Les pentes globales données par les densités sont identiques d'une carotte à l'autre, sauf pour le grain moyen :

- grain moyen avec une pente β proche de -2 pour CAT 0102 et proche de -1 sur CAT 0103,
- pente β proche de -2 pour la médiane et la susceptibilité magnétique,
- pente β proche de -1 pour les niveaux de gris et le L^* de spectrocolorimétrie.

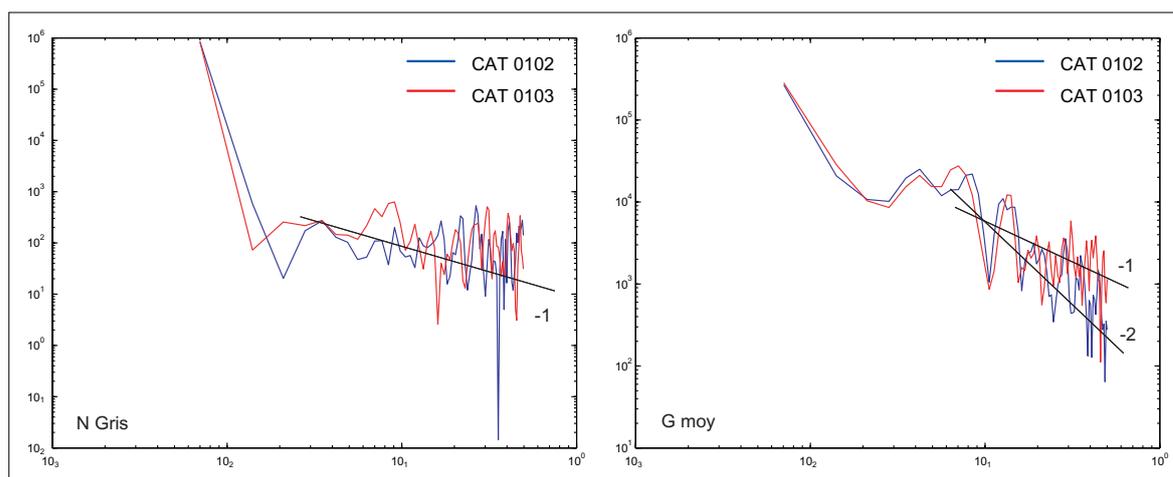


Figure III.68 : Les densités spectrales de niveaux de gris et du grain moyen comparées entre CAT 0102 et CAT 0103.

Une valeur proche de -2 pour la pente β indique que les signaux de médiane et de SM sont assimilables à du mouvement brownien fractionnaire (figure III.66). Le mouvement brownien fractionnaire est aléatoire et désordonné. Toutefois, il présente la particularité d'être auto-similaire, c'est-à-dire qu'il présente la même construction à toutes les échelles d'observation (figure III.69). Par rapport à des influences environnementales, le mouvement brownien renvoie donc plutôt vers des évolutions pouvant être variables dans leur rythme d'intervention, mais dont le fonctionnement, le comportement est plus structuré qu'il n'y paraît. On peut donc avoir ici la marque de processus différents, courts ou longs, et dont la fréquence d'apparition peut également fluctuer.

Par contre, une pente proche de -1, comme on l'observe pour la spectrocolorimétrie et les niveaux de gris est une indication de la mémorisation par les sédiments de phénomènes étant clairement identifiés comme anti-persistants. Les deux paramètres du L^* et des niveaux de gris expriment donc un effet Noé, avec des modifications brutales qu'on l'on doit pouvoir observer dans l'évolution de leur

signal respectif (figure III.69). Dans le contexte d'étude, il est possible que cette indication soit une signature des crues enregistrées par les sédiments du lac.

Pour le grain moyen, l'incohérence entre les deux carottes est plus surprenante. Nous avons montré à plusieurs reprises tout au long de ce chapitre, que médiane et grain moyen sont des critères granulométriques très proches, aux signaux comparables (données brutes, ACP, corrélations croisées...), ce qui est d'ailleurs tout à fait logique. On aurait donc pu s'attendre, ici sur les densités spectrales, à une cohérence aussi marquée sur ces deux signaux. Or, pour CAT 0103, cela ne fonctionne pas et la pente du grain moyen (-1) est différente de celle de la médiane (-2). Il est difficile d'expliquer cette différence à ce stade d'observation. Quelques éclaircissements pourront être apportés grâce aux résultats des autres échantillons.

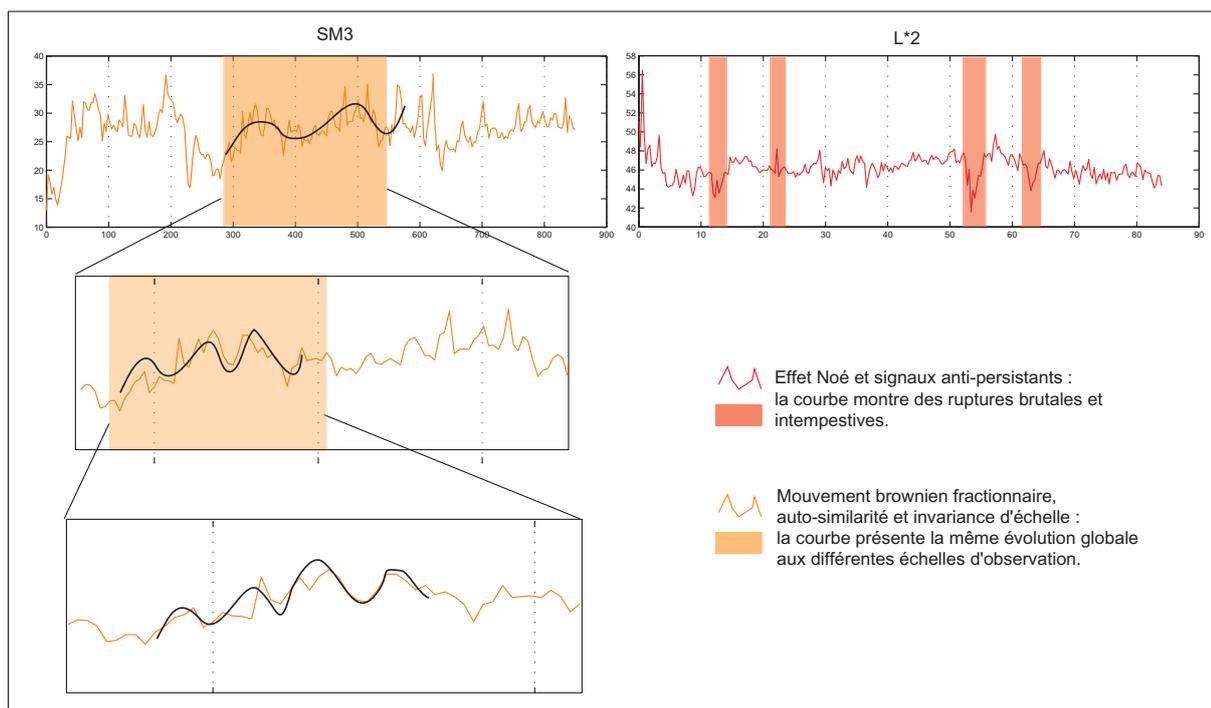


Figure III.69 : Les courbes brutes de la SM et du L* de spectrocolorimétrie – perception du mouvement brownien fractionnaire et de l'effet Noé.

Cette cohérence montrée à travers les densités spectrales de ces deux carottes vient conforter les observations tirées des corrélations croisées. En effet, pour expliquer la mauvaise qualité des corrélations croisées entre les signaux de CAT 0102 et de CAT 0103, nous avons invoqué le décalage géométrique existant entre les deux carottes, pour une même couche sédimentaire. Or, la relation géométrique entre les deux carottes n'est pas considérée à travers la représentation en densités spectrales, puisque l'évolution de la sédimentation n'y est plus considérée par rapport au temps (exprimé ici par la profondeur), mais selon des fréquences. Celles-ci renseignent exclusivement sur la qualité du signal sédimentaire et sur les influences externes qu'il subit. Si les similitudes entre signaux redeviennent évidentes lorsque le critère géométrique (décalage de profondeur, donc de temps) est retiré, cela confirme que c'est cet aspect du remplissage qui gênait les corrélations croisées.

- Les résultats par carotte

Pour la carotte CAT 0101, localisée au fond du lac, les densités spectrales donnent les résultats suivants (figure III.70):

- médiane et grain moyen ont des pentes nulles,
- L^* et niveaux de gris ont une pente β proche de -1,
- la susceptibilité donne une pente proche de -2.

Des densités spectrales donnant une pente nulle, comme c'est le cas pour la médiane et le grain moyen, ne renvoient pas vers un phénomène particulier mais ils caractérisent seulement le bruit aléatoire. Autrement dit, les indices granulométriques pour les sédiments du fond du lac ne sont pas de bons traceurs de ce qui est mémorisé par les dépôts. Ils subissent de trop grandes perturbations qui brouillent l'archivage et rendent son décryptage impossible. L'explication la plus probable ici ferait intervenir non pas les apports de matière, mais plutôt les départs. C'est en effet au fond de ce lac que se situe sa perte permanente, qui alimente la rivière Serpentine. Une partie des dépôts du fond du lac subit forcément les influences de cette perte, et c'est sans doute ce qui est relaté par les densités spectrales de la médiane et du grain moyen. La pente proche de -1 donnée par le paramètre L^* et les niveaux de gris caractérise une anti-persistance comme ce que nous avons vu pour la comparaison entre CAT 0102 et CAT 0103, et la susceptibilité magnétique est également identique, avec une pente β de l'ordre de -2, caractéristique du mouvement brownien fractionnaire.

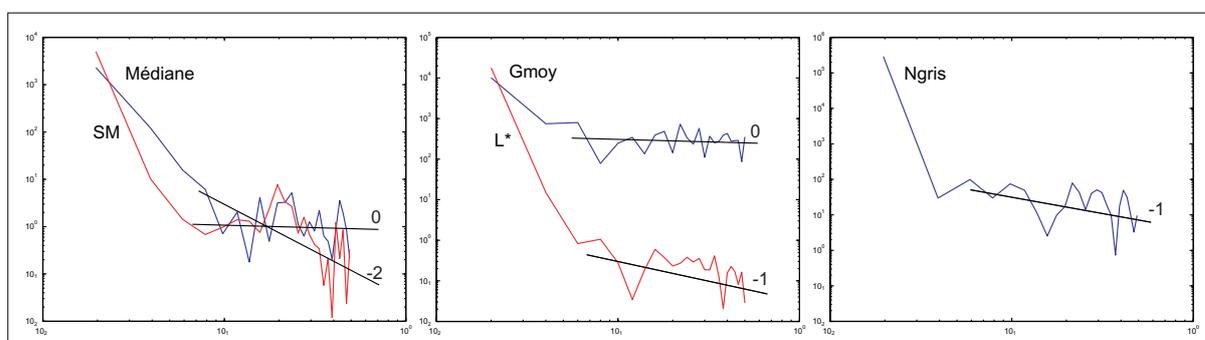


Figure III.70 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 0101.

Sur ce signal de susceptibilité magnétique, la décomposition en ondelettes et les variances associées indiquent que 40 % du signal sont exprimés dans les hautes fréquences, sur les quatre premières échelles temporelles (figure III.71). Les échelles 3 et 5 n'interviennent pratiquement pas (pour moins de 5%), et le reste du signal repose sur une basse fréquence, sur l'échelle 6. La décomposition par ondelette montre mal ces contributions dans la constitution du signal de SM, c'est pourquoi ces résultats sont aussi appuyés sur les pourcentages de variance exprimée par chaque échelle. Grâce aux deux graphiques, on peut donc observer deux principales composantes dans ce signal. Les échelles temporelles peuvent renvoyer à une rythmicité. Nous en expliquons le calcul ici, et la figure III.71 nous sert de support. Ces traitements par ondelettes nécessitent que le nombre de données traitées soit dyadique¹. En l'occurrence, les séries de données ne doivent pas être augmentées au nombre dyadique supérieur, afin de ne pas allonger les séries avec des données fictives. Elles ont donc été rééchantillonnées au nombre dyadique inférieur. Ainsi, pour CAT 0101 où nous disposons de 100 données (au pas de 3 mm), le nombre dyadique inférieur est 64, soit 2^6 . L'ondelette va donc pouvoir décomposer le signal en 6 échelles temporelles, placées en ordonnées sur la décomposition. Grâce aux variances, ces composantes dyadiques peuvent renvoyer à une rythmicité, à une fréquence de retour, exprimée ici en unités de longueur (épaisseur de sédiments). L'échelle 4 de notre décomposition en ondelettes est donc l'expression de ce que le signal perçoit toutes les 2^4 valeurs, soit toutes les 16 valeurs

¹Nombre dyadique : nombre du système binaire, qui est une puissance de 2. Par exemple 256 est un nombre dyadique, c'est 2^8 .

sur un total de 64. Une simple règle de trois introduisant le nombre réel de mesures, puis l'ajout du pas d'échantillonnage utilisé permet de retomber sur la distance réelle. Ici, l'échelle 4 correspond à 7,5 cm de sédiments. De même, nous avons vu que l'échelle 6 était également importante dans la constitution du signal de SM. Mais grâce à l'explication du calcul ci-dessus, on comprend que l'importance de l'échelle 6 est ici liée la méthode, car elle renvoie à la longueur de la carotte. Le signal de SM pour CAT 0101 est donc clairement expliqué à 40 % environ, avec des fréquences de retour inférieures à 7,5 cm de dépôt de particules détritiques.

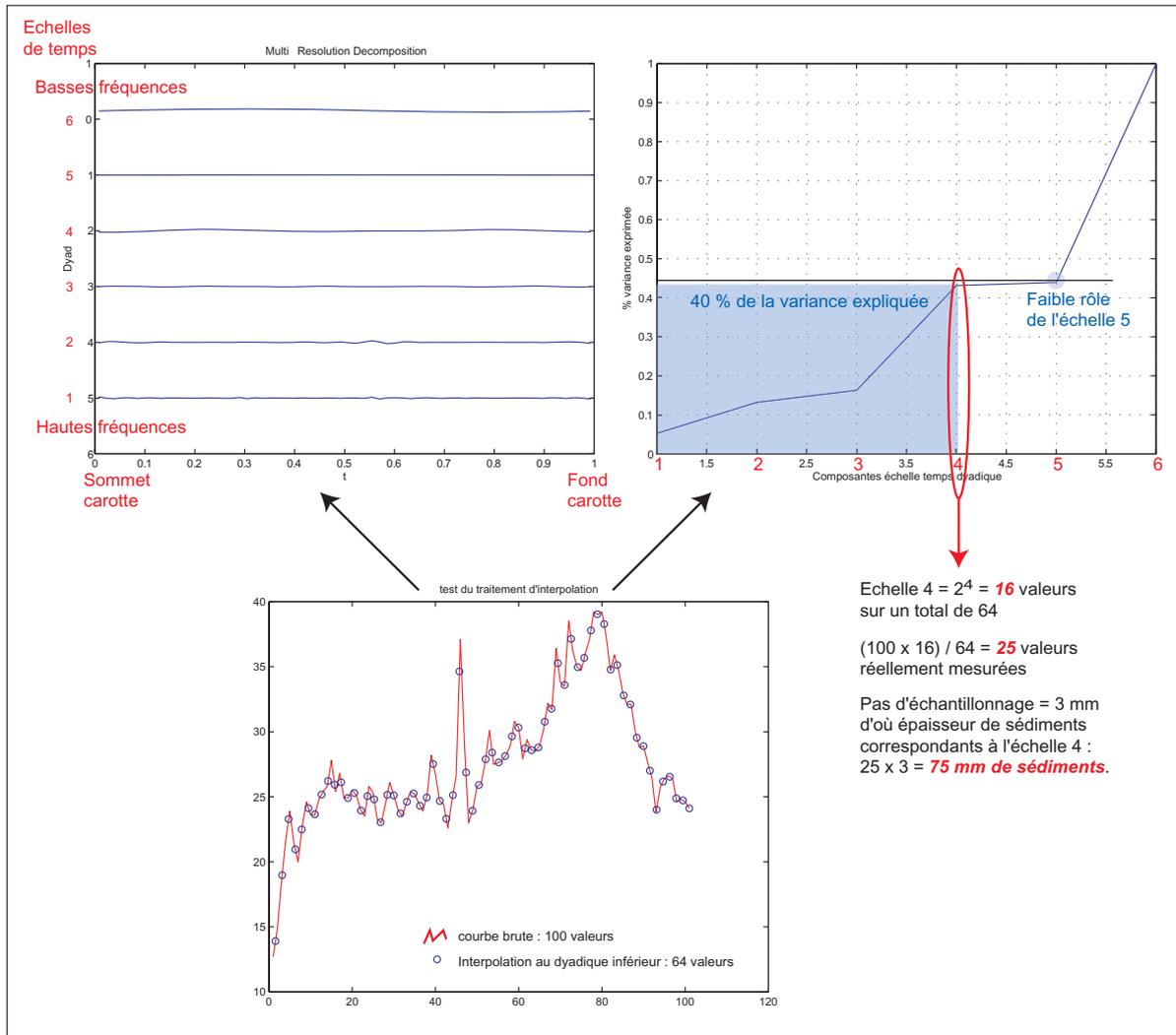


Figure III.71 : Décomposition en ondelette de la susceptibilité magnétique sur CAT 0101.

La susceptibilité magnétique de CAT 0101, caractérisée par un mouvement brownien fractionnaire, semble donc réagir à un ou des phénomènes réapparaissant dans une tranche de sédiments de 7,5 cm, et n'ayant pas de fréquence de retour supérieure à cette épaisseur de dépôt. Le même type de commentaire sera fait pour toutes les décompositions par ondelettes de chaque carotte. Les diagrammes de décomposition par échelles sont souvent très peu parlant, à l'identique de celui de la figure ci-dessus. Ils ne seront donc pas systématiquement donnés dans la suite du commentaire, étant d'un intérêt plus que limité. Par contre les graphiques de variances, beaucoup plus intéressants, seront fournis pour appuyer et éclairer le discours.

La décomposition en ondelettes du L^* donne un résultat beaucoup plus homogène, où chaque échelle semble intervenir dans la structuration du signal (figure III.72). C'est plus de 95 % de la variance

qui est expliquée par les 5 échelles dyadiques, l'échelle 4 étant la seule à participer à moins de 20 %. L'anti-persistance de ce signal (pente de -1 sur les densités spectrales) ne semble donc pas clairement localisée sur une composante de temps en particulier. Les niveaux de gris, caractérisés par la même pente de -1 sur les densités spectrales, donnent une décomposition par ondelette comparable à celle du L*. Les 4 premières échelles, en participant chacune à hauteur de 15 à 25 % expliquent 90 % du signal. La principale différence est sur la cinquième composante qui n'intervient que pour quelques pour-cent. Ces deux signaux traduisent probablement un phénomène sédimentaire brutal pouvant intervenir au fond du lac, avec une période de retour hautement aléatoire. Ces phénomènes brutaux, aux fréquences d'apparition très variables, qui semblent donc repérés par la colorimétrie et les niveaux de gris, pourraient donc être de deux catégories, la première avec des périodes de retour au maximum égales à 7,5 cm (échelle 4 des niveaux de gris) et la seconde avec des périodes de retour encore plus larges, allant jusqu'à 15 cm (épaisseur de sédiments correspondant à l'échelle 5 du L*).

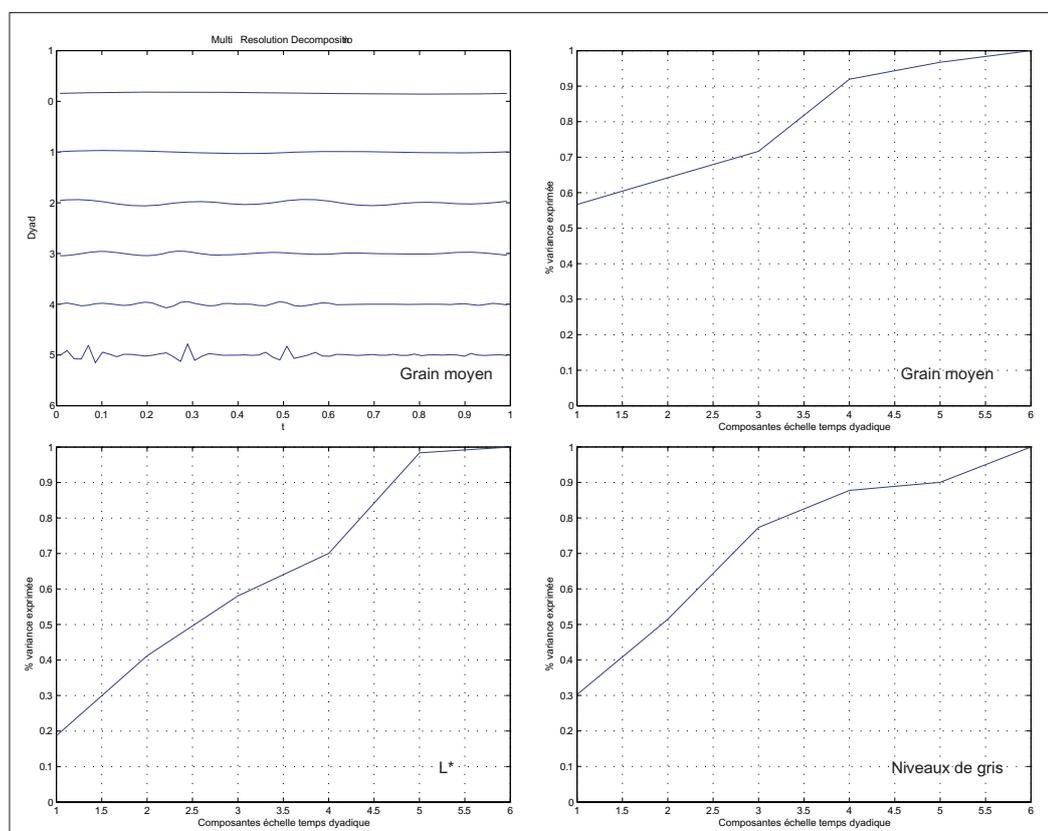


Figure III.72 : Les décompositions par ondelettes à travers les pourcentages de variance expliquée pour le L*, les niveaux de gris et le grain moyen de CAT 0101.

Enfin, le grain moyen, outre les densités spectrales renvoyant à du bruit aléatoire (pente nulle), donne des décompositions par échelle dyadique assez intéressantes. Sur le graphique des variances, on voit que plus de 50% du signal est exprimé à l'intérieur de l'échelle 1, donc à très haute fréquence puisque cette échelle correspond à des périodes inférieures à 0,94 cm. La décomposition par ondelette, et la courbe des variances montrent très bien que c'est à cette échelle que la majeure partie du signal est visible. Là encore, la part du signal expliquée par les grandes échelles temporelles est minime puisque 90 % de la variance reposent sur les quatre premières composantes de temps. Outre une pente β nulle, difficile à commenter, le fait que ce signal soit exprimé sur les hautes fréquences (période de retour inférieure à 0,94 cm) n'est pas en contradiction avec l'hypothèse de l'influence de la perte vers Serpentine. Bien au contraire, cette perte fonctionnant constamment, par sa localisation au fond du lac, la trace d'une perturbation pouvant intervenir très fréquemment paraît assez logique. Les indices

granulométriques et leurs signaux, sur les sédiments du fond du lac, semblent donc restituer une information constamment perturbée, qu'il est tentant de mettre en liaison avec la proximité de la perte permanente et l'impact que celle-ci peut localement provoquer sur les sédiments.

Avec la carotte CAT 0102, nous remontons à la surface du lac. Les densités spectrales ne montrent donc que deux structures différentes avec (figure III.73) :

- des pentes β proches de -2 pour les indices granulométriques et la SM (mouvement brownien fractionnaire),
- des pentes β proches de -1 pour le L* et les niveaux de gris (anti-persistence).

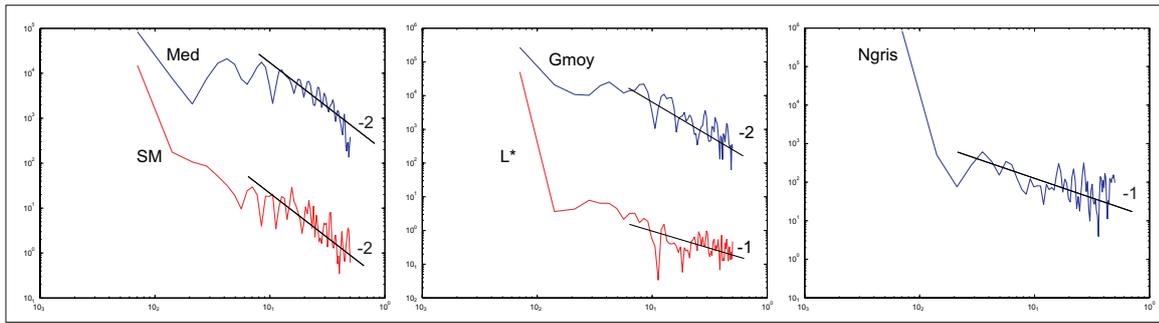


Figure III.73 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 0102.

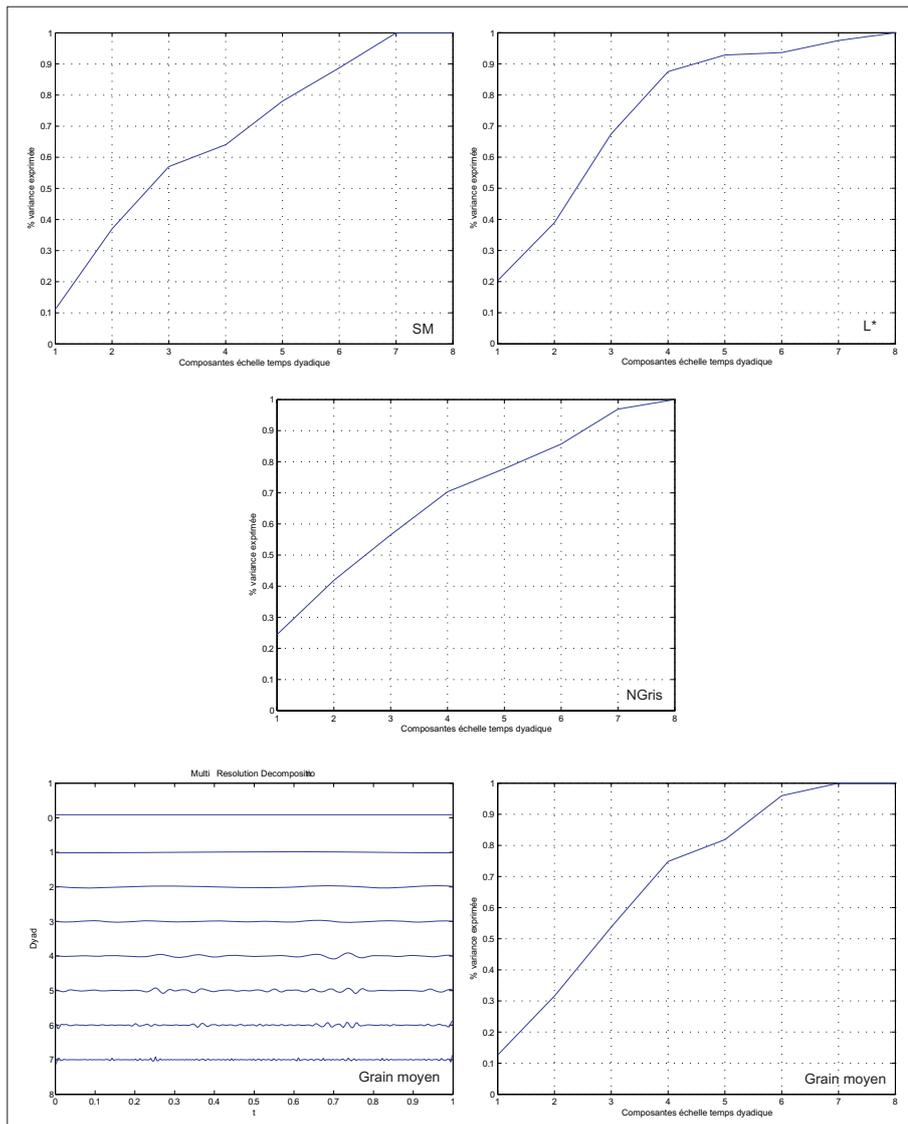


Figure III.74 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 0102.

Pour les décompositions par échelles de temps, la carotte CAT 0102 représentant 285 mesures, le nombre dyadique retenu pour opérer a été 256, soit 2^8 . Les échelles temporelles sont donc au nombre de 8 pour cette carotte. Les quatre décompositions en ondelettes sont comparables dans la mesure où elles présentent toutes deux parties : une première, qui va jusqu'à l'échelle quatre, montrant une contribution des petites échelles assez forte, comprise entre 65 et 85 %, et une seconde, rassemblant les autres composantes de basse fréquence, et ayant de fait, un rôle dans la constitution des différents signaux inférieur à 35 % (figure III.74).

La décomposition du signal des niveaux de gris donne le résultat le plus homogène, avec des participations à peu près équivalentes pour chaque échelle. Vient ensuite la SM, qui montre une cassure plus nette entre hautes et basses fréquences, puis le grain moyen, où le rôle des hautes fréquences devient de plus en plus marqué. C'est sur le L^* de la spectrorimétrie que cette distinction est la plus franche. Il semble que l'échelle 4, qui correspond en l'occurrence à 5,3 cm de sédiments soit une valeur seuil en ce qui concerne les différentes influences environnementales archivées au sein du remplissage lacustre.

L'essentiel des processus influençant la sédimentation paraît agir sur des échelles de temps inférieures ou équivalentes au temps nécessaire au dépôt de 5,3 cm de sédiments. Les pentes β permettent de compléter cette information en indiquant que les sédiments semblent subir deux influences majeures : une première, traduite par le mouvement brownien fractionnaire, pouvant renvoyer vers les fluctuations globales des écoulements, incluant toutes les variations hydrodynamiques possibles, avec des fréquences d'apparition variables, le tout étant directement dépendant de la pluviométrie ; une seconde, exprimée par de l'anti-persistance ou effet Noé, qui se raccorde assez bien aux épisodes hydrologiques les plus violents et les plus ponctuels.

La carotte CAT 0103, voisine de la précédente, donne les résultats suivants pour les pentes β des densités spectrales (figure III.75) :

- de l'ordre de -2 pour la médiane et la SM,
- de l'ordre de -1 pour le grain moyen, le L^* et les niveaux de gris.

C'est la seule carotte du lac de la Cathédrale qui donne une pente différente pour la médiane et le grain moyen. Par contre, comme pour CAT 0102, on reste sur des valeurs de pente de deux types, évoquant soit du mouvement brownien, soit l'effet Noé.

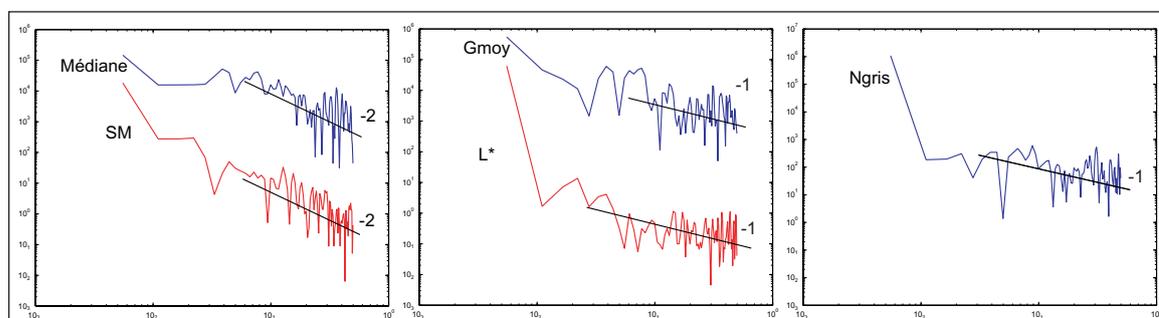


Figure III.75 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 0103.

La décomposition en ondelettes, sur la base de 361 valeurs, c'est donc faite en gardant le nombre dyadique 256 (2^8), et nous avons toujours 8 échelles temporelles de décomposition du signal. Cette fois, les résultats des décompositions peuvent se subdiviser en trois catégories (figure III.76).

La première regroupe les niveaux de gris et le L* qui montrent des décompositions semblables à ce qui a été dit pour CAT 0102. Le découpage en deux parties est toujours valable, la prépondérance des hautes fréquences également. Pour le L*, c'est toujours l'échelle 4 qui marque le seuil des 80 % de variance exprimée, mais qui correspond cette fois, compte tenu du nombre total de mesures réellement effectuées sur la carotte, à 6,8 cm de sédiments. Par contre, pour les niveaux de gris, se sont les 5 premières échelles de temps qui portent 80 % du signal. Les niveaux de gris mesurent donc un signal variant à 80 % sur des épaisseurs de sédiments inférieures à 13,5 cm. Outre les épaisseurs de sédiments qui augmentent par rapport à CAT 0102, le L* et les niveaux de gris ont des comportements à peu près semblables entre ces deux carottes, tant sur les densités spectrales que sur les évolutions sédimentaires qui semblent retracées. L'hypothèse consistant à dire que ces deux signaux sont des traceurs des épisodes de crues paraît toujours valable ici.

La deuxième catégorie correspond à la SM, qui présente une décomposition par échelle assez différente. Globalement, 90 % de la variance est expliquée avec les 5 premières échelles temporelles. En cela, elle est assez conforme aux autres décompositions commentées jusqu'ici. Par contre le rôle de l'échelle 4 apparaît encore plus accentué, portant à lui seul près de 40 % de la variance. Cela nous permet d'affiner le comportement du signal de SM par rapport aux sédiments endokarstiques. En effet, les très hautes fréquences apparaissent ici moins importantes, et la SM semble surtout percevoir des processus dans la sédimentation dont la période de retour est comprise entre 3,4 cm de sédiments (échelle 3) et 6,8 cm de sédiments (échelle 4). Avec une pente de -2 sur les densités spectrales, notre hypothèse sur l'enregistrement précis des écoulements s'affine donc un peu, la SM n'apparaît vraiment sensible qu'au-delà d'un certain niveau d'hydrodynamisme. En effet, la valeur minimale de 3,4 cm introduit l'idée que la sédimentation de fond, constante et aux variations d'écoulements assez minimes (dont la fréquence est par conséquent bien inférieure au temps qu'il faut pour déposer 3 cm de sédiments) n'est pas perçue en terme de modification de la susceptibilité magnétique. Cela est tout à fait intéressant car on peut en déduire que la modification des apports de matières ne se produit qu'au-delà d'un certain seuil d'augmentation de l'hydrodynamisme.

Enfin, la troisième catégorie de décomposition par échelle est ici le grain moyen. Outre sa pente β atypique, il présente une décomposition en ondelettes complémentaire de celle de la SM qui vient d'être commentée. En effet, si ce sont toujours les 5 premières échelles qui expriment 80 % de la variance, ce sont cette fois les très hautes fréquences qui en portent la plus grande partie, avec 60 % jusqu'à la composante 3. Les processus sédimentaires qui influencent le signal du grain moyen interviennent donc à petite échelle, sur une épaisseur de sédiments inférieure à 3,4 cm. Les hypothèses avancées sur la base des résultats de CAT 0102 sont donc largement affinées, la proximité de ces deux échantillons autorisant leur comparaison. Le grain moyen, dont le signal sédimentaire se distingue permet de penser que son fonctionnement, sa réaction aux évolutions sédimentaires est globalement du type « mouvement brownien fractionnaire » comme on le voyait pour CAT 0102. Cette hypothèse s'appuie sur les données de CAT 0102 et sur la complémentarité d'échelle que le grain moyen montre sur CAT 0103. Par contre sur CAT 0103, on peut voir que le grain moyen, s'il réagit majoritairement aux hautes fréquences, ce qui est le cas ici, devient plutôt anti-persistant dans son fonctionnement. Cet indice granulométrique, caractérisant d'une manière générale un rapport direct avec la pluviométrie, *via* les variations les plus discrètes des écoulements, aurait toutefois une composante forte sur les variations à petite échelle, dont la structure tend vers une anti-persistance. En termes concrets, cela voudrait dire que le grain moyen a la faculté d'enregistrer les variations de taille des particules les plus subtiles, à l'intérieur de la sédimentation fine qui préexiste dans notre système. Des « crues » minimales, ou tout au moins des

apports liés à des remobilisations ponctuelles seraient ainsi mémorisées dans le remplissage lacustre. Ces remobilisations ne sont pas forcément la conséquence de variations hydrodynamiques mais seraient plutôt dues ici, à une fragilisation progressive de sédiments mal piégés à l'amont du système. Le passage des écoulements, en immergeant, même partiellement, les dépôts de pièges peu efficaces, finirait par produire une certaine déconsolidation des particules, conduisant à leur détachement.

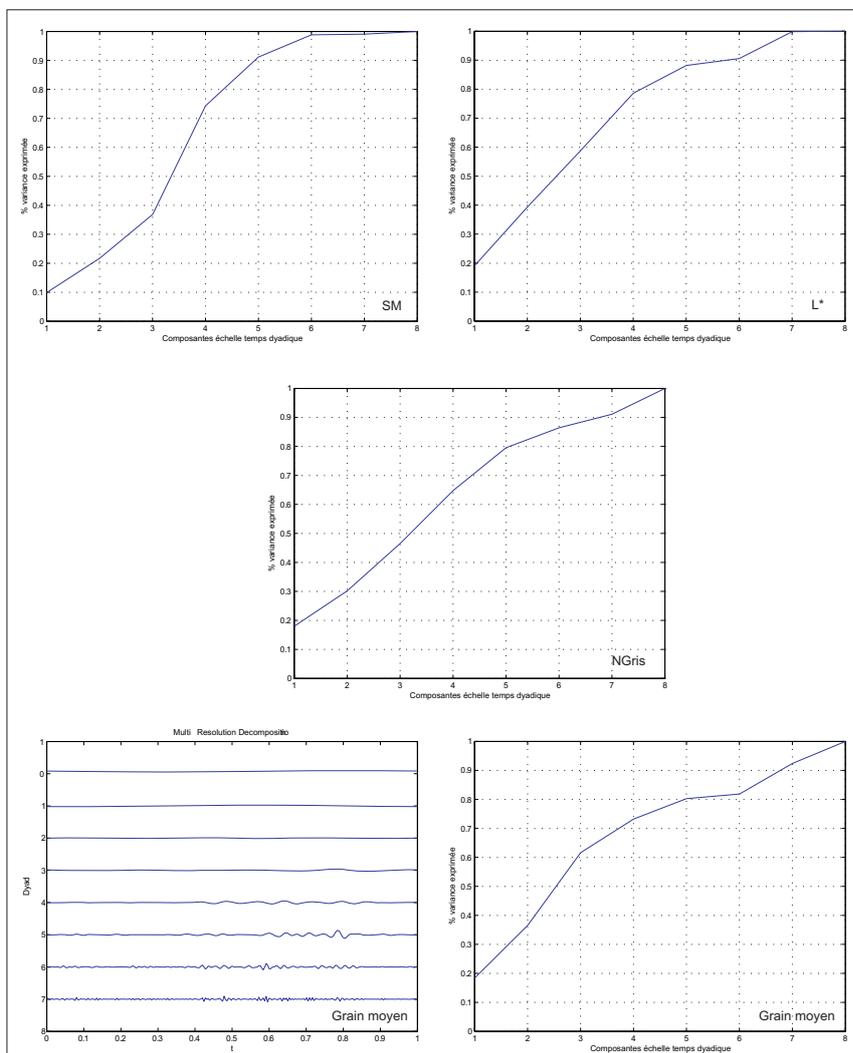


Figure III.76 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 1013.

Sur la carotte CAT 9901, prélevée sous une faible tranche d'eau, les résultats des densités spectrales donnent tous des pentes β proches de -1, sauf pour la SM qui conserve toujours une pente de l'ordre de -2 (figure III.77). Les changements, par rapport aux carottes précédentes, portent donc sur les indices granulométriques qui ont des pentes de l'ordre de -1.

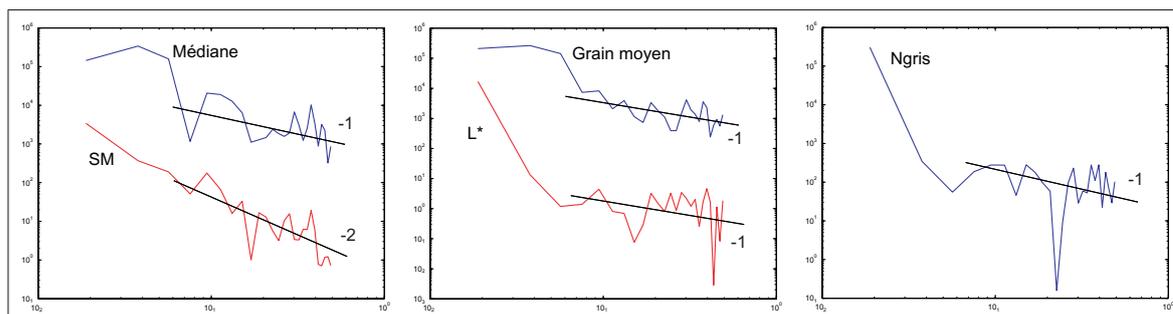


Figure III.77 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 9901.

En ce qui concerne les ondelettes, elles ont été calculées sur une base dyadique de 64 valeurs (2^6), le nombre total de mesures sur la carotte s'élevant à 105. On retrouve donc une décomposition du signal en 6 composantes de temps, comme pour CAT 0101. Les décompositions donnent cette fois des résultats tous différents entre eux (figure III.78).

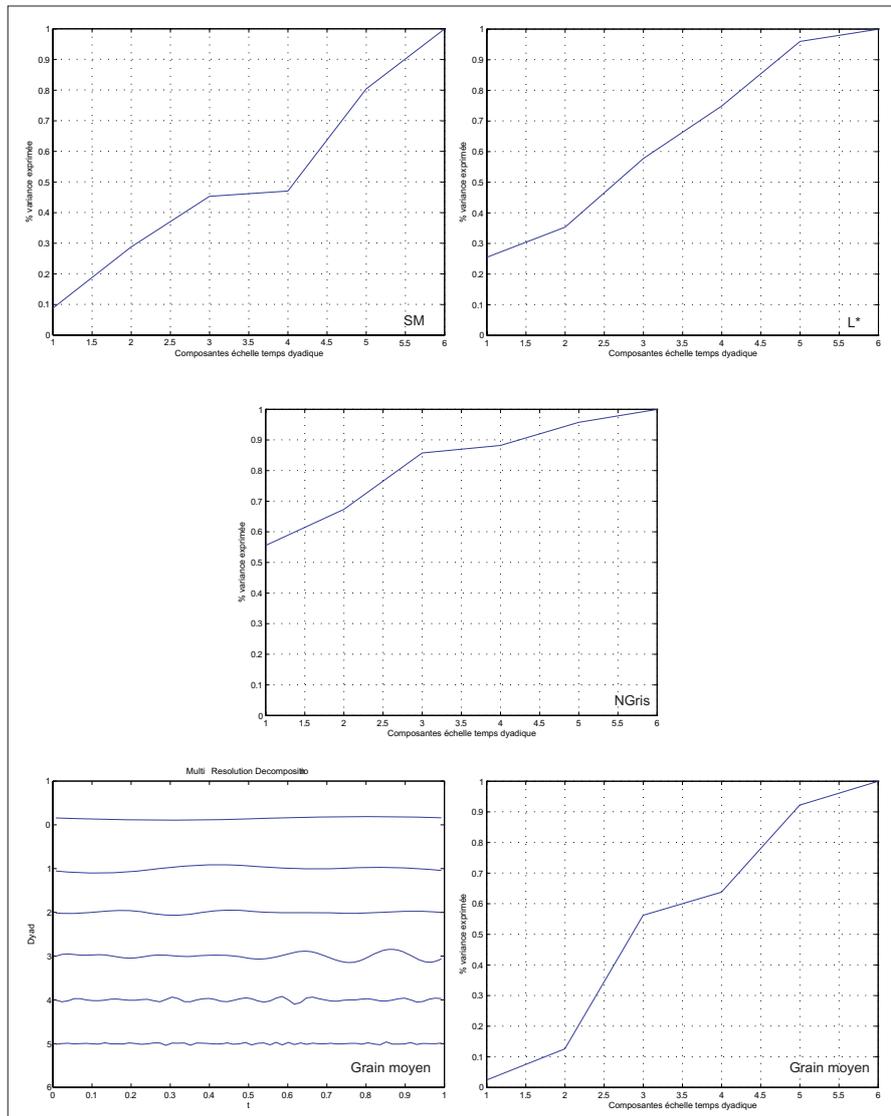


Figure III.78 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 9901.

Le L^* , dont le niveau d'information (pente β) ne change pas, a ici une expression très homogène entre toutes les échelles. En dehors de la 6^{ème} composante, chaque échelle de temps intervient pour 10 à 20 % dans la structuration du signal. Il n'y a pas, en cela, de contradiction majeure avec ce qui a été dit au sujet de ce signal sur les autres carottes. Au contraire, l'anti-persistance est d'autant plus affirmée que l'on voit qu'elle concerne toutes les composantes de temps.

Pour la SM, la décomposition montre une structuration du signal également concernée par toutes les échelles temporelles, sauf l'échelle 4, qui n'est quasiment pas impliquée. Il semble donc que pour une épaisseur de sédiments comprise entre 3,9 cm (échelle 3) et 7,9 cm (échelle 4), la SM ne détecte aucune rythmicité dans la sédimentation. Les processus identifiés par la SM se produisent, pour cette carotte, à des fréquences plus hautes (dans moins de 3,9 cm de sédiments ; échelles 1 à 3) et plus basses (dans plus de 7,9 cm de sédiments ; échelle 5). Cela pourrait être une autre empreinte d'une sédimentation au comportement très binaire, décrite grâce aux analyses granulométriques.

La décomposition du grain moyen montre l'importance des échelles 3 et 5, malgré un signal qui semble également expliqué par toutes les composantes. Les niveaux de participation sont un peu plus disparates. Une légère prédominance des hautes fréquences apparaît toutefois, puisque jusqu'à l'échelle 4, ce sont 60 % de la variance du signal qui sont exprimés. Cela rejoint d'ailleurs les comportements du grain moyen observés sur CAT 0103.

Enfin, les niveaux de gris se distinguent par une décomposition en ondelettes qui montre la forte dominance des hautes fréquences. C'est en effet 85 % de la variance du signal qui sont portés par les échelles de temps 1 à 3. Ici, la présence de phénomènes anti-persistants est donc essentiellement rattachée à des processus courts et se produisant fréquemment (période de retour inférieure au temps permettant le dépôt de 4 cm de sédiments).

La carotte CAT 9902 est également située sous une faible tranche d'eau, dans la banquette principale du lac de la Cathédrale. Les densités spectrales donnent (figure III.79) :

- des pentes β d'une valeur proche de -2 pour la médiane, le grain moyen, et la SM,
- une pente toujours proche de -1 pour le L^* ,
- une pente nulle pour les niveaux de gris.

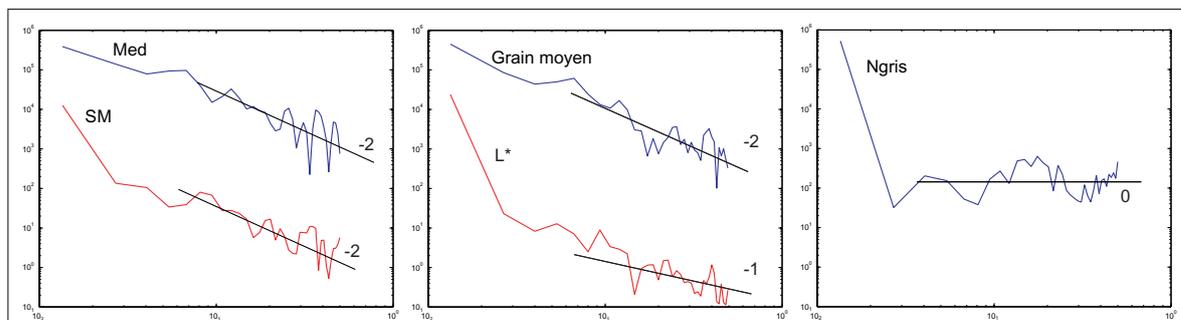


Figure III.79 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 9902.

Les décompositions par ondelettes, faites sur 7 échelles de temps (pour 148 mesures effectives transformées en 128 mesures dyadiques) présentent quelques points communs avec celles de CAT 9901 (figure III.80). C'est notamment sur le grain moyen et les niveaux de gris que les décompositions sont comparables avec la carotte précédente.

Le grain moyen montre cette fois une très forte homogénéité entre les différentes échelles, qui participent toutes, à parts égales, à la structuration du signal. Cet indice granulométrique semble donc bien être l'expression de plusieurs processus, intervenant à des fréquences variées et variables (si on tient compte de ce que suggère la pente des densités spectrales). C'est la décomposition la plus homogène que nous ayons sur les signaux de ces cinq carottes.

Les niveaux de gris, ici, sont assez particuliers. 75 % de la variance sont portés dès l'échelle temporelle de niveau 2, ce qui est la plus grosse contribution observée des hautes fréquences. Les niveaux de gris indiquent donc des fluctuations se produisant dans moins de 0,14 cm de sédiments. Mais à côté de cela, les densités spectrales de ce signal n'indiquent aucune structuration bien identifiée, la pente nulle caractérisant du bruit aléatoire. Il est donc difficile de donner un sens à ce signal. Il est probable que sa signification se rapproche de ce qui a été dit sur CAT 9901, les décompositions étant très semblables.

Le paramètre colorimétrique L^* donne une décomposition par échelle de temps simple, et déjà vue pour d'autres carottes précédemment décrites. C'est essentiellement les processus sédimentaires intervenant à haute fréquence qui sont exprimés à travers ce signal, l'échelle temporelle de niveau 3 (moins de 2,8 cm de dépôts détritiques) en portant presque 80 %.

Enfin, la susceptibilité magnétique privilégie ici beaucoup plus les basses fréquences, accentuant encore ce qu'elle montrait sur CAT 9901. C'est l'échelle 5 (soit 11, 1 cm d'épaisseur de sédiments) qui marque la rupture, avec 35 % de la variance expliqués dans les hautes fréquences, et 65 % pour les basses fréquences. L'essentiel du signal de SM réagit donc, pour cette carotte, à des processus se produisant à basses fréquences, ayant des périodes de retour supérieures au temps nécessaire pour le dépôt de 11 cm de sédiments. Même si sa valeur de pente β reste toujours stable, la structuration de ce signal est ici plutôt originale.

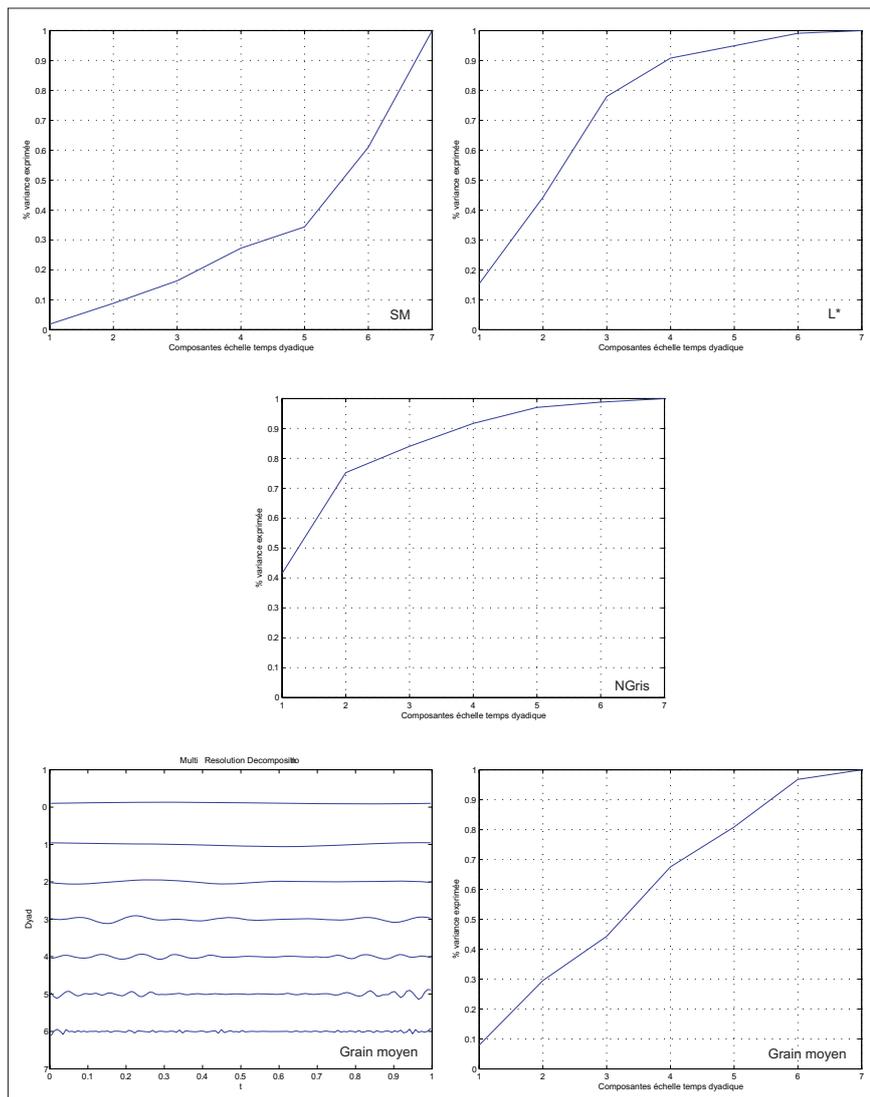


Figure III.80 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 9902.

Enfin, nous commentons les résultats de ces traitements pour COU 9902, seule carotte étudiée pour le lac de Coufin. Les densités spectrales des différents signaux donnent des pentes communes à ce qui a été observé pour le lac de la Cathédrale, et notamment la carotte CAT 0103 (figure III.81) :

- pente β aux environs de -2 pour la médiane et la susceptibilité magnétique,
- pente β proche de -1 pour le grain moyen, le L^* et les niveaux de gris.

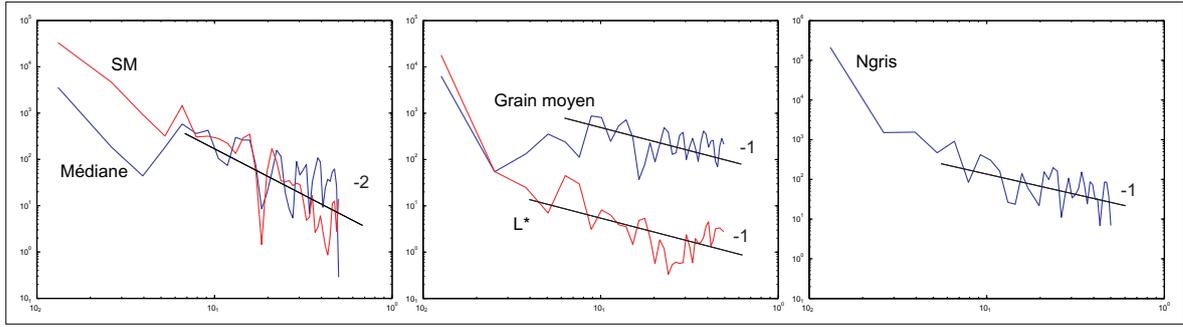


Figure III.81 : Les densités spectrales des signaux sur COU 9902.

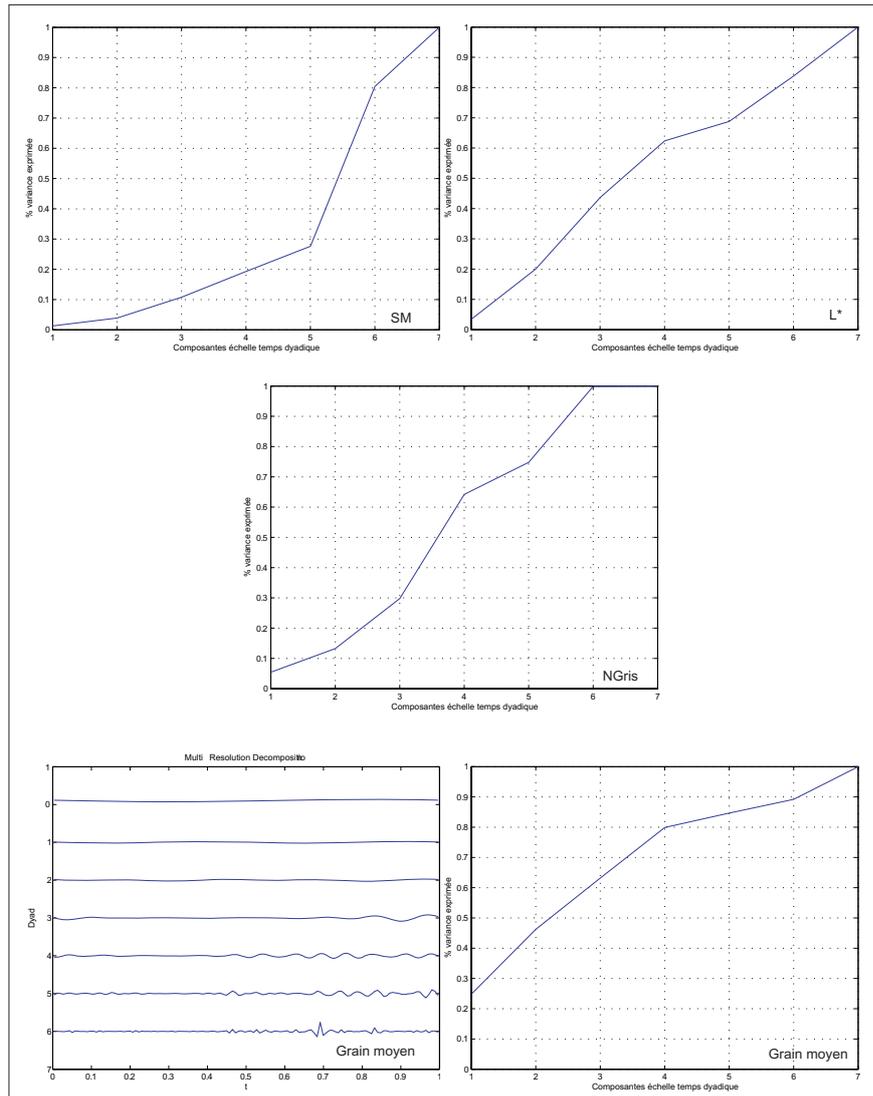


Figure III.82 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de COU 9902.

Les décompositions par ondelettes ont été faites sur 7 échelles de temps. Le nombre de mesures sur cette carotte étant de 151, le nombre dyadique inférieur le plus proche est 128, soit 2^7 . Les quatre décompositions peuvent se regrouper en trois catégories (figure III.82).

La première regroupe les résultats du grain moyen et du L*. Ces deux décompositions montrent en effet la dominance des hautes fréquences, jusqu'à l'échelle de temps 4. La variance du grain moyen atteint 80 % à cette échelle. Cela est un peu moins net pour le L* puisque les quatre premières

composantes de temps ne portent que 60 % de la variance. Pour ce second cas, une contribution des basses fréquences est également apparente, à hauteur de 15 % environ, et surtout sur l'échelle 6. Mais dans les deux cas, la plus grande partie du signal est structurée sur des rythmes contenus dans des épaisseurs de sédiments inférieures à 5,7 cm (échelle 4).

La deuxième catégorie correspond à la décomposition de la SM, qui montre la même structure un peu marginale que pour CAT 9902, avec une nette prédominance des basses fréquences. C'est l'échelle de temps 5 qui fait office de frontière, attribuant à la seule composante 6 plus de 50 % de la variance expliquée. Seulement 28 % de la variance sont portés par les 5 plus petites échelles de temps. C'est donc une structuration du signal qui se passe sur des temps au moins égaux au temps nécessaire pour le dépôt de 11,3 cm de sédiments.

Enfin, la décomposition des niveaux de gris est la troisième catégorie ici, avec une participation à peu près équivalente de toutes les composantes de temps. Seule l'échelle 4 se distingue légèrement, portant à elle seule plus de 30 % de la variance. Il y a donc une structuration du signal légèrement plus importante entre 2,8 cm (échelle 3) et 5,7 cm de sédiments (échelle 4).

Cette carotte, pourtant localisée dans un autre piège lacustre endokarstique, ne montre pas plus de différence avec les cinq carottes du lac de la Cathédrale. Même si les échantillons du lac de la Cathédrale offrent des résultats assez variables, surtout sur les décompositions en ondelettes, les phénomènes influençant les différents signaux étudiés semblent donc, eux, assez constants. Les densités spectrales et les pentes β que nous avons pu en déduire sont en effet très semblables, entre les échantillons des deux lacs. Cela prouve au moins que chaque signal, au sein d'un système, réagit aux mêmes influences même dans des pièges différents. Par contre, ces influences peuvent avoir des traductions différentes au sein de l'archivage, soit en fonction de la profondeur dans le remplissage, soit parce que chaque piège a son propre régime sédimentaire.

En conclusion à cette approche des dépôts par les méthodes de traitement du signal, on peut faire plusieurs commentaires de synthèse :

- Tout d'abord, les densités spectrales n'ont donné *aucun signe de comportement persistant* dans la sédimentation. Nous n'avons en effet pas observé de pentes β de l'ordre de -3, valeur qui renvoie à ce type de processus. Cela est assez troublant, même si l'on peut y voir une certaine cohérence avec les ACP pratiquées sur ces différents signaux, où aucun cas de dépendance franche n'apparaissait, vis-à-vis de tel ou tel indice granulométrique.
- Les densités spectrales des *deux indices granulométriques* (médiane et grain moyen) sont assez variables, oscillant entre anti-persistance et mouvement brownien fractionnaire. Ce sont les *signaux qui ont la plus grande variabilité*, parmi les cinq analysés ici. Il semble donc assez difficile de leur attribuer une signification globale. Cette variabilité est plus probablement l'expression d'une sédimentation subissant des variations constantes, y compris sous un hydrodynamisme apparemment constant et régulier comme nous l'avons évoqué lors du commentaire sur CAT 0103.
- Le paramètre L^* et les *niveaux de gris* sont au contraire, assez constants, avec une *anti-persistance de ces signaux bien caractérisée*. La seule exception concerne les niveaux de gris sur CAT 9902, dont la pente β est nulle. L'importance des hautes fréquences apparaît aussi assez régulièrement sur ces deux signaux. Il est probable que ces deux signaux réagissent, au moins en partie, aux mêmes influences, à savoir *les épisodes hydrologiques les plus violents et les plus*

ponctuels de type crue (karst intégrateur à déclenchement). En effet, leur détection fonctionne sur des critères comparables, à savoir l'évaluation, la perception de la couleur et de la brillance des dépôts. Il serait donc assez logique qu'ils réagissent de façon analogue.

- Enfin, le paramètre de *susceptibilité magnétique* a également une structuration assez régulière à travers toutes les carottes. Ses densités spectrales le caractérisent toujours comme un *signal soumis au mouvement brownien fractionnaire*. C'est également le seul signal qui montre, dans certains cas, une *prédominance des basses fréquences* (CAT 0101, CAT 9902 et COU 9902). La susceptibilité magnétique serait donc le *paramètre restituant avec le plus de fiabilité les fluctuations de la sédimentation constante, en rapport avec les écoulements et donc la pluviométrie (karst intégrateur linéaire)*.

Méthode/ Traitement	Intérêts	Limites	Apports dans le cas des lacs de Choranche
Granulométrie	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt	Pas d'indication sur la composition sauf décarbonatation	Identification des classes granulométriques et de leurs contributions respectives, rôle des écoulements, part et origine de la fraction carbonatée, nature et sources des autres minéraux en présence (usure des minéraux)
Observations microscope et loupe	Sources de matières par rapport à la géologie locale et au bassin versant > Spatialisation	Indicateurs qualitatifs de la composition du sédiment	
Diffraction des argiles	Origine de ces composantes (état des sols, conditions géologiques et/ou climatiques)		
Images de Passega et autres croisements	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt Qualité du sédiment (tri, classement...)	Indicateurs strictement granulométriques et plutôt qualitatifs	Identification des mécanismes de transport et des hydrodynamismes par Passega, relations entre ces granulométriques grâce aux ACP, premiers éléments sur le fonctionnement du piège lacustre.
Statistiques multifactorielles			
Niveaux de gris (imagerie)	Evolution globale de la sédimentation	Signaux très spécifiques pouvant masquer une partie des évolutions sédimentaires si considérés isolément	La comparaison de ces signaux dans une ACP montre leur complémentarité (points communs, recoupements ou différences) d'un point de vue qualitatif. Ici, les niveaux de gris restituent l'évolution des dépôts détritiques d'une façon particulière. Les corrélations entre ces signaux quantifient cette complémentarité. Ici, les corrélations ont presque toujours des pourcentages très faibles, exprimant l'originalité de chaque signal mais aussi leur grande complexité.
Susceptibilité magnétique (min. ferro- magnétiques)	Identification et contribution de différentes sources de matières, repérage d'événements particuliers dans l'évolution de la sédimentation		
Spectro- colorimétrie (couleur et clarté)			
Comparaisons et Corrélations	Comparaison de la structure des différents signaux et recherche de liens éventuels	Plus les signaux sont complexes, plus leurs corrélations sont difficiles à établir	
Analyse spectrale	Mise en évidence de structures de fonctionnement et/ou de rythmicités contrôlant la sédimentation, raccord aux connaissances sur l'environnement	Nécessitent de grandes séries et un cadre chronologique	Sédimentation sous influence de deux phénomènes : anti-persistants et aléatoires auto-similaires (pentes Beta). Les décompositions attestent d'un archivage structuré, le plus souvent à haute fréquence.
Ondelettes			

Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 4.

- De façon encore plus synthétique, il semble que ces différents signaux, si complexes soient-ils, réagissent le plus souvent à des *fluctuations se produisant à petites échelles, et donc dans les hautes fréquences*. En effet, la plupart des signaux et leurs décompositions en ondelettes ont montré le rôle significatif des échelles de temps 1 à 4. Selon la taille des échantillons, l'échelle 4 correspond à une épaisseur de sédiments comprise entre 5,3 cm et 7,9 cm. *L'essentiel des*

contrôles environnementaux agissant sur la sédimentation se produisent donc à l'intérieur d'une tranche de sédiments de moins de 8 cm. C'est une valeur importante car elle conditionne l'essentiel des fluctuations archivées dans les dépôts. Mais son expression en centimètres (plutôt qu'en temps, en durée) nous limite sur les interprétations et commentaires possibles.

Nous avons, en effet, dans tous les commentaires sur les décompositions des signaux, évoqué l'idée de fréquences, de périodes de retour dans la structuration de chaque signal. Mais nous les avons toujours donné en équivalent « épaisseur de sédiment » et non en temps. Nous devons donc maintenant présenter les datations qui ont été faites sur les échantillons sédimentaires, et essayer de voir si elles nous permettent de faire une conversion acceptable des épaisseurs de sédiments en temps.

4. Les datations

Nous prenons le parti de développer la question des datations en dernier lieu car c'est une approche du remplissage assez différente de ce qui a été présenté à travers l'analyse granulométrique et les traitements de signaux. De plus, les datations auxquelles nous avons pu procéder dans le cadre de cette thèse ont porté non pas sur les sédiments détritiques à proprement parler, mais sur leur contenu en matière organique, et en particulier en charbons de bois. Ce dernier point, qui clôturera ce chapitre de présentation des résultats, sera articulé en deux axes. C'est tout d'abord les motivations qui nous ont poussé à faire ces datations et leurs résultats qui seront présentés. Un essai de corrélation des différentes dates obtenues, afin d'essayer de remonter vers des données sur les taux de sédimentation des pièges lacustres endokarstiques, sera ensuite exposé.

a) Argumentation et résultats

Le recours aux datations est indispensable pour fixer le cadre évolutif des sédiments étudiés et ainsi les croiser avec les données environnementales et climatiques. Dans notre travail, les datations ont été réalisées sur les charbons de bois, avec plusieurs raisons à ce choix. Tout d'abord, la présence de fragments de charbons de bois était avérée dans toutes les carottes étudiées, et de façon assez fréquente et régulière, ce qui constituait un bon moyen d'obtenir des calages à des profondeurs variées, et éventuellement de caler entre eux les échantillons. De plus, les datations de charbons, par le biais du carbone 14, présentaient l'énorme avantage de ne pas détruire la carotte. En effet, les datations au plomb, portant sur le sédiment lui-même, nécessitent la destruction d'une partie au moins de l'échantillon (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.5.d). De plus, les travaux antérieurs sur cette grotte [Blois, 2000] ont montré toute la difficulté qu'il y a à établir un modèle de sédimentation, sur la base de quelques datations au plomb. Enfin, la connaissance plus générale de l'histoire du site et de son environnement a permis de mettre en évidence la présence d'une forte activité charbonnière sur le plateau sus-jacent aux grottes, sur plusieurs siècles (entre le XV^{ème} et le XIX^{ème} siècle). Il a déjà été prouvé que cette activité a été transmise au réseau karstique, par la présence de charbons attribués à cette exploitation du plateau, dans les stalagmites des grottes de Choranche [Villard, 1997 ; Perrette *et al.*, 1997a]. Ce faisceau d'arguments permettait donc de considérer que les datations de charbons piégés dans les sédiments détritiques seraient un bon moyen de restituer aux deux lacs étudiés leur cadre chronologique.

Près d'une vingtaine de charbons ont été prélevés dans les six carottes à disposition, pour être datés par le ¹⁴C. Ils ont été nettoyés et séchés à l'étuve (4 jours à 30 °C), puis pesés. Malheureusement,

la petite taille des fragments récupérés, et surtout leur très faible poids (toujours inférieur à 0,01 g), n'a autorisé la datation que des neufs plus « gros » fragments (tableau III.12). Ces datations ont été faites au Laboratoire du Radiocarbone de Poznań. Sur les neufs charbons datés, quatre sont à considérer avec prudence, toujours à cause de trop faibles poids. Les différentes dates obtenues ont ensuite été calibrées par nos soins, en utilisant le programme Calib4.4™ et en se basant sur la grille de calibrage appelée « intcal », la plus adaptée aux échantillons. L'incertitude retenue pour le calibrage est de 2σ , qui donne une plus grande marge de confiance, et qui est donc le choix le plus prudent. Cette correction des dates est indispensable, la méthode de datation ne tenant pas compte de la variation dans le temps de l'activité du ^{14}C atmosphérique (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.5.d). Les résultats sont détaillés dans le tableau ci-dessous (tableau III.13).

carotte	position en cm	matrice sédimentaire	poids sec en g	observation
COU 9902	8	niveau sableux	0.0003	4 jours à l'étuve à 30 °C pour tous
	16.8	niveau limono-argileux	0.0015	
CAT 9901	23	niveau sablonneux fin	0.0004	Les échantillons soumis à la datation sont ceux pour lesquels le poids est indiqué en vert.
	27.5	niveau sablonneux fin	0.0001	
CAT 9902	6	légère crue sablo-limoneuse	0.0041	
	17	légère crue limono-sableuse	0.0026	
	40.5	niveau argileux homogène	0.0015	
CAT 0101	1	niveau argileux homogène	0.0005	
	12.5	niveau argileux homogène	0.0036	
	29.3	niveau argileux homogène	0.0007	
CAT 0102	0.5	niveau sableux	0.0015	fond de la carotte
	2	niveau limoneux	0.0026	
	2.5	niveau limoneux	0.0078	
	34	niveau limoneux	0.0009	
	46.5	niveau limono-sableux	0.0007	
	84.5	niveau argileux homogène	0.0004	
CAT 0103	21	niveau argileux homogène	0.0003	
	33	niveau limoneux	0.0008	

Tableau III.12 : Caractéristiques des différents charbons prélevés.

Echantillon Charbon	Poids en g	Age 14C Brut	Incertitude	à 2 sigmas		Observation
				Age calibré intcal BP	Equivalent Cal AD	
COU 9902 à 16,8 cm	0.0015	1550	35	1353 - 1521	429 - 597	petit
CAT 9902 à 6 cm	0.0041	975	30	792 - 950	1000 - 1158	
CAT 9902 à 17 cm	0.0026	930	35	762 - 927	1023 - 1188	
CAT 9902 à 40,5 cm	0.0015	2490	50	2361 - 2736	787 - 412 BC	petit
CAT 0101 à 12,5 cm	0.0036	3630	40	3832 - 4084	2135 - 1883 BC	
CAT 0102 à 0,5 cm	0.0015	1155	40	972 - 1170	780 - 978	petit
CAT 0102 à 2 cm	0.0026	715	35	563 - 726	1224 - 1387	
CAT 0102 à 2,5 cm	0.0078	995	35	792 - 968	982 - 1158	
CAT 0102 à 34 cm	0.0009	1090	40	928 - 1066	884 - 1022	petit

Tableau III.13 : Les datations finales des charbons des sédiments lacustres de Choranche.

b) Degré de concordance entre les différentes dates

Pour le lac de Coufin, les datations qui ont été possibles techniquement ne sont pas suffisantes. Il en reste en effet une seule, jugée de plus en plus fiable par le laboratoire lui-même. Nous ne pourrions donc pas, sur la base des datations de charbons, travailler plus avant sur les taux de sédimentation du lac de

Coufin. Par contre, les huit autres dates, pour le lac de la Cathédrale, se répartissent assez bien entre les carottes. Elles portent en effet sur trois carottes : CAT 0101, CAT 0102 et CAT 9902 (figure III.83).

Au premier abord, ces dates apparaissent assez mélangées, avec des chevauchements et des incohérences chronologiques. C'est le cas par exemple, entre les deux premières dates de la carotte CAT 9902 où les deux charbons, pourtant distants de 11 cm, donnent des dates très proches, voire inversées du point de vue de la logique chronologique, le plus jeune étant plus profond. Le même cas de figure est encore plus flagrant sur CAT 0102, avec la toute première datation sur le charbon à seulement 0,5 cm du sommet qui donne des âges plus anciens que tous les autres charbons de cette carotte. De plus, la carotte CAT 0102 nous donne un calage puisque son sommet correspond à l'actuel.

Cette première série d'observations tend à montrer que les charbons ne sont pas de bons supports à l'établissement de la chronologie durant laquelle le lac de la Cathédrale a construit son remplissage détritique. Les charbons, aux dates très variables et peu conformes à la logique chronologique, semblent donc avoir une origine particulière. En effet, leur décalage par rapport au temps ne peut s'expliquer que d'une seule façon. Il est probable que ces charbons aient été piégés, pendant un temps, à d'autres niveaux du réseau karstique en amont du lac. Puis, sous l'évolution et les variations de l'écoulement de la rivière souterraine, ces dépôts vraisemblablement assez anciens ont été remobilisés et leur contenu acheminé « en vrac » jusqu'au lac. Les charbons, par leur nature, flottent plus longtemps dans l'eau que les particules détritiques. Ainsi, les charbons de différents âges se sont mélangés, puis lentement déposés de façon complètement désordonnée par rapport au temps. Vu l'âge très ancien de quelques-uns de ces fragments, il n'est d'ailleurs pas exclu que ce phénomène se soit produit d'autres fois entre des pièges à l'amont du lac, avant leur piégeage actuel dans le lac de la Cathédrale. Cela ajouterait encore à la complexité de l'histoire de ces charbons.

Mais si on élimine les dates jugées peu fiables à cause de poids trop faibles, la logique chronologique s'améliore un peu, et on peut tout de même tenter quelques approximations sur le cadre chronologique et le fonctionnement de l'édifice sédimentaire. Pour cela, il faut reconsidérer les dates et les profondeurs réelles de chaque charbon (figure III.83). On maintient également l'hypothèse que le sommet de la carotte CAT 0102 correspond à l'époque actuelle. Cela fait, on voit que les dates s'enchaînent plus logiquement, les taux de sédimentation qu'on peut en déduire restent cohérents.

Les calculs des taux de sédimentation de la figure III.83 ont été fait en utilisant les deux bornes de chaque date. L'âge minimum (en cal BP) est donc à raccorder au taux de sédimentation maximum calculé, et l'âge maximum donne le taux de sédimentation le plus faible. Les différents taux ainsi calculés s'organisent en deux groupes de valeurs. Le premier, qui correspond aux trois charbons les plus profonds, donne des taux de sédimentation assez homogènes, variant entre 1,64 mm par an et 2,19 mm par an. La moyenne des valeurs de ce groupe est de 1,87 mm par an. C'est un taux de sédimentation assez fort mais qui reste réaliste et tout de même intéressant. Le second groupe de dates correspond aux deux charbons très faiblement enfouis de la carotte CAT 0102. Il donne des taux beaucoup plus faibles, de l'ordre de 0,03 mm par an. Pour compléter ces différents calculs, on peut évaluer l'écart entre les carottes CAT 0101 et CAT 9902. Les charbons de ces deux carottes sont distants de 5,56 m (en considérant le charbon au centimètre 6 de la carotte CAT 9902). Au taux de sédimentation moyen de 1,87 mm par an, 5,56 m correspondent à environ 3000 ans de sédimentation dans le lac. Ce calcul place donc le charbon à 6 cm de CAT 9902 entre 1111 années et 858 années avant l'époque actuelle (selon les deux bornes de la date du charbon de CAT 0101). Ce charbon a été daté par le laboratoire entre 792 et 950 cal

BP. Il y a donc un décalage entre l'âge calculé et l'âge mesuré, de l'ordre de 66 à 161 ans. L'âge mesuré par le ^{14}C semble donc indiquer un léger ralentissement du taux de sédimentation. Pour les sédiments à une profondeur de deux mètres, et jusqu'à la surface, les raccords ne sont plus possibles, les deux charbons de CAT 0102 donnant des taux de sédimentation contradictoires par rapport à CAT 9902, allant de taux nuls à des taux de plus de 6 mm par an. Ces taux de sédimentation sont tout simplement impossibles, dans la mesure où les repères utilisés sont distants de 0,5 cm. Les dates des deux charbons de CAT 0102, distantes de 200 ans environ, mais de seulement 0,5 cm en distance verticale, ne sont pas exploitables pour poursuivre notre raisonnement. Ces incohérences dans les dates sont probablement liées au fait que l'on se trouve à un endroit de la carotte tout à fait particulier, à savoir à la surface de l'eau. A l'échelle du remplissage du lac, cette interface air/eau est un secteur extrêmement perturbé quant aux écoulements et donc en termes d'apports sédimentaires, de brassage et de remaniements également. La position des charbons, au vu des dates auxquelles ils renvoient, n'est donc à l'évidence pas originelle. Il y a vraisemblablement eu ici d'importants remaniements.

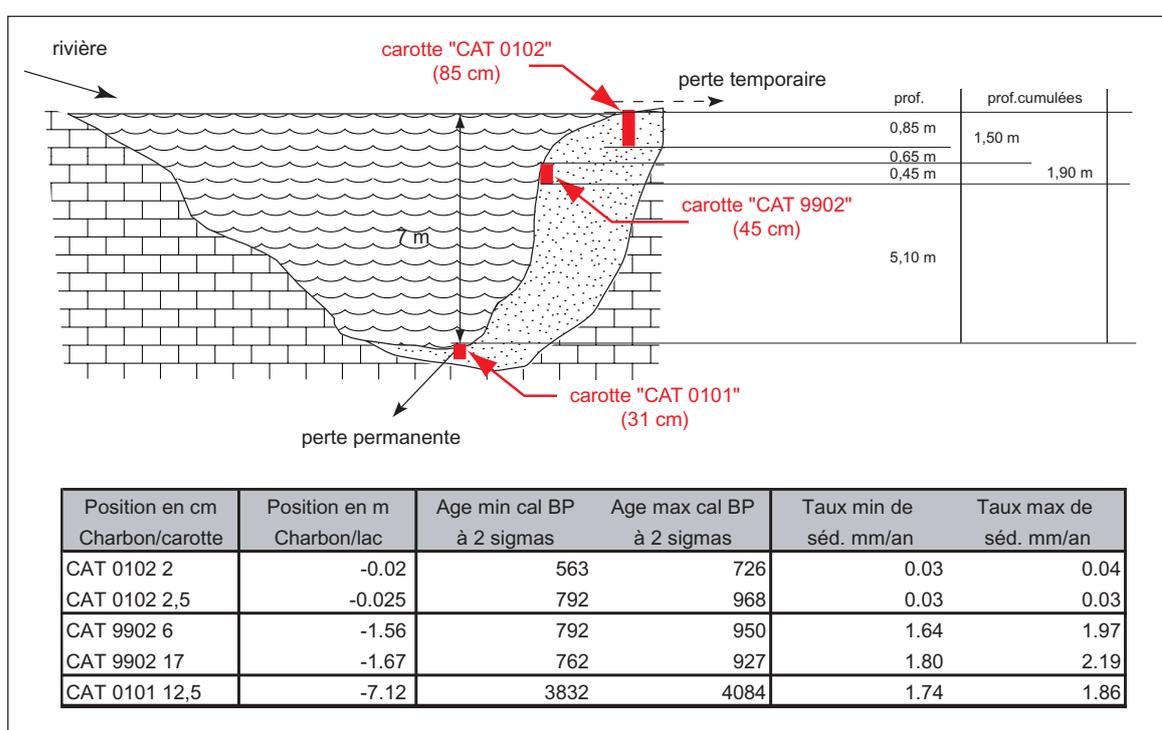


Figure III.83 : Localisation précise des charbons datés dans le remplissage détritique du lac de la Cathédrale et taux de sédimentation correspondants.

Face à cette hypothèse de charbons remobilisés et flottés, cette évaluation des taux de sédimentation doit être considérée avec une très grande prudence. Un autre élément doit nous inciter à beaucoup de précautions au sujet de ces datations et de ce que l'on en déduit. En effet, ces charbons datés ne permettent pas de retrouver la trace des vidanges accidentelles récentes que le lac de la Cathédrale a connues. Et pourtant, ces deux événements, en particulier celui de la vidange totale de 1980, ont forcément laissé leur empreinte dans le remplissage. Une lacune de sédimentation conséquente devrait exister, au moins dans la partie profonde du remplissage. Et pourtant, il semble que le taux de sédimentation moyen de 1,87 mm/an, basé sur le charbon le plus profond soit réaliste. On peut donc conserver pour le moment cette hypothèse et supposer que le remplissage détritique du lac de la Cathédrale représente un archivage sédimentaire des évolutions environnementales et climatiques des 4000 dernières années, avec un taux de sédimentation de 1,87 mm/an à -0,23 et +0,32 mm près. Il nous faudra donc réfléchir plus avant au processus des vidanges accidentelles, si l'on veut maintenir cette hypothèse. Par

rapport aux fréquences et aux résultats globaux sur la décomposition par échelle de temps, il semble donc que notre seuil principal, à 8 cm, corresponde en fait à une quarantaine d'années. La majorité des fluctuations sédimentaires seraient donc contrôlée par des phénomènes environnementaux aux périodes de retour inférieures à 42 ans (si échelle de temps de niveau 4 = 78,7 mm), voire même inférieures à 28,5 ans (si échelle de temps de niveau 4 = 53,3 mm) selon les échantillons.

Méthode/ Traitement	Intérêts	Limites	Apports dans le cas des lacs de Choranche
Granulométrie	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt	Pas d'indication sur la composition sauf décarbonatation	Identification des classes granulométriques et de leurs contributions respectives, rôle des écoulements, part et origine de la fraction carbonatée, nature et sources des autres minéraux en présence (usure des minéraux)
Observations microscope et loupe	Sources de matières par rapport à la géologie locale et au bassin versant > Spatialisation	Indicateurs qualitatifs de la composition du sédiment	
Diffraction des argiles	Origine de ces composantes (état des sols, conditions géologiques et/ou climatiques)		
Images de Passega et autres croisements	Hydrodynamisme Modalités du transport et du dépôt Qualité du sédiment (tri, classement...)	Indicateurs strictement granulométriques et plutôt qualitatifs	Identification des mécanismes de transport et des hydrodynamismes par Passega, relations entre ces dynamiques grâce aux ACP, premiers éléments sur le fonctionnement du piège lacustre.
Statistiques multifactorielles			
Niveaux de gris (imagerie)	Evolution globale de la sédimentation	Signaux très spécifiques pouvant masquer une partie des évolutions sédimentaires si considérés isolément	La comparaison de ces signaux dans une ACP montre leur complémentarité (points communs, recouvrements ou différences) d'un point de vue qualitatif. Ici, les niveaux de gris restituent l'évolution des dépôts détritiques d'une façon particulière. Les corrélations entre ces signaux quantifient cette complémentarité. Ici, les corrélations ont presque toujours des pourcentages très faibles, exprimant l'originalité de chaque signal mais aussi leur grande complexité.
Susceptibilité magnétique (min. ferro- magnétiques)	Identification et contribution de différentes sources de matières, repérage d'événements particuliers dans l'évolution de la sédimentation		
Spectro- colorimétrie (couleur et clarté)			
Comparaisons et Corrélations	Comparaison de la structure des différents signaux et recherche de liens éventuels	Plus les signaux sont complexes, plus leurs corrélations sont difficiles à établir	
Analyse spectrale	Mise en évidence de structures de fonctionnement et/ou de rythmicités contrôlant la sédimentation, raccord aux connaissances sur l'environnement	Nécessitent de grandes séries et un cadre chronologique	Sédimentation sous influence de deux phénomènes : anti-persistants et aléatoires auto-similaires (pentes Beta). Les décompositions attestent d'un archivage structuré, le plus souvent à haute fréquence.
Ondelettes			
Datations ¹⁴ C	Cadre chronologique Calage des différentes évolutions sédimentaires mises en évidence, raccord avec le contexte climatique et environnemental local	Risques de calages insatisfaisants ou insuffisants	Malgré des dates dispersées, proposition d'un cadre temporel englobant la totalité du remplissage, et d'un taux de sédimentation moyen.

Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 5.

SSSSSS

L'ensemble des traitements et analyses ayant été pratiqués sur les carottes des lacs de la Cathédrale et de Coufin ont été décrits et commentés dans ce chapitre. Nous avons bien conscience du caractère relativement fastidieux de ce chapitre pour le lecteur. Mais il nous paraissait important, étant donné le caractère nouveau de l'étude sédimentaire d'un lac souterrain, de développer les différentes étapes et d'expliquer pas à pas les observations tirées de ces analyses. La première série d'analyses

(granulométrie) a permis de saisir les modalités de la sédimentation dans ces deux pièges lacustres souterrains. C'est notamment le comportement binaire qui a pu être mis en évidence, par rapport à l'hydrodynamisme des écoulements, et leur capacité à se modifier rapidement, sans la moindre trace de phase transitionnelle conservée au niveau des sédiments.

La granulométrie a permis de montrer que les deux lacs ne sont pas comparables, une première réflexion sur la reproductibilité de notre démarche d'étude a ainsi été abordée. Il semble en effet que ces deux lacs, différents en grande partie par les apports de sédiments qui les caractérisent, ne donnent pas le même type d'archivage. La reproductibilité de l'approche semble donc ne fonctionner que partiellement sur des pièges pourtant comparables de prime abord. A travers l'étude comparée des lacs de la Cathédrale et de Coufin, nous avons pu voir que cette reproductibilité s'applique mieux si elle est confortée par la prise en compte de données plus globales, intégrant la morphologie du karst à proximité du piège, et plus largement, le fonctionnement général du système considéré. Le faible degré de reproductibilité que nous avons rencontré ici met donc en exergue la nécessité absolue de replacer le lac à la fois dans son contexte naturel et dans son histoire environnementale. L'étude et la connaissance, *via* les méthodes plus couramment utilisées en karstologie, des systèmes karstiques pour lesquels les sédiments détritiques sont étudiés, s'avère donc réellement indispensable pour appuyer les résultats issus du volet plus novateur de notre méthodologie.

Les différents autres signaux sédimentaires, et leur analyse par les méthodes de traitement du signal se sont également montrés enrichissants. Malgré la complexité des différents signaux, la mise en évidence d'un certain nombre de structures a été possible. De plus, la constance de certains signaux entre les différents échantillons, a permis de montrer leur pertinence en tant qu'outil de décryptage de l'archivage sédimentaire. Enfin, les datations de charbons nous ont aidé pour l'établissement d'un contexte chronologique encadrant l'intégralité du remplissage du lac de la Cathédrale. L'hypothèse retenue, avec toutefois beaucoup de prudence sur les dates, est que le remplissage du lac de la Cathédrale couvrirait une période d'environ 4000 ans, avec un taux de sédimentation moyen estimé à 1,87 mm par an. Cet enregistrement serait essentiellement structuré par des processus haute fréquence, agissant sur moins de 40 ans, et vraisemblablement de deux natures : les fluctuations désordonnées et constantes liées à la pluviométrie, et les phénomènes de crue à la fois plus marqués, plus violents et plus ponctuels.

Dans le chapitre suivant, ces différents résultats seront mis en communs et confrontés aux autres connaissances de ce système karstique. Leur association permettra de proposer une réflexion plus poussée sur cette mémoire environnementale et son contenu, et sur ses rapports étroits (type et temps de réaction) avec l'environnement local et son évolution.

CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET INTERPRÉTATIONS.

Les résultats tirés des différents protocoles analytiques sont ici confrontés et croisés aux données environnementales et géomorphologiques, afin de mettre en avant la qualité et l'intérêt de la mémoire naturelle « sédiments lacustres endokarstiques ».

Ce chapitre s'articule en deux grands axes. En premier lieu, après avoir discuté des limites de la méthodologie employée, une carte d'identité des pièges lacustres endokarstiques sera proposée, sur la base des images de Passega. Le fonctionnement du lac en tant que piège à sédiments sera également abordé. Ce premier point permet de traiter la question de la reproductibilité de la méthode, entre deux pièges *a priori* comparables d'un même système karstique. Les premières données ont montré que la reproductibilité n'est pas celle que nous attendions. Une méthodologie plus affinée et des critères de mise en oeuvre plus stricts seront proposés. Cela permettra de contourner les problèmes rencontrés, et d'avoir de bonnes conditions d'application pour les sites et les pièges fossiles.

Le second volet de ce chapitre est consacré à la valeur informationnelle, et notamment environnementale, archivée dans les dépôts détritiques. En confrontant les différents résultats (description des échantillons, analyses granulométriques, étude de la structure des signaux et datations) aux données environnementales du site étudié et à ses variations dans le temps, un cadre chronologique général de l'accumulation sera proposé. Différentes hypothèses sur la genèse du remplissage seront alors discutées. Un premier bilan quant à la capacité mémoire des sédiments détritiques endokarstiques sera développé.

1. Le point sur la caractérisation des pièges lacustres de l'endokarst

a) Le lac de la Cathédrale

1. Les images C/M comme carte d'identité des pièges

Parmi les différents moyens d'études présentés, les images C/M, basées sur les théories de Passega [1964] et utilisant des indices granulométriques du sédiment ont permis de fournir une image caractérisant le piège lacustre endokarstique. Les images C/M des cinq carottes du lac de la Cathédrale ont montré une disposition des points de mesure analogue, quelque soit la profondeur de l'échantillon et sa position dans le lac. Chaque image C/M s'organisait autour de deux axes, un subhorizontal pour les niveaux grossiers, et un second incliné, autour duquel se plaçaient les points de la fraction plus fine. Cette disposition qui se retrouve pour le lac de Coufin (figure III.84), constitue une véritable « carte d'identité » du piège lacustre endokarstique.

L'enveloppe globale des points de mesures proposée lors de la présentation des résultats peut être restreinte, afin d'être plus pertinente, et caractériser plus strictement les pièges lacustres endokarstiques. Pour cela, nous avons eu recours aux régressions polynomiales. Pour chaque carotte, différentes régressions polynomiales ont été définies, pour tester les différents degrés de précision

(figure III.85). Ainsi, les régressions polynomiales d'ordre 2, 3 et 5 ont été comparées (figure III.86). Parmi celles-ci, ce sont les courbes enveloppes construites grâce aux polynômes d'ordre 3 qui apparaissent les plus pertinentes. Les régressions polynomiales d'ordre 3 ont donc été retenues ; les régressions d'ordre 2 donnant une image trop peu synthétique, alors que les régressions d'ordre 5 impliquent une synthèse des données trop puissante, qui introduit trop de perte d'informations. Ce tri fait, chaque carotte est représentée sur le diagramme bi-logarithmique de Passega par deux courbes polynomiales, qui encadrent à $\pm 0,5$ la courbe polynomiale centrale synthétisant la disposition du nuage de points. Ces deux courbes enveloppes, donnent une fenêtre de 1 unité de validité pour chaque échantillon.

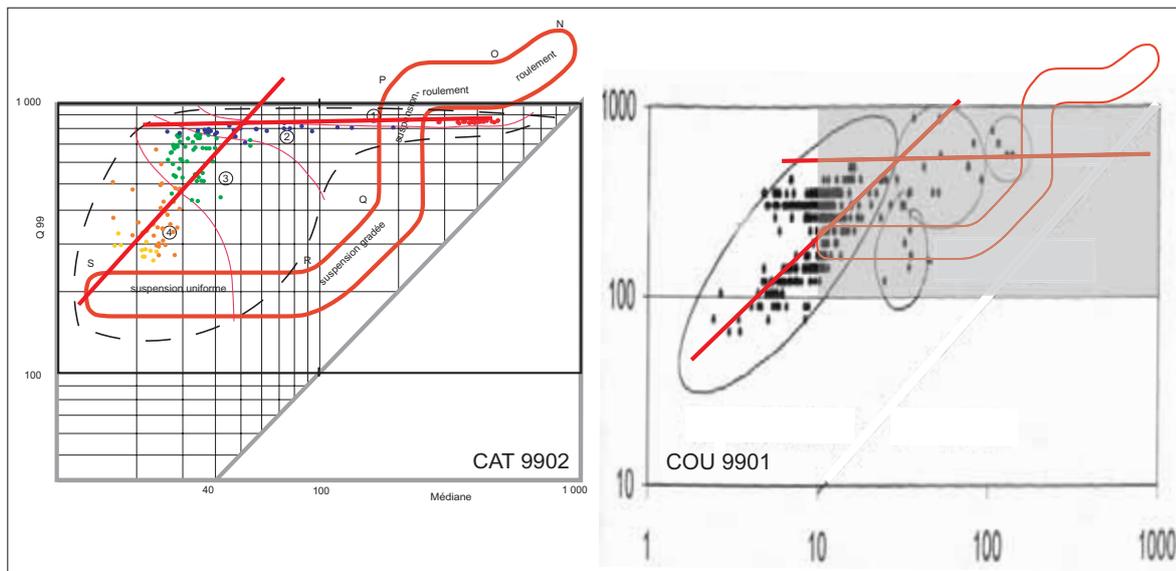


Figure III.84 : Les premières descriptions des images de Passega proposées pour les lacs de Choranche.

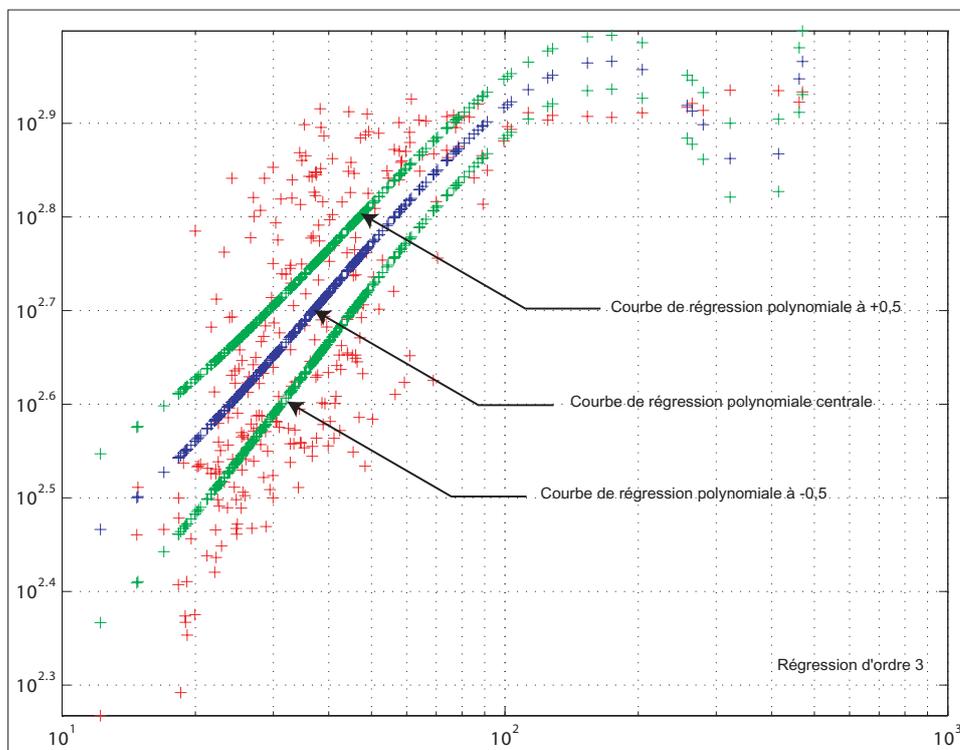


Figure III.85 : Exemple d'une régression polynomiale sur les données de la carotte CAT 0102.

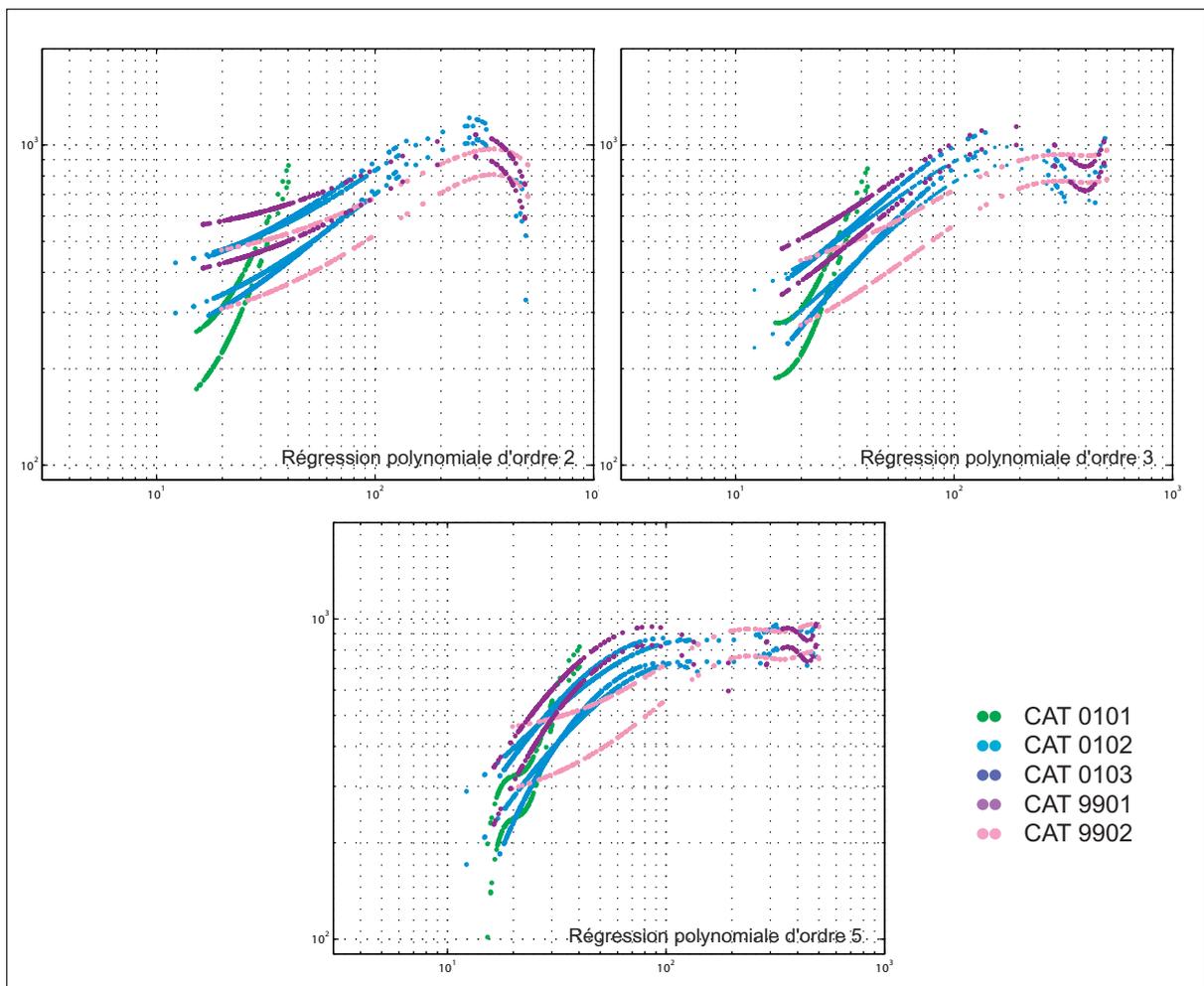


Figure III.86 : Comparaison de la pertinence des différentes régressions testées sur les échantillons du lac de la Cathédrale.

Les courbes enveloppes des cinq carottes du lac de la Cathédrale, placées sur un seul et même diagramme de Passega, permettent de proposer une image caractéristique du piège lacustre endokarstique (figure III.87). Grâce à cette représentation plus contrainte de la sédimentation du lac de la Cathédrale, nous pouvons décrire de façon un peu plus approfondie le fonctionnement du piège sédimentaire. En effet, les courbes enveloppes des cinq échantillons du lac de la Cathédrale s'organisent en deux grandes zones de sédimentation aux caractéristiques différentes. La zone 1, marquée en bleu, regroupe les carottes prélevées près de la surface. Cette zone semble donc correspondre aux dépôts des sédiments en bordure du piège, sur les pourtours du lac. Elle est caractérisée par une partie subhorizontale, à droite, qui correspond au secteur des niveaux grossiers (crues ponctuelles ou périodes de hautes eaux). Toute la partie gauche de cette zone est d'une pente relativement faible, et correspond à une sédimentation plus fine, et plus courante dans le lac. La seconde zone, en vert, est supportée par la carotte CAT 0101, la seule localisée au fond du lac. Les courbes enveloppes se distinguent nettement des quatre autres, par une pente plus forte, et l'absence totale de sédiments grossiers. Cette zone caractérise la sédimentation du fond du lac. Compte tenu de la particularité du lac (perte permanente et diffuse localisée dans le fond), cette seconde zone doit sûrement une partie de ses critères distinctifs à ce fonctionnement hydrologique particulier. L'absence de particules grossières dans cette partie profonde des dépôts est probablement liée aux départs de matières ; les particules grossières ayant une moindre force de cohésion, sont plus facilement remobilisées et absorbées vers la perte de Serpentine. Des deux zones de sédimentation identifiées sur cette image, la seconde est donc vraisemblablement la plus fragile et la moins représentative en terme de reproductibilité.

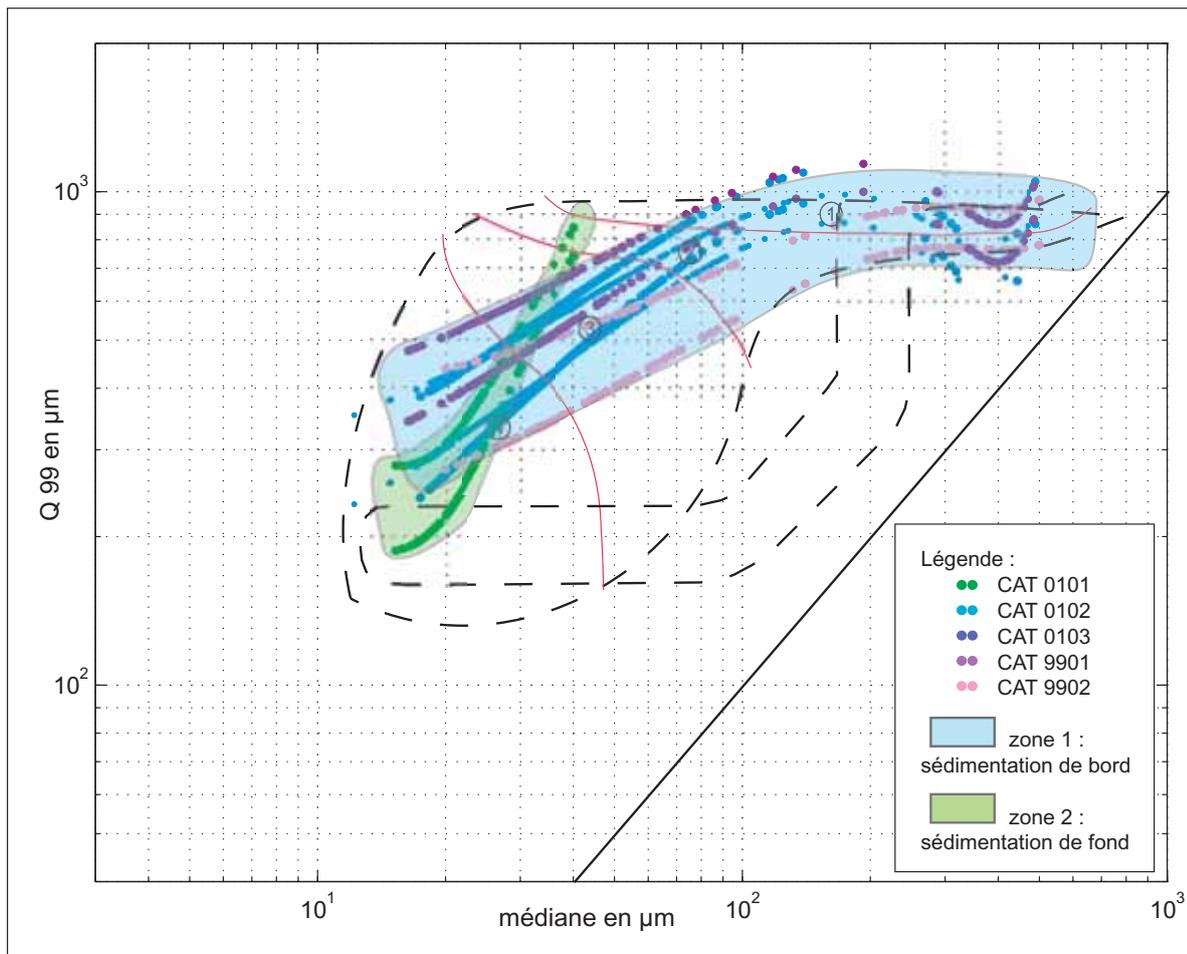


Figure III.87 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés en contexte lacustre, élaborée à partir des carottes du lac de la Cathédrale.

Nous faisons donc l'hypothèse que la disposition des courbes de régression est représentative de sédiments lacustres endokarstiques ayant été transportés par une rivière aux écoulements plus ou moins pérennes. Cette figure peut être proposée comme une carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés dans un lac, dont l'évacuation permanente des eaux se fait par le fond. Cette figure de synthèse sera croisée avec celle tirée des travaux sur les sédiments du lac de Coufin, et elle servira de référence aux études menées sur des sites non fonctionnels (cf. *infra* : Partie IV, Chap. II et III). La validité de cette carte d'identité sera ainsi éprouvée, et discutée selon les cas de figure.

2. Le modèle de fonctionnement de ce piège

Grâce aux résultats collectés, il est possible de proposer la synthèse suivante sur le fonctionnement du lac de la Cathédrale en tant que piège à sédiments. La sédimentation dans ce lac semble contrainte, au niveau des écoulements et des apports de matière, par un fonctionnement clairement binaire. Le processus sédimentaire dominant repose sur un hydrodynamisme calme à faiblement agité de la rivière. C'est un processus pérenne et il nourrit le piège lacustre endokarstique en apports fins. Le remplissage détritique est ainsi alimenté de particules argileuses et silteuses, dont les plus grosses peuvent parfois indiquer des variations ponctuelles de l'hydrodynamisme. Au niveau du lac, le volume d'eau assure une inertie et les particules se répandent dans toute la surface du lac, pour se déposer ensuite par des décantations plus ou moins rapides et napper ainsi le fond et les bords du lac.

Le second processus, moins régulier et plus brutal correspond aux événements hydrologiques responsables de l'apport et de la sédimentation de matériaux plus grossiers. L'étude des signaux a permis de mettre en avant leur caractère ponctuel et irrégulier (anti-persistance au niveau des densités spectrales). Sur un plan dynamique, il semble que lors de ces événements, la sédimentation fine est purement et simplement « interrompue », cette fraction étant évacuée par la perte temporaire de Chevaline. En amont, la rivière fournit des apports plus massifs de particules grossières qui sont très vraisemblablement issues de la remobilisation de dépôts anciens, si on se réfère à leur composition minéralogique. Cette augmentation de l'hydrodynamisme semble survenir très rapidement, sans réelle phase de transition tout au moins à l'amont immédiat du lac (images de Passega et ACP). Comme la sédimentation à dominante fine, ces apports grossiers sont diffusés dans tout le volume du lac et leur dépôt se fait sur toute la surface du remplissage. L'arrêt d'un tel épisode de sédimentation grossière est tout aussi rapide que sa mise en place ; cela s'exprime par l'absence de dépôts transitionnels. En effet, les silts correspondants à la sédimentation fine dominante, et ayant en tous points des comportements identiques aux argiles, ne peuvent être assimilés à des processus transitionnels entre les deux modes principaux de sédimentation (l'étude des trois grandes classes granulométriques : argiles/silts/sables, et leurs coefficients de corrélation en sont une des plus nettes démonstration). C'est un argument supplémentaire en faveur de l'alternance brutale qui semble exister entre le processus sédimentaire dominant (dépôt argilo-silteux sous faible hydrodynamisme) et le processus ponctuel surimposé correspondant aux événements hydrologiques majeurs comme les crues ponctuelles et les périodes de hautes eaux (dépôt sableux sous fort hydrodynamisme).

Dans cette hypothèse d'un fonctionnement sédimentaire binaire, deux aspects de l'étude doivent pourtant être plus abondamment discutés, car ils ne sont pas en totale cohérence avec le modèle sédimentaire proposé. C'est tout d'abord la particularité de la carotte CAT 0101, du fond du lac, qui ne montre pas de niveaux sableux. Mais c'est aussi l'absence de traces de la vidange accidentelle du lac en 1980 notamment. Ces deux points sont ici discutés, et nous verrons ainsi pourquoi ils restent en marge du fonctionnement sédimentaire global du lac.

En ce qui concerne la carotte CAT 0101, la carte d'identité du piège lacustre met en avant l'absence de sédimentation grossière au fond du lac. Or, selon le fonctionnement sédimentaire exposé ci-dessus, l'hypothèse de l'absence d'apports grossiers ne peut qu'être rejetée. Ainsi que nous l'avons suggéré pour expliquer l'image C/M de synthèse (figure III.87), la sédimentation visible sur cette carotte semble grandement liée à la présence de la perte permanente du lac, toute proche. Cette perte pourrait provoquer un tri sédimentaire, dans la partie basse du remplissage du lac. Son ampleur sur le remplissage est difficile à estimer avec plus de précision, il faudrait pour cela avoir d'autres prélèvements, à des profondeurs diminuant régulièrement. Mais sur le plan dynamique, il est possible d'expliquer cette spécificité de la sédimentation au fond du lac. Le volume d'eau piégé dans le lac, par son simple poids, exerce une pression d'autant plus forte sur la perte permanente que celle-ci est spatialement contrainte (d'autant plus depuis le réaménagement du fond du lac). Partant de cette hypothèse, il semble difficile que cette pression et cette poussée vers le fond n'aient aucune influence sur les dépôts localisés à proximité de la perte. De fait, on peut émettre l'hypothèse que les particules les plus grossières arrivant dans le fond du lac ne se déposent même pas ou assez peu de temps, et sont immédiatement transmises à la rivière Serpentine par aspiration au niveau de la perte (figure III.88). Un tel scénario est envisageable dans la mesure où les particules sableuses, une fois mises en mouvement, ont une très faible cohésion ; ce qui n'est pas le cas des particules argileuses et silteuses, dont la cohésion pourrait ainsi expliquer leur maintien au fond du lac. Si les quatre carottes échantillonnées sous une

faible tranche d'eau, voire depuis la surface du remplissage, permettent d'étudier celui-ci à travers les apports de particules que la rivière Chevaline lui fournit, la carotte CAT 0101, elle, semble plutôt nous renseigner sur les départs de matières détritiques que ce même lac subit, compte tenu de la disposition géométrique de ses entrées et de ses sorties.

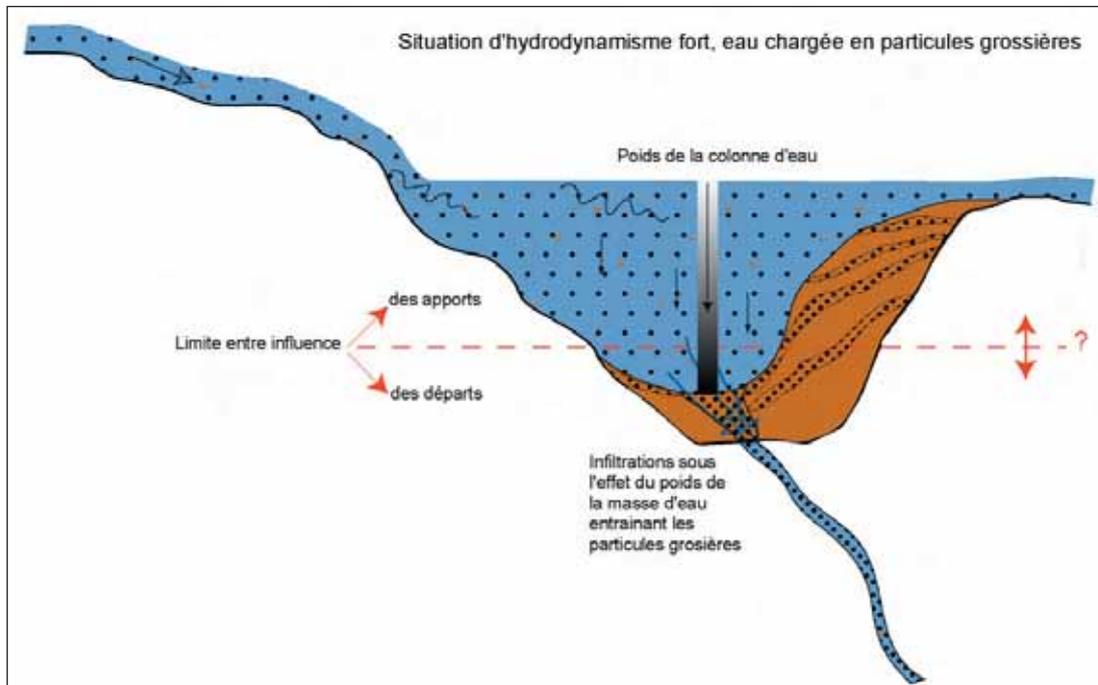


Figure III.88 : Le fonctionnement de la perte permanente au fond du lac de la Cathédrale, impact sur le remplissage détritique profond.

Le second problème par rapport au modèle de sédimentation proposé est lié aux vidanges accidentelles que le lac a connu, notamment celle de 1980. On aurait pu s'attendre, en effet, à trouver dans quelques unes des carottes au moins la trace de cet événement particulièrement important. Cela aurait pu se traduire par une importante limite érosive, et/ou la déstructuration localement, de quelques lamines sédimentaires. Or, il n'en est rien et sur les cinq carottes étudiées, aucune trace de cette vidange n'est repérable. Les différents résultats collectés et le modèle proposé laisseraient penser que le remplissage encore en place n'a pas subi, en tout cas pas directement, la vidange. En effet, nous avons dit au début de cette partie (cf. *supra* : Partie III, Chap. I.1.a) que le remplissage détritique du lac de la Cathédrale avait continué à se démanteler partiellement depuis la vidange complète, lors de crues ou d'étiages sévères. Ce démantèlement se traduit par la chute de « blocs » de sédiments fragilisés, décollés lors de la vidange. Cette donnée autorise à penser que c'est seulement la partie centrale du lac qui a été affectée par la vidange, et que les bords de la banquette sont restés quasiment intacts, à part peut-être un léger basculement général vers le centre du lac, imperceptible à l'échelle d'une carotte sédimentaire. Aussi, sur cette réflexion de base, il devient possible de proposer un modèle de la dynamique du décolmatage du lac lors de la vidange accidentelle. Ce modèle pourrait être assimilé au phénomène du sablier, qui se vide progressivement par le fond et par son centre (figure III.89). Cette hypothèse permet de fournir une explication assez réaliste du processus de la vidange tout en restant compatible avec le modèle de sédimentation que nous avons proposé, et avec le fait qu'on ne retrouve aucune trace de cet événement dans le remplissage encore en place. Cette hypothèse est également en bon accord avec les propositions avancées pour expliquer la sédimentation de CAT 0101, introduisant l'influence du poids de la colonne d'eau et de la perte sur la sédimentation au fond du lac.

Les différents résultats et les interprétations que nous avons pu en déduire permettent donc de proposer un modèle de sédimentation, et une carte d'identité du piège à sédiments pour le lac de la Cathédrale. Dans ce modèle, nous devons retenir que les arrivées de particules sédimentaires ne sont pas les seules à caractériser le fonctionnement et l'évolution du remplissage. Dans le cas du lac de la Cathédrale, le fonctionnement sédimentaire est également sous le contrôle des départs de matière. Cela est dû à la présence de la perte diffuse mais pérenne dans le fond du lac, dont le rôle a été, et est vraisemblablement amplifié par la colonne d'eau et l'influence physique de son poids. Ce premier travail pose ainsi la question de la reproductibilité des analyses et traitements réalisés pour l'établissement de la « carte d'identité ».

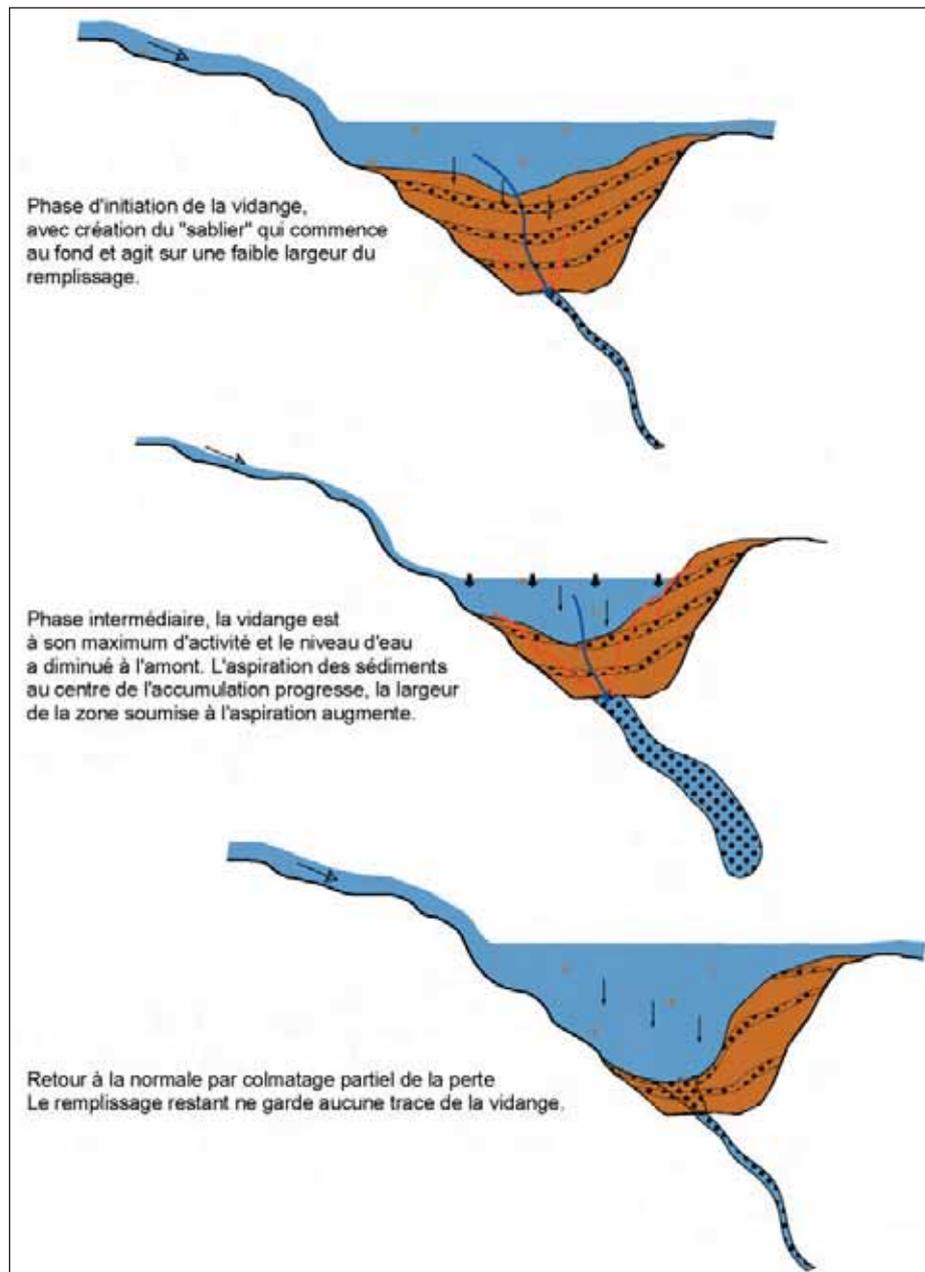


Figure III.89 : Hypothèse sur la dynamique du processus de la vidange accidentelle de 1980.

b) La reproductibilité piège à piège : le lac de Coufin

En reprenant les différents résultats obtenus pour le lac de Coufin et en proposant une interprétation, des précisions peuvent être apportées, notamment sur le protocole d'étude que nous avons élaboré dans ce travail.

1. La carte d'identité du piège lacustre endokarstique mise à l'épreuve

Sur la base de la carotte COU 9902, le lac de Coufin peut être positionné sur l'image de Passega proposée en tant que carte d'identité du piègeage lacustre endokarstique (figure III.87). Les courbes utilisées ont été construites selon les mêmes critères que pour le lac de la Cathédrale, afin de ne pas fausser la comparaison (régression polynomiale d'ordre 3 et fenêtre de 1 unité entre les deux courbes enveloppes). On obtient un tracé différent sur l'image de Passega, qui se distingue des deux zones initialement identifiées (figure III.90). En première lecture, les deux lacs ne fournissent pas la même image, et la typologie des pièges endokarstiques à travers cette représentation apparaît peu pertinente. Pourtant, plusieurs arguments nuancent cette conclusion.

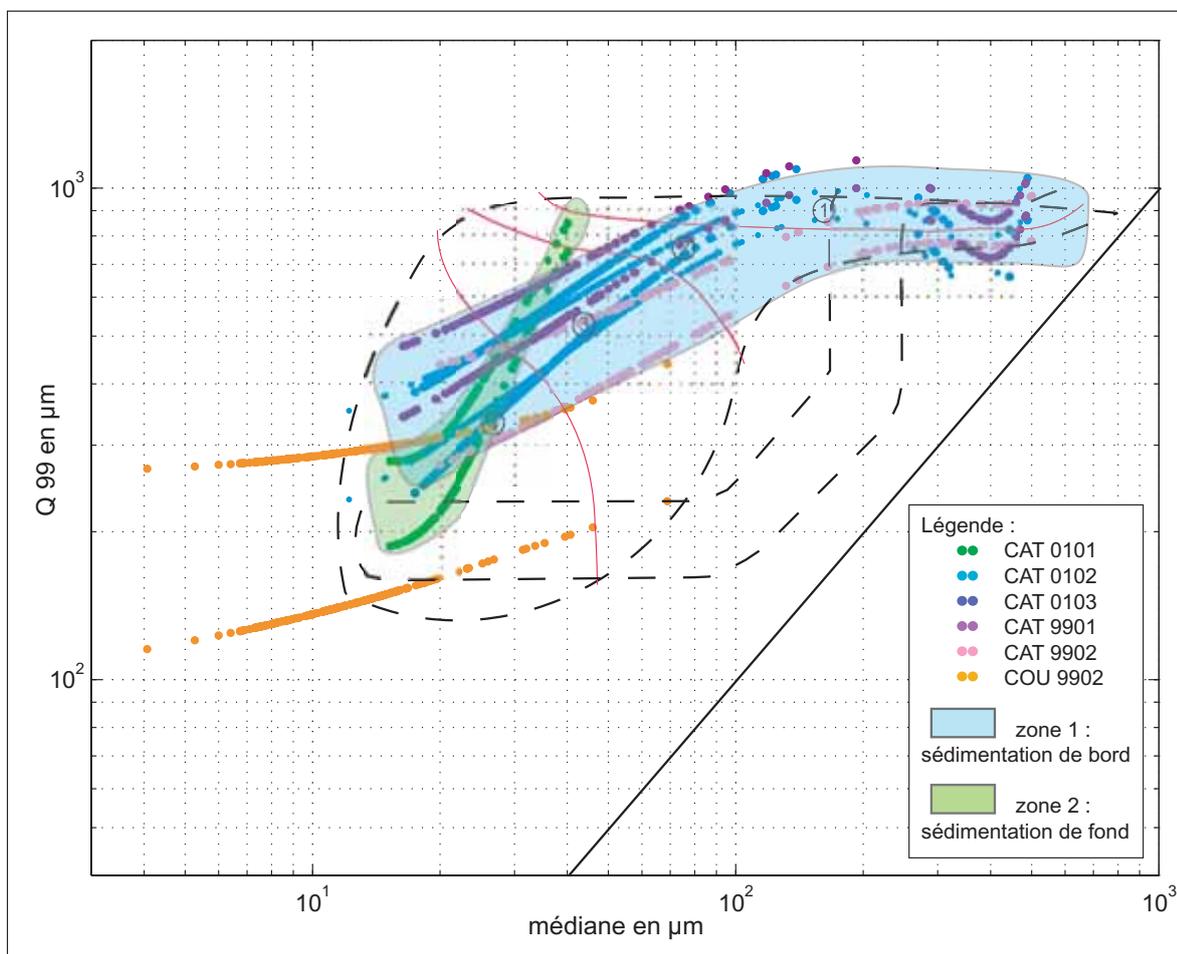


Figure III.90 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés en contexte lacustre, élaborée à partir des carottes du lac de la Cathédrale – Positionnement des courbes de l'échantillon du lac de Coufin.

Tout d'abord, nous avons vu que la sédimentation dans le lac de Coufin était beaucoup plus fine que dans le lac de la Cathédrale. L'image C/M classique place donc le nuage de points du lac de Coufin plus bas et plus à gauche, en toute logique par rapport aux critères granulométriques de la grille bi-logarithmique. Outre la différence de granulométrie et la présence d'un émissaire à faible profondeur,

ce décalage trouve aussi des éléments d'explication dans l'anthropisation que le lac de Coufin a subi. En effet, avant les aménagements de la grotte, le niveau du lac de Coufin était plus haut, sa trace est encore visible sur les rebords de la salle et sur une partie du concrétionnement. Cet ancien lac, plus important, permettait une sédimentation plus conséquente qu'aujourd'hui. Cela explique en partie les faibles pentes que nous pouvons voir actuellement pour la rivière de Coufin et l'aval de Serpentine, d'où un hydrodynamisme réduit et une sédimentation plus fine. D'autre part cet exercice de comparaison entre les deux lacs doit être conduit avec prudence. Nous n'avons en effet étudié qu'une seule carotte pour le lac de Coufin (COU 9902), et il serait dangereux de considérer que celle-ci est représentative, à elle seule, de l'ensemble de la sédimentation de ce lac.

Il apparaît donc plus pertinent d'observer les pentes globales des courbes de régression. Dans ce cas, les pentes des courbes de la carotte de Coufin sont très proches de celles des carottes du lac de la Cathédrale et notamment de la zone 1 qui se caractérise par une sédimentation de bords de lac, et de faible profondeur. On retrouve alors les mêmes caractéristiques que pour la carotte COU 9902, également localisée sur les bords du lac de Coufin.

On peut déduire de ces observations que la caractérisation d'un piège à sédiments par une image de Passega telle que nous l'avons construite semble possible. L'échantillon du lac de Coufin n'est pas en contradiction avec ce qui a été exposé pour le lac de la Cathédrale. L'identification du piège endokarstique, ou d'une partie de ce piège, repose en fait sur la pente générale des courbes de régression et non sur leur positionnement par rapport à la grille bi-logarithmique.

Par cette première comparaison de deux lacs actifs, la caractérisation des pièges sédimentaires endokarstiques avec les images de Passega est plutôt satisfaisante, puisqu'elle prend bien en compte les paramètres intervenant dans le piégeage des sédiments : la granulométrie et l'hydrodynamisme ainsi que le rôle respectif des arrivées de matières et des émissaires (nombre et position).

2. Le fonctionnement sédimentaire du lac de Coufin

Le lac de Coufin ne possède pas les mêmes apports de matières (deux rivières à l'amont : Coufin et Serpentine), ni les mêmes émissaires que le lac de la Cathédrale (un seul émissaire peu profond). Compte tenu de l'importance de ces deux paramètres, montrée à travers le modèle de sédimentation du lac de la Cathédrale, le fonctionnement sédimentaire global de cet autre piège lacustre endokarstique est donc probablement assez différent. Nous en donnons ici une lecture, fondée sur les différents résultats du chapitre II.

Les différentes contributions granulométriques ainsi que les traitements associés font apparaître un rôle de la fraction silteuse tout à fait différent du lac de la Cathédrale. Ici, la fraction silteuse reste dissociée de la fraction sableuse. Ainsi, si fractions argileuse et sableuse montrent un fonctionnement plutôt opposé, et binaire à l'image de ce qui a été décrit pour le lac de la Cathédrale, la fraction silteuse complique ce fonctionnement sédimentaire. En effet, on observe une opposition permanente entre argiles et sables ; la sédimentation argileuse étant largement dominante sur la sédimentation grossière, beaucoup plus ponctuelle (et nettement plus rare que dans le cas du lac de la Cathédrale).

La fraction silteuse nettement prépondérante n'est pas en relation avec les sables, ou avec les argiles (figure III.23). Des caractéristiques granulométriques à ce point déconnectées des deux autres,

supposent que la fraction silteuse est dépendante d'autres paramètres. La présence d'une seconde rivière responsable d'apports pourrait être une cause possible. En l'occurrence, il semble que la rivière de Coufin soit en cause, avec des apports assez différents de Serpentine, et de composition majoritairement silteuse.

Le fonctionnement du lac de la Cathédrale que nous avons proposé, et le fait qu'il se situe à l'amont du lac de Coufin, permet de retrouver dans la sédimentation du lac de Coufin la participation de chacune des deux rivières qui l'alimentent. Nous proposons donc le modèle de sédimentation suivant pour le lac de Coufin.

- Nous faisons l'hypothèse que le comportement binaire des fractions sableuses et argileuses est une réminiscence du fonctionnement du lac en amont, le lac de la Cathédrale. Les influences de ces deux contributions granulométriques (anti-corrélation la plus prononcée dans le graphique des contributions) seraient donc quasi-exclusivement transmises par la rivière Serpentine (jonction hydrologique entre les deux lacs). Il faut d'ailleurs préciser qu'il n'est pas exclu que la rivière Serpentine transmette également une partie de la fraction silteuse, qui serait alors calée sur les apports argileux. Mais il est impossible de l'estimer et de vérifier cela, car cette composante de la fraction silteuse, si elle existe, est complètement masquée, noyée par les apports de la rivière de Coufin. Dans cette hypothèse sur le rôle de relais joué par la rivière Serpentine, on peut affiner le modèle de sédimentation proposé pour le lac de la Cathédrale. En effet, on peut alors préciser que si la perte et le poids de la colonne d'eau opèrent un tri sur le fond du remplissage, celui-ci peut être précisé. Si c'est le transport des particules grossières qui est préférentiellement opéré, il n'en est pas pour autant unique, et une partie de la fraction fine du fond du remplissage de la Cathédrale serait également transmise vers le second lac.

- La seconde composante du fonctionnement sédimentaire du lac de Coufin est donc supportée par la rivière Coufin, issue d'une autre partie du drainage de ce système karstique, et dont la contribution sédimentaire semble massivement silteuse. Ces apports sont clairement soumis à une autre dynamique hydrologique, assez indépendante des apports en argiles et en sables. Toutefois, là aussi, il est tout à fait possible que la rivière de Coufin contribue aux apports argileux et sableux, mais dans des proportions qu'il n'est plus possible de distinguer au niveau du remplissage du lac de Coufin.

Avec des connaissances sur le site étudié, l'utilisation des images de Passega autorise une caractérisation des pièges sédimentaires endokarstiques. La comparaison des deux lacs de la Cathédrale et de Coufin tend à le montrer, même si ce n'est qu'une première tentative. Les similitudes et les différences entre les deux lacs (sources de matières, émissaires, géométrie des salles, granulométrie et hydrodynamisme) se retrouvent assez bien dans les images de Passega de synthèse, ces « cartes d'identités » que nous avons choisi d'utiliser.

3. Discussion sur la reproductibilité de la méthode

La réflexion faite ici, et les interprétations proposées sur le fonctionnement des deux lacs actifs en tant que pièges sédimentaires impliquent un premier bilan sur les atouts et les limites de la méthodologie afin de voir comment l'utiliser de façon plus performante, et d'améliorer sa reproductibilité à d'autres sites.

L'identification, la reconnaissance des pièges endokarstiques telle que nous l'avons proposée, passe par une analyse des modalités du transport et du dépôt sédimentaire. Mais par rapport à la méthodologie initialement choisie, il ressort de l'étude de ces deux lacs des grottes de Choranche plusieurs données qu'il est important de prendre en compte. En effet, il apparaît maintenant évident que les pièges endokarstiques ne peuvent être caractérisés « pour eux-mêmes », sur la base exclusive de leur fonctionnement intrinsèque. Entre les deux lacs de Choranche, avec pourtant plusieurs caractéristiques *a priori* comparables (lacs en bout du système de drainage, appartenant au même réseau karstique...), le fonctionnement sédimentaire de chaque lac ressort comme différent. De plus, il apparaît clairement que la caractérisation par les images de Passega fonctionne, sous réserve de la prise en compte des données autres que les critères granulométriques qui constituent l'image C/M. Il est donc indispensable de connaître les conditions environnementales et fonctionnelles des pièges étudiés, pour en faire une caractérisation pertinente.

En ce qui concerne les images de Passega, lorsqu'elles sont utilisées pour la reconnaissance d'un piège, nous avons montré que les types de sédiments pouvaient vraisemblablement être considérés comme un facteur secondaire. C'est plutôt la forme des nuages de points et de leurs courbes de régression qui est la clé d'interprétation principale, et la granulométrie précise peut être, dans ce cas précis d'utilisation du diagramme de Passega, négligée. Par contre, pour retrouver le fonctionnement de chaque lac en tant que piège sédimentaire, l'impact des apports et des départs de matières sur le piège apparaît, dans les deux cas, très fortement marqué au niveau du remplissage détritique et de son édification. Le fonctionnement du piège intègre donc, dans la constitution de l'archive sédimentaire, le rôle des rivières à l'amont et des émissaires à l'aval. C'est un des principaux impacts sur la qualité de l'archivage détritique, et qui intervient autant en quantité (nombre de rivières sources et/ou de pertes) qu'en qualité (hydrodynamismes, positions et pentes des écoulements amont et aval par rapport au piège...).

L'ensemble des caractéristiques de l'environnement immédiat du piège intervient pour une part non négligeable dans la structuration et l'évolution du dépôt sédimentaire. Un piège ne peut être considéré isolément, comme une entité à part entière. Son identification doit impérativement se faire, pour être valable et recevable, en intégrant les caractéristiques de son environnement, jusqu'à sa morphologie et sa position dans le système.

Par rapport à la démarche que nous avons adoptée, ce constat insiste sur l'importance de joindre aux méthodes d'analyses l'étude du système karstique tenant compte de son fonctionnement général. En effet, sur un site comme Choranche, où les pièges sont actifs, il est relativement aisé de comprendre le fonctionnement d'un piège. Il n'y a par exemple, aucun doute possible sur la présence de deux rivières qui alimentent le lac de Coufin. Et de fait, le décryptage des sédiments qui y sont piégés peut s'appuyer sur cette observation. Mais pour l'étude et la reconnaissance des pièges fossiles, cela devient beaucoup plus aléatoire, les apports et les départs de matières, entre autres, ne pouvant plus être aussi clairement identifiés. Les différentes techniques d'analyses sont testées dans la suite de ce manuscrit, sur un exemple de site hérité (cf. *infra* : Partie IV). Nous avons en effet choisi deux secteurs particuliers du réseau de l'Aven d'Orgnac, pour lesquels les mêmes méthodes ont été mises en œuvre. Nous verrons alors plus concrètement comment la démarche méthodologique peut et doit être appliquée sur des sites aujourd'hui non fonctionnels.

2. Evaluation de la capacité mémoire des dépôts détritiques endokarstiques

Dans ce deuxième point du chapitre, nous proposons différentes hypothèses quant au contenu informationnel de ces archives détritiques, en ce qui concerne les évolutions environnementales et climatiques. Les hypothèses sont discutées autour du cas du remplissage du lac de la Cathédrale, pour lequel nous disposons de plusieurs échantillons, à des profondeurs différentes. Le fonctionnement de ce lac est maintenant clairement établi, et nous nous basons également sur les datations de charbons, avec toutefois beaucoup de prudence. La comparaison avec le remplissage du lac de Coufin, pour lequel nous n'avons pas assez de données, n'est pas possible ici. L'étude de ce second lac privilégiait d'ailleurs les aspects plus méthodologiques de notre travail, que nous devons tester avant tout.

a) Hypothèses sur l'archivage détritique du lac de la Cathédrale

1. Positionnement du cadre chronologique global du remplissage

Pour la constitution du cadre chronologique général de l'accumulation détritique du lac de la Cathédrale, nous reprenons, sur la base des datations de charbons, l'hypothèse d'un taux moyen de sédimentation de 1,87 mm/an (cf. *supra* : Partie III, Chap. II.4.b). Lors de l'établissement de ce taux moyen de sédimentation, nous avons insisté sur la prudence et le recul à conserver. En effet, nous avons vu que les différentes dates obtenues à partir des charbons sont parfois en totale contradiction avec la logique temps/profondeur. Malgré cela, le calcul du taux de sédimentation moyen repose sur le charbon le plus profond, daté à 4000 ans cal BP environ. Nous faisons donc le postulat que cette date est fiable, mais au vu des inversions chronologiques des autres charbons datés, le lecteur aura saisi que ce postulat est fragile. Les datations sur sédiments détritiques en milieu souterrain sont un domaine de recherches encore en plein devenir. Nous précisons également que le fond du remplissage, à l'interface avec le bed-rock, n'a pas été atteint lors des campagnes de carottage. L'intégralité du remplissage du lac de la Cathédrale couvrirait donc vraisemblablement un peu plus de 4000 ans.

Toutefois, ce taux est réaliste et faute de données chronologiques plus pointues, nous nous basons sur celui-ci (1,87 mm/an soit environ 4000 ans d'archivage) pour discuter des interprétations possibles quant à l'information environnementale archivée par l'accumulation détritique dans le lac. Le sommet de l'accumulation correspond à l'époque actuelle, le piège lacustre étant encore actif à ce jour. L'intégralité du remplissage serait donc un enregistrement des fluctuations climatiques et environnementales, intégrant le rôle de l'Homme, et recouvrant la fin du Sub-Boréal et l'intégralité du Sub-Atlantique. Ces deux stades correspondent aux phases culturelles du Néolithique final, puis de l'âge du Bronze, de la civilisation Gallo-romaine, du Moyen-Âge, et des époques moderne et contemporaine (tableau III.14).

Par contre, dans cette plage de 4000 ans, le positionnement de chaque carotte sédimentaire, en fonction de sa profondeur de prélèvement est loin d'être évident. En effet, l'incohérence relative des autres dates et ce que l'on sait de ce remplissage (vidanges accidentelles notamment) impose une importante réserve. De plus, les différents échantillons ne sont pas « jointifs » entre eux, par rapport à la profondeur. Les problèmes liés aux lacunes de sédimentation et autres hiatus sont donc ici particulièrement marqués. Nous nous contentons donc de discussions plus globales sur le contenu informationnel de ce remplissage lacustre.

Chronologie absolue		Phases culturelles	Civilisation	Conditions paléo-climatiques
0 BP	Sub-Atlantique	Epoque contemporaine	passage civilisation rurale → moderne	Les activités anthropiques ne permettent plus de distinguer l'évolution naturelle de la couverture végétale entre 900 et 1200 : max de l'optimum climatique médiéval entre 1550 et 1700 : max du Petit Age Glaciaire
		Epoque moderne		
1 000		Moyen-Âge	An Mil : Grands mouvements de défrichement, organisation des villages	
		Haut Moyen-Âge		
2 000		Civilisation Gallo-Romaine		
		La Tène Hallstatt	Civilisation alpine de l'Age de Fer	
2 800	Sub-Boréal	Bronze final		Le chêne est dominant ; la LSF atteint 2400 à 2500 m en Maurienne
3 650		Bronze moyen	Influences de la civilisation des Tumulus	
		Bronze ancien	Influences de la civilisation du Rhône	
4 250		Néolithique final	Influences campaniformes	
	Néolithique récent	Conditions fraîches et humides		

Tableau III.14 : Les stades et les phases chronologiques couvertes par le remplissage détritique du lac de la Cathédrale (d'après Vivian *et al.* 1991).

Par rapport à la genèse de ce système karstique, le fonctionnement du lac de la Cathédrale en tant que piège sédimentaire apparaît *a priori* assez récent. En effet, des datations de concrétions sur la partie aval des réseaux, comprenant donc la salle de la Cathédrale, s'étalent entre 21 300 et 9700 BP. La morphologie de cette partie des réseaux telle que nous la connaissons aujourd'hui était donc déjà acquise au Tardiglaciaire [Delannoy, 1997]. Sur la base des datations de charbons, le piégeage des sédiments ne semble donc effectif que longtemps après. Si cela est logique du point de vue purement temporel, le temps écoulé avant le fonctionnement du lac en piège peut lui, avoir plusieurs origines. C'est par exemple, l'absence d'apports de matériel détritique qui a pu empêcher le piégeage des sédiments, ou encore, un colmatage de la perte vers Serpentine qui s'est fait très progressivement, et peut-être en plusieurs fois, avant qu'un lac tel que l'actuel puisse se former et fonctionner en piège à sédiments. Enfin, on ne peut exclure l'hypothèse d'un lac qui s'est colmaté et vidangé plusieurs fois, avant cette accumulation qui remonte à environ 4000 ans.

2. Discussion sur l'histoire sédimentaire et les évolutions environnementales extérieures

Si le cadre chronologique ne nous permet pas de proposer un modèle âge-profondeur pour le remplissage du lac de la Cathédrale, plusieurs remarques peuvent tout de même être faites sur l'histoire, la genèse de ce remplissage et sur les paramètres environnementaux qui ont pu l'influencer. Nous insistons sur le fait que ces remarques se fondent sur les hypothèses et interprétations formulées jusqu'ici, à savoir 4000 ans de dépôts, selon le modèle de fonctionnement proposé et sans impact de la vidange de 1980 sur les sédiments actuellement en place.

Tout d'abord, le fait que la vidange n'ait pas affecté les dépôts est un argument en faveur d'une sédimentation continue, sans hiatus. Si un tel événement n'a pas eu d'impact sur l'accumulation en place, excepté peut-être sur sa partie la plus profonde (tri et départ de matière, démantèlement...), alors c'est une garantie d'un remplissage qui n'a pas cessé de fonctionner et d'accumuler des sédiments depuis 4000 ans (figure III.89). Seul un arrêt des apports a pu affecter la continuité des dépôts, mais le cadre chronologique ne nous permet pas de travailler à cette précision.

Sur la base de cette première remarque, il devient possible de positionner les différentes carottes entre elles. Pour les carottes CAT 9901 et CAT 9902 notamment, leur profondeur dans le lac n'est probablement pas le reflet de leur positionnement chronologique. Plusieurs arguments permettent d'avancer cette hypothèse. Tout d'abord, ces échantillons ont été prélevés par plongée, sur des « blocs » de sédiments basculés et désolidarisés du remplissage en place. Cet héritage de la vidange a produit un décalage des blocs basculés par rapport à la surface. Lors de l'échantillonnage, l'hypothèse retenue était celle d'échantillons dont le sommet correspondait bien à la sédimentation actuelle [V. Lignier, comm. pers.]. Les quelques datations de charbons obtenues sur la carotte CAT 9902 confirment cette hypothèse, notamment si on les compare aux dates obtenues sur CAT 0102, carotte prélevée à la surface (tableau III.14). En effet, parmi les dates considérées comme fiables, celles des charbons de CAT 0102 (à 2 cm et 2,5 cm) et de CAT 9902 (à 6 et 17 cm) se regroupent autour de 700/800 ans cal BP. En recalant ces carottes par rapport à leur sommet, on retrouve donc une certaine cohérence à ces datations de charbons. Enfin, il faut préciser que ces charbons ne datent pas le sédiment lui-même. Ils sont plus anciens (aux environs de l'an mil) et le fait de les retrouver sur une épaisseur de sédiments de quelques centimètres atteste seulement que leur piégeage dans le lac est synchrone, et que le décalage entre les carottes n'est donc bien qu'un héritage géométrique du démantèlement lié à la vidange (figure III.91).

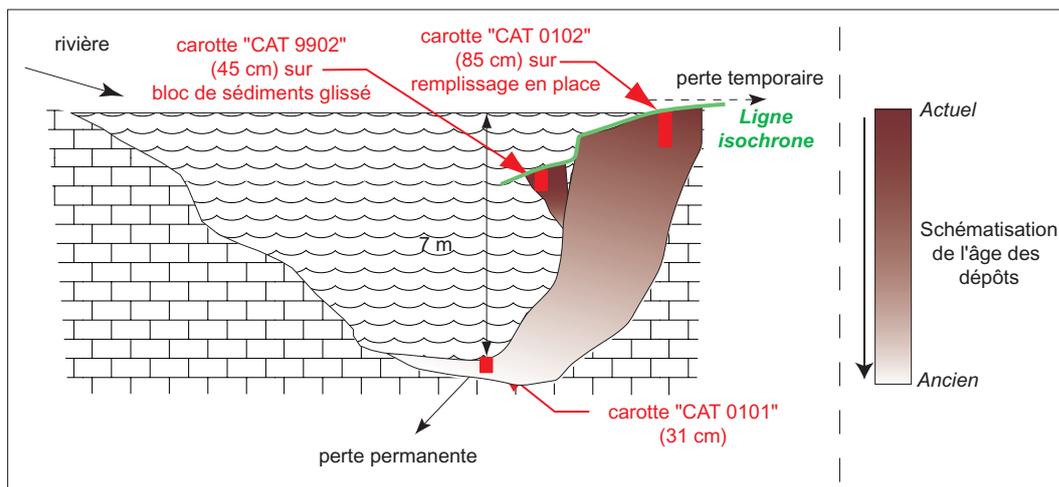


Figure III.91 : Disposition et chronologie des différentes carottes prélevées dans le lac de la Cathédrale.

Compte tenu de cette organisation, les carottes dont nous disposons ne retracent pas tout le remplissage mais seulement sa base et son sommet. L'écart entre les différents échantillons ne nous permet pas d'affiner le cadre chronologique de départ. Aussi, quant aux fluctuations environnementales que l'on pourrait identifier, reconnaître dans ce remplissage, la plus grande réserve s'impose. C'est seulement en s'appuyant sur d'autres travaux sur les archives naturelles, à différentes échelles [Le Roy Ladurie, 1983 ; Magny, 1995 ; Perrette, 2000], que l'on peut faire quelques remarques (figure III.92).

Le tableau de synthèse de Magny [1995] indique le cadre environnemental retrouvé dans différentes archives naturelles (zone orangée). Cette figure montre quatre grandes phases froides, dont le Petit Age Glaciaire, la plus récente. Ces événements ont également marqué l'enregistrement stalagmitique du Vercors proposé par Perrette [2000]. L'omniprésence de ces fluctuations dans les archives naturelles de surface comme endokarstiques autorise à penser que le remplissage détritique du lac de la Cathédrale peut avoir subi ces mêmes fluctuations. Au niveau des carottes, ce sont les différentes unités sédimentaires grossières décrites (à l'exception des passées grossières centimétriques) qui pourraient avoir un lien avec ces phases froides. En effet, il a été rappelé, au début de ce mémoire

(cf. *supra* : Partie I, Chap. I.3) que la sédimentation prend différentes expressions selon que la période est biostasique (phases plutôt chaudes avec pédogenèse et reconquête végétale d'où une sédimentation fine) ou rhexistasique (phases plutôt froides avec dégradation de la végétation et des sols d'où une sédimentation grossière). Le cadre chronologique global proposé et la présence d'unités fines et grossières en alternance dans les échantillons peuvent laisser penser que des liens avec les phases environnementales des 4000 dernières années sont possibles. Dans ce contexte, le rôle de l'Homme, notamment à travers l'exploitation du plateau sus-jacent a probablement laissé aussi son empreinte dans cette accumulation détritique. Mais on ne peut se permettre d'aller plus avant dans ces hypothèses. Il faudrait d'autres échantillons, de position intermédiaire dans le remplissage, et surtout d'autres datations pour affiner le cadre chronologique et les éventuelles variations du taux de sédimentation.

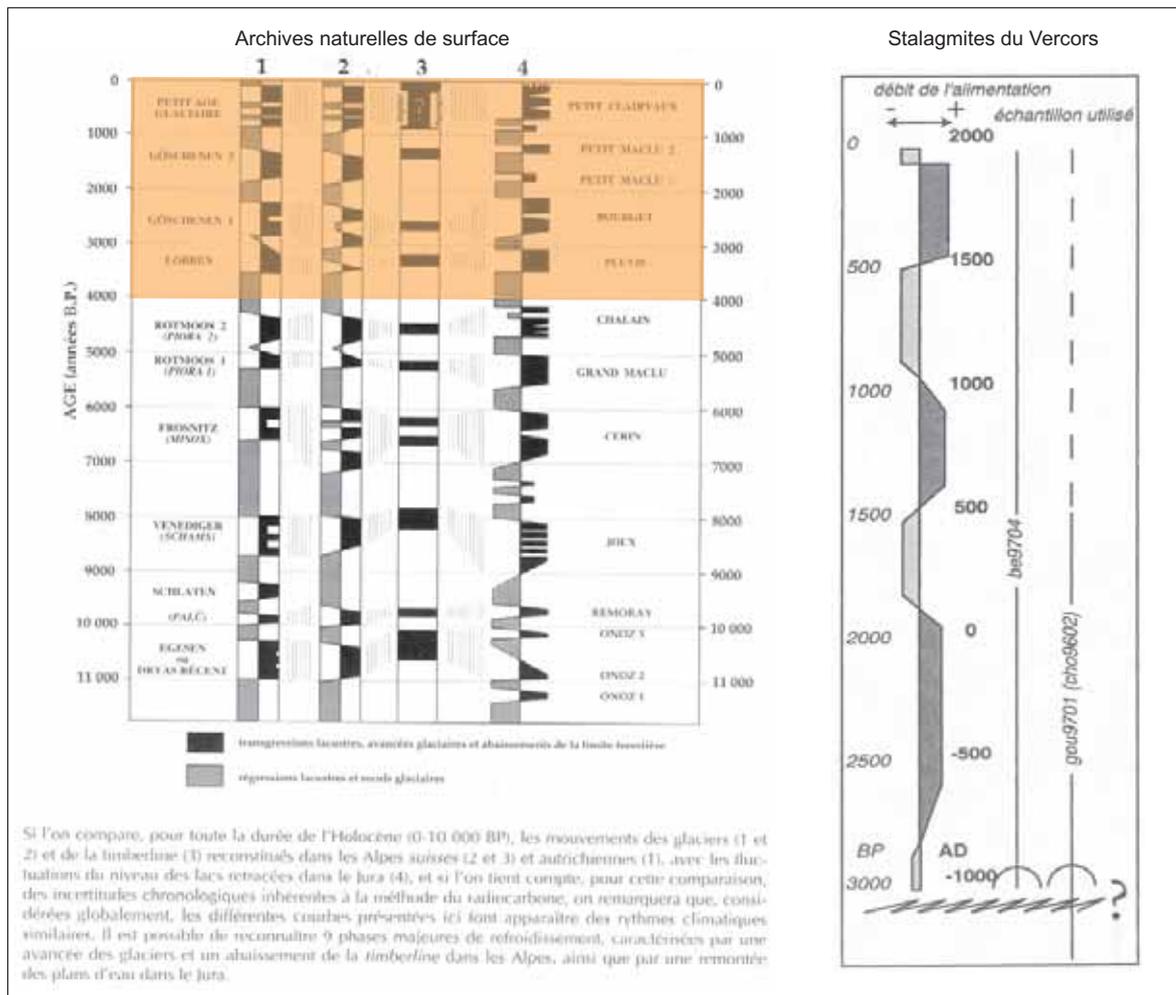


Figure III.92 : Les archives naturelles de surface (d'après Magny, 1995) et les archives stalagmitiques du Vercors (d'après Perrette, 2000) – Eléments de comparaison.

Enfin, d'autres aspects restent à analyser, par rapport à la qualité de l'archivage détritique. En effet, s'il semble bien y avoir un enregistrement sédimentaire en relation avec les évolutions environnementales externes, qu'en est-il de leur impact, en terme d'amplitude et de temps de réponse du milieu endokarstique ? Les données ne permettent pas de proposer des hypothèses ou de lever des incertitudes, mais ces aspects sont tout de même à prendre en compte. Là encore, et au-delà de cette thèse aux implications essentiellement méthodologiques, seuls un cadre chronologique précis et un modèle âge-profondeur du remplissage pourront permettre de répondre à cette question.

b) Remarques sur la structuration de l'archivage et les forçages extérieurs

Pour compléter cette réflexion sur l'histoire environnementale enregistrée dans les dépôts du lac de la Cathédrale, il nous faut maintenant retourner vers les résultats issus des traitements des différents signaux sédimentaires. Nous tenterons de voir quels sont les paramètres environnementaux et climatiques qui pourraient structurer et contraindre l'archivage sédimentaire.

En fonction des résultats tirés des analyses spectrales et des décompositions en ondelettes, et grâce à l'utilisation du taux de sédimentation de 1,87 mm/an à la base de nos réflexions, nous allons pouvoir proposer d'éventuelles relations entre les épaisseurs sédimentaires intervenant dans le cryptage du dépôt, et les fréquences, les périodes correspondantes. Nous allons donc pouvoir appréhender les rythmicités qui semblent intervenir dans la structuration du remplissage détritique. Les différentes fréquences sont rassemblées dans le tableau ci-dessous (tableau III.15). Ce tableau redonne pour chaque carotte, les principales composantes de temps structurant chacun des quatre signaux étudiés, et les périodes correspondantes. En gras, figure parfois la période dominante dans un signal, lorsque plusieurs périodes semblent intervenir. Enfin, les pentes β , caractéristiques des densités spectrales et indiquant le fonctionnement des processus en jeu, sont rappelées dans la dernière colonne.

Grâce aux graphiques de décomposition par échelles données pour le grain moyen (représentation intéressante seulement pour cet indice granulométrique ; figures III.71, III.72, III.74, III.76, III.78, III.80), nous avons pu également observer que c'est cet indice qui semble réagir le plus fortement, en termes de structuration (unités grossières des différentes carottes, notamment ; figure III.93). D'autre part une autre indication générale ressort à la lecture de ce tableau : la prédominance des périodes correspondant aux composantes de temps 3 et 4. Ces deux composantes renvoient en effet à deux groupes de périodes, entre 15 et 21 ans et entre 30 et 42 ans environ (selon le taux de 1,87 mm/an), qui semblent avoir un contrôle assez marqué sur la sédimentation détritique endokarstique dans son ensemble.

Composantes de Temps		1	2	3	4	5	
CAT 0102		Périodes correspondantes en années					Rappel pente
Grain moyen	US 2	3.5	7.1	14.2	28.4		-2
L*					28.4		-1
SM				14.2	28.4		-2
Ngris					28.4		-1
CAT 0103		Périodes correspondantes en années					Rappel pente
Grain moyen	US 2	4.5	9	18.1			-1
L*					36.2		-1
SM					36.2		-2
Ngris						72.4	-1
CAT 9902		Périodes correspondantes en années					Rappel pente
Grain moyen	US 1 et 3	3.7	7.4	14.8	29.7		-2
L*				14.8			-1
SM						59.4	-2
Ngris		3.7	7.4				0
CAT 9901		Périodes correspondantes en années					Rappel pente
Grain moyen	2/3 inf.			21.1		84.2	-1
L*		5.3	10.5	21.1	42.1	84.2	-1
SM				21.1		84.2	-2
Ngris		5.3		21.1			-1
CAT 0101		Périodes correspondantes en années					Rappel pente
Grain moyen	2/3 sup.	5.0					0
L*						80.2	-1
SM					40.1		-2
Ngris				20.1			-1

Tableau III.15 : Les périodicités intervenant sur la sédimentation détritique du lac de la Cathédrale, tirées des traitements par ondelettes.

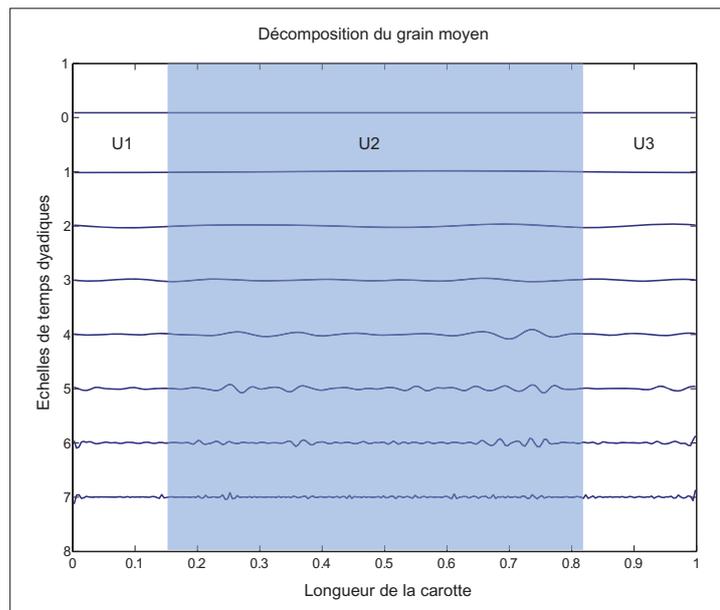


Figure III.93 : La décomposition par ondelettes du grain moyen de CAT 0102 : importance du signal sur l'unité sédimentaire grossière.

Compte tenu des informations réduites sur le cadre chronologique du remplissage, nous ne pouvons pas raisonnablement aller plus loin, dans l'interprétation et la signification de ces périodes. Le tableau III.16 n'a pas d'autre but que de fournir la synthèse des structures tirées des analyses par ondelettes. Faute d'une chronologie suffisamment précise, nous ne pouvons dire si les valeurs qu'il regroupe renvoient à des périodes et/ou cycles connus dans les évolutions de l'environnement et du climat.

Toutefois, la capacité mémoire des archives détritiques endokarstiques, au travers des résultats présentés et discutés ici, semble donc exister. Toute la première phase du travail visant à la compréhension du fonctionnement du piège sédimentaire a permis de mieux en saisir le contenu en terme d'archive naturelle. Sous réserve d'un cadre chronologique plus précisément construit, le décryptage devrait permettre de proposer des reconstitutions locales à régionales, où des influences variées, et imbriquées sur plusieurs échelles temporelles sont également perceptibles. Mais ces résultats, et en particulier les différentes périodes retrouvées montrent une limite, à ce stade de l'étude, de ces archives. En effet, comment expliquer que des carottes de sédiments provenant d'un même remplissage, parfois distantes de seulement quelques dizaines de centimètres, donnent des indications si différentes quant aux paramètres qui contrôlent leur croissance ? Les périodes reconnues dans les carottes CAT 0102 et CAT 0103 ne sont pas vraiment comparables (tableau III.15). Pourtant, il a été montré que leur fonctionnement est identique et ces carottes ont vraisemblablement connu une sédimentation synchrone en raison de leur proximité. Voilà donc une perspective de recherches toute trouvée pour la poursuite des travaux. En nous focalisant sur l'étude des périodes et des contrôles agissant sur la sédimentation, il nous faudra apporter des éléments de réponse à cette variabilité des facteurs de contrôle enregistrés au sein d'un remplissage.

§§§§§§§

Les différents moyens d'étude employés dans ce travail ont donc permis de révéler le potentiel des dépôts détritiques endokarstiques en tant que mémoire naturelle. Malgré certaines carences dont

nous avons pleinement conscience, notamment le cadre chronologique ici, cette archive semble tout à fait intéressante, pour elle-même mais aussi par rapport aux spéléothèmes et aux autres archives naturelles continentales. Pour arriver à ce résultat, notre démarche de travail et ses différentes étapes intermédiaires ont permis de bien poser les limites actuelles des méthodes.

Ce premier travail permet de se tourner vers les pièges à sédiments les plus pertinents et d'en comprendre le fonctionnement propre, au sein du système karstique. De là, l'étude de l'accumulation sédimentaire peut se faire de façon cohérente et éclairée, et les interprétations ou hypothèses fonctionnelles puis environnementales que l'on peut en déduire sont mieux cadrées, et de fait, de meilleure qualité. En l'occurrence, dans le cas du lac de la Cathédrale, nous avons pu mettre en évidence que l'impact de la vidange accidentelle était minime, voire nul, sur le remplissage encore en place. Par contre, le rôle de la perte permanente est un facteur de brouillage de l'archivage des évolutions environnementales dans la sédimentation du fond de l'accumulation. Le décryptage de l'archive naturelle est donc directement dépendant de la qualité de l'accumulation, elle-même contrainte par le fonctionnement intrinsèque du piège lacustre.

Ce résultat donne une importance considérable au fonctionnement d'un piège à sédiments, par rapport à l'archivage qui s'y produit. Pour les questions relatives à la reproductibilité de la méthode, ce point est donc crucial. Cela a d'ailleurs été vérifié partiellement par la comparaison avec les modalités de la sédimentation dans le lac de Coufin.

CONCLUSION

Cette troisième partie de notre thèse a permis de mettre en application notre démarche méthodologique. Nous avons pu ainsi vérifier la pertinence des différentes analyses sur lesquelles repose notre approche, et proposer des réajustements en conséquence.

Les différents résultats présentés ont montré le caractère indispensable d'une étude du fonctionnement du piège sédimentaire avant toute interprétation. Pour comprendre le cryptage de la mémoire environnementale qui s'y accumule, l'analyse dynamique des dépôts est une garantie du bon déchiffrement des différents paramètres en jeu, et permet aussi éventuellement la détection de processus de brouillage, générateurs de perturbations sur l'archivage sédimentaire. De plus, la connaissance préalable du site est apparue également incontournable, prenant finalement dans notre méthodologie une place plus importante que celle que nous lui avons attribuée au départ.

Les résultats et leur synthèse ont permis d'établir :

- une « *carte d'identité* » des modalités de la sédimentation détritique endokarstique, valable pour un piège lacustre similaire au lac de la Cathédrale, avec notamment une rivière pour les apports, et une perte au fond du lac. Il est en effet apparu que ces critères en limite du piège lacustre ont un rôle majeur dans la structuration de l'accumulation sédimentaire, et dans sa conservation.
- que la *reproductibilité de la méthode* semble possible, si elle est appuyée par une bonne connaissance du site, et par la prise en compte des critères morphologiques et hydrodynamiques à proximité de la zone de piégeage.
- la reconnaissance d'un certain nombre de *processus environnementaux agissant comme facteurs de contrôle* sur la sédimentation. Les forçages semblent avoir quatre origines différentes et imbriquées. Des plus généraux aux plus limités, ces forçages influençant et rythmant la sédimentation sont : astronomiques, atmosphériques, régionaux à locaux, et même éventuellement intrinsèques au piège.

L'ensemble de ces résultats atteste de la qualité des archives détritiques endokarstiques en tant que mémoire environnementale. Mais on a également pu déceler les limites de l'archivage lacustre endokarstique. Outre les faiblesses liées à la conservation de l'archivage (lacunes de sédimentation et/ départ de matière), elles concernent l'amplitude et le temps de réponse du système accumulateur d'informations environnementales. Ces différents constats sont cependant tous intéressants, et constituent des pistes à explorer plus longuement dans la suite de nos recherches.

PARTIE IV
APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES
HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).

PARTIE 4 : APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).

Démarche globale :

Etudier les archives détritiques du réseau, selon une démarche "aller-retour" entre site référent et site test. Evaluer ainsi la qualité de l'approche proposée et sa reproductibilité vis-à-vis des dépôts anciens.

Choix et présentation des sites étudiés :
Importance de leur fonctionnement en tant que pièges, en vue d'une comparaison des signatures des dynamiques sédimentaires.
Nécessité d'un site actif "référent" (Choranche) et d'un site ancien "test" (Orgnac).

Analyse des données à partir des échantillons de sédiments :
Description et intérêt du traitement
Commentaire des résultats
Interprétation "brute"
Interprétation par rapport aux sédiments, au milieu et à la problématique.
↳ Intégration des différents résultats successifs.

REFERENTIEL : CHORANCHE

ORGNAC

Test de caractérisation des modes de piégeage sur la base des travaux de Passega

Discussion sur la reproductibilité des signatures hydrodynamiques, parallèle avec le site référent

Recherche de structures dans la constitution de l'archive pouvant expliquer des contrôles potentiels en terme d'écoulements

Hypothèses de fonctionnement des anciens pièges étudiés

Bilan croisé sur l'approche et l'archive

INTRODUCTION

Dans cette partie de notre recherche doctorale, nous appliquons la méthodologie testée à Choranche sur des dépôts détritiques contemporains d'anciens pièges lacustres ou assimilés. Ce volet de notre travail de thèse a pour objet d'éprouver la reproductibilité de l'approche construite à partir du site fonctionnel des grottes de Choranche.

Le site karstique retenu pour cette partie du travail est l'Aven d'Orgnac, grotte localisée dans le Sud du département de l'Ardèche, dans le Bas-Vivarais. Dans la partie III, nous nous sommes attachés à l'étude du fonctionnement des pièges lacustres de Choranche et à l'étude des informations environnementales qui y étaient contenues. Ici, notre objectif est d'étudier les sédiments contemporains de paléofonctionnements du système d'Orgnac et de là, en extraire les informations paléoenvironnementales contenues. Seule la partie concernant le paléofonctionnement de ce système sera ici développée ; la partie concernant les données paléoenvironnementales n'a pu être menée à bien pour les raisons suivantes. La démarche méthodologique proposée se concentre sur la compréhension des modalités de la sédimentation souterraine. Cette question préliminaire est incontournable, puisque la qualité, la précision et la validité des reconstitutions paléoenvironnementales déduites de l'archivage sédimentaire en dépendent. La compréhension des mécanismes constitutifs de l'archive « dépôts détritiques endokarstiques » est donc indiscutablement notre premier objet d'étude. De plus, les travaux sur l'Aven d'Orgnac ont débuté plus tard que sur les lacs de Choranche. Enfin, ce site ardéchois était pour nous nettement moins bien connu que les grottes de Choranche. Les connaissances générales sur cette cavité ont donc été acquises presque simultanément à notre travail sur les dépôts détritiques. La finalité de notre recherche, à savoir des reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques tirées des dépôts détritiques, n'a donc pas pu être atteinte dans le temps de la thèse pour ce site. Par contre, les questions relatives à notre méthodologie ont pu être traitées, et confrontées aux différentes connaissances acquises sur cette cavité aujourd'hui non fonctionnelle.

Cette partie est construite en trois chapitres. Le premier a pour objet de présenter l'Aven d'Orgnac et son contexte environnemental. En partant du contexte régional, nous présenterons cette grotte et ses grands traits morphogéniques, ainsi que les différents pièges relevés dans la cavité. Les résultats issus des analyses et des traitements de données seront présentés dans le chapitre II, à l'instar de ce qui a été fait pour Choranche. Des précisions sur les méthodes mises en œuvre parallèlement à notre travail seront apportées ; il en sera de même sur leurs apports quant à la connaissance plus globale de la cavité. Après la description des échantillons, les résultats issus des analyses granulométriques et des analyses statistiques associées seront présentés. Malgré l'absence de calage chronologique, des informations sur les traitements de signaux seront également développées. Enfin, dans le chapitre III, nous tenterons de faire le point sur la reproductibilité de notre méthode à Orgnac. Un essai d'interprétation de nos résultats sera proposé sur le fonctionnement des différents pièges étudiés. La reproductibilité de notre méthode sera ainsi évaluée, grâce à la confrontation avec les résultats de Choranche mais aussi par rapport aux études en cours sur l'Aven d'Orgnac et aux premières connaissances acquises sur l'histoire karstique de ce site.

CHAPITRE I : LE CHOIX DE L'AVEN D'ORGNAC ET LE CONTEXTE ARDECHOIS.

Les principales caractéristiques du cadre régional de l'aven d'Orgnac sont ici présentées. L'accent sera mis sur un épisode géologique qui a joué un rôle moteur dans le façonnement de ces régions calcaires. Cet épisode se rapporte à la crise messinienne, caractérisée par un abaissement exceptionnel du niveau de la Méditerranée, sur laquelle nous revenons un peu plus longuement. Les grands traits de l'évolution de cet aven, en rapport avec cet événement et ceux qui la précèdent et lui succèdent sont développés dans ce chapitre.

Après cette présentation, les secteurs d'étude de la cavité seront abordés. Le choix de ces secteurs repose sur la présence de sédiments fins et sur les causes de leur piégeage (cf. *supra* : Partie I). Le fait d'avoir commencé à travailler sur Orgnac plus tardivement que sur Choranche apparaît ici avantageux, car nous avons, en effet, plus de recul pour guider le choix des secteurs étudiés.

1. Les plateaux calcaires du Bas-Vivarais

Nous choisissons de développer un peu plus longuement les connaissances sur l'évolution régionale du secteur d'Orgnac, car c'est notre principal support à l'étude de la cavité.

a) Données générales

L'Aven d'Orgnac se développe dans le plateau des Gras non loin du fossé d'Alès. Deux unités géologiques caractérisent ce secteur d'étude (figure IV.1) [Gèze, 1979] :

- *La région d'Alès et la bordure sous-cévenole* : Au nord-ouest de la région nîmoise, le très important fossé oligocène d'Alès est sensiblement parallèle à la limite du Massif Central. Entre ces deux unités topographiques et géologiques, une bande continue de terrains triasiques, jurassiques et du Crétacé inférieur constitue la bordure sous-cévenole. Fracturée et redressée en de nombreux points, cette bordure dont les altitudes peuvent dépasser 900 m s'allonge sur 130 km depuis les environs de Ganges jusqu'à Privas, selon une direction NE-SW.

- *Le Bas-Vivarais* : La partie septentrionale de la bordure sous-cévenole et les garrigues crétacées de la Basse Ardèche au nord de la région nîmoise appartiennent à la région du Bas-Vivarais. Le plateau volcanique des Coirons recouvre toute la succession des terrains secondaires avec des altitudes variant de 1 000 à 500 mètres environ.

1. Grands traits géologiques et géomorphologiques

Dès le début du Néogène, l'histoire de cette région est directement liée à celle de la Méditerranée (figure IV.2) : le Miocène (entre 23 et 5 MA) correspond à un cycle sédimentaire marin, qui a affecté le couloir rhodanien et le nord du bassin alpin (Alpes encore en surrection). La région ardéchoise, entièrement continentale, connaît alors les premiers bouleversements volcaniques (volcanisme des Coirons). Le retrait de la mer entraîne une phase de creusement des vallées qui va donner à la région les grands traits de son allure actuelle. Ce creusement va avoir tendance à s'accélérer lors de la crise

messinienne, évènement durant lequel le niveau de la Méditerranée s'est abaissé de 2 000 m par rapport au niveau actuel (cf. *infra* : Partie IV, Chap. I.1.b) [Gèze, 1979 ; Clauzon, 1982].

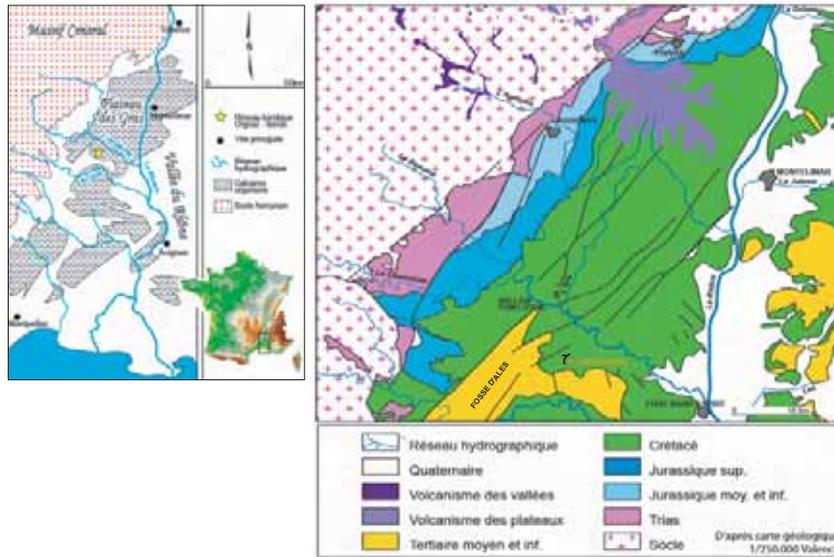


Figure IV.1 : Localisation du site et carte géologique simplifiée du secteur (d'après Jaillet, 2004).

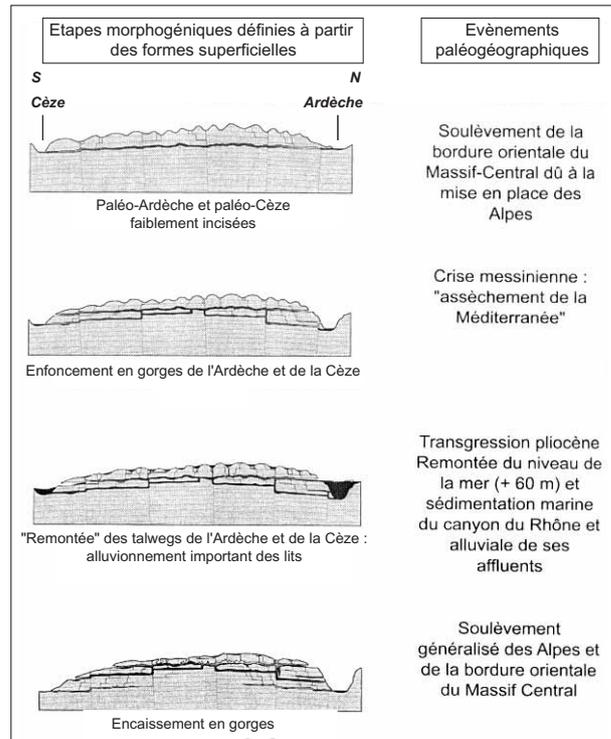


Figure IV.2 : Synthèse de l'évolution des Gorges de l'Ardèche en fonction des grands évènements méditerranéens (d'après J.J. Delannoy « L'eau et le Calcaire » - Musée Régional de la Préhistoire – Orgnac).

Le début du Pliocène se traduit par une nouvelle phase transgressive. La mer envahit la vallée du Rhône sous forme d'une ria. Cette transgression se traduit par un important comblement marin (marnes bleues). Ce comblement est recouvert par des dépôts continentaux progradants qui marquent le terme du colmatage de la vallée messinienne du Rhône. La fin du colmatage correspond à des cailloutis avec argiles continentales rubéfiées, transportés depuis les Alpes par la Durance et le Rhône. La vallée du Rhône et les bassins qui en dépendent forment alors un paysage très proche de l'actuel. La fin du Miocène et la transition Plio-Quaternaire ont été marqués par des mouvements tectoniques responsables d'un soulèvement généralisé des plateaux du Bas-Vivarais.

Dans les périodes froides du Quaternaire (1.8 MA à nos jours), le secteur de l'Ardèche était soumis à un climat périglaciaire. C'est dans ce contexte que se sont formés les nombreux éboulis calcaires au pied des escarpements jurassiques du plateau des Gras ou crétaqués des gorges de l'Ardèche et de l'Ibie. Du côté de la vallée du Rhône, les glaciers alpins ne sont pas loin. Sur le « rivage » ardéchois se déposent de grandes quantités de loess et des témoins périglaciaires sont reconnus en plusieurs points (fentes en coin à Rochemaure) [Gèze, 1979 ; Belleville, 1985].

Sur le plan géomorphologique, la karstification s'est développée dès la mise à l'affleurement des assises calcaires. Cette karstification s'est traduite par la mise en place de surfaces d'aplanissement syn-miocènes et syn-pliocènes, et par la structuration endokarstique engendrée par les différentes phases d'enfoncement des niveaux de base que constituent les vallées de la Cèze, de l'Ardèche et du Rhône. Le réseau hydrographique a été soumis aux influences structurales ; ainsi, le système de la faille des Cévennes et les fossés qui lui sont associés ont provoqué notamment les « décrochements » vers le N-E des cours de la Cèze et du Chassezac-Ardèche inférieure (figure IV.1), la capture de l'Ardèche supérieure (également liée au volcanisme des Coirons), et sa déviation vers le S-W entre Aubenas et Ruoms [Belleville, 1985]. Outre ces grands traits de l'évolution paléogéographique du secteur, un questionnement subsiste qui concerne les périodes de creusement des gorges de l'Ardèche et de la Cèze ; ces phases de creusement étant le moteur de l'évolution endokarstique : mise en place des réseaux et évolution spéléogénique en zone noyée ou zone vadose.

2. Données de l'endokarst

Plusieurs cavités de haut niveau, sans lien avec les réseaux hydrographiques actuels, sont des témoins d'anciennes phases de karstification. C'est le cas de l'aven d'Orgnac et de la grotte des Demoiselles [Gèze, 1979]. Plus récemment, les études conduites sur la grotte Chauvet indiquent que celle-ci est également un témoin d'anciennes phases de karstification qui ont été rapportées à la crise messinienne et à la transgression pliocène [Delannoy *et al.*, 2001 et 2004 ; Debard *et al.*, 2003]. La question reste posée pour l'aven d'Orgnac, dont les réseaux sont creusés dans l'Urgonien, et qui sont perchés au-dessus des talwegs de l'Ardèche et de la Cèze. Les galeries horizontales de ces réseaux sont orientées NNE/SSW ; leur position perchée en lien avec une paléo-Ardèche est une hypothèse probable (figure IV.3).

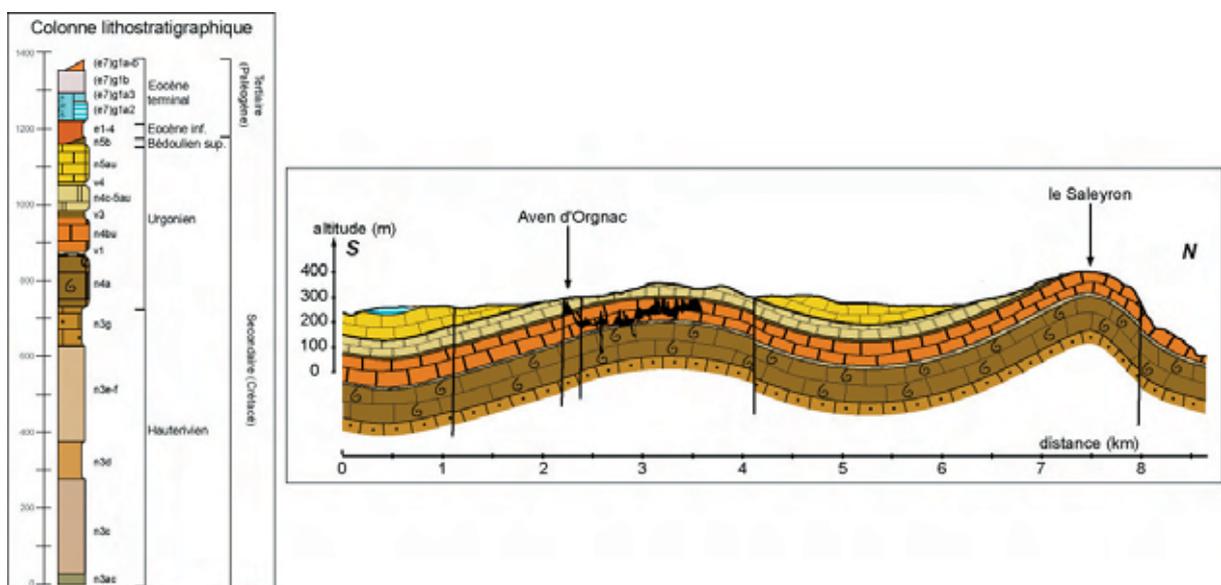


Figure IV.3 : Coupe géologique du secteur de l'Aven d'Orgnac, entre Ardèche et Cèze (d'après Sabaut, 2005).

Sur le plan des écoulements et de la karstogenèse, on souligne que le Plateau des Gras, particulièrement à l'ouest de Bidon où se développent les plus grands avens, semble dépourvu de traces d'écoulement superficiel. Si on y ajoute les observations nombreuses et complexes d'ordre structural et tectonique (phase pyrénéenne pour le Plateau et fossé Oligocène d'Alès), on constate alors que cette zone représente un secteur d'infiltration totale, aussi bien pour le karst actuel que pour la période antérieure au vu de l'abondance et de la taille des avens fossiles. 87 avens ont été répertoriés, ils sont tous secs et ne recourent pas de systèmes actifs. Ils sont tous localisés sur le plateau sommital et ses premières pentes, et ce en liaison avec la logique structurale [Belleville, 1985]. De plus, la karstogenèse ne peut être dissociée du processus de creusement des gorges de l'Ardèche et de la Cèze. Ainsi, les différents mouvements relatifs de l'Ardèche et du Rhône depuis la fin du Miocène (plus ou moins synchrone avec la crise messinienne) auraient conditionné les épisodes de karstification les plus récents. La karstogenèse de ce secteur pourrait donc s'expliquer en partie par l'hypothèse suivante, qui retrace les principales étapes [Belleville, 1985 ; Choppy, 1995 ; Blanc, 1997 ; Delannoy *et al.*, 2001 ; Debard *et al.*, 2003] :

- Une première phase de karstification à la fin du Crétacé supérieur. Des dépôts bariolés de l'Eocène inférieur fossilisent des cavités contemporaines de cette 1^{ère} phase.
- La karstification oligo-miocène a laissé beaucoup plus de traces sur le Plateau des Gras : de nombreux avens des environs de Bidon et d'Orgnac, et certaines galeries de la Grotte de St Marcel sont rapportées à cette phase. La question se pose pour les réseaux d'Orgnac. Cette phase aurait largement conditionné l'évolution du karst qui a suivi.
- Le Miocène supérieur voit deux épisodes fondamentaux : le creusement des gorges qui s'accompagne du développement de nombreux réseaux (réseau de Foussoubie, galeries inférieures de St Marcel...); et la mise en place des circulations karstiques profondes en lien avec l'important enfoncement de la vallée du Rhône (crise messinienne). Ces réseaux sont reconnus aux sources de Tourne et sous le cours de l'Ardèche actuelle.
- Au Pliocène, la transgression marine engendre un relèvement du talweg de la vallée du Rhône et de ses affluents, impliquant leur comblement ainsi que l'ennoiement des cavités karstiques.
- Au cours du Plio-Quaternaire, l'Ardèche termine son encaissement. Le karst qui lui est associé tend à utiliser ses propres directions héritées de la compression alpine.

Enfin, on rappelle que l'étude des remplissages de grottes et d'abris sous roche (site archéologique d'Orgnac III notamment) a apporté des informations sur l'évolution climatique de la région au cours du Quaternaire récent [Debard, 1988]. A travers les différents sites et leur étude commune, on peut suivre la succession des périodes froides (accumulation de cailloutis de roches calcaires) et des périodes chaudes ou tempérées (formations des concrétions et dépôt d'argiles rouges). Ces études ont permis de montrer que le Bas-Vivarais a subi une influence méditerranéenne, très sensible au niveau de la flore conservée dans les couches du « Würm moyen et récent ». Le Pléistocène supérieur (Interglaciaire Riss-Würm et tout le Würm) serait d'ailleurs la période la mieux représentée, sur le plan sédimentologique, du Quaternaire dans le Bas-Vivarais [Blanc et Chamley, 1975 ; Debard *et al.* 1986 ; Debard, 1988 ; Debard, 1997b ; Blanc, 1997 ; Defleur *et al.*, 2001]. Cependant, et c'est un problème constant dans ce genre d'études, il ne faut pas oublier qu'une partie seulement du temps écoulé est matérialisée. Il n'est donc pas toujours possible de proposer une échelle chrono-climatique continue. Des données complémentaires peuvent être tirées de l'étude des pollens piégés dans les sédiments. Une analyse palynologique a ainsi pu être menée dans le cadre des recherches sur la grotte Chauvet, à partir des sols de fréquentation. L'environnement des hommes qui ont fréquenté la grotte (30 000 BP environ) a donc pu être reconstitué. Il devait ressembler à une steppe froide et plutôt sèche, dominée par le pin sylvestre [Girard in Clottes, 2001].

b) La crise messinienne

On en parle aussi parfois sous l'intitulé «crise de salinité messinienne en Méditerranée», car cet épisode est marqué, en bordure du bassin méditerranéen actuel par des dépôts de sels et de gypse (évaaporites, liées à la nette régression marine de cette époque). Plus précisément, cette crise, qui est la conséquence de la restriction des échanges Méditerranée/Atlantique a donné lieu au dépôt de plus de 1 million de km³ de sels, répartis sur plus de 2 millions de km². Cela représente l'un des plus grands épisodes évaporitiques que notre planète ait connu au cours de son histoire [Clauzon, 1996 ; Saint-Martin, 2003]. Cette crise aurait débuté au cours du Messinien (étage compris entre 7.2 et 5.3 Ma) et son paroxysme serait situé entre 5.95 et 5.3 millions d'années [Gautier *et al.*, 1994]. C'est un exemple sans précédent d'exondation intégrale d'une marge continentale, suivi d'une pénétration de la mer, au Pliocène, sur une grande distance et en configuration fluviale. On retiendra également de cette crise son extrême rapidité, exprimée par des vitesses fulgurantes à l'échelle géologique, tant pour le déclenchement de la crise que pour la remise en eau du bassin. Les formes qui en résultent, notamment la surface d'érosion messinienne, sont immatures [Clauzon, 1996].

Sur le plan climatique, on suppose que les conditions messiniennes étaient proches du climat actuel, mais plutôt voisin de celui qui règne aujourd'hui sur les rivages de la Mer Rouge. D'autre part, on sait que le Messinien est une période d'accroissement du volume de l'inlandsis antarctique et que les fluctuations du volume des glaces pendant cette période ont pu provoquer des variations sensibles du niveau océanique.

Mais à ce phénomène d'abaissement glacio-eustatique¹, vient se surimposer un autre événement qui est la tectonique des plaques. C'est en effet à cette époque que la Téthys se referme (compression alpine par remontée de la plaque Afrique vers le N-E), faisant de la Méditerranée un bassin clos et privé de ses apports hydriques habituels venant de l'Atlantique. Ce contexte de déficit hydrique se maintiendra jusqu'à 5.3 MA (transition Miocène-Pliocène), moment où se forme l'isthme de Gibraltar et où la communication avec l'Atlantique fonctionne de nouveau [Saint-Martin, 2003].

Enfin, la crise de salinité messinienne et son indissociable complément qu'est le remblaiement pliocène font partie des limites de séquences sédimentaires remarquables et constituent les clés de l'évolution géodynamique [Gautier *et al.*, 1994 ; Suc *et al.*, 1995 ; Clauzon, 1996]. En effet, pour le secteur qui nous intéresse, il est probable que la réunion de cette phase tectonique rhodanienne et de l'abaissement du niveau de la Méditerranée soit à l'origine, pour l'essentiel, de l'enfoncement du réseau hydrographique préfigurant celui du Rhône [Blanc, 1997]. Cette intense phase de creusement semble être l'épisode le plus favorable à l'encaissement de l'Ardèche. Il a donc également pu avoir une influence sur la karstification de ces régions. En ce qui concerne plus particulièrement notre travail, cet événement a donc pu influencer la genèse et/ou l'évolution des réseaux d'Orgnac. Notre étude a pour objet d'apporter des éléments de réponse. Pour cela, une description de cette cavité ainsi que des secteurs plus particulièrement étudiés est donnée ci-dessous, c'est une première étape du travail.

¹ Glacio-eustatisisme : variation générale du niveau des mers due à la fonte ou à l'augmentation du volume des glaciers [Foucault A. et Raoult J.-F. – 1995 - *Dictionnaire de Géologie* - Ed. Masson, 4^{ème} mise à jour, 324 pages].

2. L'Aven d'Orgnac : présentation générale

a) Description et données globales

Cette cavité, découverte en août 1935 par R. de Joly, se développe sur plus de 4,6 km. Elle se caractérise par une succession de grandes salles et/ou galeries. Hormis la salle d'entrée et la partie NW d'Orgnac III, la cavité se caractérise par l'association de dépôts argileux rougeâtres recouverts d'un important concrétionnement. Chaque grande partie (Orgnac I, Orgnac II, Orgnac III et Orgnac IV) s'individualise par rapport aux autres par des passages bas et étroits. Ces passages étroits n'ont pas tous la même origine : remplissage détritique entre Orgnac II et III, remplissage carbonaté entre Orgnac I et II, et entre Orgnac III et IV. Cette disposition des salles est visible sur la topographie en coupe de la cavité. Une telle organisation des volumes ainsi que les différentes formes et remplissages observés lorsque l'on parcourt ce réseau évoquent un creusement paragénétique de cette cavité aujourd'hui non fonctionnelle (cf. *supra* : Partie I, Chap. I.2 et Chap. I.3). En effet, le remplissage semble réellement important et les formes telles que des coupoles de dissolution et des chenaux de voûte apparaissent comme autant de témoins d'un creusement paragénétique.

On précise que ce découpage du réseau en quatre portions successives correspond aux différentes étapes de découvertes ; étapes qui correspondaient au franchissement des étroitures. De plus, chacune de ces portions a un rôle différent dans le site tel qu'il est connu aujourd'hui. Le réseau Orgnac I comprend essentiellement la partie touristique de cette cavité. C'est dans cette partie que se situe l'aven à proprement parler, c'est-à-dire l'entrée naturelle de cette grotte, liée ici à l'effondrement de la voûte karstique (figure IV.4). Les salles d'Orgnac I sont par ailleurs une des parties les plus richement concrétionnées (photo IV.1). Tout le reste de cette grotte correspond à la partie spéléologique du réseau, non accessible aux touristes. Dans Orgnac II et III, le concrétionnement est toujours abondant, mais on constate également la présence de remplissages argileux considérables et presque omniprésents. Quant à Orgnac IV, c'est la partie entièrement préservée du réseau dans un but de conservation totale de ce patrimoine naturel (cavité bénéficiant du label « Grand Site de France »).

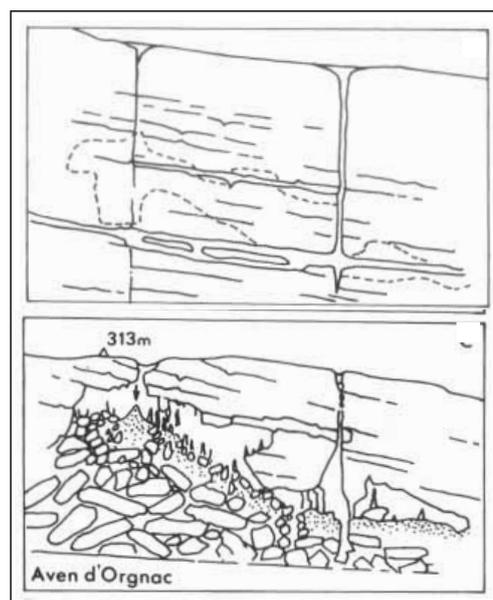


Figure IV.4 : La formation d'un aven (modifié d'après Combier in Debard, 1988).

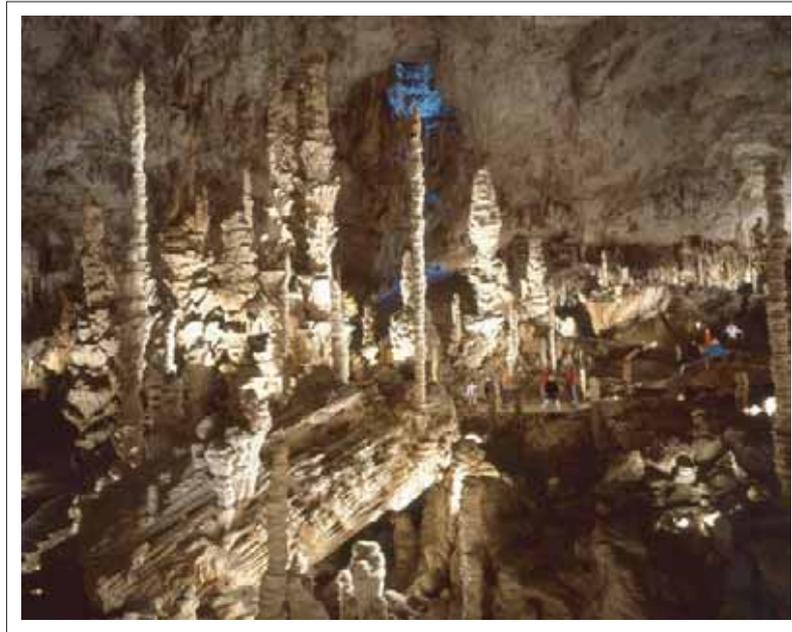


Photo IV.1 : La salle De Joly et l'entrée naturelle (cliché J.M. André).

b) Connaissances et questionnements sur ce site

L'aven d'Orgnac correspond à un réseau karstique très ancien sur lequel on a peu d'informations spéléogéniques et morphogéniques. Les études en cours ont pour but d'apporter des informations sur la genèse de cette grotte dans son contexte régional. Un des rares référent dont on dispose est le cas de la grotte Chauvet, toute proche [Delannoy *et al.*, 2001 et 2004 ; Debard *et al.*, 2003].

L'ensemble des études conduites aujourd'hui sur l'Aven d'Orgnac vise à comprendre si cette cavité a connu une évolution proche de celle de Chauvet ou une histoire complémentaire. Notamment par rapport à l'histoire géomorphologique régionale, est-ce que la position de l'aven d'Orgnac à l'interfluve entre Ardèche et Cèze a induit une morphogenèse particulière ?

Nos différents résultats (cf. *infra* : Partie IV, Chap. II) acquis sur cette cavité, notamment sur la salle Nord et la Chatière des Sables, secteurs sur lesquels nous avons concentrés nos efforts, ont pour but d'apporter des éléments de réponse à ces questionnements. Ces deux points particuliers de l'Aven d'Orgnac font l'objet d'une présentation détaillée.

3. Les secteurs d'étude choisis

L'Aven d'Orgnac pose d'emblée le problème du choix des secteurs d'étude, basé sur la notion de piège sédimentaire. En l'absence d'écoulements, le choix a été ici guidé par les indices morphologiques en tant qu'indicateurs de pièges sinon lacustres, tout au moins sédimentaires. Cette grotte, comme nous l'avons déjà signalé, est caractérisée par une forte présence de sédiments fins (colmatage argileux important). Ces sédiments sont contemporains des écoulements qui ont drainé la grotte. Aussi, leur disposition, leur structure interne et leur forme sont autant d'indices pour déterminer si ces sédiments ont été piégés en contexte de zone noyée ou en écoulement vadose. Les significations paléogéographiques sont en effet très différentes dans ces deux contextes. L'analyse des sédiments devrait donc permettre

de situer les dépôts étudiés dans leur contexte de piégeage. Dans cette optique, deux points particuliers de la cavité ont ainsi été retenus pour des prélèvements de sédiments (figure IV.5), afin d'en étudier les dynamiques de transport et de dépôt, et de voir dans quelle mesure ces pièges peuvent être comparés aux lacs de Choranche. Nous avons choisi un secteur localisé dans un point bas de la cavité, et un autre secteur situé au fond d'une chatière. Ces deux secteurs ont par ailleurs fait l'objet de désobstructions partielles par les spéléologues.

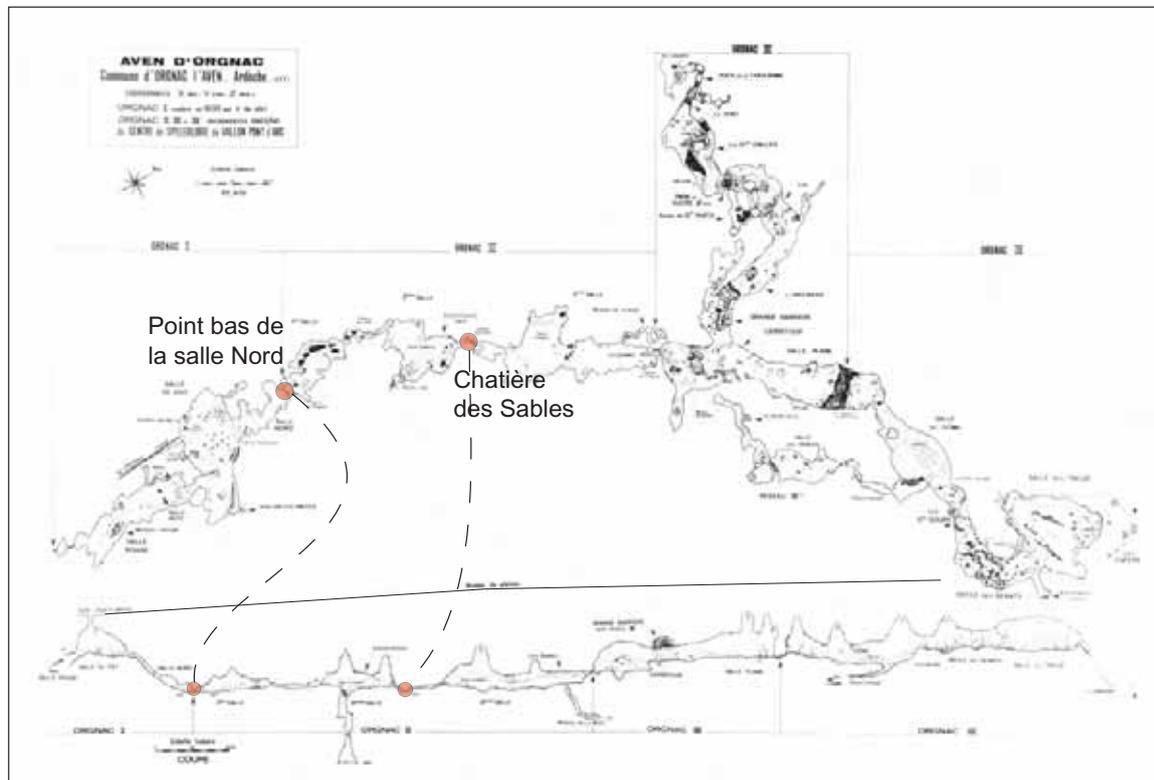


Figure IV.5 : Topographie de l'Aven d'Orgnac et la localisation des secteurs d'étude.

a) Le point bas de la Salle Nord

Le point bas de la salle Nord est un des secteurs d'étude que nous avons retenus. Situé à la jonction entre la salle Nord et la salle I (transition entre les parties Orgnac I et Orgnac II du réseau), les éléments morphologiques et l'allure du dépôt détritiques nous ont paru d'emblée particulièrement intéressants.

Le point bas de la salle Nord présente une forte pente, sous forme d'une cascade de gours nappant les blocs issus de l'effondrement de la salle d'entrée (figure IV.6). Au pied de cette descente, se situe un dépôt de sédiments détritiques présentant un pendage. Il est plus difficile d'estimer ce qu'a été le volume du piège sédimentaire. Différents témoins sont présents sur ce secteur qui renvoient à deux possibilités : les coupoles sur la voûte et les argiles présentes au plafond plaident en faveur d'une zone noyée ; le pendage des sédiments et la présence de gours tendent plus vers un contexte vadose. La concomitance de ces différentes empreintes indique donc une histoire complexe. L'étude des sédiments prélevés devrait permettre de mieux comprendre leur piégeage, et donc l'hydrodynamisme de ce point bas de la salle Nord, y compris pour ce qui concerne la position et le nombre des arrivées et des départs de matière. La largeur de cette petite salle ne dépasse pas une dizaine de mètres, l'épaisseur de l'accumulation argileuse n'excède pas 3 m, pour environ 8 m de long (photo IV.2).

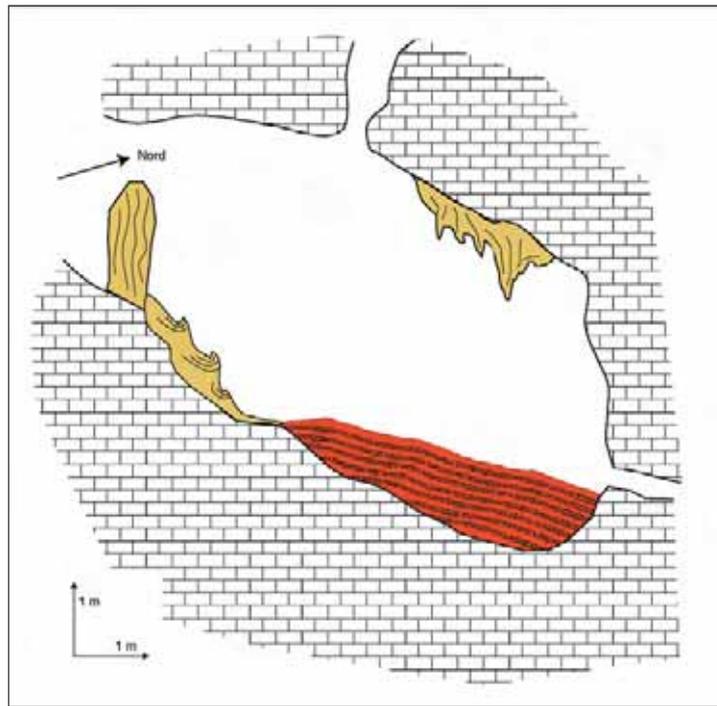


Figure IV.6 : Le point bas de la salle Nord, vue schématique en coupe.

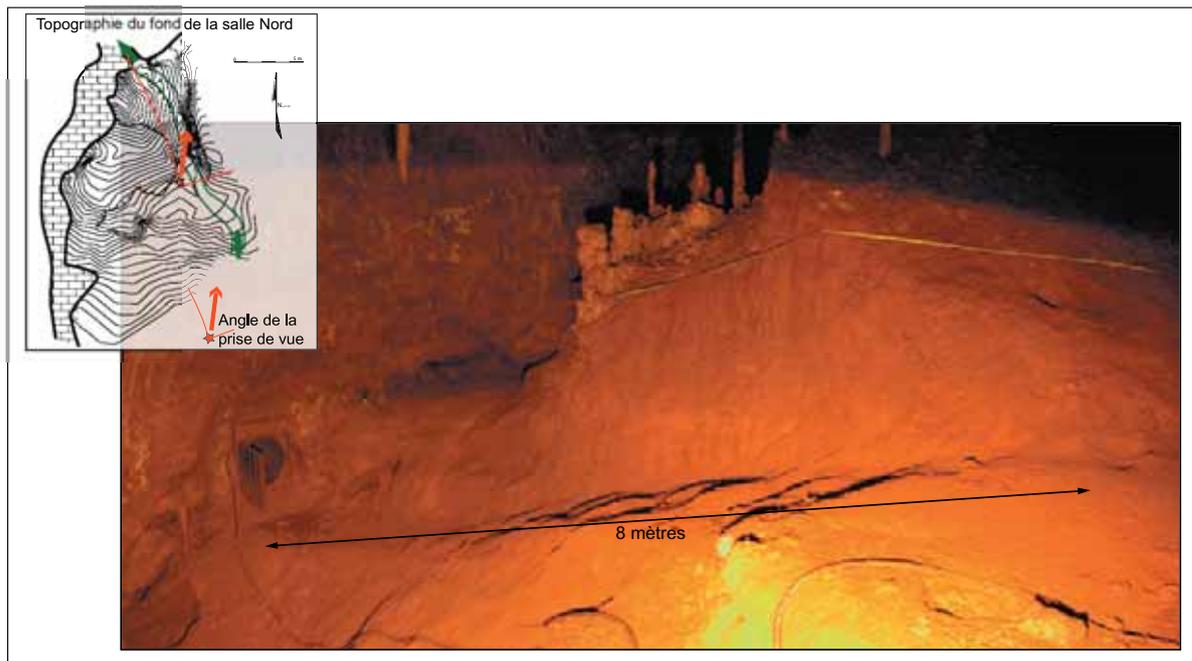


Photo IV.2 : L'accumulation détritique du point bas de la salle Nord (cliché A.S. Perroux).

b) La Chatière des Sables

Le second secteur retenu est également un point bas, mais aux caractéristiques différentes et au fonctionnement apparemment plus complexe qu'un simple piège accumulateur de sédiments. Il s'agit de la Chatière des Sables, passage étroit entre les salles II et III d'Orgnac II (figure IV.5). Nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur le cœur de cette chatière, petite « niche » aux dimensions métriques.

Ce secteur est beaucoup plus petit que les pièges étudiés à Choranche et que le point bas de la salle Nord présenté ci-dessus. Il s'agit également d'un point bas, mais beaucoup moins marqué et dont les deux extrémités sont, cette fois, similaires dans leur disposition (figure IV.7). De part et d'autre du point retenu, nous avons en effet un conduit étroit, bas et de faible pente, qui débouche après quelques mètres sur une grande salle (Salle II vers le Sud-Ouest, salle III vers le Nord-Est). Les indices qui nous ont interpellés sur cette petite section de la chatière (espace métrique) sont d'abord les formes. En effet, au plafond de cette petite alcôve, un chenal de voûte apparaît très nettement, attestant que cet espace a été un jour colmaté et que les eaux y circulaient à l'interface avec la voûte. Puis, un décolmatage a dû se produire car le remplissage subsiste uniquement au plancher de cette petite salle, les parois sont parfaitement nettoyées. Enfin, ce secteur était pour nous intéressant car c'est le seul de toute la cavité qui laisse voir des sables déposés au sommet du remplissage. Le reste de la cavité montre en effet d'importants dépôts argileux, quasi exclusivement.

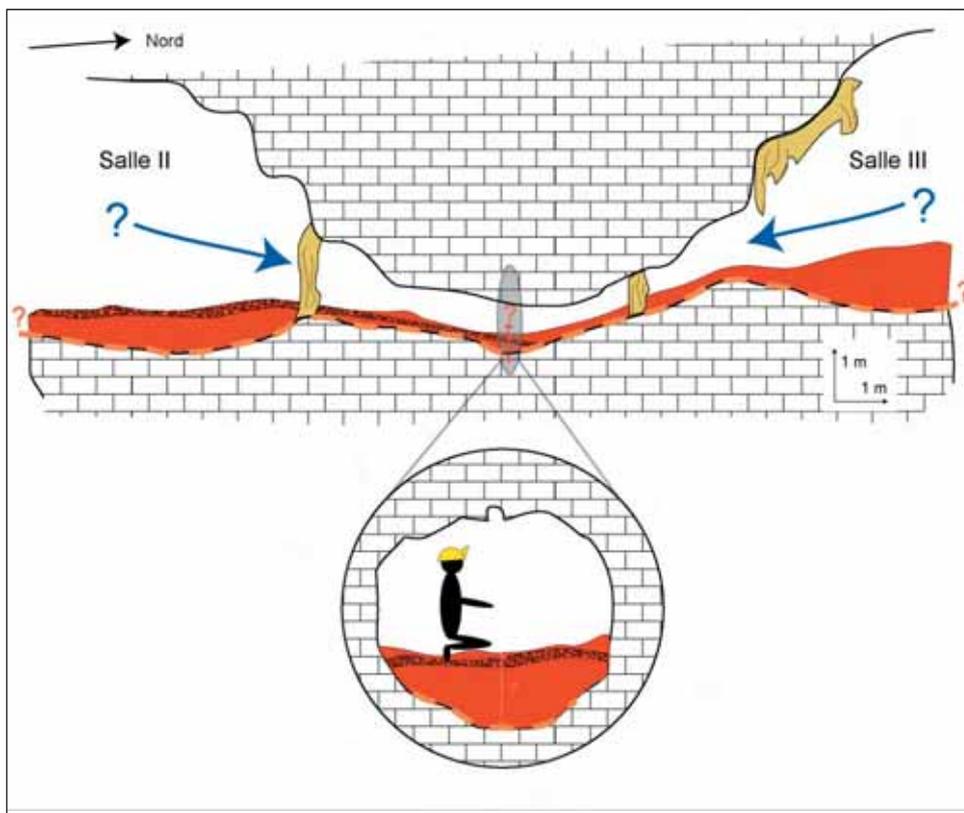


Figure IV.7 : Schéma du secteur étudié dans la Chatière des Sables – Coupes longitudinale et transversale.

Le choix de ce secteur repose sur deux arguments. Tout d'abord, par rapport à une étude plus générale de cette cavité (menée conjointement à notre propre travail sur les dépôts comme nous l'avons déjà expliqué en introduction), cette partie de la grotte, avec des dépôts si différents du reste des remplissages est pour nous un point important à éclaircir. Il nous faut comprendre et expliquer la présence de ces sables. La majorité des travaux initiés sur cette cavité se sont d'ailleurs, pour le moment, concentrés sur la salle II et sur cette chatière des Sables. De plus, par rapport à notre propre étude des dépôts détritiques, ce secteur apparaît intéressant pour éprouver la reproductibilité de notre approche, mais par un raisonnement inverse. En effet, il est important de vérifier qu'un piège lacustre, ou reconnu comme tel, peut être caractérisé par une même représentation, et notamment à travers la « carte d'identité » que nous avons proposée grâce aux images de Passega (cf. *supra* : Partie III, Chap. III.1.a.1). Mais il est également indispensable de vérifier qu'un autre mode de piégeage ne donne pas la même signature. En étudiant les dépôts de cette Chatière des Sables, nous pourrions donc comparer les

images de Passega, appuyées par les différents autres résultats. Même si cela devra être encore complété par la suite, avec l'étude d'autres pièges, ce second secteur de l'Aven d'Orgnac va nous servir de contre-exemple, afin de donner un champ d'application et de validité le plus précis possible à notre démarche d'étude des dépôts détritiques endokarstiques.

§§§§§§§

Les principales clés de l'histoire géologique et géomorphologique ont été présentées dans ce chapitre, afin d'exposer les grands traits du contexte et de l'évolution de la région. Dans ce cadre général, l'Aven d'Orgnac apparaît comme une cavité particulièrement intéressante, pouvant apporter des connaissances complémentaires sur l'évolution de l'hydrographie locale, et notamment sur l'Ardèche et la Cèze.

A travers notre propre recherche sur les dépôts détritiques endokarstiques de l'Aven d'Orgnac, nous devrions pouvoir, à terme, apporter des éléments de réponse à ces questionnements. Les travaux présentés ici, portant uniquement sur un test de la pertinence de notre approche fonctionnelle des sédiments, sont la première étape à ce travail. Si la reproductibilité de notre méthode, quant à l'identification des modes de piégeages sédimentaires s'avère acceptable, nous pourrions alors travailler sur l'histoire de la spéléogenèse de la cavité, et sur ses rapports avec les rivières avoisinantes au cours du temps.

CHAPITRE II : L'ETUDE DES PRÉLEVEMENTS D'ORGNAC – TRANSFERT DE NOTRE APPROCHE AUX PIÈGES FOSSILES.

Dans ce chapitre, nous traitons tout d'abord des recherches effectuées dans la salle II du réseau spéléologique, salle sur laquelle nous avons concentré nos travaux. Le premier point de ce chapitre est consacré aux méthodes préalables et indispensables à notre recherche, permettant de définir le contexte des dépôts étudiés. Les résultats des sondages à la tarière ainsi que le travail de cartographie des sols de la salle II, réalisé par le laboratoire Edytem et B. Sadier [2004] sont présentés afin de mieux traiter l'étude sur le fonctionnement et l'évolution de la salle II et de la Chatière des Sables. La cartographie étant un des outils permettant de structurer les connaissances morphogéniques d'un réseau, nous l'avons également utilisée pour le secteur de la salle Nord.

La suite de ce chapitre est focalisée sur les deux zones échantillonnées, à savoir la salle Nord et la Chatière des Sables. Outre l'outil cartographique, nous procédons à l'identique des résultats présentés pour les lacs de Choranche : une description détaillée des remplissages, les données granulométriques et les traitements associés (observations à la loupe, traitements statistiques...), et les données tirées du traitement de signal.

Les prélèvements ont été étudiés de la même façon que les carottes de Choranche, les mêmes traitements et méthodes d'analyses ont été appliqués, avec les mêmes outils et le même souci de travailler à la meilleure résolution possible, aussi bien technique que pratique. Ainsi, tous les éléments ont été réunis pour mener cette étude de la reproductibilité de notre approche dans les meilleures conditions. Les résultats obtenus pour les sédiments d'Orgnac devraient donc conduire à une comparaison avec les interprétations proposées pour les lacs de Choranche. La pertinence de la démarche d'étude proposée et sa capacité à s'appliquer à différents sites, actifs comme non fonctionnels, seront ainsi clairement exposées.

1. Approche globale préliminaire des dépôts

Lorsqu'on parcourt cette cavité, les dépôts détritiques argileux rougeâtres sont quasi-omniprésents, en dehors du fond d'Orgnac III et d'Orgnac IV, où prédominent les roches en place, les écroulements et les remplissages carbonatés. Un des premiers questionnements a été de comprendre la géométrie des dépôts argileux, et d'en estimer l'épaisseur.

a) La cartographie morphologique des sols

1. Principe

Nous ne reprenons pas l'intérêt et la démarche nécessaire à la réalisation d'un tel document cartographique. Ces aspects ont été présentés antérieurement (cf. *supra* : Partie II, Chap. II.2.b.2). Par contre, nous donnons ici quelques précisions sur les méthodes utilisées dans le cas précis de l'Aven d'Orgnac.

Pour réaliser la carte morphologique des sols et en l'absence d'un fond topographique précis de cette galerie, le relevé topographique a été nécessaire (figure IV.8). Pour ce relevé, deux réflexions préalables ont été posées : le choix de l'échelle de représentation et la constitution de la légende, les deux étant interdépendants. Pour la salle II, l'échelle de travail retenue a été le 1/200^{ème}, échelle permettant un bon compromis entre les grands volumes et les formations majeures de cette salle (volume estimé à 48 000 m³), et les formes et formations les plus petites. Pour le fond de la salle Nord, espace beaucoup plus réduit, le choix de l'échelle était moins important. Cependant, le relevé des formes et formations n'est pas exhaustif dans la mesure où les microformes ne sont pas représentées individuellement, mais sous forme synthétique. Il en va ainsi des micro-gours, par exemple. Chacun d'eux n'apparaît pas sur la carte, mais le secteur affecté par ces micro-gours est, lui, figuré dans son ensemble. Enfin, la légende choisie pour ce travail correspond à la légende mise en place pour la réalisation du même document dans le cas de la grotte Chauvet [Delannoy *et al.*, 2001]. Nous rappelons qu'elle est basée sur un jeu de couleur (une couleur par processus, le concrétionnement en violet par exemple) et de variation de l'intensité par rapport au temps (violet foncé : concrétionnement récent ; violet clair : concrétionnement ancien) [Delannoy, 1981]. Le temps n'a qu'une valeur relative, permettant de situer les différentes formes et formations reconnues les unes par rapport aux autres, et de travailler ainsi sur l'emboîtement des formes et/ou des formations étudiées. Cette légende a été complétée en ajoutant des figurés pour exprimer des processus ou des objets morphologiques qui ne sont pas présents dans la grotte Chauvet [Sadier, 2004].

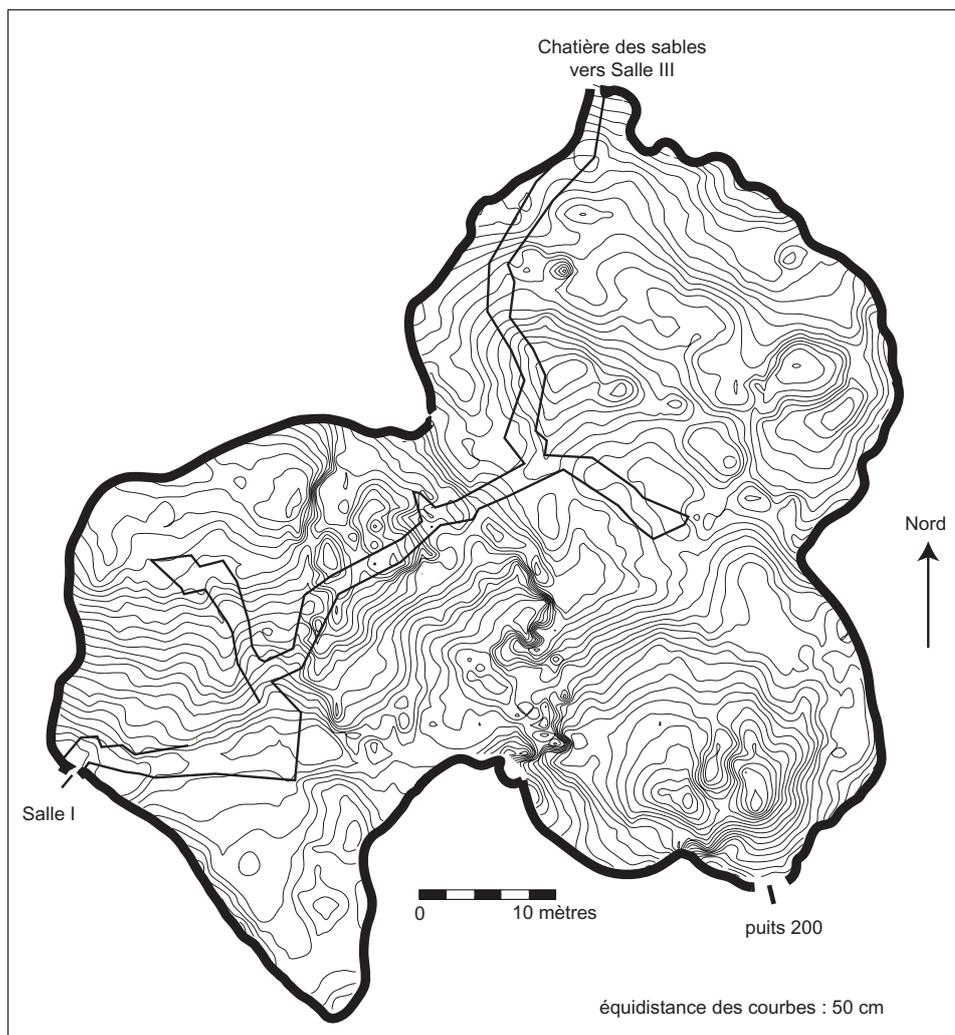


Figure IV.8 : Topographie de la salle II de l'Aven d'Orgnac (d'après Sadier, 2004).

2. Intérêts et limites du document

L'intérêt d'une telle représentation a été largement démontré dans le cas de la Grotte Chauvet, aussi bien pour la spéléogénèse que pour ces rapports, ces liens avec les évolutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques locales à régionales [Delannoy *et al.*, 2001].

Une carte offre de nombreux niveaux de lecture. Non seulement les informations relatives à la lithologie et aux processus géomorphologiques et hydrologiques y apparaissent clairement, mais c'est aussi les relations spatiales et temporelles entre ces différents processus qui sont mises en évidence. La carte permet alors une lecture dynamique de l'évolution du secteur cartographié, où l'emboîtement des formes et formations apparaît beaucoup plus clairement [Delannoy *et al.*, 2001 ; Sadier, 2004]. Elle offre ainsi une vision à la fois synthétique et précise dans laquelle les informations rassemblées sont de deux natures (figure IV.9):

- *morphogénique*, pour tout ce qui concerne les formes endokarstiques ;
- *paléoenvironnementales*, pour toutes les formations conservées au sein du karst.

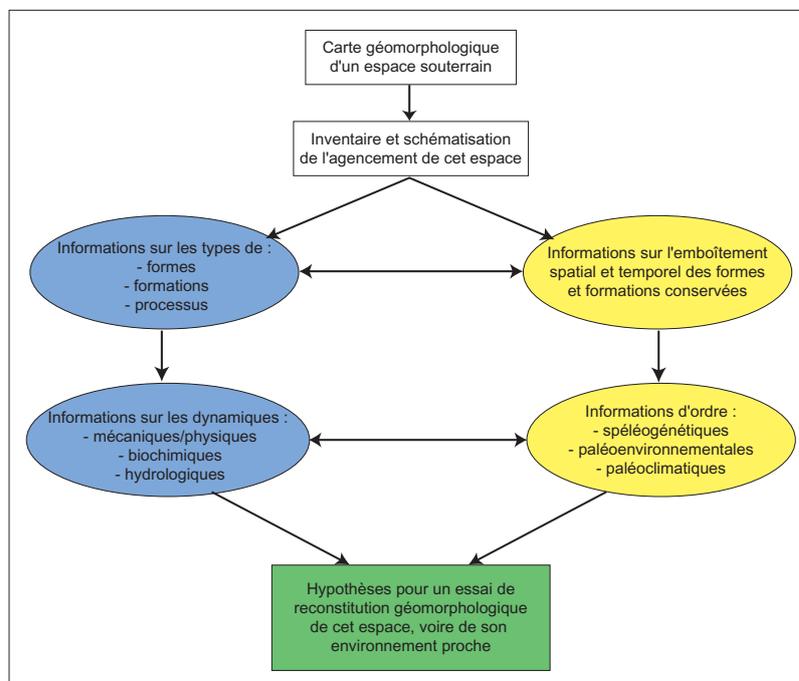


Figure IV.9 : Les apports de la cartographie géomorphologique souterraine (modifié d'après Sadier, 2004).

A ce titre, la lecture, la compréhension d'un tel document se doit d'être extrêmement claire, voire immédiate. C'est aussi pourquoi la représentation des microformes n'est faite que de façon globale. Une carte trop complète, trop détaillée, devient très difficile à consulter et à comprendre. Les choix de représentation sont donc importants, et doivent être judicieusement faits puisque la qualité du document final en dépend.

Enfin, la carte morphologique des sols est un document nécessaire à l'étude d'une cavité ou d'une portion de cavité, mais non suffisant. Une des principales limites d'une telle représentation de l'espace est la faiblesse, voire l'absence de données en profondeur. Cette limite à la lecture verticale des formes et formations est une réelle gêne, car l'emboîtement des formes et des formations que l'on perçoit en surface n'est que la portion congrue des différents processus qui se sont succédés. C'est pour palier à cette carence que le travail de cartographie a été agrémenté, pour l'étude de la salle II, de

quelques sondages à la tarière, profonds ou plus réduits selon les emplacements. Nous les présentons immédiatement après cette partie sur la cartographie.

3. Carte morphologique du point bas de la salle Nord

Pour le secteur de la salle Nord, S. Jaillet et moi-même avons réalisé le relevé topographique et la carte géomorphologique des sols. Cette cartographie (figure IV.10) permet de mettre en évidence les éléments d'informations suivants.

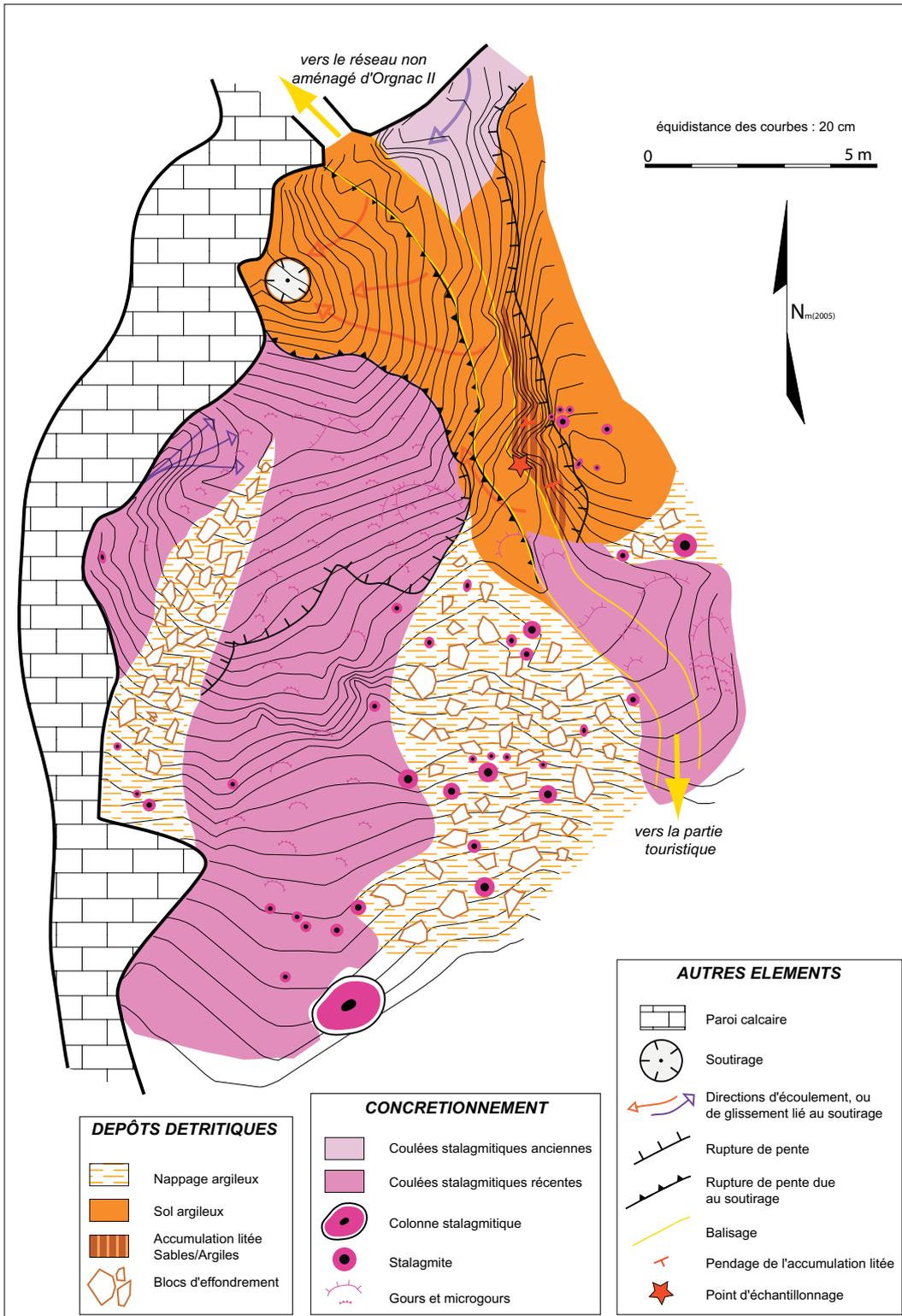


Figure IV.10 : La carte géomorphologique du fond de la salle Nord de l'Aven d'Orgnac.

L'extrémité étudiée de la salle Nord présente un remplissage argileux, dont la majeure partie est recouverte d'une importante coulée stalagmitique et de concrétions. Outre sa pente générale, la présence sur cette coulée de gours et de micro-gours indique l'existence d'anciens ruissellements vers le nord (vers le réseau non aménagé). Sur deux portions, cette coulée est partiellement masquée par des blocs et/ou des paquets d'argile démantelée ; les stalagmites y sont plus nombreuses également. C'est seulement dans le fond de ce secteur que les argiles rouges sont apparentes, elles ceinturent un soutirage. A l'est de ce secteur, le talus argileux est relativement bien conservé. Un concrétionnement plus récent a repris à son sommet, mais surtout, ce talus qui borde le balisage laisse voir, localement, une structure des dépôts rare dans cette cavité : une alternance assez fine de couches sableuses et argileuses. C'est sur cette coupe naturelle rafraîchie que nous avons travaillé et prélevé les échantillons. Le pendage des couches est conforme à la pente générale de ce point bas, sauf à l'extrémité sud où il s'inverse très localement (photo IV.3).

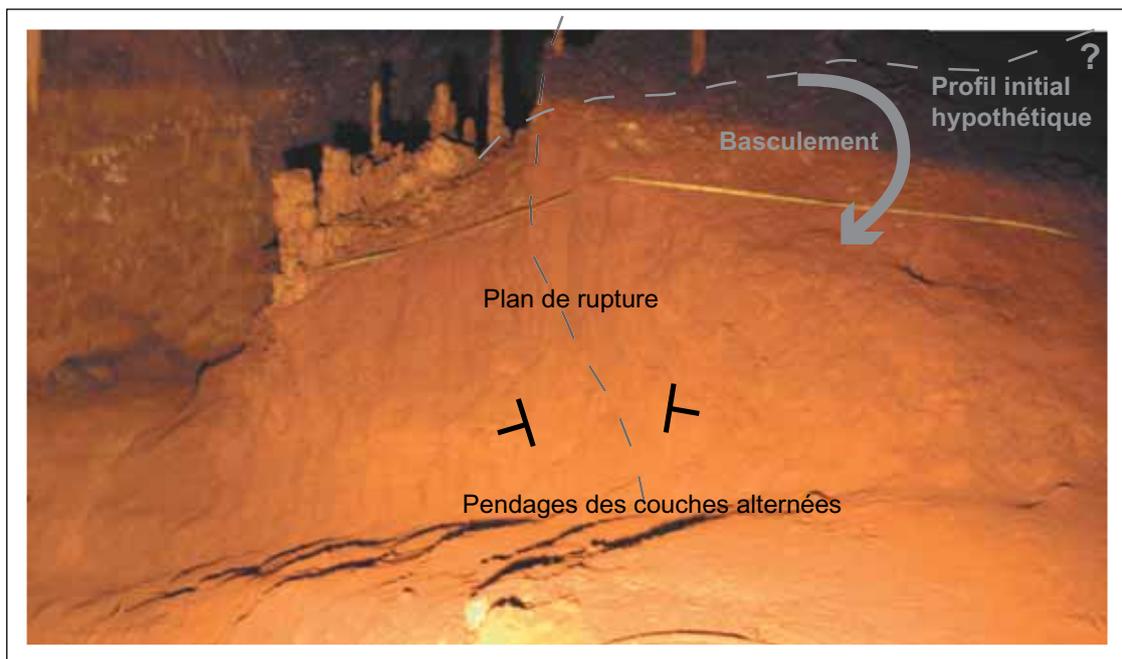


Photo IV.3 : Structure globale du talus d'argile de la salle Nord (cliché A.S. Perroux).

4. Carte morphologique de la salle II : premières données

Le travail de cartographie de la salle II présenté ici a été réalisé dans le cadre d'une année de Master, par B. Sadier [2004]. Les différentes étapes de la réalisation ont été supervisées par S. Jaillet et J.-J. Delannoy. La carte géomorphologique de la salle II de l'Aven d'Ornac et sa légende sont données dans la figure ci-dessous (figure IV.11). Un rapide commentaire en est fait, sur les différentes formations en présence et sur les dépôts sableux en particulier, puisque ceux-ci nous intéressent particulièrement quant à notre propre étude du remplissage de la Chatière des Sables.

Le premier élément important dans la lecture de cette carte est l'abondance des dépôts argileux. Les dépôts les plus répandus dans la majeure partie de la grotte sont, en effet, des argiles rouges, massives et pour lesquelles on observe parfois un fin litage. La salle II ne fait pas exception, ces dépôts détritiques y sont considérables. Le fait que ces argiles soient finement litées fait penser à une sédimentation en zone noyée, suite à une mise en charge des réseaux. Le concrétionnement y est également abondant, en formations ponctuelles (stalactites et stalagmites) comme en formations diffuses (planchers, gours).

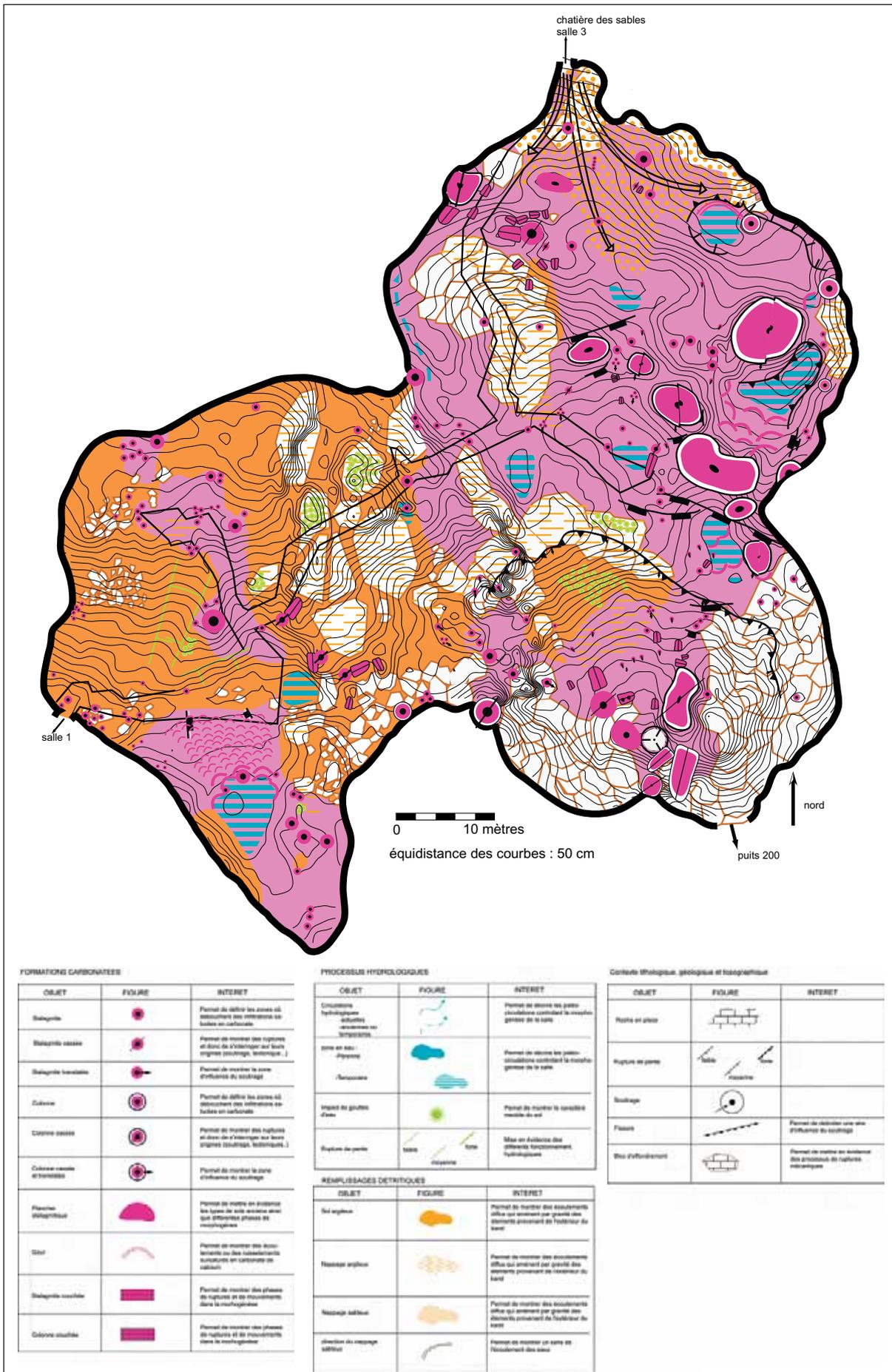


Figure IV.11 : La carte géomorphologique de la salle II de l'Aven d'Orgnac (d'après Sadier, 2004).

Même si la carte ne le montre pas ici, différentes générations de concrétions peuvent s'individualiser. Elles sont au moins trois. La plus ancienne concerne des édifices stalagmitiques massifs qui se sont effondrés. Ils sont aujourd'hui couchés au milieu d'autres édifices, parfois partiellement nappés d'argiles. La génération intermédiaire regroupe les édifices stalagmitiques toujours en place. Ils peuvent être plus ou moins massifs mais montrent toujours une calcite opaque en surface, ayant déjà subi de l'altération. Certaines de ces concrétions ont d'ailleurs poussé sur les édifices stalagmitiques basculés de la génération précédente ; ce qui témoigne de leur succession dans le temps. Enfin, une troisième génération se distingue à travers les concrétions les plus petites, dont certaines sont encore actives. Les planchers stalagmitiques présents dans la partie nord-est de la salle permettent de supposer qu'aucune mise en charge importante du réseau ne s'est produite depuis un temps relativement ancien. Par contre, les zones de gours attestent de ruissellements qui peuvent encore, pour certains, être temporairement actifs. Il en va de même des blocs d'effondrement comme pour le concrétionnement, dans la mesure où différentes phases peuvent être identifiées. Des blocs massifs et nombreux sont nappés par l'argile rouge dont nous avons parlé plus haut, alors que d'autres, de taille plus réduite, ne sont pas recouverts. Dans les deux cas, la présence de ces blocs s'explique par des phénomènes de rééquilibrages de la voûte, par ajustements mécaniques. Mais il semble que les plus anciens d'entre eux aient subi une phase de ré-ennoiement de la cavité ou de mise en charge, toutefois assez brève si l'on se réfère à la faible épaisseur d'argile qui les recouvre.

Deux autres aspects majeurs de cette carte méritent un commentaire. Il s'agit de la présence d'un dépôt sableux superficiel, cantonné à l'extrémité nord de la salle, en direction de la Chatière ; et d'un grand soutirage dont la présence est soulignée par l'abondance des blocs effondrés sur son pourtour. Le dépôt sableux soulève un questionnement quant à sa provenance. En effet, on ne l'observe à aucun autre endroit de la salle II. Dans la traversée de la Chatière, qui fait environ 65 m de long, ce niveau sableux disparaît assez vite, et la portion de la Chatière la plus proche de la salle III montre un remplissage exclusivement argileux. Ce dépôt sableux est donc assez énigmatique à ce jour, nous y reviendrons à travers la présentation de quelques sondages. Le soutirage lui, semble avoir une importance remarquable sur l'évolution de la salle, avec une aire d'influence assez étendue, attestée par de nombreux témoins de mouvements dans sa direction : effondrement, concrétions translitées, fissures dans les planchers. Ce soutirage est l'expression de l'évacuation progressive des dépôts de la salle *via* les infiltrations, provenant soit de ruissellements soit d'infiltrations du plafond. Son fonctionnement, tributaire de ces apports en eau, doit donc être relativement discontinu, au moins en terme d'intensité [Sadier, 2004]. Sa profondeur n'a pas été estimée.

La carte réalisée permet d'appréhender les processus en jeu dans la salle, et leur succession possible. Elle permet également de soulever certaines questions. Nous retiendrons ici la question relative à la présence des sables en dépôt superficiel local, en direction de la Chatière qui est l'un des secteurs que nous avons étudié plus en détail. Nous y reviendrons lors de l'étude des prélèvements. Mais voyons maintenant l'apport d'informations complémentaires à cette carte grâce aux sondages, sur la salle II et sur la chatière ensuite.

b) Les sondages

1. Sondages dans la première partie de la salle II

Six sondages ont été effectués, ils se regroupent sur un profil commun localisé dans la première partie de la salle II, selon une direction Nord-Sud (figure IV.12). D'autres profils du même type seront

réalisés à l'avenir, en progressant en direction de la salle III. Techniquement, ces sondages ont été réalisés à l'aide d'une tarière, disposant de rallonges qui permettent de faire des sondages de l'ordre de 9 m de profondeur (à condition de disposer d'une distance verticale équivalente par rapport au plafond de la cavité). La tarière permet de retirer le sédiment par tronçons de 20 cm, les changements dans le remplissage ainsi traversés sont donc repérés sur les petites carottes de 20 cm remontées les unes après les autres (photo IV.4). Compte tenu de la nature des sédiments rencontrés, leur conservation n'a pas été possible ; les couteaux de la tarière les ayant souvent déformés, voire complètement démantelés (argile collante et élastique, photo IV.5). Les observations stratigraphiques ont donc été faites « sur l'instant ».

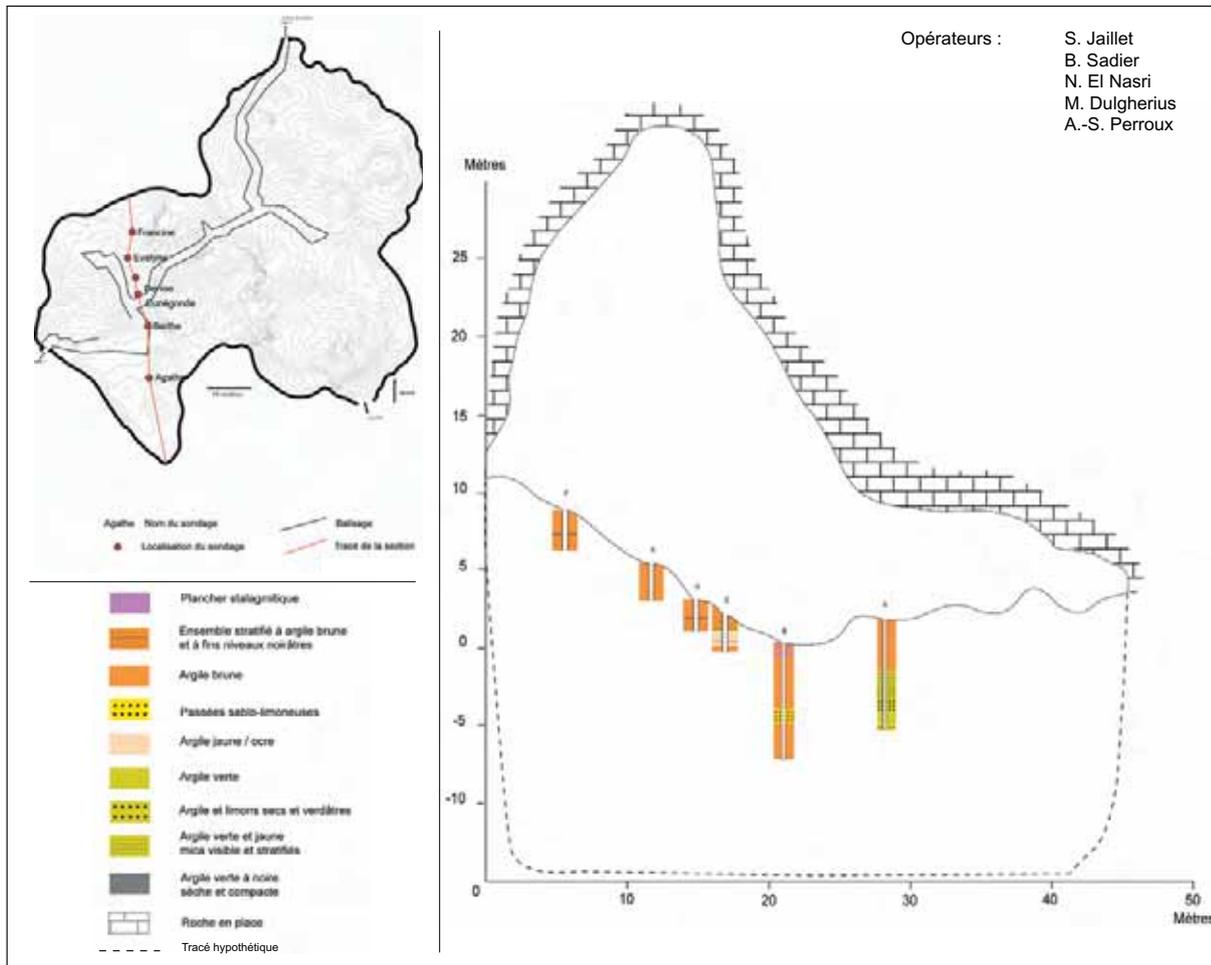


Figure IV.12 : Synthèse graphique des sondages effectués dans la salle II de l'Aven d'Orgnac (d'après Sadier, 2004).

Les sondages et le détail des sédiments rencontrés tels que les montrent la figure IV.12 apportent plusieurs informations complémentaires à la carte géomorphologique. Tout d'abord, aucun des sondages n'a permis de toucher la roche encaissante, il y a donc, pour ce secteur de la salle II en tous cas, un remplissage d'au moins 7 m d'épaisseur. Ce remplissage est majoritairement argileux, et notamment constitué par les argiles rouges à brunâtres plus ou moins nettement litées. Ces argiles rouges forment la dernière partie du dépôt, sur 2 à 3 m d'épaisseur selon les sondages. Le sondage Agathe est le seul à montrer une modification importante des dépôts, puisque ces argiles rouges disparaissent pendant plusieurs mètres, en profondeur, au profit d'argiles vertes à jaunâtres. Pour ces dernières, la contribution d'une fraction silteuse apparaît, même si elle est assez variable. Dans la plupart des sondages, un, voire plusieurs planchers stalagmitiques ont été franchis. Ces planchers sont la preuve que le colmatage argileux s'est fait de façon discontinue, des interruptions se sont produites, aux cours desquelles de fins planchers stalagmitiques ont pu se former (figure IV.12).

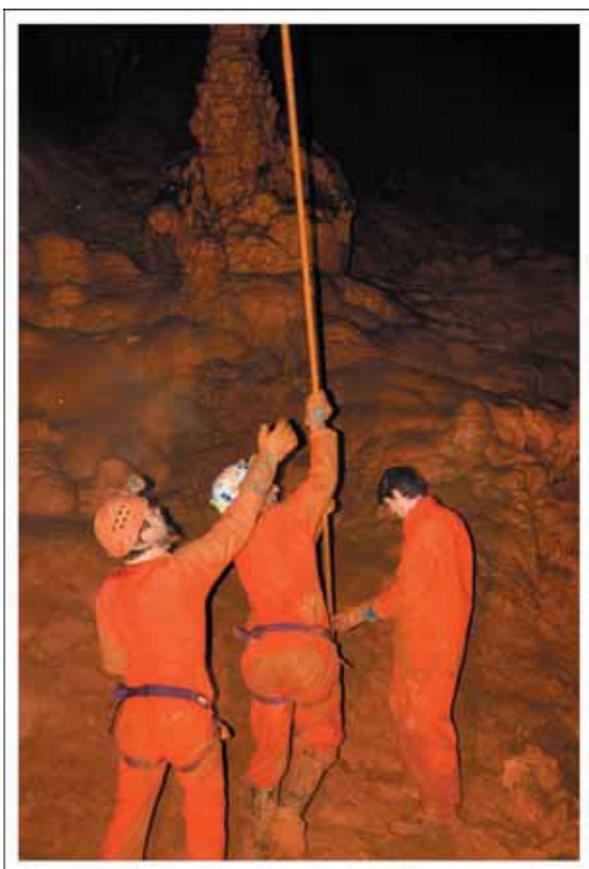


Photo IV.4 : Sondage profond à la grande tanière (cliché S. Jaillet).

Photo IV.5 : Argile retirée à la tanière (cliché S. Jaillet).



L'organisation du remplissage telle qu'elle transparaît au travers des sondages profonds, confirme l'omniprésence et l'abondance des dépôts argileux dans la salle II, que la carte géomorphologique avait permis de mettre en avant. Compte tenu de l'époque du creusement de ce réseau karstique, nous aurions donc affaire ici à des dépôts particulièrement anciens, et à l'histoire relativement complexe (cf. *supra* : Partie IV, Chap. I.1). Les dépôts tels que nous les voyons aujourd'hui sont en effet le résultat de courtes phases d'assèchement et de périodes de ré-ennoiement de la cavité. A ce titre, nous ne pouvons exclure que des lacunes stratigraphiques aient été créées au cours de cette spéléogénèse. En regard des objectifs finaux au-delà ces recherches, à savoir des interprétations paléoenvironnementales et paléoclimatiques à partir des remplissages de l'endokarst, ce point devra alors être pris en considération. Ces travaux permettant une approche à la fois globale et précise de la salle II, et qui seront d'ailleurs étendus à d'autres secteurs de la cavité, apportent donc des informations sur la spéléogénèse.

2. Sondages au niveau de la Chatière

Par rapport au deuxième questionnement soulevé par la réalisation de la carte, à savoir la présence très réduite d'un dépôt sableux entre la salle II et la Chatière des Sables, S. Jaillet et moi-même avons procédé à d'autres sondages en profondeur dans ce secteur, afin d'essayer de connaître leur épaisseur et de voir si ce type de dépôt était également présent en profondeur. La chatière a été parcourue sur toute sa longueur, soit un peu plus de 65 m, et nous avons essayé de suivre le dépôt sableux tout le long de ce passage étroit. Dans les plus petites parties de cette étroiture, les sondages à la tarière, même avec 1 mètre seulement de développement n'étaient techniquement pas possibles. A part quelques sondages à la transition entre la salle II et la Chatière, qui seront présentés ici, nous avons donc travaillé en creusant le remplissage de place en place, au piochon, sur 20 à 50 cm d'épaisseur. Les coupes ainsi dégagées, si petites soient-elles, nous ont permis de suivre ce dépôt sableux. Après la description des deux sondages, nous restituerons ici nos observations sur les différentes petites coupes.

Les deux principaux sondages sont situés à l'entrée de la chatière, du côté de la salle II. Sur ces secteurs, le dépôt de sable est le plus récent, et il est aussi le plus abondant, pouvant avoir une épaisseur de 30 cm. Le dépôt n'est pas consolidé, au point que ce secteur particulier a été surnommé « la plage ». De plus, il ne faut pas oublier que le matériel a peut-être été remanié lors des désobstructions de cette partie de la cavité. Les sondages y ont été faits pour voir les dépôts sous-jacents à ce niveau de sables, et tenter de faire le parallèle avec les différents sondages profonds de l'autre extrémité de la salle. Cette plage a la particularité d'avoir une assez forte pente, le fond étant dirigé vers la chatière. Cette géométrie est d'ailleurs assez troublante par rapport au nappage sableux. Les sondages, leur localisation et leur description sont donnés dans la figure IV.13.

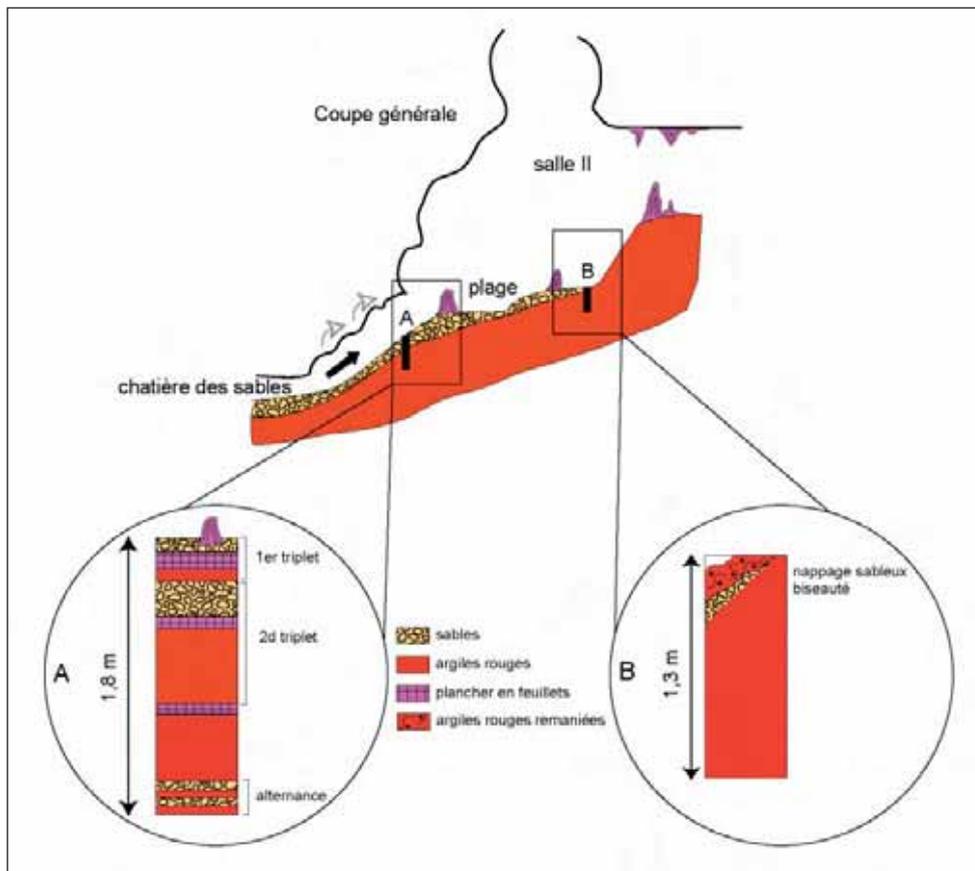


Figure IV.13 : Coupe générale situant les deux sondages A et B et description.

Ces deux sondages A et B font respectivement de 1,8 m et 1,3 m de profondeur, ils permettent de faire quelques recoupements avec les sondages de la moitié ouest de la salle. Le sondage A est à une altitude comparable au sondage Berthe (figure IV.12). Il présente directement sous les sables un plancher stalagmitique, puis on retrouve les argiles rouge brunâtre (photo IV.6). Le même triplet s'observe en dessous avec encore un niveau sableux, puis un plancher et les argiles. Un dernier plancher est rencontré vers 1,10 m de profondeur, sous lequel on retrouve les argiles, puis une alternance plus resserrée entre des sables fins et les argiles rouges. Les deux premiers niveaux de sables (nappage et premier niveau en profondeur) sont plus grossiers que les sables fins profonds. Seule la partie médiane de ce sondage peut s'accorder avec le sondage Berthe, entre le deuxième plancher et les premiers niveaux de sables fins. Sur les 40 premiers centimètres par contre, les sables sont beaucoup plus fréquents et le fait que l'on rencontre deux fois la succession « sables/plancher/argiles » fait penser que la formation sableuse qui nous préoccupe a eu des conditions particulières de sédimentation que l'on ne retrouve pas ailleurs dans la salle II, voire même dans toute la cavité.



Photo IV.6 : Les premiers centimètres du sondage A (cliché A.S. Perroux).

Le sondage B est situé un peu plus haut, à la rupture de pente avec le sommet du talus argileux, rupture de pente qui marque également la fin du nappage sableux. Il se situe à des altitudes comparables aux sondages Denise et Evelyne. Les niveaux traversés sont successivement des argiles remobilisées par les rééquilibrages de pente qui scellent le dépôt sableux se terminant ici en biseau. L'argile brune litée et de pente conforme au talus se retrouve en dessous. Aucun plancher n'est rencontré dans ce second sondage. Cela pourrait s'expliquer par l'altitude à laquelle on a sondé les dépôts et leur forte pente, celle-ci empêchant la stagnation des eaux. Dans ce second cas, on a un remplissage semblable en tous points à celui du sondage Evelyne. L'augmentation de pente brutale au niveau de ce second sondage explique alors que les sables, non indurés, n'aient pu se déposer ou se maintenir plus avant sur ce talus.

A ces deux petits sondages s'ajoutent un certain nombre de repérages fait tout le long de la chatière, ils sont représentés ensembles sur la figure de synthèse ci-dessous (figure IV.14). Le travail de

repérage de ce niveau sableux dans la chatière n'a pas été évident car toute la première descente entre la salle II et le cœur de la chatière est en fait un chaos rocheux partiellement colmaté et recouvert d'une mince couche d'argiles rouge brunâtre. Le dégagement de petites coupes au piochon n'a donc pas pu se faire aussi souvent que nous le souhaitions.

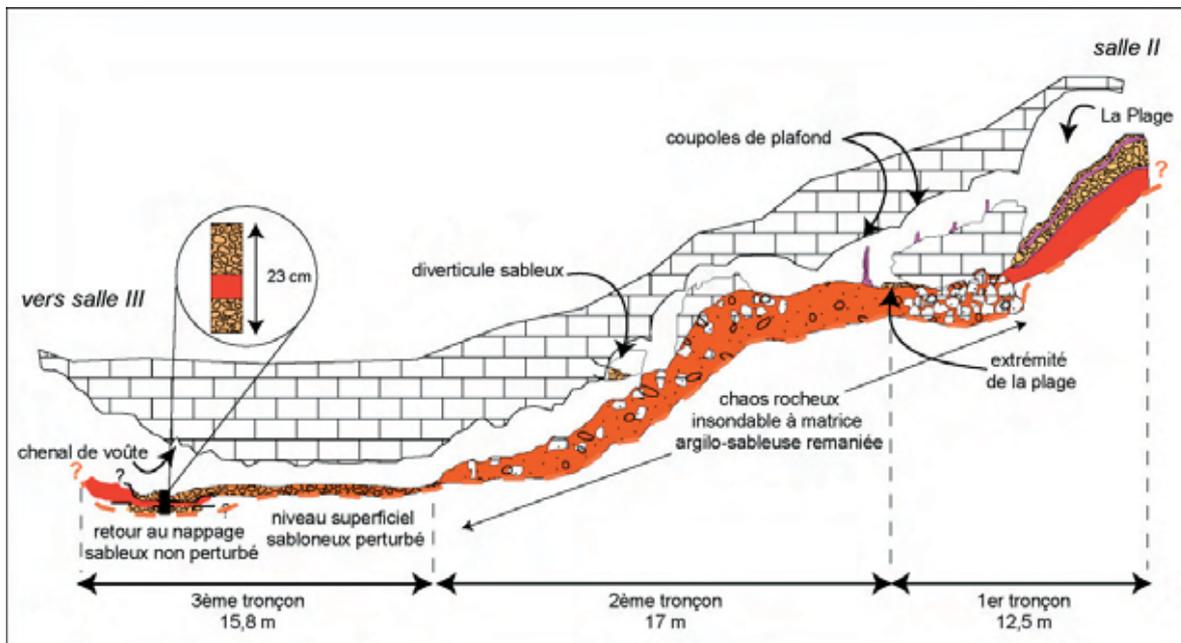


Figure IV.14 : Croquis de synthèse sur l'évolution du niveau sableux dans la Chatière des Sables (pour le confort de lecture, les échelles ne sont pas forcément respectées).

Les sables se suivent très bien depuis les sondages présentés ci-dessus jusqu'au premier chaos rocheux rencontré. Sur ce premier tronçon, sur un profil décalé vers le Nord par rapport aux petites coupes A et B, le nappage sableux superficiel est de moins en moins visible, mais le second niveau, sous le plancher stalagmitique, s'observe bien (figure IV.14). Sur environ 5 m de long, le chaos rocheux nous empêche de suivre ce niveau. Mais immédiatement derrière, on recroise une extrémité de « la plage » et le nappage sableux (photo IV.7). La descente vers le cœur de la chatière se poursuit, et l'espace se réduit. La voûte sur ce tronçon est marquée par de larges coupoles de dissolution emboîtées. Le remplissage au sol, lui, est très mélangé. Nous avons en effet dépassé le chaos rocheux, mais dans cette partie assez pentée, on retrouve encore de nombreux blocs effondrés, noyés dans une matrice à dominante sableuse, où l'argile rouge est également présente (figure IV.14 ; photo IV.8). Les coupes réalisées dans ce secteur sont à considérer avec recul, notamment au niveau des dépôts fins. Si la présence des blocs n'est pas remise en cause, la matrice qui les enrobe est difficile à analyser sur le plan de la sédimentation. En effet, ce secteur de la Chatière des Sables étant le seul passage pour communiquer entre les salles II et III du réseau, la partie superficielle des dépôts est fortement remaniée par le passage des spéléologues. Aussi, les passages répétés ont vraisemblablement perturbé la stratigraphie sommitale de ce secteur étroit. Et comme les blocs y sont assez fréquents, il est difficile d'y faire une coupe plus profonde. On retiendra de ce second tronçon du passage étroit, que le nappage sableux superficiel se perd peu à peu, étant mélangé à l'argile ; et que nous n'avons pu mettre en évidence la présence du second niveau de sables observé dans le sondage A. Par contre, ce second tronçon de la Chatière présente un petit diverticule, sur la droite, en léger contre-haut (photo IV.9). Dans ce diverticule, on retrouve les sables en abondance, et ce sur une coupe de 30 cm environ (figure IV.14). Ils sont non indurés sur les premiers centimètres, puis apparaissent plus consolidés, et en strates bien individualisées en dessous. Ce diverticule n'est pénétrable que sur 2 mètres, et se referme assez rapidement. Mais il prouve qu'un dépôt sableux

abondant existe encore, alors que l'on est descendu de plus de 5 m (en distance verticale) depuis « la plage ».

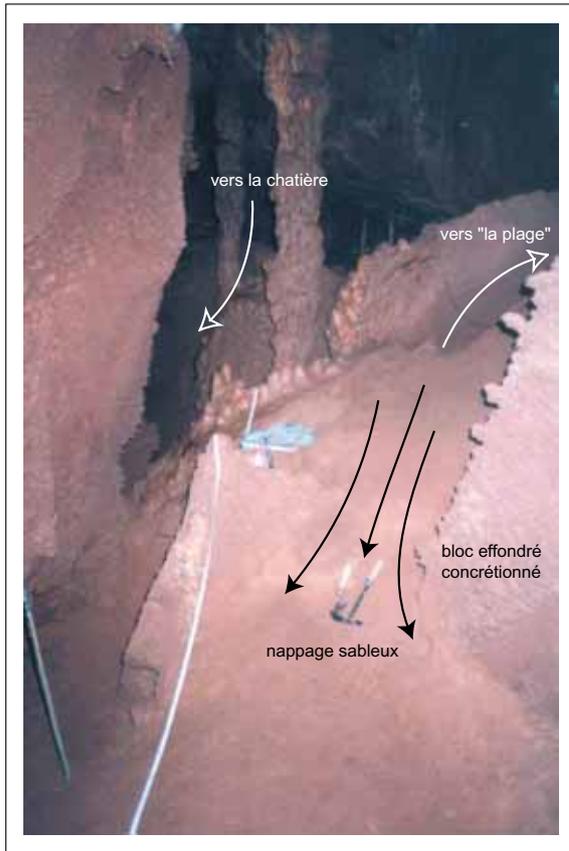


Photo IV.7 : Début du rétrécissement vers la chatière et dernière extrémité de « la plage » (cliché A.S. Perroux).

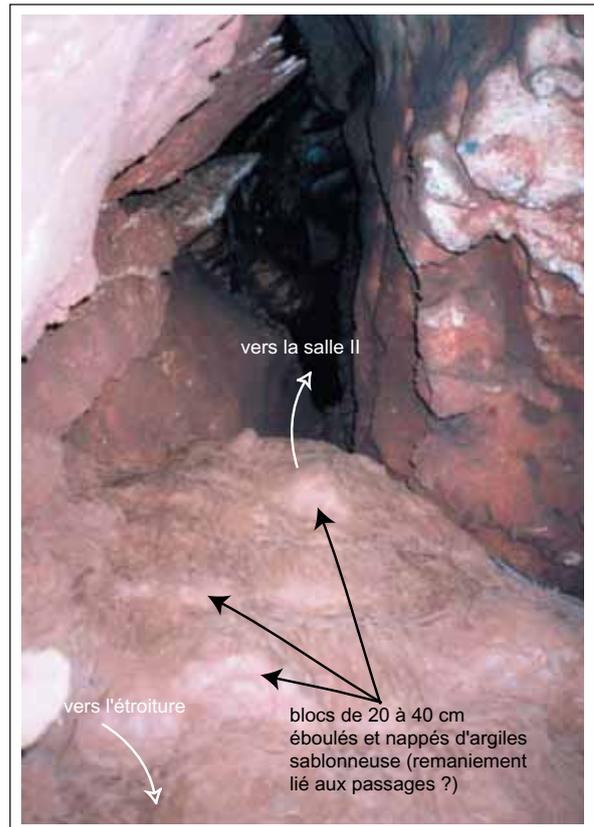


Photo IV.8 : Dans la chatière, vue des blocs éboulés noyés dans un remplissage fin sablonneux (cliché A.S. Perroux).

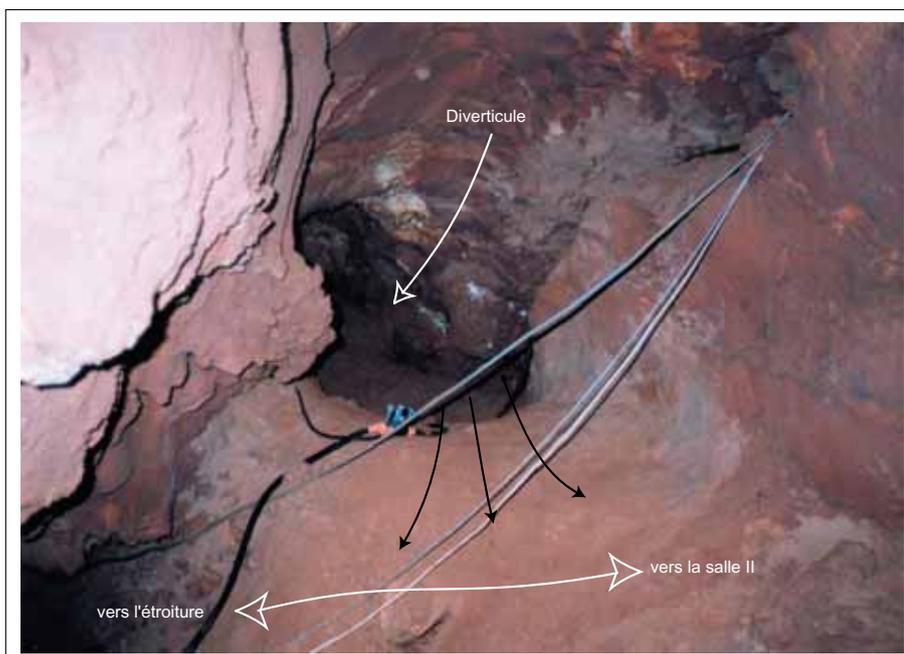


Photo IV.9 : Le diverticule rempli de sables (cliché A.S. Perroux).

Le troisième et dernier tronçon de cette chatière comprend l'étroiture *sensu stricto*. Elle mesure 8,70 m de long, et le sol est un remplissage sableux remanié. Là encore, les passages sont probablement responsables de l'état des derniers centimètres du dépôt. Dans cet étroit passage, aucun sondage n'a été possible. Par contre, ce passage bas se termine sur une petite « cloche », un peu plus large (photo IV.10), dans laquelle nous avons pu dégager un peu le remplissage. Nous en ferons une description détaillée plus loin car c'est ce secteur que nous avons échantillonné pour notre travail de reconnaissance des modalités de piégeage. C'est en effet le fond de la chatière, et c'est le seul endroit où nous avons retrouvé les deux niveaux de sables du sondage A. Dans la petite coupe mise à jour dans cette niche, on trouve en effet les sables en surface, un peu plus indurés que ce que nous avons au niveau de « la plage », un niveau argileux puis de nouveau les sables faiblement indurés. Un autre élément tout à fait intéressant à ce niveau de la chatière est l'état de la voûte. Dans la niche, un chenal de voûte est visible, qui témoigne d'un colmatage complet de ce passage bas, et d'une érosion à l'interface avec le plafond. Enfin, la « fin » de cette chatière (longue de 17 mètres) recommence à s'élargir en direction de la salle III. Elle ne montre plus que des dépôts exclusivement argileux, rouges bien lités et des formes de voûte beaucoup plus simples. Notamment, les coupoles que nous avons observé du côté de la salle II ne sont plus visibles de ce côté ci.



Photo IV.10 : Dans la chatière, vue de la petite niche entre la sortie de l'étroiture et la remontée vers la salle III (cliché A.S. Perroux).

L'ensemble de ces données sur les niveaux sableux s'accorde assez bien avec l'hypothèse d'un dépôt de sables ponctuel et localisé. Le dépôt, sa géométrie et la stratigraphie que nous avons pu observer de place en place permettent de proposer l'hypothèse suivante. Suite au décolmatage partiel des réseaux, un écoulement relie la salle III et la salle II (son origine et l'aire concernée restant à déterminer précisément). L'hydrodynamisme de cet écoulement empêche tout dépôt du côté de la salle III. On peut même supposer que cet écoulement soit responsable d'un départ de matière dans cette partie du réseau. Au niveau de la chatière, l'écoulement est siphonnant, probablement jusqu'à l'altitude du diverticule au vu de la quantité de sables qu'il renferme. La partie de la chatière remontant vers la salle II voit ainsi des écoulements ralentis ; la perte d'énergie favorisant le dépôt des particules sableuses dans cette partie (figure IV.15). Un tel phénomène aurait pu se produire deux fois au moins. Entre

ces deux épisodes marqués par le dépôt de sables, la sédimentation argileuse indiquerait une phase intermédiaire avec le retour d'un hydrodynamisme calme.

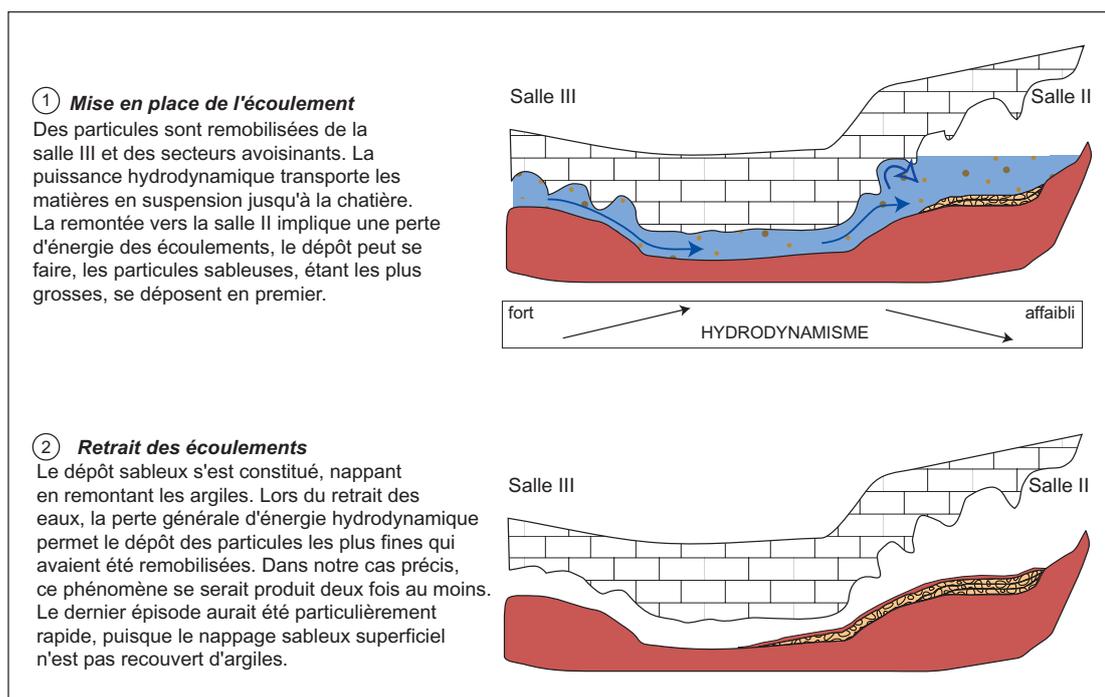


Figure IV.15 : Interprétation dynamique proposée pour le dépôt sableux entre le fond de la Chatière des Sables et l'extrémité Nord de la Salle II.

Les formes de creusement conservées au plafond de ce passage étroit pourraient également être des témoins complémentaires de cette dynamique particulière à l'origine du dépôt sableux. En effet, les plafonds des réseaux de l'Aven d'Orgnac, quand ils ne sont pas concrétionnés, présentent des coupes, témoins de banquettes limitées (creusement ascendant typique des galeries paragenétiques, lié à une dissolution préférentielle à l'interface paroi/remplissage) [Renault, 1967]. Ces coupes sont présentes dans la partie de la Chatière du côté de la salle II, mais sont beaucoup moins nettes de l'autre côté, vers la salle III (figure IV.15). Cette dissymétrie pourrait s'expliquer par l'ennoiement de l'étranglement et du bas de la salle III, provoquant une dissolution partielle de la voûte pour ce secteur et donc une atténuation des formes en coupes. Enfin, reste la question de la provenance des sables. En parcourant la chatière dans son ensemble, on peut observer de petites accumulations sableuses, de forme clairement conique. Ces petits dômes de sables, localisés juste après le diverticule et au point de départ de l'étranglement *sensu stricto*, indiquent sans ambiguïté une alimentation du dôme par le haut. Ces accumulations sableuses suggèrent donc la présence de sables piégés dans les parties supérieures du réseau karstique. La formation sableuse de la salle II pourrait provenir d'une ou plusieurs poches sableuses sus-jacentes, remobilisées lors d'une remise en eau localisée et relativement ponctuelle.

Cette première hypothèse mérite bien sûr d'être confortée par d'autres observations et d'autres analyses, le travail est poursuivi dans ce sens. Mais dans cette optique d'apports sableux remontants, si nous recentrons la discussion sur notre questionnement quant à l'identification des modalités de la sédimentation souterraine, le prélèvement effectué au fond de la Chatière devrait nous donner une signature tout à fait différente de la « carte d'identité » que nous avons proposé pour les pièges lacustres (cf. *supra* : Partie III, Chap. III.1.a.1). Cela conférerait à la démarche d'étude une bonne reproductibilité. Grâce à la cartographie et aux sondages sur cette partie des réseaux, on peut donc appréhender d'une manière globale le secteur étudié, mais aussi pressentir des hypothèses de dynamique sédimentaire,

pour une partie des dépôts au moins. Par rapport à l'étude de la reproductibilité de notre approche des dépôts détritiques endokarstiques, cette réflexion plus générale, en apportant un éclairage intéressant sur la pertinence du secteur étudié, était nécessaire afin de mieux cerner ce que l'on peut attendre de l'analyse du prélèvement de la Chatière. Ces données préliminaires étant posées, la suite du discours peut maintenant se focaliser sur l'étude des deux prélèvements, et sur l'évaluation concrète de la reproductibilité de la démarche de travail adoptée.

2. Description des prélèvements

a) Mode particulier d'échantillonnage

Le mode d'échantillonnage que nous avons utilisé pour les sédiments d'Ornac est différent de ce que nous avons fait pour Choranche. Dans cette seconde cavité, nous sommes en effet sur des sédiments secs et accessibles. Aussi, le matériel d'échantillonnage est beaucoup plus léger et le prélèvement se fait beaucoup plus rapidement. Dans les deux secteurs étudiés, nous avons prélevé les sédiments en utilisant de petits profilés en aluminium. La coupe est préalablement rafraîchie dans les sédiments, puis les profilés en aluminium sont plaqués sur cette section. On peut les mettre les uns à la suite des autres, sur une même coupe. Dans ce cas, le mieux est de prévoir quelques centimètres de recouvrement entre les différents profilés (figure IV.16). Après les avoir annotés et orientés, ils sont extraits de la coupe grâce à un fil à couper (fil de pêche par exemple). Emballés dans un film plastique fin puis dans un étui plastique plus résistant, les échantillons sont protégés jusqu'au retour au laboratoire [Lignier et Desmet, 2002]. Ils sont alors conservés en chambre froide, comme les carottes.

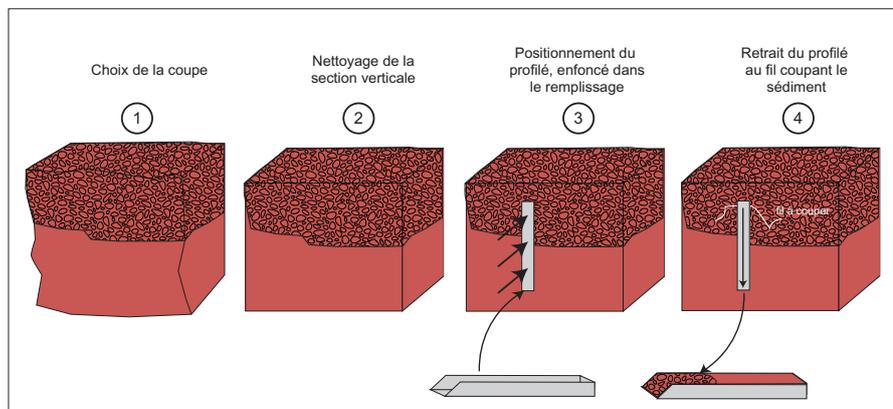


Figure IV.16 : Les différentes étapes d'un prélèvement de sédiments à l'aide de profilés aluminium.

b) Profilé du point bas de la salle Nord

Le profilé, nommé OR 203a a été prélevé dans les sédiments du fond de la salle Nord, juste avant l'étranglement donnant sur la salle I. Ce remplissage détritique se caractérise par une sédimentation alternée, avec des niveaux millimétriques d'argiles rouge brunâtres et des niveaux sableux centimétriques (photo IV.11). Le profilé, de 23 cm de long, restitue bien cette alternance resserrée de deux types de dépôts (figure IV.17 ; annexe 26). On remarque également que les niveaux sédimentaires ont un pendage qui est globalement conforme à la pente de la salle.

Un tel remplissage ne facilite pas le découpage en unités stratigraphiques. Nous avons pris le parti de les considérer comme une unité sédimentaire à part entière ; l'alternance sables/argiles faisant

partie de ses principales caractéristiques. Le site n'étant plus actif, il est difficile de proposer le moindre calage relatif par rapport à l'actuel.



Photo IV.11 : Prélèvement dans les dépôts du fond de la salle Nord (cliché A.S. Perroux).

c) Profilé de la Chatière des Sables

Ce profilé, localisé au cœur de la Chatière des Sables, a été nommé OR 04 S6 (photo IV.12). Nous rappelons qu'il a été prélevé car il permet de retrouver la succession des deux niveaux de sables observés au niveau de « la plage », extrémité Nord de la salle II. L'échantillon, long de 23 cm, peut se décrire selon un découpage en trois unités sédimentaires (figure IV.18 ; annexe 27) :

- de 0 à 10 cm : niveau sableux relativement homogène, dans lequel on n'observe pas de litages. Ce niveau a probablement été perturbé et tassé par les passages des spéléologues, la chatière étant un passage obligé. Il est également plus induré que les sables de la plage.
- de 10 à 14,5 cm : niveau d'argiles rouges homogènes, sans litage apparent. Ce niveau présente des argiles semblables à celles visibles dans tout le réseau, y compris dans les sondages A et B de la plage, et dans les sondages profonds localisés à l'entrée de la salle II.
- de 14,5 à 23 cm : niveau sableux, homogène et non lité. Faiblement indurés, ces sables sont un niveau que l'on ne peut pas observer en parcourant la chatière depuis « la plage », où le sondage A les fait apparaître clairement.

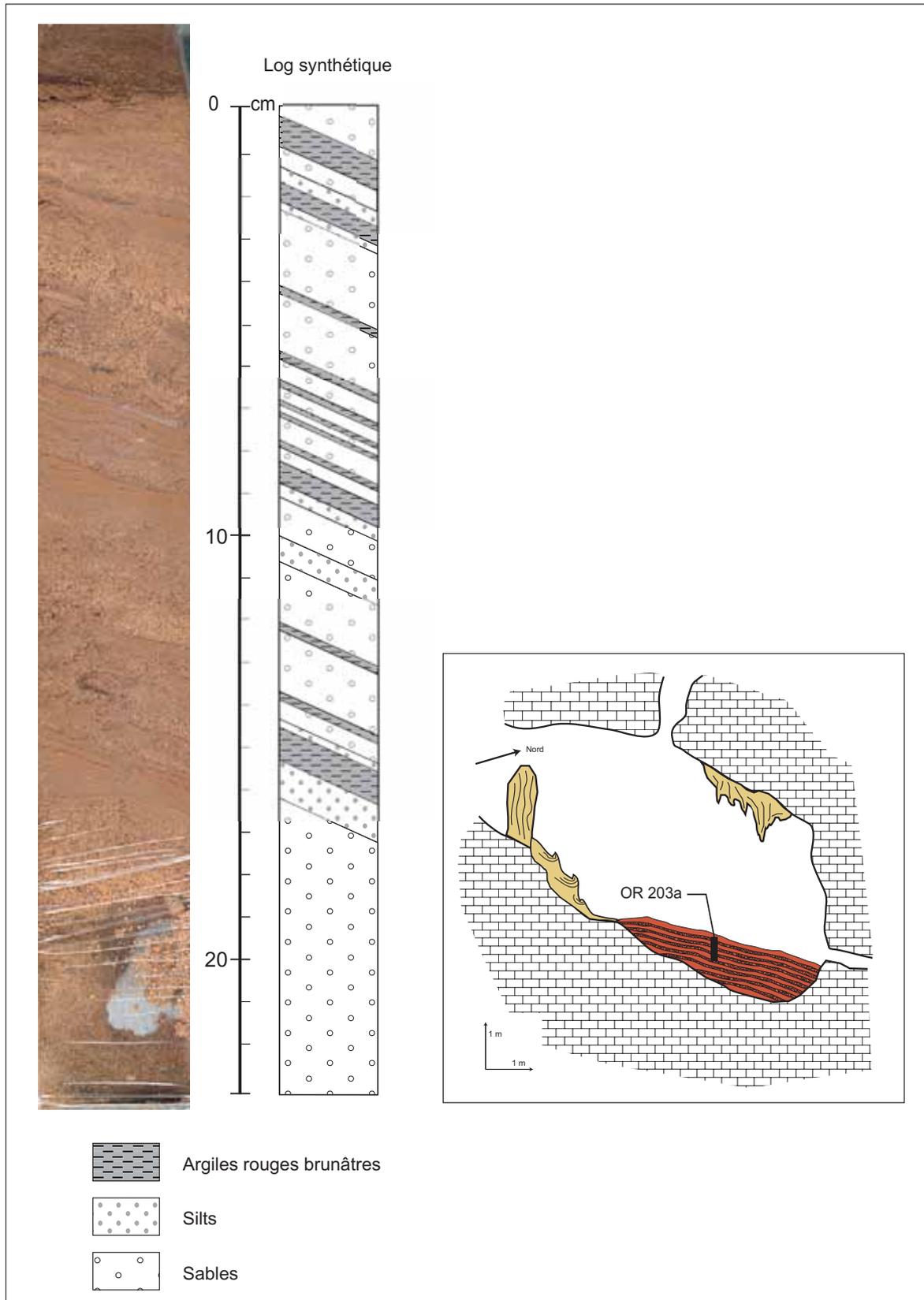


Figure IV.17 : Schéma descriptif du profilé OR 203a.

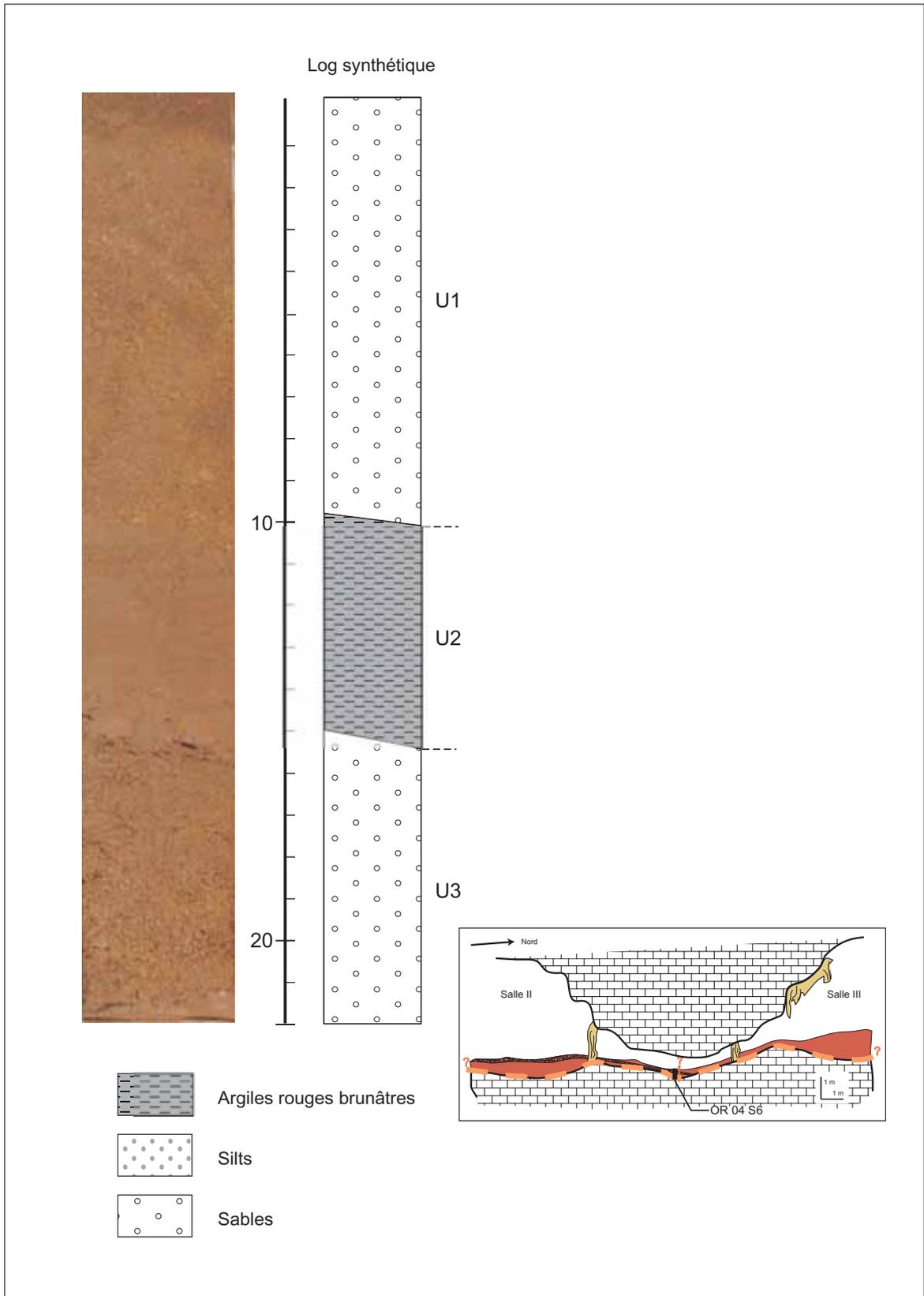


Figure IV.18 : Schéma descriptif du profilé OR 04 S6.

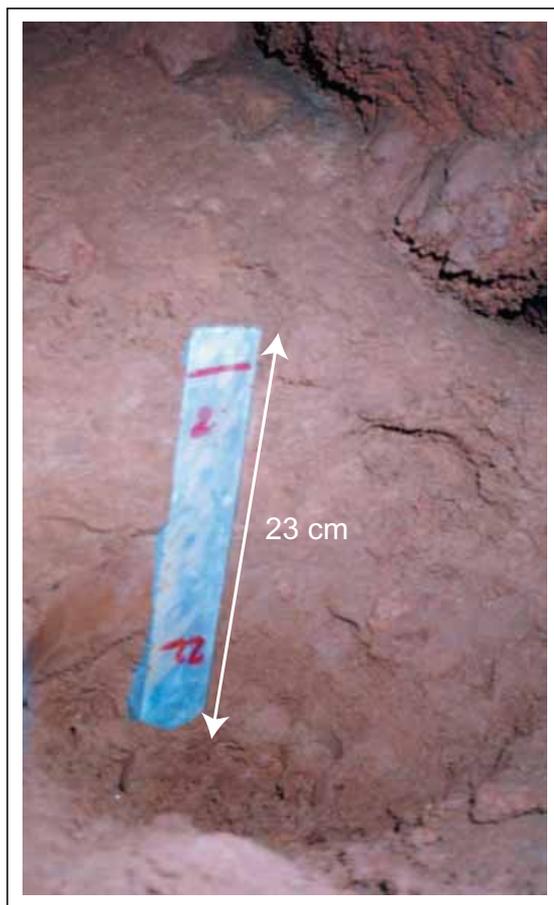


Photo IV.12 : Prélèvement dans la chatière des sables (cliché A.S. Perroux).

Ces deux échantillons, très différents entre eux, sont également assez différents de ce que nous avons dans les carottes de Choranche. Chaque couche de sédiments, qu'elle soit fine (quelques millimètres pour OR 203a) ou plus conséquente (plusieurs centimètres dans le cas de OR 04 S6) apparaît dans cette première description visuelle très bien triée, très homogène. Les différents types d'apports sont donc bien individualisés. Les traitements et analyses présentés ci-dessous devraient permettre d'affiner cette observation et de mettre en évidence les dynamiques sédimentaires responsables de ces dépôts.

3. Les analyses granulométriques et les traitements associés

Les analyses granulométriques réalisées sur les échantillons d'Ornac sont ici présentées. Avant de les exposer, nous rappelons que les données granulométriques ont été acquises à haute résolution, avec un pas de mesure de 3 mm (le même que pour les sédiments de Choranche). Pour le prélèvement OR 203a, ces données granulométriques ont été acquises sur les 15 premiers centimètres du profilé, soit une cinquantaine de mesures. Pour l'échantillon OR 04 S6, nous avons travaillé sur 17 cm, soit 58 mesures. Ces échantillons étant beaucoup plus petits que les carottes de Choranche, le nombre de données sur lesquelles nous avons travaillé s'en trouve réduit d'autant. Mais cette limitation des données ne devrait pas être trop gênante, et les études comparatives visant à étudier la reproductibilité pourront se faire, dans la mesure où les méthodes d'acquisition employées et la précision de chaque donnée sont strictement identiques.

a) Données de base sur l'évolution granulométrique

1. Le comportement des indices granulométriques majeurs

Nous présentons tout d'abord les courbes des contributions granulométriques regroupées en trois classes : sables, silts et argiles. Pour le profilé de la salle Nord « OR 203a » (figure IV.19), les argiles sont la contribution la plus faible, oscillant entre 5 et 33 %. Les silts, dont la courbe varie de façon similaire aux argiles, avec une plus grande amplitude, sont beaucoup plus abondants avec des pourcentages compris entre 12 et 67 %. Enfin, les sables constituent la fraction granulométrique la plus importante, toujours avec des apports pouvant énormément varier, puisque les pourcentages se situent cette fois entre 5 et 85 %. Le calcul des coefficients de corrélation entre ces différentes classes granulométriques confirme également ses relations (tableau IV.1). Avec un coefficient positif et élevé entre argiles et silts, on a bien une bonne corrélation, alors que des coefficients plus forts, mais négatifs attestent logiquement de la nette anti-corrélation régnant entre les sables et les deux composantes plus fines. Ces courbes évolutives, aux contributions pouvant subir des variations fortes et répétées, expriment très bien l'alternance de niveaux fins et grossiers dont nous avons parlé dans la description de l'échantillon. Par ailleurs, les rapports très étroits entre les trois classes granulométriques rappellent ce que nous avons observé dans les sédiments du lac de la Cathédrale, à Choranche. Ce constat permet de confirmer la nature des apports de sédiments supposés au point bas de la salle Nord.

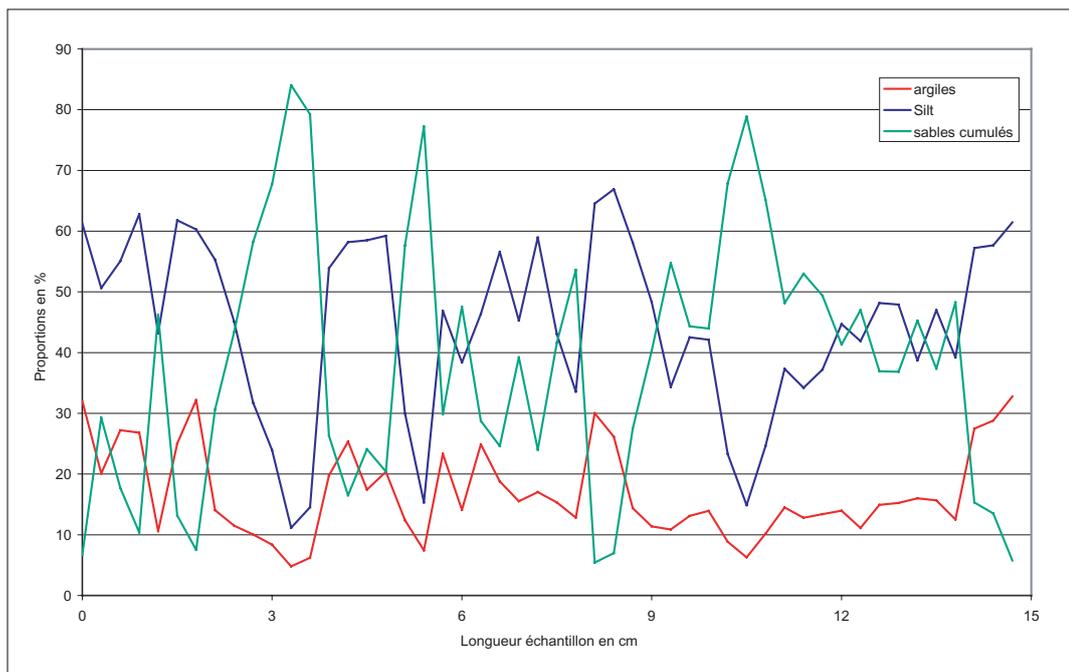


Figure IV.19 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques de OR 203a.

Coefficients de corrélation			
	<i>argiles/silts</i>	<i>argiles/sables</i>	<i>silts/sables</i>
OR 203a	0.825	-0.922	-0.980
OR 04 S6	0.981	-0.99	-0.999

Tableau IV.1 : Les coefficients de corrélation entre les trois composantes granulométriques des prélèvements d'Ornac.

Les sédiments du prélèvement de la chatière (profilé « OR 04 S6 ») donnent des courbes d'évolutions granulométriques assez semblables (figure IV.20). En effet, les participations respectives de chaque composante sont les mêmes, les argiles étant la fraction la plus faiblement représentée (entre 3 et

27 %), et les sables étant les plus importants (entre 8 et 90 %). Les fluctuations dans chaque composante sont cependant moins fortes, sauf vers les centimètres 9-10 et 13-14, qui marquent la transition entre les unités sédimentaires décrites plus haut. Les coefficients de corrélation sont, en valeur absolue, beaucoup plus forts et quasiment à 1 (tableau IV.1). Le fait que les coefficients relatifs aux sables atteignent le maximum est intéressant. C'est une première donnée quant à la particularité de l'apport sableux que nous avons déjà longuement présenté dans ce secteur qu'est la chatière. Grâce aux courbes et aux valeurs des coefficients, on peut en effet aller un peu plus loin dans le commentaire de ces données. Les forts liens entre les trois fractions granulométriques prouvent qu'une seule source de matière est responsable de leur accumulation. Par contre, l'étude préliminaire exposée dans le premier volet de ce chapitre permet d'avancer que la source de matière, si elle a été unique, n'a pas forcément été toujours la même. On pourrait en effet voir ici une succession plus ou moins continue entre deux processus sédimentaires différents, mais mobilisant une seule voie d'apports de particules : un responsable du dépôt argilo-silteux (correspondant à la sédimentation observée à beaucoup plus grande échelle dans la cavité), un responsable du dépôt sableux (beaucoup plus localisé et ponctuel). Associées aux descriptions de cette cavité, ces premières analyses granulométriques (présence de minéraux sableux) permettent de relativiser la perception d'une sédimentation argileuse. L'étude granulométrique révèle une histoire spéléogénique plus complexe, que nous nous devons de compléter. Nous tentons donc de voir si les autres traitements de données renforcent cette hypothèse.

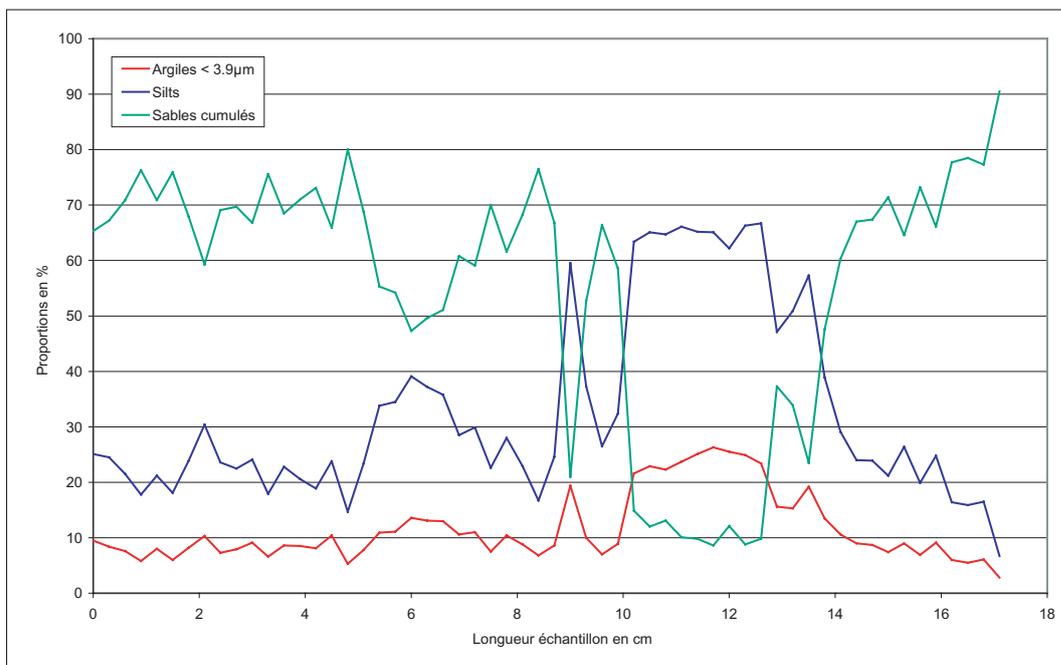


Figure IV.20 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques de OR 04 S6.

L'étude des indices granulométriques plus génériques que sont le mode, la médiane et le grain moyen permet de porter un regard plus synthétique sur les données. Pour OR 203a, leur comparaison est intéressante car on se rend compte que selon les courbes, certains niveaux grossiers apparaissent moins nettement. D'une manière générale, l'alternance des niveaux fins et grossiers est moins bien restituée par ces trois indices (figure IV.21). Le mode donne un repérage des niveaux grossiers acceptable mais très peu nuancé, voire même exagéré, les valeurs passant brutalement de 50-100 µm à 500 voire 700 µm. La médiane semble être le critère granulométrique le moins intéressant des trois, le repérage des niveaux grossiers y est incomplet. Le grain moyen apparaît comme l'indice qui restitue le plus grand nombre d'informations sur l'évolution globale de la granulométrie. L'indication des niveaux grossiers

est augmentée par rapport à la courbe du mode, et si on se réfère aux courbes de l'évolution de la fraction sableuse présentées avant, elle semble être la plus ajustée. De plus, les tailles de particules sont beaucoup plus nuancées que dans le mode. Le grain moyen semble donc être l'indice granulométrique le plus réaliste, comme c'était le cas pour les données de Choranche. Les coefficients de corrélation sont moins pertinents ici, mais ils permettent de vérifier que c'est bien le grain moyen qui offre les meilleures corrélations (tableau IV.2).

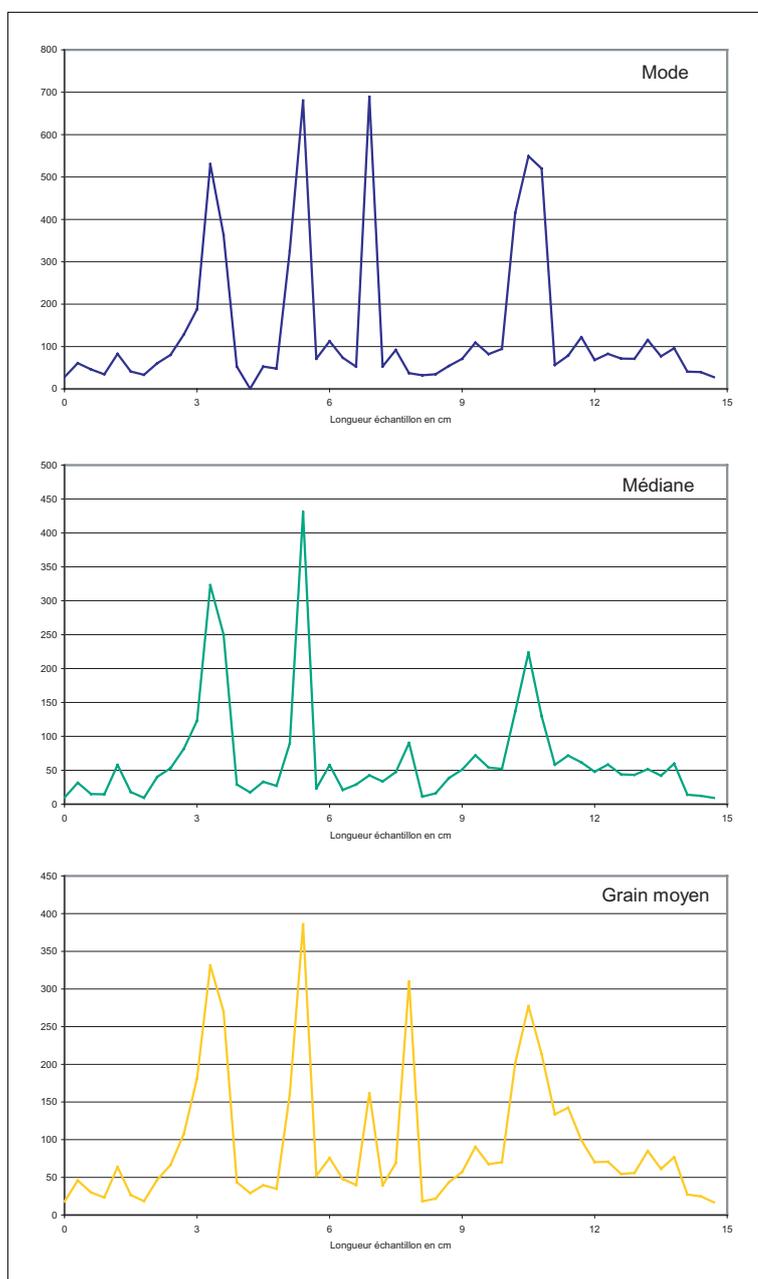


Figure IV.21 : La comparaison des indices granulométriques synthétiques : mode, médiane et grain moyen pour OR 203a.

Coefficients de corrélation			
	<i>mode/médiane</i>	<i>mode/grain moyen</i>	<i>médiane/grain moyen</i>
OR 203a	0.787	0.803	0.903
OR 04 S6	0.781	0.926	0.941

Tableau IV.2 : Les coefficients de corrélation entre les trois indices granulométriques génériques calculés pour les deux prélèvements d'Orgnac.

En ce qui concerne ces trois indices pour le profilé OR 04 S6, le même constat peut être fait. Même si la lecture de chaque courbe est moins évidente, les coefficients de corrélation confirment l'intérêt du grain moyen devant les deux autres indices (figure IV.22 ; tableau IV.2). Si le mode semble assez intéressant pour les deux unités sableuses, aux extrémités de l'échantillon, on mesure toute la perte d'information que cet indice introduit pour l'unité sédimentaire intermédiaire, à dominante argilo-silteuse. La médiane compense cette perte d'information, mais le grain moyen reste le plus complet, offrant la vision la plus détaillée des deux unités sableuses mais aussi de l'unité fine.

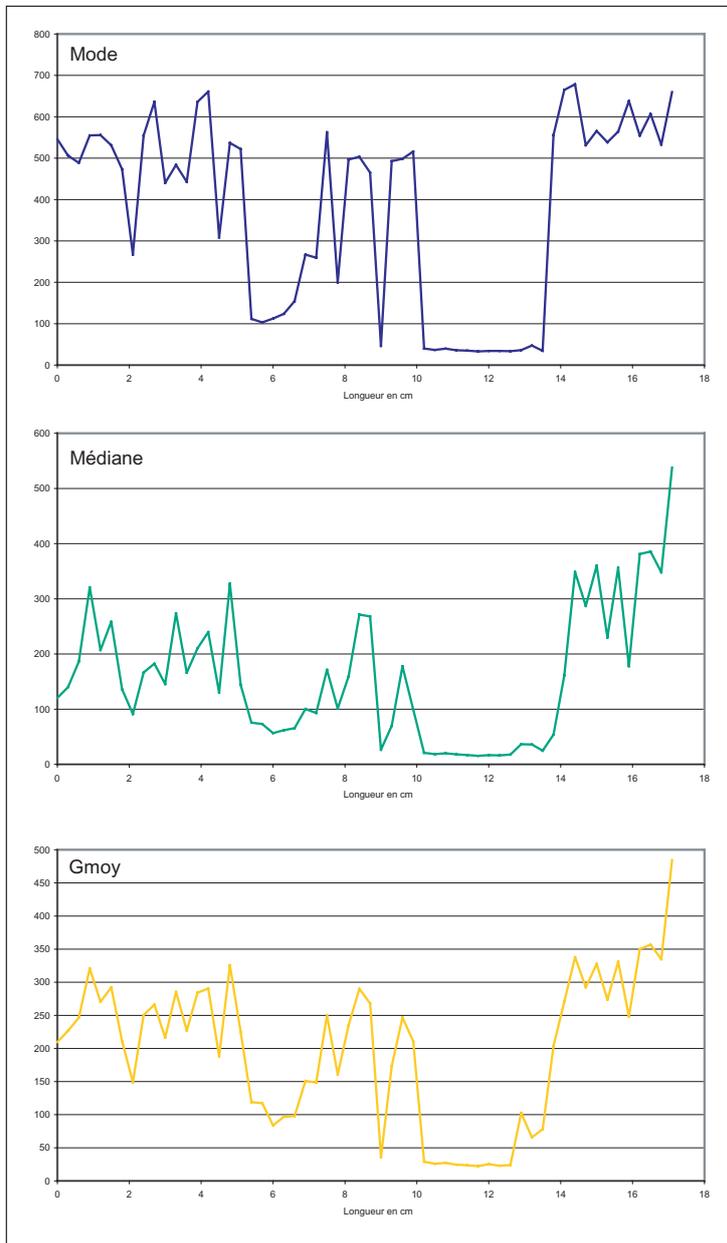


Figure IV.22 : La comparaison des indices granulométriques synthétiques : mode, médiane et grain moyen pour OR 04 S6.

Si cette comparaison des différents indices granulométriques n'est pas, pour elle-même, d'un grand intérêt, il était important de faire cette comparaison et de faire ressortir que l'indice le plus pertinent est le grain moyen. C'est cet indice qui s'était également révélé le plus intéressant pour Choranche. Nous savons donc que pour les autres analyses, comme l'étude de l'image de Passega (critère discriminant) et les traitements de signaux par ondelettes, l'indice le plus pertinent, le plus intéressant est le grain moyen. Nous avons préféré réitérer cette comparaison car nous pensons que d'un site à l'autre, les modalités de sédimentation ont un tel degré de variabilité que les indices granulométriques les plus pertinents ne sont pas forcément toujours les mêmes. Il fallait donc le vérifier ici.

2. Analyses de données granulométriques croisées

Les autres graphiques qui permettent de travailler sur les données granulométriques sont ici abordés, sans traiter de leur évolution au cours du temps. Pour chacun des deux échantillons, les graphiques classement/asymétrie, mode/classement et grain moyen/kurtosis seront analysés. Les définitions de ces différents indices granulométriques ayant déjà été données, nous y renvoyons le lecteur (cf. *supra* : Partie II, Chap. I.2.a).

Pour le profilé OR 203a de la salle Nord, les trois graphiques sont rassemblés dans la figure IV.23. Le premier graphe permet d'évaluer la qualité du classement des grains, en fonction de la taille des particules les plus représentées, un classement étant considéré comme bon si sa valeur est inférieure à 2,5. Ici, on peut faire plusieurs observations. Tout d'abord, la présence de particules fines, au sens de l'indice d'asymétrie, n'est pas constatée, à une donnée près. Cette donnée est d'ailleurs assez douteuse, car elle correspond en réalité au troisième pic le plus important que l'on peut voir dans l'évolution du grain moyen. Par ailleurs, on constate que les points de mesure donnant une granulométrie bien triée sont rares et concernent les points de granulométrie très variée, la majorité des points donnant un tri assez mauvais. Il est difficile de voir dans ce premier graphe d'autres découpages dans les données, celles-ci formant un nuage de point assez homogène. Le second graphe permet d'observer une gradation plus claire entre la qualité du classement, et cette fois, le mode granulométrique. Même si nous avons montré plus haut que le mode doit être utilisé avec recul, ce second graphique confirme que le tri des particules n'est pas très élevé, à l'exception de quelques points. Ce graphe permet également de vérifier que le tri est de qualité équivalente quelque soit la granulométrie en présence. Enfin, le dernier graphique, croisant le grain moyen et le kurtosis, complète la vision de la disproportion entre les différentes composantes granulométriques (cf. *supra* : Partie III, Chap. II.2.a.2). Sur ce graphique, on se rend compte que la majorité des points se situe dans le domaine très platykurtic avec une valeur du kurtosis inférieure à 0,4 [Sorriaux, 1982]. Cela traduit des proportions granulométriques relativement comparables, voire égales, pour chaque mesure. La qualité, l'équilibre du mélange se détériore pour quelques points, se rapprochant d'une valeur de kurtosis de 0,45. Ces points correspondent aux pics granulométriques les plus grossiers, repérés notamment dans l'évolution du grain moyen.

De ces trois graphiques, on peut donc tirer que la composition granulométrique en chaque point est assez mélangée et mal triée ; les différentes tailles de grain semblant même présentes dans des proportions comparables, au vu du dernier graphique. Si par rapport au critère d'asymétrie la distinction entre les granulométries fines et grossières se fait mal, elle apparaît plus clairement avec le kurtosis. Ce dernier permet en effet d'affiner les observations. La qualité du tri serait la moins mauvaise dans le cas des niveaux argilo-silteux, où les différentes fractions qui composent ce mélange s'équilibrent bien (tiers droit du dernier graphique). Par contre, la qualité du classement diminue très légèrement pour les niveaux les plus grossiers, lorsque la fraction sableuse et toutes ses composantes interviennent plus abondamment.

Les mêmes graphiques réalisés pour OR 04 S6, le prélèvement de la Chatière, sont cette fois assez différents (figure IV.24). Dans l'étude du classement en fonction de l'asymétrie, la répartition des points apparaît plus clairement liée à la composition granulométrique. Il n'y a guère plus de points montrant une asymétrie vers les fines, et le classement est toujours assez médiocre, mais par contre un découpage de l'amas de points en fonction de la granulométrie se dessine. En effet, 3 groupes de points peuvent se voir. Le premier est central et très petit, il correspond en fait aux quelques points (une petite

dizaine) de l'unité sédimentaire intermédiaire, à dominante argilo-silteuse. Le second rassemble tous les points aux valeurs d'asymétrie les plus basses, il forme un arc, allant jusqu'au seul point montrant un bon classement. Il correspond en fait aux pics granulométriques les plus grossiers. Le dernier groupe rassemble tous les autres points, c'est le plus vaste, et il est de nature intermédiaire. Ce découpage se retrouve d'ailleurs très bien dans le deuxième graphique qui utilise le mode granulométrique. On retrouve le 1^{er} groupe, aux points très resserrés, avec le mode le plus faible. Le second groupe décrit ci-dessus apparaît également clairement, toujours sous la forme d'un arc. Enfin, le groupe intermédiaire peut également être observé plus précisément, une distinction apparaissant entre les points plus proches du 1^{er} groupe (valeurs de classement de l'ordre de 3), et ceux plus proches des niveaux grossiers du second groupe (valeurs de classement plus écartées, entre 2,5 et 4). Le dernier graphique confrontant kurtosis et grain moyen est moins riche. La distribution est très platykurtic, attestant de contributions granulométriques globalement équilibrées. Seuls les quelques points de l'unité sédimentaire intermédiaire restent toujours un peu à part, ici tout à fait à droite, avec des valeurs de grain moyen inférieures à 40 μm .

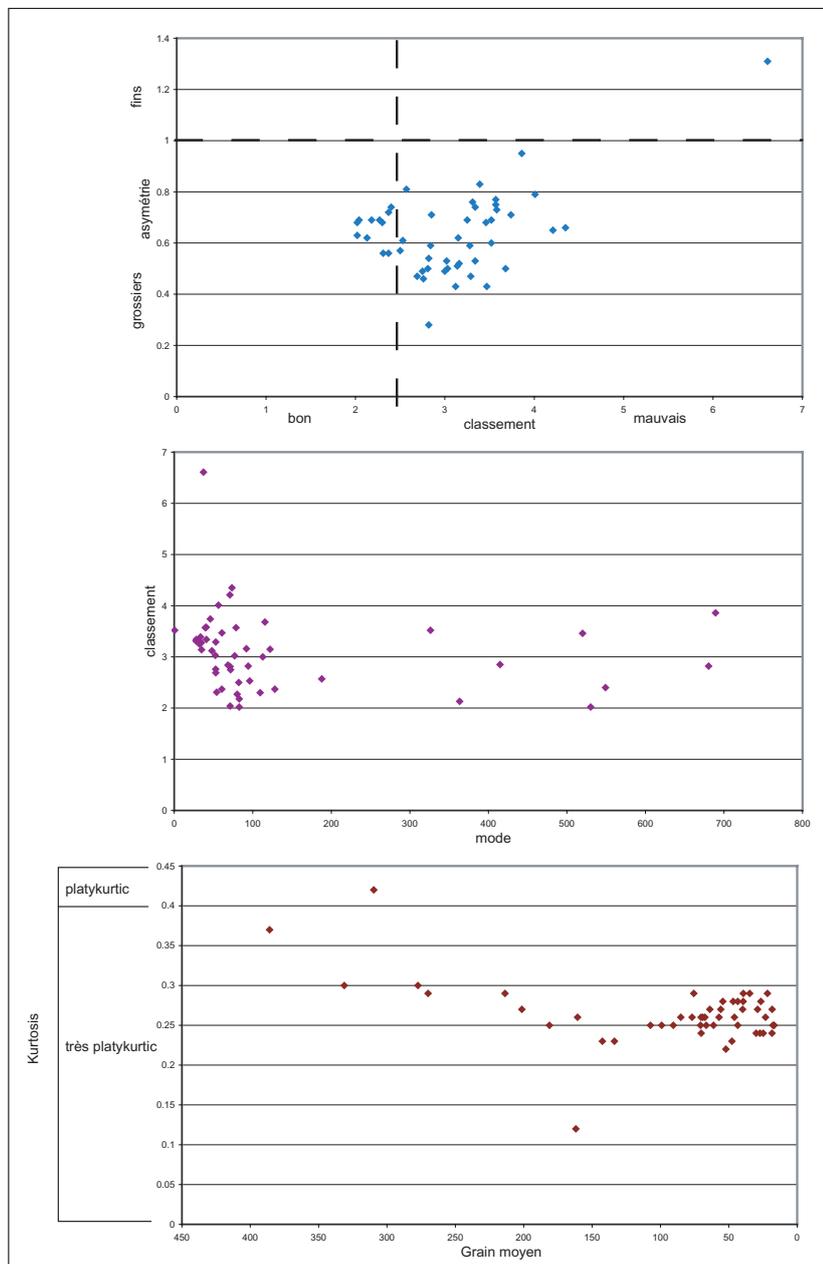


Figure IV.23 : Croisements de données granulométriques complémentaires sur OR 203a.

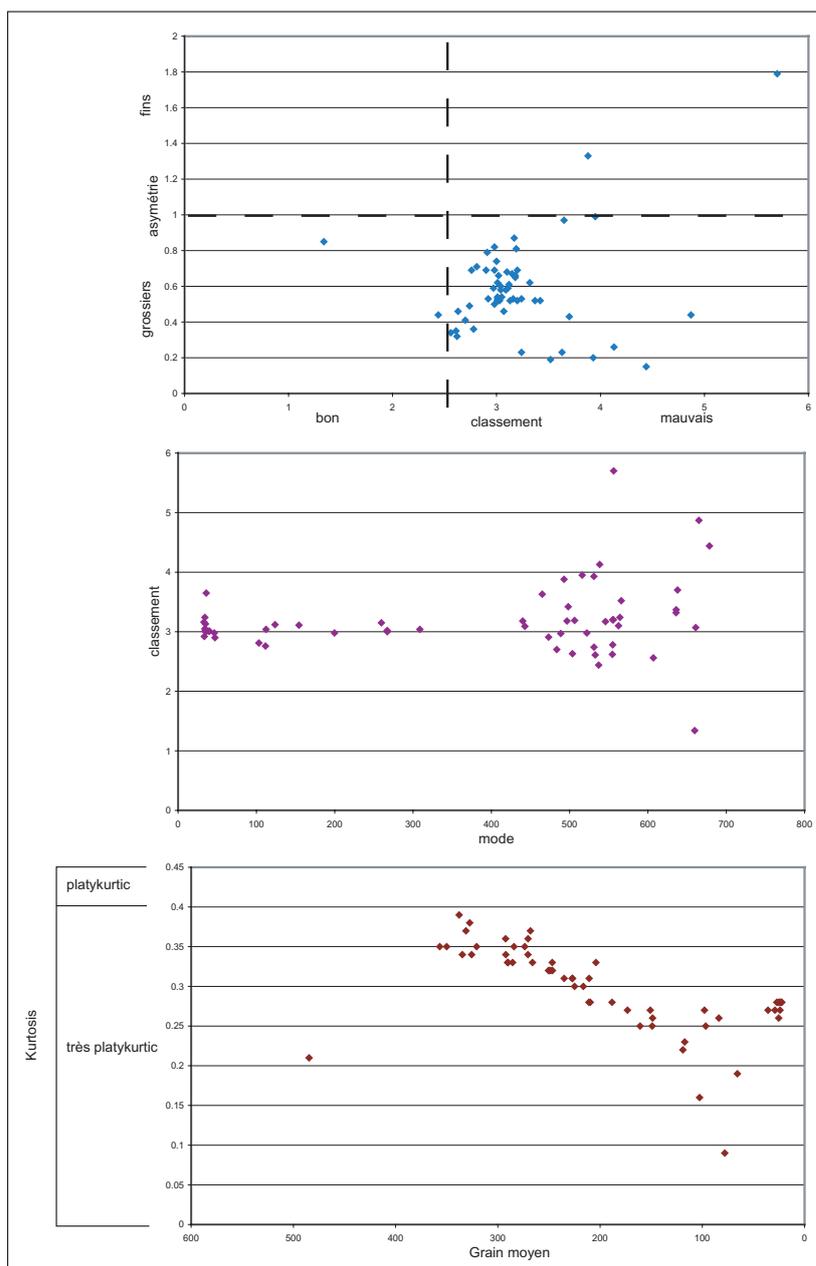


Figure IV.24 : Croisements de données granulométriques complémentaires sur OR 04 S6.

Avec un classement globalement assez mauvais, ce second échantillon permet de distinguer différents comportements des sédiments. Ces quelques indices granulométriques renforcent donc l'hypothèse émise plus haut, au sujet de la sédimentation dans ce point bas de la Chatière des Sables.

3. Les analyses minéralogiques et morphoscopiques

Les dernières données présentées ici concernent les observations faites à la loupe des dépôts sableux de la chatière. Les observations à la loupe des niveaux grossiers apportent un éclairage complémentaire sur les données relatives à la granulométrie, mais aussi sur les modes de transport sédimentaire et les sources de matières. Les différents clichés, qui portent ici sur les sables prélevés en différents endroits de la chatière, sont rassemblés dans la figure ci-dessous (figure IV.25). Ces sables ont également fait l'objet d'une étude par Wienin [non daté], sur laquelle nous appuyons aussi notre commentaire.

Entre les différents points prélevés, seule la taille des grains semble varier légèrement. La composition, elle, peut être considérée comme inchangée dans tous les sables de la chatière. La première observation porte sur la présence des grains de quartz, dominant très largement tous les autres minéraux en présence. La variété de la composition de ces sables est d'ailleurs assez limitée, puisque outre les quartz dont une bonne partie est partiellement oxydée (teinte rosée), on ne trouve que des oxydes de fer (hématite et magnétite), des feldspaths et de très rares calcites. La présence de quelques micas blancs et noirs a également été constatée, mais toujours dans des proportions extrêmement réduites. Aucun fragment de coquille ou de matière organique n'a été repéré. Il s'agit donc de sables quartzeux.

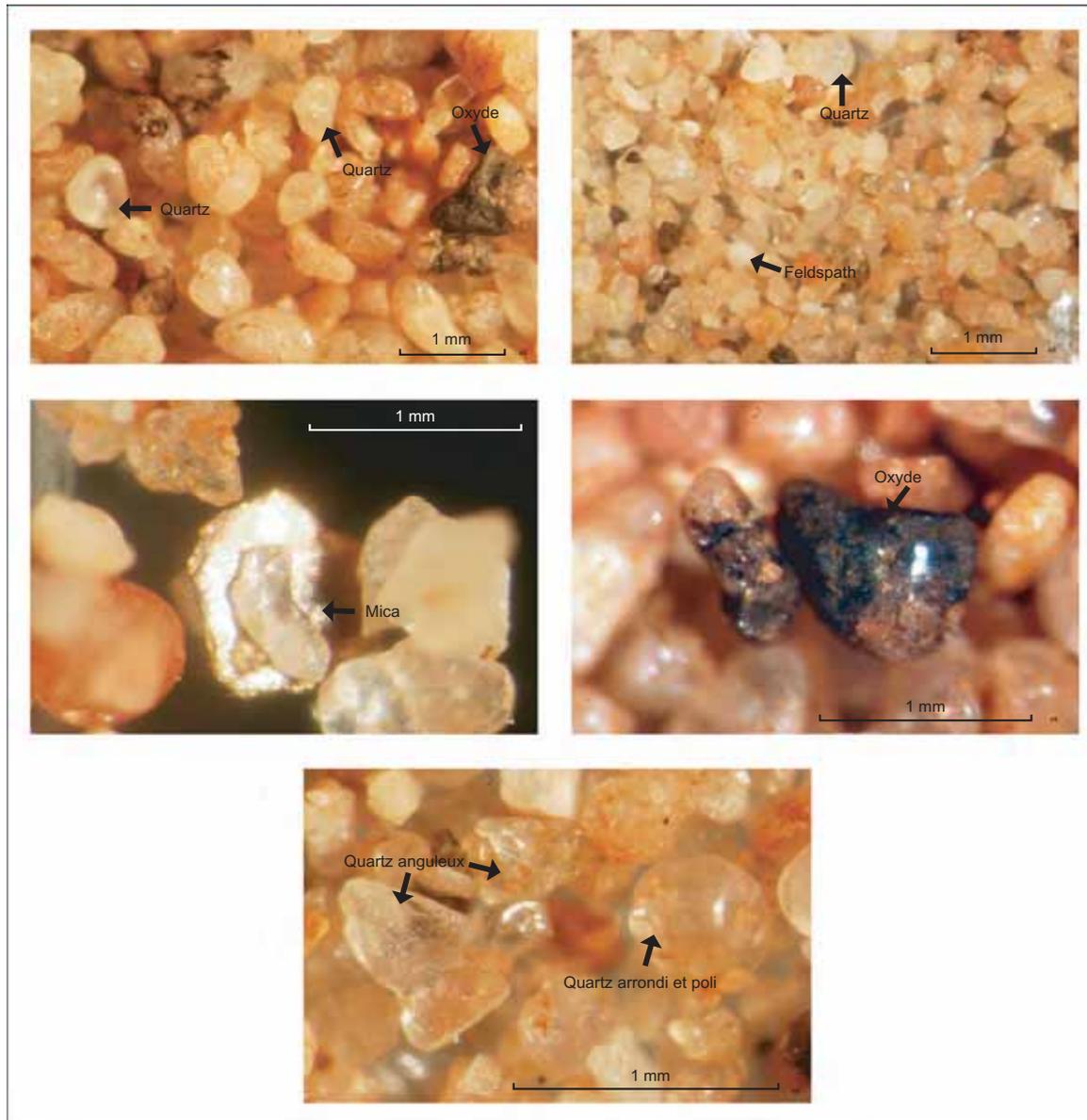


Figure IV.25 : Plaque photographique de quelques observations à la loupe binoculaire sur les sables de la chatière (clichés A.S. Perroux)

De plus, ces observations à la loupe sont intéressantes du point de vue morphoscopique, par rapport à la question du transport. En effet, on remarque un mélange de grains très arrondis et de grains anguleux dans ces dépôts sableux. En particulier sur le dernier cliché de la figure IV.25, on peut voir que le degré d'usure des grains peut être très différent, dans un même niveau. Les vues plus générales montrent une légère dominance des grains polis sur les grains non usés. En ce qui concerne les grains émoussés, Wienin [non daté] souligne qu'ils ne présentent pas de faciès éolisés. Ces données

morphoscopiques sont intéressantes car elles indiquent que les sables déposés ont peut être des sources multiples, probablement avec d'anciens dépôts remobilisés, mais aussi que les modalités du transport de ces différents grains sont alluviales et fluviales [Wienin, non daté]. L'absence de matières organiques dans ces niveaux sableux permet d'ajouter que leur apport au niveau de l'endokarst est probablement très ancien [Wienin, non daté].

La composition minéralogique de ces sables renvoie à deux sources de matières. L'une, correspondant aux quartz les plus gros, aux feldspaths, aux oxydes de fer et aux micas, pourrait se rapprocher du cortège alluvial des ruisseaux d'origine cévenole, comme le Chassezac ou l'Ardèche, qui transportent du matériel du socle métamorphique [Wienin, non daté]. Pour la fraction sableuse la plus émoussée, et notamment les quartz, Wienin [non daté] suggère une origine paléocène à éocène (entre 65 et 45 MA), issue de la séquence sédimentaire cénozoïque locale (affleurement au hameau de Pouzol notamment) [Pascal *et al.*, 1989].

L'hypothèse de poches sableuses sus-jacentes au réseau est en bon accord avec ces différentes observations. De plus, la chatière présente en deux points au moins des petites accumulations sableuses en dôme, cette disposition ne pouvant être que le résultat d'une alimentation par le haut. Compte tenu de ces données, il reste deux options possibles quant à la dynamique responsable du dépôt sableux visible à ce jour dans la chatière. En effet, ce nappage sableux inédit dans la cavité peut être le résultat :

- soit d'un soutirage « à sec » de réseaux ou poches karstiques sus jacents vers les galeries fréquentées, puis d'un étalement (remontant vers la salle II) lors d'une remise en charge de la chatière,
- soit d'une remise en eau (ennoïement) de ce secteur et des poches sus-jacentes qui aurait favorisé simultanément leur soutirage et leur étalement du fond de la chatière vers l'extrémité nord de la salle II.

b) Les traitements graphiques et statistiques

1. Les images C/M selon Passega

La construction des images de Passega, faisant intervenir les indices granulométriques de la médiane et du percentile le plus grossier Q₉₉, est exposée ici. Nous aurons recours à un critère discriminant pour décrire plus finement ces diagrammes. Compte tenu des comparaisons exposées ci-dessus, et à l'instar des traitements faits sur les sédiments de Choranche, le critère discriminant retenu est le grain moyen. C'est à ce niveau, notamment avec la construction des images de Passega, que la reproductibilité de l'approche va plus précisément être testée.

L'image C/M du profilé OR 203a, qui provient du fond de la salle Nord, offre une comparaison intéressante avec les images C/M du lac de la Cathédrale. On peut en effet faire de nombreux rapprochements entre ces deux pièges, tout du moins ici en première approche (figure IV.26). L'image C/M proposée ici reprend la première enveloppe qui avait été proposée pour les sédiments de Choranche, avec ses quatre grandes zones. Le positionnement de cette enveloppe peu contrainte et les limites entre chaque zone sont exactement les mêmes. Le nuage de point a simplement été placé sur le diagramme, en utilisant les mêmes valeurs limites dans le grain moyen.

On observe tout d'abord que la majorité des points de ce prélèvement se situe dans l'enveloppe établie pour le lac de la Cathédrale à Choranche. Seuls quelques points, au niveau des fractions fines,

s'en éloignent légèrement. Mais surtout, on remarque que la forme du nuage de point est également très ressemblante à ce que nous avons pour le lac de la Cathédrale, avec deux directions majeures. Un axe sub-horizontale regroupe les mesures de granulométrie les plus grossières, appartenant aux zones 1 et 2 (respectivement, grain moyen supérieur à 250 μm et supérieur à 125 μm). Un axe plus incliné rassemble en dessous les points les plus fins appartenant aux zones 3 et 4 délimitées grâce au grain moyen (respectivement, grain moyen supérieur à 62,5 μm et inférieur à 62,5 μm). A première vue, cette disposition de l'amas de points est donc tout à fait intéressante, elle semble être une signature assez claire d'un piégeage sédimentaire détritique en contexte lacustre voire noyé. Du point de vue de la reproductibilité de la méthodologie, cela est intéressant. Il semble donc que le point bas de la salle Nord ait pu fonctionner comme un lac. Compte tenu des résultats de Choranche et sur la base de cette première lecture de l'image de Passega, nous pensons que l'hypothèse d'un piège sédimentaire fonctionnant de la même manière qu'un lac est envisageable pour ce secteur.

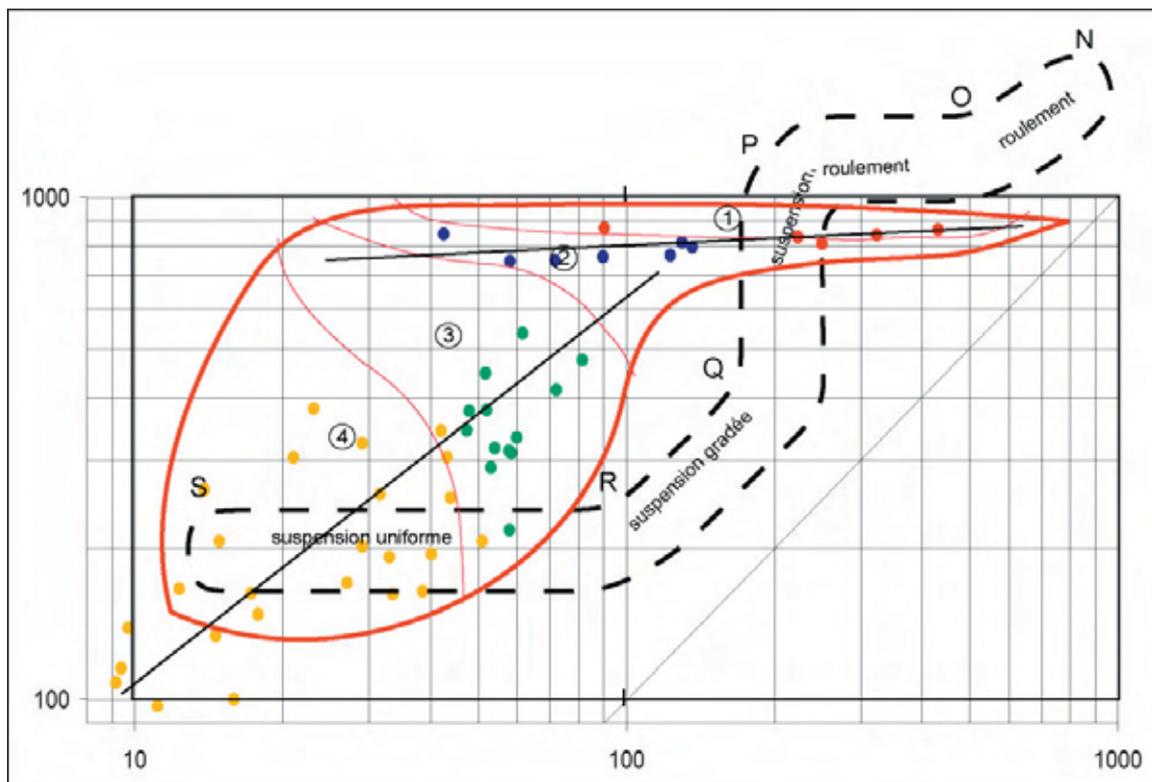


Figure IV.26 : L'image C/M du prélèvement OR 203a, dans le point bas de la salle Nord.

Pour aller plus loin dans l'étude de cette image, on observe toutefois que les points des zones 3 et 4 marquent un faible décalage vers des valeurs de médiane plus élevées, par rapport aux données de Choranche. En particulier dans la zone 3, les points se localisent plus à droite. La zone 4, elle, est étendue par quelques points, cette fois avec des valeurs de médiane et de Q99 plus basses que ce que nous avons à Choranche. Ces dissemblances peuvent être rapportées non pas au type de piège, mais aux sédiments transportés et déposés dans ce paléolac. Le matériel sédimentaire est en effet très différent : nous sommes dans une autre région karstique qui à une géologie et une histoire géomorphologique différentes de celles du Vercors. La variabilité de la signature d'une image C/M est donc incontournable d'un site à l'autre, et ce à cause des sédiments eux-mêmes (nature, origine).

Si l'aspect général du nuage de points sur cette image C/M renvoie à un mode de piégeage pseudo-lacustre, le détail du fonctionnement, lui, n'apparaît pas à ce niveau. En effet, la stratigraphie du

remplissage de cette salle et très différente de l'organisation des sédiments du lac de la Cathédrale. Dans la Cathédrale, nous avons une sédimentation non laminée, en unités massives. Ici, il y a au contraire une alternance très prononcée, et très rapide entre des couches argileuses et des couches sableuses. Ces deux pièges, même s'ils sont similaires dans leur disposition, auraient donc un fonctionnement très différent, probablement en rapport avec le régime des écoulements qui les aliment(ai)ent. Cet aspect de la sédimentation ne transparaît absolument pas à travers l'image C/M. Cela nous permet de limiter la portée informationnelle de ce diagramme. Les images de Passega semblent renseigner efficacement sur le type de piège sédimentaire étudié, mais en aucun cas sur son fonctionnement au cours du temps, lié aux influences endokarstiques et exokarstiques locales. La question du fonctionnement hydrologique de ce piège sera traitée à travers les autres traitements exposés dans la suite, avec les analyses multifactorielles et l'étude des signaux.

Pour le prélèvement de la Chatière des Sables OR 04 S6, l'image C/M a également été construite (figure IV.27). Nous l'avons représentée sous la même forme que les autres, avec l'enveloppe globale et le découpage en quatre zones sur la base du grain moyen. La encore, la majorité des points se place bien à l'intérieur de l'enveloppe. Mais l'organisation du nuage de points est différente et on peut remarquer plusieurs changements. Il est beaucoup plus difficile de placer une direction globale autour de laquelle les points s'organisent. De plus, il y a une grande rupture entre les points de la zone 3 et les points de la zone 4. La continuité dans la distribution des points sur le diagramme ne se retrouve pas. Aussi, on peut alors voir un découpage différent dans la structure de ce nuage de points. Pour la zone 3, les valeurs du percentile le plus grossier (Q99) étant globalement plus élevées, on peut raccorder les points de cette zone aux points des zones 1 et 2. L'ensemble des zones 1, 2 et 3 donne alors un groupe de points placés autour d'un axe légèrement plus incliné. A l'exception d'une donnée, les points de la zone 4, distants des autres mesures forment un autre groupe caractérisant une sédimentation exclusivement fine, pour laquelle on peut indiquer un axe plus redressé, à 45° environ.

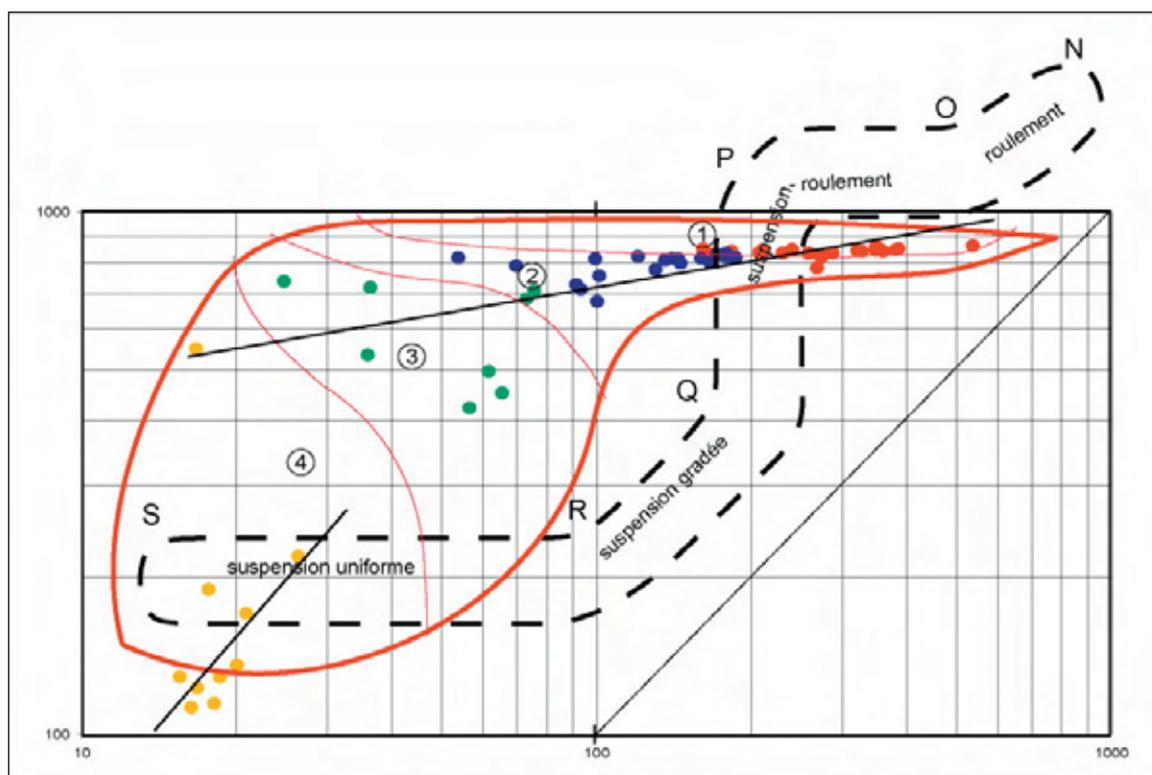


Figure IV.27 : L'image C/M du prélèvement OR 04 S6, dans le point bas de la Chatière des Sables.

Le recours à des directions préférentielles autour desquelles les points semblent se disposer n'a qu'un intérêt purement descriptif, nous en avons d'ailleurs fait le même usage pour décrire les images C/M des sédiments de Choranche. Mais cela permet de mettre en évidence les similitudes ou les différences entre les échantillons. Ici, la différence la plus remarquable avec les autres images de Passega est la rupture dans la disposition des points entre les zones 3 et 4. L'absence de continuité entre ces deux zones permet de formuler quelques hypothèses. Tout d'abord, les points localisés dans la zone 4, et même un peu en dessous caractérisent clairement un stade de sédimentation en contexte hydrodynamique particulièrement calme, ou la décantation des particules les plus fines peut se produire. Cette dynamique se distingue très fortement des autres contextes hydrodynamiques plus agités auxquels les points des zones 1, 2 et 3 renvoient. L'absence de points transitionnels entre les zones 3 et 4 peut par ailleurs avoir deux significations opposées : soit elle traduit un passage brutal entre deux modes de sédimentation, soit au contraire, elle exprime un arrêt de sédimentation, d'une durée indéterminée. A ce niveau, il n'est pas possible de trancher.

En regard des questionnements sur la reproductibilité de la méthode, l'image de Passega, étudiée ici en première approche, n'est pas extrêmement différente de celle correspondant *a priori* à un piègeage lacustre. La disposition des points est changée mais la signature ainsi donnée n'est pas forcément évidente, notamment par rapport à l'enveloppe globale. Mais comme nous l'avons déjà dit, cette enveloppe est très peu restrictive. On ne doit donc pas se contenter de cette première analyse des images. Dans la suite, nous retravaillerons ces diagrammes grâce aux régressions polynomiales, comme cela a été fait pour les sédiments de Choranche. Les signatures de chaque contexte de piègeage sédimentaire seront ainsi plus affinées, afin d'évaluer plus drastiquement la reproductibilité (cf. *infra* : Partie IV, Chap. III.1).

2. Les analyses multifactorielles d'ACP et de CAH associée

Pour comprendre plus en détail le fonctionnement de chacun des deux pièges étudiés dans l'Aven d'Orgnac, nous utilisons une nouvelle fois les techniques d'analyses multifactorielles que sont les Analyses en Composantes Principales (ACP) complétées par les Classifications Ascendantes Hiérarchiques (CAH). Ces méthodes d'analyses qui se sont révélées très intéressantes dans l'étude des sédiments de Choranche devraient contribuer à expliquer le mode d'archivage de chaque piège de cette cavité aujourd'hui non fonctionnelle.

Dans le cas du prélèvement OR 203a, l'ACP donne trois regroupements majeurs et trois oppositions (figure IV.28 ; annexe 28), qui restituent logiquement les propriétés granulométriques entre argiles, silts et sables. Cette première constatation est confirmée par les valeurs de degré d'indépendance entre les variables (tableau IV.3). Mais on remarque aussi trois cas intermédiaires, désignés par le terme de quadrature (variables dont les axes forment un angle droit dans le plan factoriel, et degré d'indépendance proche de zéro). Cette situation est observée entre les silts et les sables très fins, entre les sables très fins et moyens, et entre les sables fins et grossiers. Dans les deux premiers cas, la quadrature se rapproche d'une situation d'opposition alors que dans le troisième, la quadrature est plus proche d'une conjonction. La quadrature correspond en fait à une indépendance entre les variables considérées. Ainsi, dans le cas de OR 203a, la présence de silts dans le sédiment est donnée comme complètement indépendante de la présence des sables très fins. Enfin, les points de mesures placés dans le plan factoriel indiquent, par leur localisation vis-à-vis des axes représentant les variables, qu'ils sont essentiellement liés aux cinq classes les plus fines. Seuls quelques points s'écartent de l'amas principal

vers les sables moyens et grossiers. Ils correspondent aux pics les plus marqués de la courbe évolutive du grain moyen.

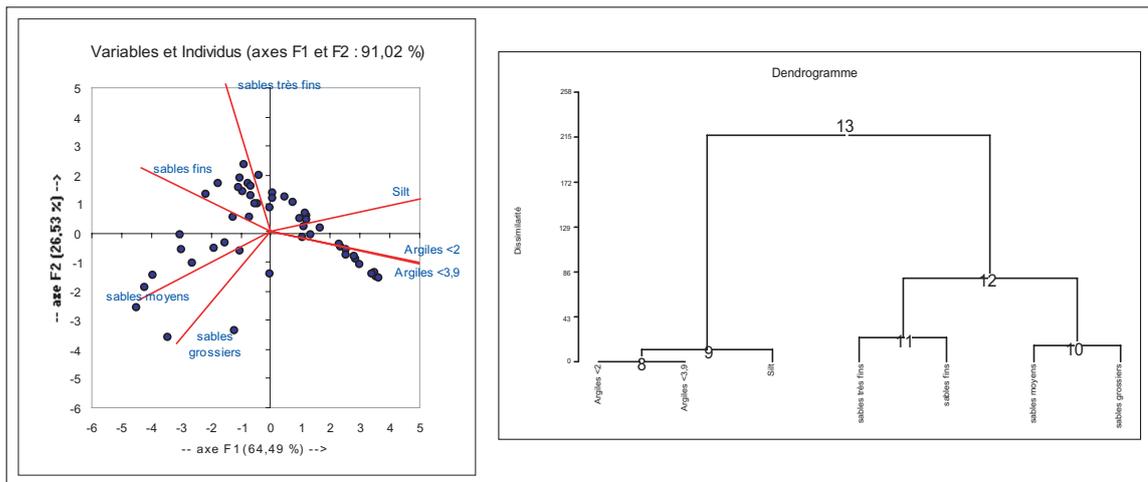


Figure IV.28 : Premier plan factoriel de l'ACP sur les classes granulométriques de OR 203a et CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles							
	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1						
Argiles <3,9	1.000	1					
Silt	0.821	0.825	1				
sables très fins	-0.492	-0.497	-0.071	1			
sables fins	-0.750	-0.763	-0.765	0.534	1		
sables moyens	-0.658	-0.663	-0.912	-0.221	0.593	1	
sables grossiers	-0.483	-0.472	-0.681	-0.428	0.074	0.685	1

Tableau IV.3 : Données numériques de l'ACP sur OR 203a – Indépendance des variables.

Ces différents résultats renseignent sur les liens entre chaque classe granulométrique, et de là, sur les différents processus sédimentaires que l'on peut identifier. Ici, les données de l'ACP sont très proches de ce que nous avons pour les sédiments du lac de la Cathédrale. Ces données ne remettent pas en cause l'hypothèse d'un seul écoulement souterrain (restant à préciser) comme source de particules détritiques pour le point bas. Elles permettent par contre de discerner les différents régimes hydrodynamiques responsables des dépôts. Trois degrés d'énergie hydrodynamique sont décelables dans ces analyses :

- un hydrodynamisme faible, caractérisé par les fractions fines, pouvant se raccorder aux périodes d'étiages pour l'écoulement qui alimentait le piège sédimentaire du point bas.
- un hydrodynamisme fort, exprimé par les deux variables sables moyens et sables grossiers, et lié au précédent dans la mesure où les deux sont parfaitement incompatibles. Au vu du peu de points qui sont portés par ces axes, cet hydrodynamisme ne semble apparaître que très peu. Les conditions de sédimentation pourraient donc être celles de crues passagères, ponctuelles, mais fournissant des matériaux particulièrement grossiers au piège.
- un hydrodynamisme intermédiaire, responsable du dépôt des sables très fins et fins. Si le nuage de points ne permet pas de faire cette distinction avec la sédimentation la plus fine, les axes et leur degré d'indépendance, eux, le permettent. En effet, il y a opposition entre ces deux variables et les trois classes les plus fines, ce qui atteste de processus sédimentaires ne pouvant coexister au sein du piège endokarstique. Par contre, la distinction avec le processus responsable des dépôts grossiers apparaît moins nettement puisqu'il y a alors un rapport d'indépendance.

Cet hydrodynamisme médian serait donc responsable du dépôt des niveaux grossiers les plus fréquemment observés dans l'échantillon, et restituant cette alternance très nette avec les niveaux fins.

Le dendrogramme de la CAH confirme en tous points cette distinction de trois régimes hydrodynamiques (figure IV.28). Il précise même que le groupe ayant la plus forte cohésion est celui des trois classes les plus fines. On voit en effet que ce sont les premières variables associées dans la classification. Le nœud suivant se fait entre les deux fractions sableuses grossières, puis entre les deux fractions sableuses intermédiaires. Le degré de similarité entre ces deux doublets est très proche. L'indépendance montrée par l'ACP entre ces deux couples se traduit ici par une association de faible poids.

Ces analyses permettent de préciser le fonctionnement hydrodynamique du point bas de la salle Nord. L'hypothèse du paléolac n'est pas remise en cause, et le régime hydrologique apparaît mieux décrit, notamment par rapport à l'alternance des niveaux sableux et argileux caractéristique de ce secteur. Aussi, le fonctionnement de cet ancien piège n'était vraisemblablement pas le même que l'interprétation du fonctionnement binaire proposée au sujet du lac de la Cathédrale. Ici, nous avons affaire à une accumulation sédimentaire beaucoup plus contrastée que ce que présentaient les carottes du lac de la Cathédrale. Le régime de l'écoulement responsable des apports semble être mieux conservé à travers les niveaux alternés visibles dans le remplissage. Pour cet ancien piège, on pourrait également parler de fonctionnement binaire, mais intervenant cette fois entre les fractions fines (hydrodynamisme faible) et les fractions intermédiaires que sont les sables très fins et fins (hydrodynamisme moyen). La répartition des points de mesure se fait, en effet, essentiellement sur ces cinq axes dans l'ACP. Les conditions d'hydrodynamisme fort restent en dehors de cette dynamique d'alternance, renvoyant plutôt à des événements hydrologiques exceptionnels.

Les résultats de l'ACP et de la CAH pour le prélèvement de la Chatière des Sables donnent les informations suivantes (figure IV.29, tableau IV.4). Ces données apparaissent très semblables au premier prélèvement (annexe 29). En effet, on observe les mêmes regroupements entre les variables, et des interactions également peu changées entre chacun des trois groupes. Le degré de dépendance entre les trois classes granulométriques les plus fines est encore plus marqué que dans le prélèvement de la salle Nord. Il en va de même entre les sables moyens et grossiers, et entre les sables très fins et fins. Les trois groupes apparaissent donc encore plus distincts. L'opposition entre le groupe des fractions fines et celui des fractions les plus grossières est également très prononcée, alors que la relation d'indépendance entre les deux groupes de sables reste sensiblement la même. Le seul changement remarquable se situe dans le groupe intermédiaire, en particulier les sables très fins, avec le groupe des fractions fines. Le lien entre ces deux groupes tend vers une relation d'indépendance, alors que dans le point bas de la salle Nord, il y avait une opposition sans ambiguïté. Cette différence est assez importante. Elle indique en effet qu'ici, au fond de la chatière des Sables, les sables très fins sont indépendants de la composante fine des sédiments. Cette composante granulométrique intermédiaire et notamment les sables très fins jouent alors un rôle assez particulier puisque sur les cinq cas d'indépendance identifiés, quatre concernent les sables très fins et un les sables fins (tableau IV.4). Il semble y avoir ici une indication sur le fonctionnement original de ce secteur en tant que piège sédimentaire endokarstique, notamment en ce qui concerne les apports sableux, spécifiques à cette chatière.

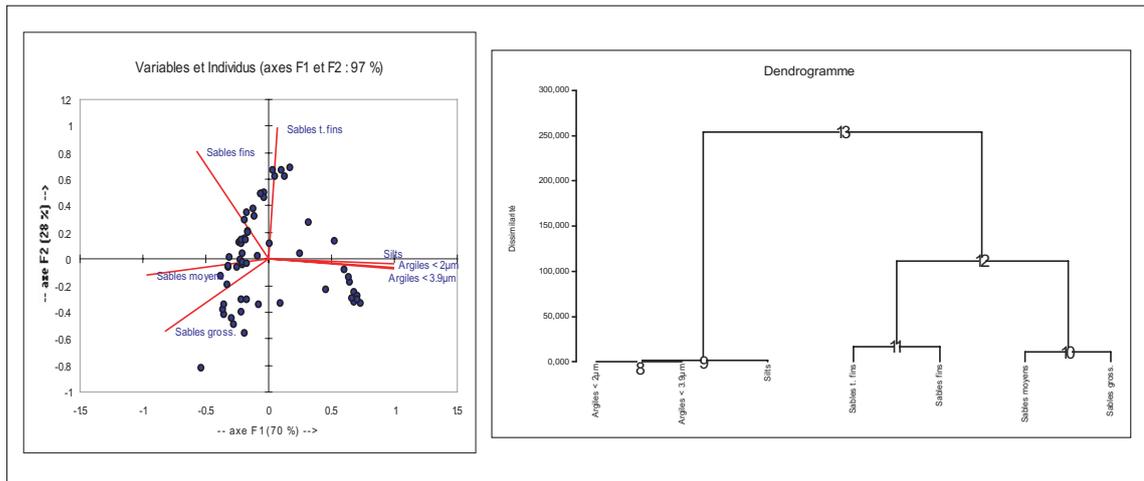


Figure IV.29 : Premier plan factoriel de l'ACP sur les classes granulométriques de OR 04 S6 et CAH associée.

degré d'indépendance des variables entre elles

	Argiles < 2µm	Argiles < 3.9µm	Silts	Sables très fins	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers
Argiles < 2µm	1						
Argiles < 3.9µm	0.999	1					
Silts	0.979	0.981	1				
Sables très fins	-0.006	-0.016	0.042	1			
Sables fins	-0.594	-0.607	-0.603	0.722	1		
Sables moyens	-0.937	-0.938	-0.955	-0.216	0.458	1	
Sables grossiers	-0.782	-0.775	-0.800	-0.566	0.022	0.810	1

Tableau IV.4 : Données numériques de l'ACP sur OR 04 S6 – Indépendance des variables.

Une autre différence marquante est la disposition du nuage de points. Elle s'organise autour de deux axes. Le plus important passe par les classes granulométriques les plus grossières, incluant les sables fins. Les sables très fins participent également à ce premier groupe de points. Le second axe rassemble beaucoup moins de points, et se localise de façon très marquée en direction des trois composantes fines. Cette disposition des points est quasi-opposée à ce que nous avons pour le prélèvement de la salle Nord. Les fractions grossières sont plus représentées et surtout, les fractions intermédiaires et notamment les sables très fins apparaissent plus déconnectés des trois fractions fines. En effet, à part quelques rares mesures, les deux parties du nuage de points sont clairement séparées. L'indépendance des sables très fins vis-à-vis des fractions fines transparaît donc à tous les niveaux de lecture de ce premier plan factoriel de l'ACP.

Par contre le dendrogramme de la CAH est parfaitement identique à celui des sédiments du point bas de la salle Nord, en terme de hiérarchisation qualitative tout du moins (figure IV.29). Mais en ce qui concerne les degrés de dissimilarité pour chaque nœud, on se rend compte que la valeur de dissimilarité est beaucoup plus faible pour les quatre premiers niveaux de hiérarchisation. Par rapport à la CAH de l'échantillon de la salle Nord, on a donc bien la confirmation de trois regroupements granulométriques bien plus forts, plus individualisés. Le cinquième niveau (12 dans le dendrogramme) est légèrement plus élevé que dans le cas de OR 203a, mais les deux restent comparables. Ils traduisent la faiblesse des relations entre les deux fractions sableuses grossières, et les deux fractions sableuses intermédiaires. Par contre, ici, le niveau de hiérarchisation final est un nœud beaucoup moins fort que dans le cas de la salle Nord, avec une valeur de dissimilarité supérieure à 250 unités. La CAH appuie bien les différents comportements et les rapports montrés par l'ACP. Elle permet également de les quantifier, au moins de façon relative, les uns par rapport aux autres.

Pour ce deuxième échantillon, l'hypothèse de deux contextes hydrodynamiques radicalement différents reste donc valable à l'issue de ces analyses. Si on raccorde ces données aux différentes informations collectées précédemment, on peut compléter l'hypothèse sur les sédiments de la Chatière des Sables en précisant que le dépôt fin est probablement le résultat d'une phase d'ennoiement relativement prolongée et peut-être assez générale dans la cavité. Le second processus permettant la mise en place des sables a très bien pu se produire longtemps après, par une phase localisée et assez violente d'ennoiement, les écoulements allant de la salle III vers la salle II. La forte énergie hydrodynamique aurait même pu provoquer, au fond de la Chatière, un départ de fines avant le dépôt des sables. Les deux processus n'ont vraisemblablement rien à voir, ni en ampleur ni en durée. En ce qui concerne le rôle particulier des sables très fins, on peut imaginer que ceux-ci, présents dans les poches sableuses formées au dessus du réseau actuel, sont remobilisés par simple soutirage rééquilibrant les dépôts des poches sableuses. Pour formuler cette hypothèse sur le cas précis des sables très fins, nous rappelons l'observation, dans au moins deux endroits de la Chatière, de petits amas de forme conique de sables fins. Cette disposition et la taille des grains suggèrent un apport localisé et très ponctuel, provenant d'au dessus. Au cœur de la chatière, le même phénomène a pu se produire, mais les différentes mises en charge auraient alors perturbé ce dépôt en l'étalant dans la chatière.

En conclusion sur ces analyses multifactorielles, nous insistons sur le fait que ces méthodes apportent des informations qui complètent très efficacement l'étude granulométrique. Sur les deux échantillons, les ACP et les CAH donnent des indications cohérentes. Toutefois, en rapprochant ces données des autres informations collectées, il est possible d'être beaucoup plus précis. Ainsi, on retiendra que pour les deux secteurs étudiés, l'ensemble de l'étude granulométrique met en évidence :

- *deux processus sédimentaires bien distincts* dans les deux cas avec un hydrodynamisme de faible énergie responsable de la sédimentation fine, toujours composée des argiles et des silts, et un hydrodynamisme plus fort, responsable de la sédimentation plus grossière.
- *un troisième processus apparaît*, dans le cas de la salle Nord étant plus ou moins fortement lié, connecté au deux autres. Ce troisième processus est responsable des dépôts les plus grossiers, que nous avons proposé de raccorder à des événements hydrologiques exceptionnels, sans rapport avec une éventuelle expression de saisonnalité des écoulements.
- *les deux processus sédimentaires majeurs ne sont pas forcément les mêmes dans les deux pièges*. En dehors des dépôts les plus fins, les modalités du dépôt des niveaux sableux sont différentes dans les deux secteurs. Dans le cas du piège de la salle Nord, les dépôts grossiers sont vraisemblablement liés à la présence d'un piège dont les caractéristiques se rapprochent de celles d'un lac, et à des écoulements réguliers responsables des apports. Par contre, pour la Chatière des Sables, on ne peut affirmer que la présence de l'eau ait été durable ; le dépôt sableux, plus massif, serait plutôt dû à un épisode très particulier de mise en charge.
- *aussi, les échelles de temps* durant lesquelles les différents processus hydrodynamiques se sont succédés sont donc, sur la base de ces observations, sans doute très différentes.

L'étude de ces deux secteurs différents montre bien que les ACP et CAH sont des outils nécessaires mais non suffisants pour la caractérisation des modalités de la sédimentation souterraine. En effet, grâce aux données tirées des analyses granulométriques, des images de Passega, mais aussi d'une approche préalable plus globale des secteurs d'étude et de la cavité, le commentaire de ces analyses, et notamment des relations les plus atypiques par rapport aux lois de la sédimentation, peut être plus détaillé. Nous insistons sur ce point car ici, la nécessité de connaissances plus générales sur la cavité étudiée est parfaitement illustrée. Par rapport à la méthodologie proposée, les ajustements

ajoutés avec l'étude des sédiments de Choranche sont une fois encore, justifiés (cf. *supra* : Partie III, Chap. III.1.b.3). Des informations générales sur la cavité ou sur certains secteurs sont une donnée tout à fait indispensable pour valoriser les aspects plus novateurs de notre démarche d'étude. Cela est encore plus vrai dans le cas d'étude de pièges fossiles. Ces informations ont été collectées ici à travers la cartographie et les sondages, notamment.

4. Les autres lectures du signal sédimentaire

Ce dernier point complète les autres méthodes d'acquisition de signaux sédimentaires et les données granulométriques. Ces données sont abordées ici beaucoup plus rapidement que dans le cas de Choranche. Les signaux complémentaires sont ici les niveaux de gris et la spectrorimétrie. Le raccord avec des contextes environnementaux et/ou climatiques ne sera pas discuté dans cette thèse, pour les raisons déjà données. En outre, aucune datation n'ayant encore été faite à ce jour sur ces sédiments détritiques, le cadre chronologique ne peut être établi. Nous focalisons ici notre étude sur la reproductibilité de la démarche méthodologique, et ce par rapport à la question de la reconnaissance des pièges dans une cavité non-fonctionnelle et de leur fonctionnement dans le passé. Nous rappelons enfin que ces différents signaux ont été mesurés avec la meilleure résolution possible, tant technique que pratique.

a) La réponse spécifique de chaque signal

1. Pertinence des autres cryptages du signal sédimentaire

Ce point doit permettre de voir comment se distribuent les différents signaux par rapport aux données de granulométrie. Comme pour les sédiments de Choranche, nous traitons ici deux ACP et CAH établies pour chacun des échantillons, faisant intervenir les autres types de données. Leur comparaison à travers les analyses factorielles nous permettra de les situer, et de voir quelle est la sensibilité de leur réponse par rapport à quelques indices granulométriques clés. Nous précisons aussi qu'ici, les mesures de susceptibilité magnétique sur les échantillons n'ont pas été faites en raison de la contrainte technique suivante : les échantillons d'Orgnac ont été prélevés dans des supports en aluminium non pur, incompatibles avec une telle mesure (présence de métal produisant un biais sur la mesure). Aussi, la susceptibilité magnétique, pour être mesurée, implique de sortir les sédiments du profilé, au risque de les détruire. C'est pourquoi cette mesure n'a pas été effectuée, et ne le sera qu'en cas d'absolue nécessité.

Pour l'échantillon OR 203a du point bas de la salle Nord, les signaux supplémentaires sont les niveaux de gris et le paramètre L^* de la spectrorimétrie. L'ACP et la CAH associée ont été réalisées sur la base de sept critères : médiane, grain moyen, argiles, silts et sables pour les indices granulométriques ; L^* et niveaux de gris (figure IV.30). Outre l'opposition entre les argiles/silts d'une part, et les sables d'autres part, on remarque que les indices granulométriques de médiane et de grain moyen, en conjonction entre eux, sont également en attraction avec les fractions sableuses. Il en va de même du L^* de la colorimétrie, en conjonction avec les sables, la médiane et le grain moyen. Par rapport à ces différents signaux, les argiles et les silts sont en opposition assez marquée. On peut déduire de cela que le L^* , le grain moyen et la médiane varient de façon conjointe, avec une évolution conforme à celle de la fraction sableuse, et anti-corrélée à celles des fractions argileuse et silteuse. Le comportement

des niveaux de gris se place en marge, avec une situation d'indépendance marquée vis-à-vis des deux indices granulométriques de médiane et de grain moyen, et également par rapport au L*. Une faible conjonction subsiste avec les sables, alors qu'il y a toujours opposition avec les argiles et les silts. D'une manière générale, le signal sédimentaire en niveaux de gris (codé de 0 pour le noir, à 256 pour le blanc) est très faiblement lié aux autres paramètres considérés ici. Cela est d'ailleurs confirmé par la CAH, dans laquelle les niveaux de gris sont les derniers à être liés aux autres variables. La CAH montre aussi la forte opposition entre le doublet argiles/silts et les cinq autres critères. Le L* de la spectrorimétrie devrait donc avoir une évolution le long de l'échantillon se rapprochant plutôt des fractions sableuses et du grain moyen. Les niveaux de gris, eux, malgré un codage globalement noir pour la fraction fine et blanc pour la fraction grossière, donnent une lecture vraisemblablement plus transversale du signal sédimentaire.

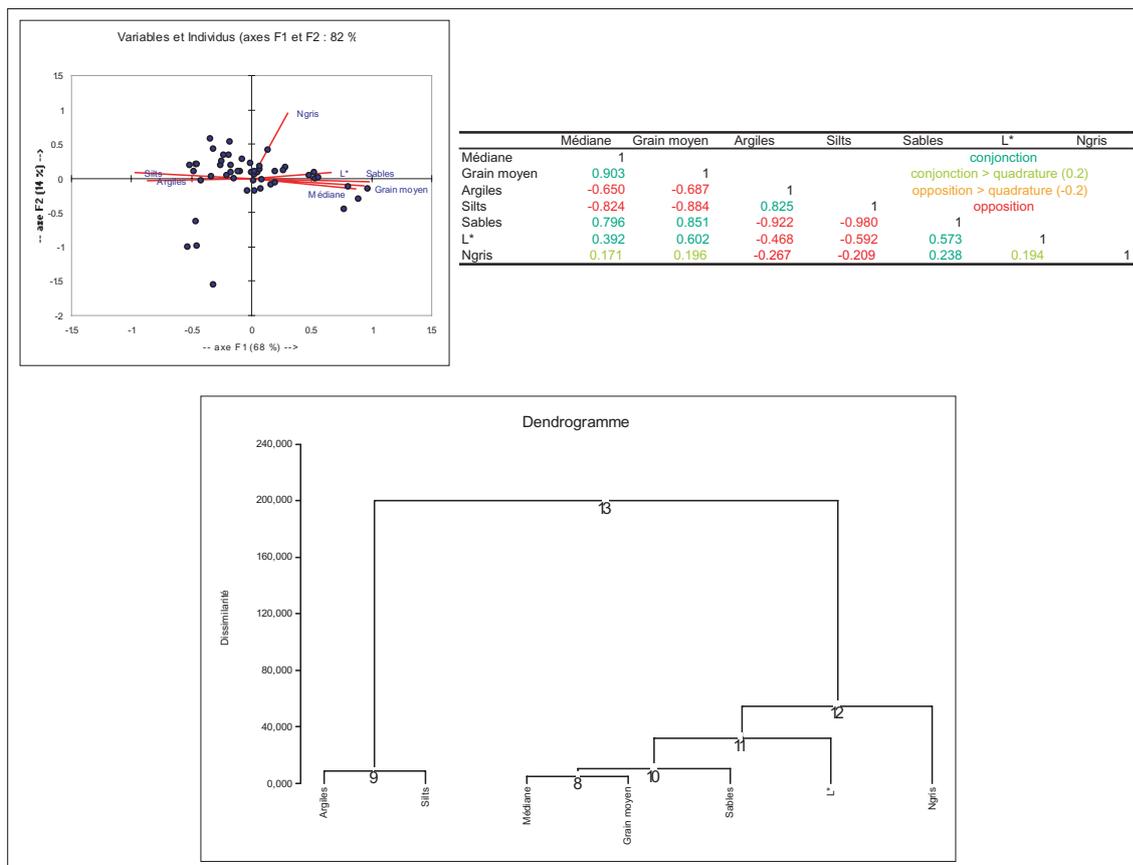


Figure IV.30 : Rapports entre les différents signaux sédimentaires de OR 203a par les analyses multifactorielles.

Pour l'échantillon OR 04 S6 de la Chatière des Sables, ces analyses ont également été effectuées, mais sur six critères seulement. En effet, les mesures de spectrorimétrie n'ont pas été faites sur ce second échantillon. Les cinq indices granulométriques sont donc confrontés aux seuls niveaux de gris (figure IV.31). Bien sûr, l'opposition entre les sables et les deux composantes fines est toujours visible, et les indices granulométriques de médiane et de grain moyen semblent de même en étroit rapport d'attraction avec les sables. Par contre, le signal des niveaux de gris montre cette fois une indépendance légèrement plus prononcée que dans le premier échantillon, mais surtout dont les tendances sont rigoureusement inversées. En effet, les niveaux de gris ont ici une indépendance tendant à la conjonction avec les argiles et les silts, et oscillant plutôt vers une opposition vis-à-vis des sables, de la médiane et du grain moyen. La situation était contraire pour OR 203a. Ce point est tout à fait intéressant car c'est un élément supplémentaire qui enrichit les données sur les différences entre les deux pièges. Ici, l'évolution

des niveaux de gris, au-delà de son caractère indépendant, présente tout de même plus de similitudes avec les deux composantes granulométriques fines. C'est également ce qui est exprimé à travers la CAH, pour laquelle le rattachement des niveaux de gris se fait avec une assez forte dissimilarité, mais avec les argiles et les silts.

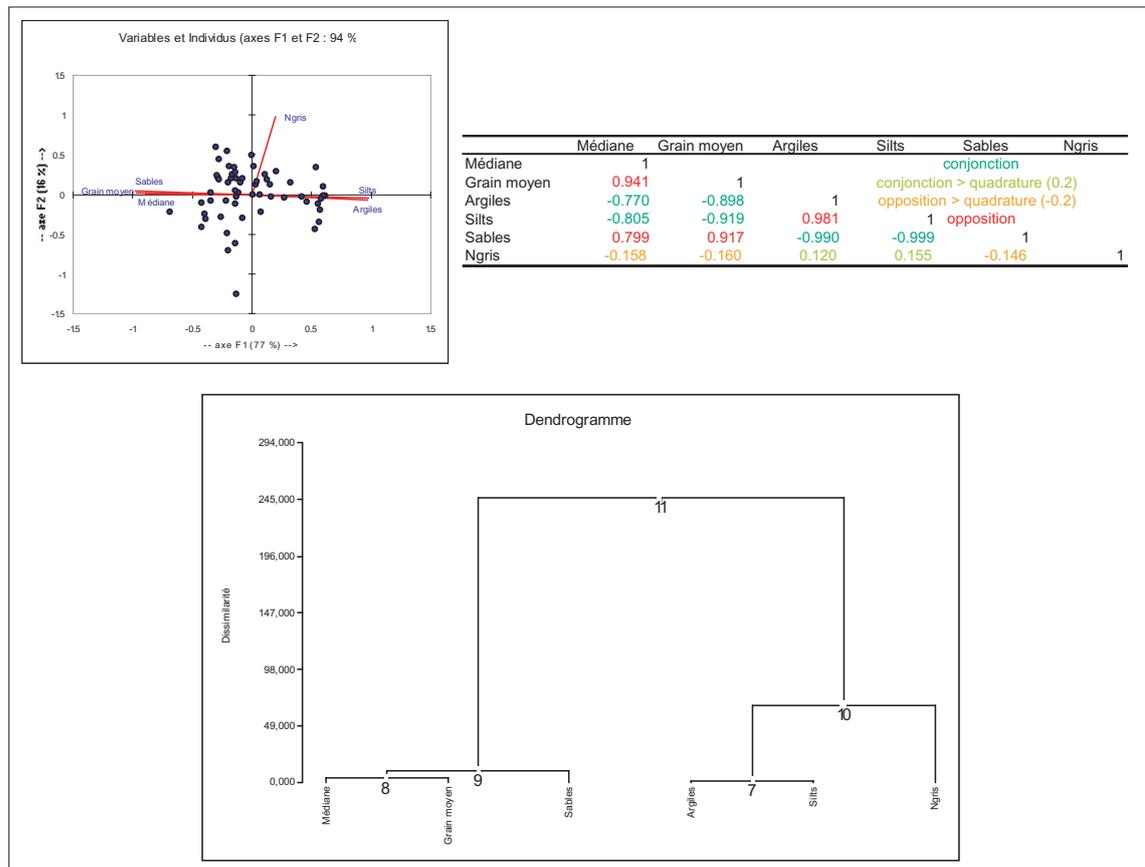


Figure IV.31 : Rapports entre les différents signaux sédimentaires de OR 04 S6 par les analyses multifactorielles.

Dans ces deux échantillons, une lecture plus approfondie indique que les niveaux de gris ont une signature différente : plus proche des sables (vers le blanc et les fortes valeurs de niveaux de gris) dans la salle Nord, et plus proche des fines (vers le noir et les faibles valeurs de niveaux de gris) dans la Chatière.

2. Lecture comparée et corrélations

Cette première information sur les différents signaux étant posée, nous pouvons nous pencher sur la comparaison de leur évolution. Afin de ne pas trop nuire à la clarté de la lecture, seul le grain moyen a été retenu pour cette comparaison des évolutions.

Pour l'échantillon OR 203a (salle Nord), le grain moyen est comparé aux niveaux de gris et au L*. Pour OR 04 S6 (Chatière), le grain moyen est confronté aux niveaux de gris. Dans les deux cas, la comparaison des évolutions apparaît peu satisfaisante, les pics de grain moyen se corrélant mal aux autres courbes (figure IV.32). Aucune régularité n'est constatée entre les courbes. Pour OR 203a, chacun des cinq pics les plus forts correspond à une combinaison différente sur les deux autres courbes, tantôt corrélées, tantôt anti-corrélées. En cela, on retrouve la grande variabilité des événements hydrologiques importants qui avait déjà été signalée à travers les sédiments de Choranche (cf. *supra* : Partie III, Chap.

II.3.b). La sédimentation plus fine subit des fluctuations constantes dans les niveaux de gris comme dans le L*, mais leur rapport n'est pas évident. Pour OR 04 S6, la courbe des niveaux de gris ne se raccorde pas plus facilement à l'évolution du grain moyen. Cela prouve au moins que le caractère indépendant de ce signal est largement vérifié. L'unité sédimentaire intermédiaire, à dominante granulométrique argilo-silteuse, n'est pas détectable par les niveaux de gris.

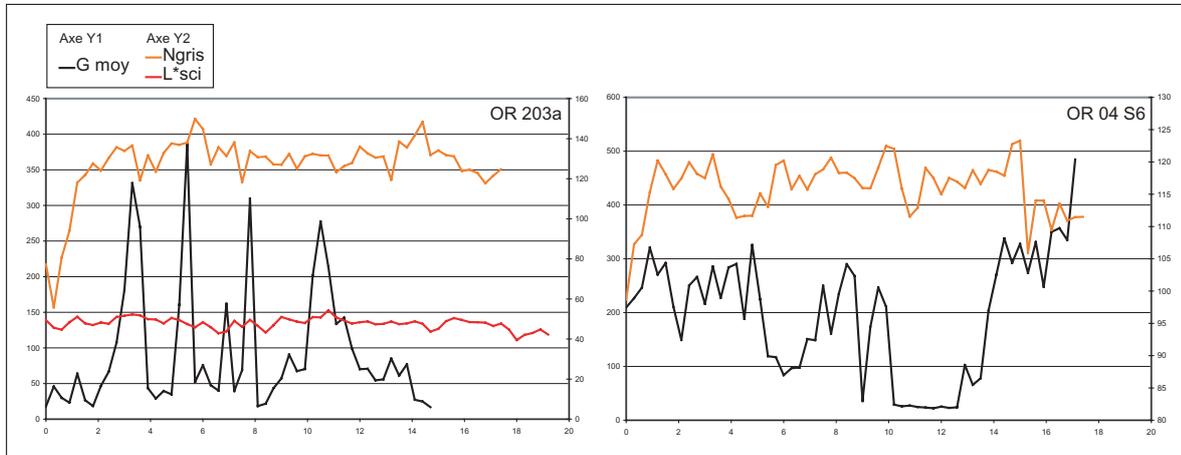


Figure IV.32 : Evolution comparée du grain moyen et des autres signaux sédimentaires.

L'évolution comparée des différents signaux n'est pas évidente. Les corrélations croisées permettent d'étoffer un peu les informations à ce niveau. Ces corrélations, toujours par souci d'homogénéité et de comparaisons justifiées, ont été faites entre les mêmes variables que celles des sédiments de Choranche. Ainsi, en l'absence des données de susceptibilité magnétique, seules trois corrélations croisées ont été calculées pour OR 203a, et deux seulement pour OR 04 S6.

Des comparaisons avec les sédiments des lacs de Choranche sont en effet envisageables ici. En premier lieu, nous pouvons remarquer que la corrélation croisée entre le grain moyen et la médiane atteint une significativité de 100 %, résultat logique que nous avons également dans toutes les carottes de Choranche (figure IV.33 ; IV.34 et tableau IV.5). Pour OR 203a (salle Nord), les deux autres cas de corrélations sont assez différents. Entre le grain moyen et le L*, la corrélation est assez bonne puisque 68 % des valeurs sont significatives. La corrélation est de plus franchement positive, attestant de l'étroit rapport entre ces deux paramètres, comme l'a montré l'ACP. Par extension, on peut également déduire que le L* est en corrélation positive avec les sables. Les niveaux de gris, eux, se corrélaient mal avec la médiane, avec seulement 10 % de valeurs significatives. L'information liée est pour le moins incertaine, la moitié des données étant corrélées positivement, l'autre négativement.

Le cas de OR 04 S6 (Chatière) est sensiblement le même. Outre la corrélation parfaite entre le grain moyen et la médiane, les niveaux de gris présentent un niveau de corrélation très bas avec la médiane, et par extension avec les classes granulométriques dans leur ensemble (d'après l'ACP). Sur les 14 % de valeurs significatives, le sens de la corrélation est toujours très variable, donnant peu de poids à cette corrélation avec la médiane.

Le comportement globalement marginal des niveaux de gris est donc le seul élément remarquable dans ces corrélations croisées. Ce signal avait également ce type de comportement pour les sédiments de Choranche. Aussi, ce nouveau constat fait réfléchir sur la teneur des informations

restituées par les niveaux de gris, et sur la pertinence de ce signal. A l'évidence, les niveaux de gris sont sans rapport étroit avec les évolutions granulométriques, les ACP comme les corrélations l'attestent bien. Ce signal ne semble donc pas enregistrer les variations de l'hydrodynamisme responsable des transports et des dépôts dans les pièges endokarstiques étudiés. Mais en plus, les niveaux de gris, au moins pour l'échantillon du point bas de la salle Nord ne sont pas en liaison non plus avec le L* de la colorimétrie. Alors quel est le moteur de ce signal ? Est-il à ce point général qu'aucune influence particulière ne peut y être décelée ? Et dans ce cas, son étude est-elle justifiée ? Ces questions seront peut-être en partie éclairées grâce aux analyses spectrales et aux ondelettes, qui permettent une analyse plus poussée des différents signaux et de leur structure.

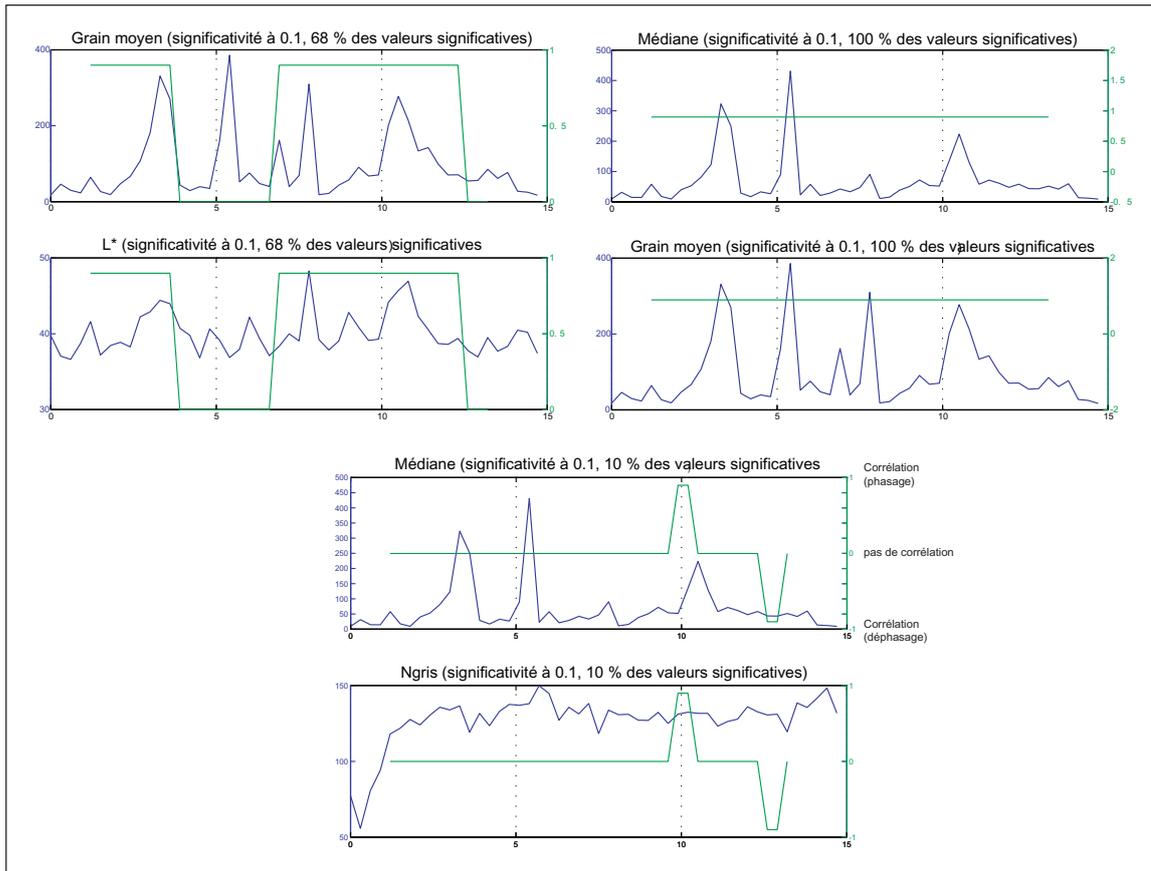


Figure IV.33 : Les différentes corrélations croisées sur OR 203a.

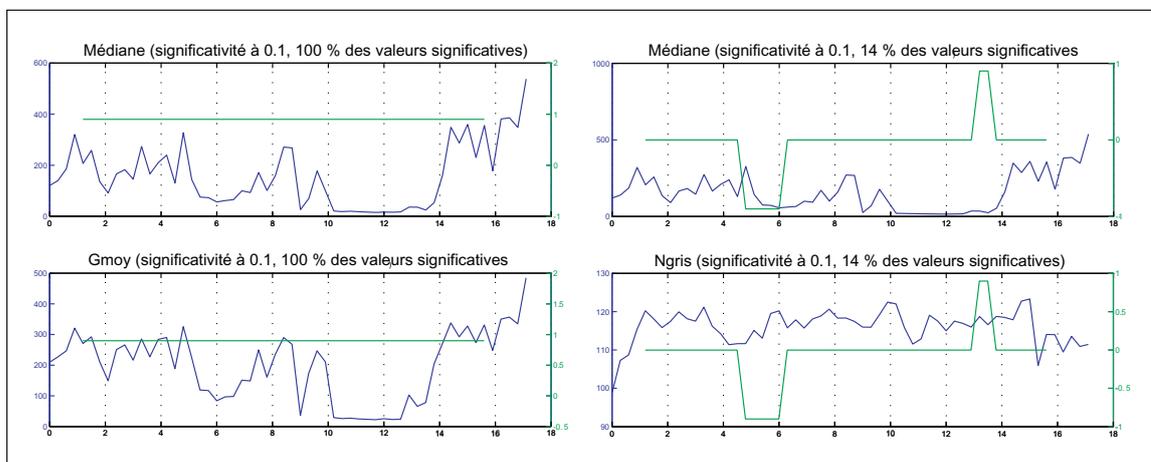


Figure IV.34 : Les différentes corrélations croisées sur OR 04 S6.

Données comparées		OR 203a		OR 04 S6	
		% des valeurs	corrélation	% des valeurs	corrélation
Grain moyen/L*	B	68	positive		
Médiane/Grain moyen	D	100	positive	100	positive
Médiane/Ngris	F	10	indifférenciée	14	nég/indiff.

Valeurs significatives données selon la table des coefficients de Bravais-Pearson (annexe 6) pour 10 degrés de liberté (largeur de la fenêtre de données) et un risque d'erreur fixé à 10%.

Tableau IV.5 : Récapitulatif des valeurs et de la qualité des corrélations croisées.

3. Colorimétrie

Avant de passer à ces traitements par ondelette, nous faisons ici quelques commentaires sur les données spectrocolorimétriques de l'échantillon OR 203a, prélevé dans le point bas de la salle Nord. Le paramètre L*, expression de la clarté d'un sédiment, n'est en effet pas le seul paramètre de spectrocolorimétrie. Deux autres paramètres, a* et b* permettent de restituer l'espace colorimétrique dans lequel se situent les sédiments. Nous avons choisi de représenter cet espace colorimétrique sur le même diagramme que les carottes de Choranche, afin de mieux visualiser les caractéristiques de couleur de cet échantillon par rapport aux sédiments du Vercors (figure IV.35).

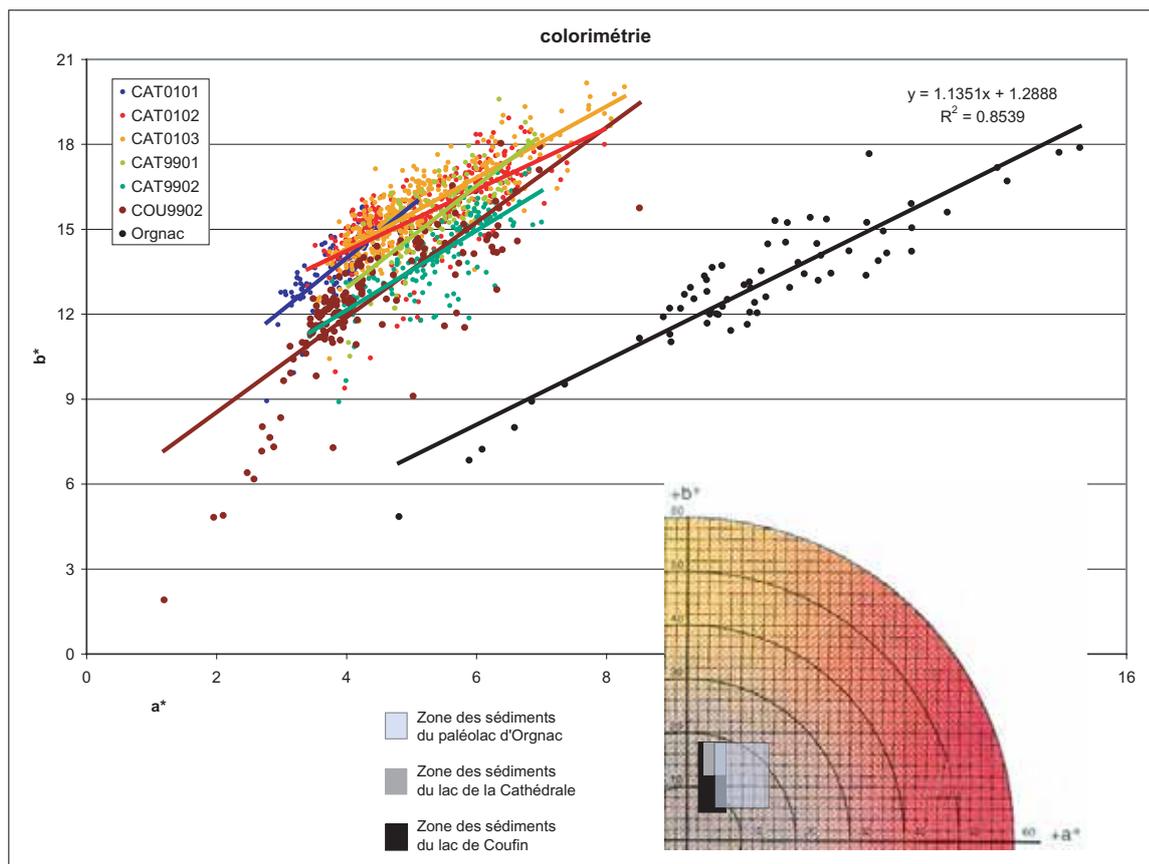


Figure IV.35 : La comparaison des espaces colorimétriques des différents sédiments étudiés.

La première observation est que les sédiments d'Orgnac ont un espace de couleur beaucoup plus vaste que les sédiments de Choranche. Les valeurs du a* sont largement décalées vers les rouges, avec un spectre plus large, allant de 5 à 16. Les valeurs du b* sont sensiblement identiques aux sédiments de Choranche, notamment du lac de Coufin. Un autre aspect intéressant est la disposition des points

sur le graphique, qui donne une droite de régression quasi parallèle aux sédiments de Choranche. Avec des valeurs du L^* comprises entre 35 et 45, le sédiment a une assez faible clarté, se situant encore dans les teintes plutôt profondes. Si on observe ces données de colorimétrie plus en détail, et par rapport à la granulométrie, on n'observe aucun classement dans le nuage de points. Les valeurs correspondant aux niveaux sableux sont mélangées avec les valeurs renvoyant aux niveaux argileux. Les deux types ne se distinguent pas, étant présents sur quasiment toute l'étendue du nuage. Outre la déviation évidente de la colorimétrie vers les teintes rouges, la disposition et l'organisation du nuage de points présentent de nombreuses similitudes avec la colorimétrie des sédiments de Choranche.

b) Les analyses spectrales et les ondelettes

Les résultats présents ici vont être brièvement commentés, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les analyses spectrales et les ondelettes sont traitées ici du strict point de vue de l'étude des pièges, de leur identification et de leur fonctionnement. Nous commenterons donc la structure globale des signaux, décryptée à travers les puissances spectrales et les décompositions par ondelettes. De plus, cette étude des signaux est encore incomplète, des signaux comme la spectrocolorimétrie n'étant pas disponibles sur tous les échantillons, et la susceptibilité magnétique n'ayant pas été mesurée. Une étude poussée de ces données ne prendra tout son sens qu'avec l'ajout de ces quelques autres mesures. Enfin, et c'est une réserve importante sur les signaux et les traitements qui vont être présentés ici, les séries de données sont très courtes. Avec 50 à 60 données par échantillon, l'utilisation des méthodes d'analyse spectrale et de décomposition en ondelettes atteint sa limite de validité. Ces techniques sont en effet d'une fiabilité croissante avec le nombre de données.

1. Densités spectrales : structure globale des signaux

Sur les traitements par densités spectrales, nous voyons donc quelle est la valeur de la pente β de chaque courbe. Cette pente globale fournit une indication sur le ou les processus intervenant(s) dans la structuration de l'archivage sédimentaire, et ce pour chaque signal.

Pour l'échantillon OR 203a (salle Nord), quatre courbes de densités spectrales ont pu être dressées (figure IV.36). Le grain moyen et la médiane, indices granulométriques synthétisant l'information et étant étroitement liés, donnent une même valeur proche de -2, pour la pente globale β . Cette valeur renvoie à une structuration de ces deux signaux se rapprochant du mouvement brownien fractionnaire, c'est-à-dire à un signal auto-similaire et présentant la même évolution aux différentes échelles de temps. Quelques-unes des carottes de Choranche donnaient une même pente β pour ces deux indices granulométriques. Le paramètre L^* donne une pente β proche de -1, expression d'un signal anti-persistant appelé aussi l'effet Noé. La structure du signal est donc soumise à des événements brutaux, aux fréquences de retour très variables. Là aussi, ce signal était systématiquement caractérisé par cette valeur de pente dans les sédiments de Choranche. Il semble donc bien, à travers la comparaison entre les deux sites, mais surtout par les données accumulées jusqu'ici pour la salle Nord d'Orgnac, que le paramètre de clarté de la colorimétrie soit en rapport avec les sables et donc, compte tenu de la valeur de la pente β , à raccorder aux épisodes hydrologiques violents et ponctuels de type crue. Enfin, les niveaux de gris donnent une pente proche de -2, renvoyant à nouveau à une structure du signal de type mouvement brownien fractionnaire. L'invariance d'échelle qui caractérise cette structure des signaux s'accorde bien avec la nature particulière des niveaux de gris dans les échantillons. Cette structure pourrait en effet être l'expression d'un signal complexe, prenant en compte un maximum de

données combinées, intégrées les unes aux autres. Cette hypothèse rejoint l'idée d'un signal transversal par rapport à tous les autres critères étudiés ici. Là aussi, on retrouve une donnée identique à ce que montraient les sédiments des grottes de Choranche.

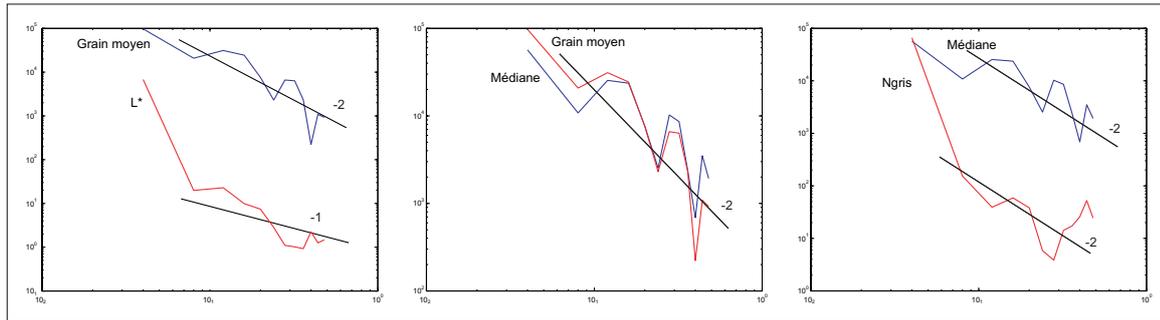


Figure IV.36 : Les densités spectrales et les pentes correspondantes pour les différents signaux sédimentaires de OR 203a.

Pour l'échantillon OR 04 S6 (Chatière des Sables), les densités spectrales ont été construites pour le grain moyen, la médiane et les niveaux de gris seulement, les autres signaux n'étant pas disponibles à ce jour (figure IV.37). Les différentes pentes β sont également assez proches de celles des sédiments de Choranche. Les niveaux de gris sont toujours représentés par une pente proche de -2. L'hypothèse formulée ci-dessus reste donc valable, et il est possible que cette représentativité des niveaux de gris ait une portée plus importante qu'à l'échelle d'un site, actif ou non. La médiane et le grain moyen sont toujours très proches, mais cette fois avec une pente β se plaçant plus près de la valeur de -1. Ce changement dans la valeur de pente n'est pas réellement surprenant, le type de piège étant différent. Des signaux granulométriques structurés par de l'anti-persistance ne font que confirmer l'existence de deux processus sédimentaires différents en tous points dans le cœur de la Chatière des sables, ce que les autres analyses tendaient également à montrer. Ici, l'anti-persistance attestée par ces deux indices granulométriques pourrait très bien être une expression de la succession très rapide, très marquée, des trois unités sédimentaires données dans la description de l'échantillon (unité sableuse/unité argileuse/unité sableuse).

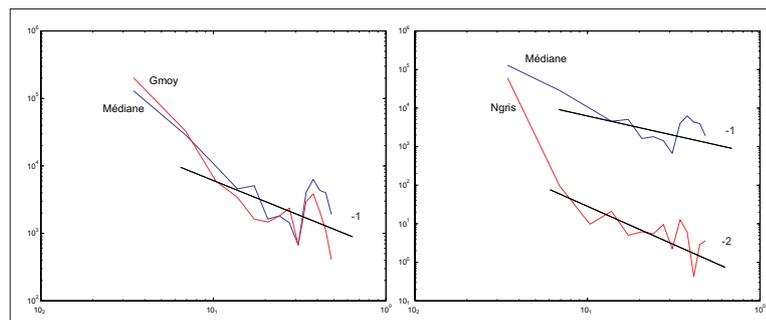


Figure IV.37 : Les densités spectrales et les pentes correspondantes pour les différents signaux sédimentaires de OR 04 S6.

Les différents signaux présentent donc des structures globales de deux types. Les pentes de l'ordre de -1, signifiant l'anti-persistance ou effet Noé renvoient à des phénomènes ponctuels et importants tels que des crues (pour OR 203a) ou une phase de sédimentation plus massive mais très différente des conditions régnant avant et après (pour OR 04 S6). Les pentes aux environs de -2, traduisant une structure plus complexe, laissent supposer que certains signaux sont une intégration de plusieurs variables. Voyons maintenant à quelle(s) échelle(s) ces structurations interviennent.

2. Décompositions en ondelettes : structure interne

Grâce à la décomposition par l'utilisation d'une ondelette, le signal sédimentaire peut être observé à différentes échelles. On rappelle que les petites échelles de temps (hautes fréquences) sont dans la partie basse du graphique. Plus on monte dans l'axe des ordonnées, plus on va vers les échelles de temps les plus longues (basses fréquences). Conjointement à ces graphiques, qui ne sont pas toujours très riches, nous commenterons systématiquement les courbes cumulées de la variance expliquée par chaque échelle. En l'absence d'informations très fines sur les graphiques de décomposition par échelle, ces courbes de variance sont très utiles.

Dans le cas de l'échantillon OR 203a de la salle Nord, la décomposition en ondelettes a été faite sur le grain moyen, le L^* et les niveaux de gris. Le grain moyen est la seule variable montrant une décomposition intéressante. Nous utiliserons la variance pour les deux autres paramètres (figure IV.38). Pour le grain moyen, les deux représentations indiquent bien que le signal a une organisation interne se faisant sur les 3 premières échelles de temps. La structure du signal se fait donc dans les hautes fréquences, avec quasiment 95 % de variance expliquée par les trois premières échelles. La décomposition met en avant l'importance de la toute première échelle. Le grain moyen est donc un signal évoluant très vite, subissant les moindres variations de taille des sédiments. Le paramètre de clarté de la spectrorimétrie est également, en majeure partie, structuré par des phénomènes intervenant à haute fréquence. Au niveau de l'échelle 3, c'est presque 80 % de la variance du signal qui sont expliqués, l'échelle 3 elle-même est d'ailleurs la plus importante, comptant à elle seule pour presque 30 %. Par rapport à la valeur de pente β , qui était proche de -1 pour ce signal de clarté du sédiment, il semble donc que l'anti-persistance soit le résultat de processus intervenant à cette échelle intermédiaire qu'est l'échelle 3. Il est difficile de donner un ordre de grandeur du temps représenté par cette composante, en l'absence de datations. Enfin, les niveaux de gris sont plutôt structurés par la deuxième composante de temps, portant à elle seule un peu plus de 50 % du signal. Ces indications sur la variance expliquée sont ici assez incohérentes avec les résultats tirés des densités spectrales. En effet, pour les niveaux de gris, la pente β (et les autres traitements commentés plus haut) suggérait d'avantage un signal complexe, intégrant la signature de nombreux processus intervenant sur des pas de temps différents. Au contraire, ici, la décomposition par ondelette indique très clairement la dominance de la seconde composante. Le signal des niveaux de gris reste donc difficile à appréhender.

Pour le prélèvement OR 04 S6 du fond de la chatière, les décompositions sont données pour le grain moyen et les niveaux de gris. Là encore, seule la décomposition du grain moyen offre une visualisation intéressante. Pour les niveaux de gris, on se reporte sur la courbe cumulée de variance expliquée (figure IV.39). Le grain moyen est ici un signal qui apparaît très différent, notamment au niveau de la courbe de variance. En effet, on voit clairement que l'échelle 4 explique à elle seule la moitié de la structuration du signal. Cette échelle correspond plutôt à des basses fréquences, à du temps long (relativement au total des 5 échelles utilisées ici). Les fluctuations de ce signal que l'on peut observer aux hautes fréquences, sur le graphique de décomposition, seraient donc d'une nature secondaire, découlant de l'échelle 4. Cette structuration sur un temps plus long n'est pas vraiment surprenante, elle se raccorde bien aux différents autres résultats et hypothèses formulées pour ce secteur de la Chatière des Sables. On a en effet affaire à des phases de sédimentation plus homogènes, plus massives, voire même plus durables que dans le point bas de la salle Nord. La succession des trois unités sédimentaires (pluricentimétriques) décrites dans l'échantillon est en bon accord avec un signal de grain moyen évoluant plus lentement que dans le cas d'une alternance de lamines. Les niveaux de gris, eux,

montrent une courbe de variance cumulée en meilleur accord avec les hypothèses formulées jusqu'ici. Pour ce signal, les trois premières composantes de temps participent en proportions comparables à la structuration du signal. On retrouve donc une certaine cohérence avec l'hypothèse d'un signal complexe, particulièrement intégrateur de processus multiples.

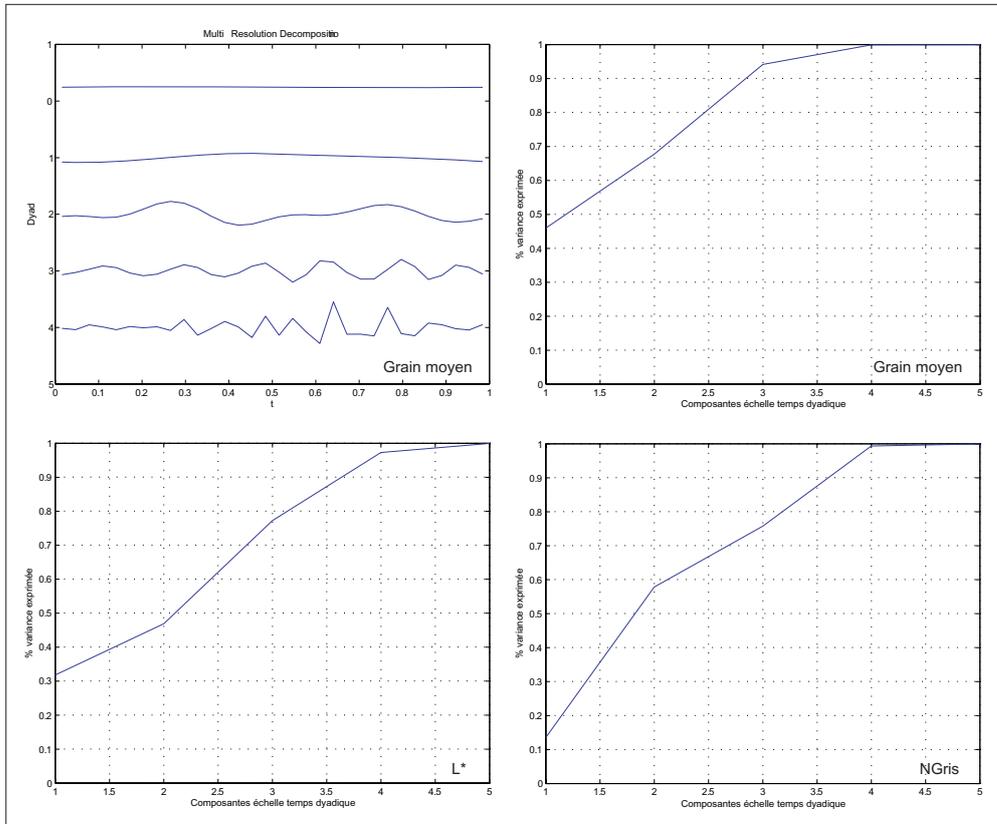


Figure IV.38 : Les décompositions par ondelette pour les différents signaux sédimentaires de OR 203a.

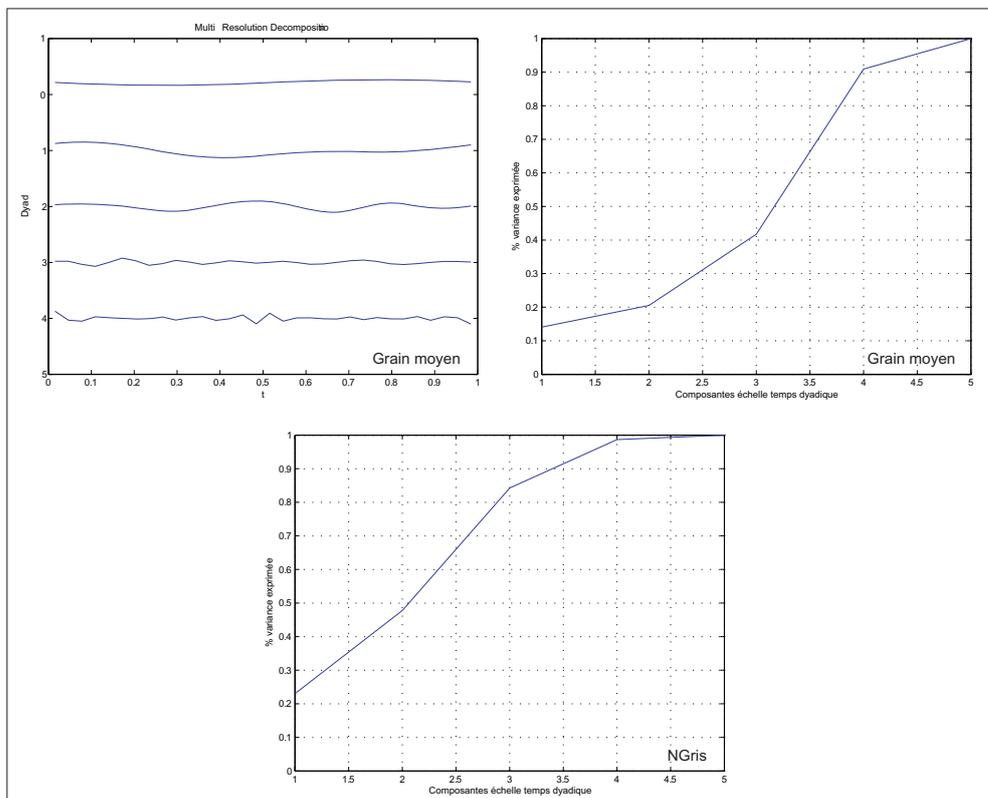


Figure IV.39 : Les décompositions par ondelette pour les différents signaux sédimentaires de OR 04 S6.

Ces différents traitements de signaux apportent des compléments sur le fonctionnement des deux pièges endokarstiques, compléments qui tendent à conforter les hypothèses de sédimentation. Mais au-delà, les différents signaux analysés présentent un certain nombre de similitudes par rapport à leur étude pour les sédiments de Choranche. Ainsi, dans la majorité des cas, la décomposition en ondelette des signaux montre une structuration se faisant sur les échelles de temps les plus réduites, ou autrement dit sur les plus hautes fréquences. Cette observation implique deux remarques :

- l'archivage sédimentaire détritique dans l'endokarst semble donc se faire avec une certaine précision. Sinon, nous ne pourrions observer que des signaux beaucoup moins structurés, et à des échelles beaucoup moins fines. *La qualité de la mémoire détritique endokarstique apparaît donc plutôt bonne*, et ce malgré les problèmes de temps de réponse évoqués dans le cas de l'étude des sédiments de Choranche.

- *il semble que la structuration d'un signal puisse être utile à l'identification des modalités de sédimentation.* Ici, à travers le cas de la Chatière des Sables, nous avons montré qu'une structuration à basse fréquence est bien en rapport étroit avec la dynamique sédimentaire. Cela sera à vérifier par l'étude d'autres pièges, mais cette analyse des signaux a donc un intérêt grandissant dans notre méthodologie. Au-delà du lien avec les conditions paléoenvironnementales et paléoclimatiques, ces traitements permettent de travailler avec plus de précision sur les conditions de transport et de piégeage des sédiments.

Par ailleurs, l'étude des pentes globales des densités spectrales fait apparaître, entre Choranche et Orgnac, plusieurs constantes dans les résultats. Ainsi, on a pu vérifier que les structurations globales du grain moyen et de médiane sont rarement distinctes. Mais on a également vu que le signal de clarté du sédiment (L^*) donne toujours la même indication de pente β , renvoyant invariablement à un comportement anti-persistant. Il semble donc que ce paramètre soit particulièrement adapté à la détection d'épisodes brutaux et irréguliers (événements hydrologiques majeurs). Par contre, le paramètre des niveaux de gris, avec une pente β toujours proche de -2, a une signification beaucoup plus complexe. Ici, entre les deux échantillons ardéchois, on a pu voir que les niveaux de gris ont une structuration très variable, et parfois difficile à raccorder aux autres observations. Les niveaux de gris seraient donc un signal d'un archivage sédimentaire complexe, au pouvoir intégrateur ne permettant pas son décryptage. Là encore, il sera prudent de tester à nouveau ce paramètre sur d'autres pièges sédimentaires, et aussi en approfondissant les moyens de décryptage de ce signal.

§§§§§§§§

Les différentes analyses réalisées sur l'Aven d'Orgnac ont été présentées, commentées et discutées dans ce chapitre. Les recherches sur cette cavité aujourd'hui non-fonctionnelle impliquent de façon incontournable les travaux préalables à l'analyse des échantillons de sédiments. En premier lieu, il est évident que dans une telle cavité, le choix des pièges sédimentaires à étudier n'est pas immédiat ; un travail d'identification étant une première étape inévitable.

La combinaison des méthodes utilisées, depuis la cartographie jusqu'aux décompositions des signaux sédimentaires à l'aide d'une ondelette, ont permis de faire un travail de reconnaissance et d'identification d'anciens pièges à sédiments détritiques. En cela, la reproductibilité de notre démarche d'étude des sédiments détritiques endokarstiques est validée. Mais il ne faut pas négliger que la condition essentielle à la réalisation d'une bonne étude de remplissages détritiques, actuels ou anciens, passe par une connaissance plus globale de la cavité. A travers le cas des grottes de Choranche et de

l'Aven d'Orgnac, nous avons montré qu'il existe de nombreux moyens pour appréhender une cavité ou un secteur dans son ensemble.

Mais au-delà de ce travail de reconnaissance des pièges, nous devons maintenant nous attacher à vérifier que les interprétations plus synthétiques sur le fonctionnement des pièges sont également d'une bonne reproductibilité. Ici, nous avons seulement une reproductibilité satisfaisante sur la démarche de travail. Il nous faut évaluer cette reproductibilité d'un point de vue plus définitif, à travers des interprétations plus étoffées du fonctionnement des pièges sédimentaires reconnus.

CHAPITRE III : INTERPRÉTATIONS ET ESTIMATION DE LA REPRODUCTIBILITÉ.

Dans ce dernier chapitre, nous reviendrons pour chacun des deux secteurs sur une caractérisation plus affinée du piégeage sédimentaire. L'élaboration d'une carte d'identité pour chaque piège sera présentée, à l'identique de celle proposée pour les sédiments des grottes de Choranche et en particulier du Lac de la Cathédrale (cf. *supra* : Partie III, Chap. III.1.a.1). Ainsi, la comparaison de ces différentes images de Passega permettra de discuter de la question de la reproductibilité de notre méthode d'identification des différents pièges à sédiments détritiques de l'endokarst.

Comme nous l'avons dit, le choix de ces deux secteurs d'étude permet d'évaluer la reproductibilité de notre travail à double titre. A travers le point bas de la salle Nord d'Orgnac, nous verrons si la « carte d'identité » dressée à partir des images de Passega donne une caractérisation semblable à celle des lacs de Choranche. Sur ce premier point, nous testons donc la fiabilité de l'image de Passega pour identifier un même contexte de piégeage sédimentaire. Ensuite, grâce à l'étude des sédiments de la Chatière des Sables, contexte endokarstique vraisemblablement différent (zone noyée restreinte de type siphon), nous verrons si la carte d'identité construite à partir de l'image de Passega renvoie une signature différente, permettant de faire la distinction entre ces différents pièges. La reproductibilité de notre caractérisation des pièges sédimentaires sera ainsi évaluée plus complètement. En effet, pour que notre démarche d'étude soit satisfaisante, et reproductible aux sites non fonctionnels notamment, il faut que les signatures données à travers les diagrammes de Passega permettent de bien distinguer les différents types et modes de piégeage.

1. Le point bas de la salle Nord

a) Synthèse sur l'image de Passega

1. Régression sur le nuage de points

Les différentes observations faites sur ce secteur de la cavité, ainsi que les analyses présentées, et en particulier l'image C/M « brute », ont conforté l'hypothèse d'un piège sédimentaire au fonctionnement proche d'un lac, dans le fond de la salle Nord. Ce faisceau de résultats renvoie donc à un ancien piège collectant des apports de matières *via* un seul écoulement. Ce contexte renvoie à un piège endokarstique très semblable au Lac de la Cathédrale. Partant de ce constat, on peut espérer obtenir une « carte d'identité » satisfaisante de cet ancien piège.

Nous rappelons que la restriction des images de Passega est ici opérée par un calcul de régression polynomiale sur le nuage de points. Par tâtonnements, sur les données de Choranche, nous avons retenu la régression polynomiale d'ordre 3, car elle fournissait une bonne synthèse de la disposition du nuage de points. De plus, les courbes de régression proposées sont au nombre de deux. Elles traduisent en fait une enveloppe polynomiale d'une unité de large, représentant le nuage de points.

La figure IV.40 reproduit la carte d'identité proposée pour le lac de la Cathédrale ; l'enveloppe polynomiale des sédiments du lac de Coufin y figure également. L'enveloppe polynomiale des

sédiments de la salle Nord d'Orgnac (profilé OR 203a) a été portée en rouge sur cette image. Nous avons pu identifier deux zones distinguant la sédimentation du fond du lac de la sédimentation sur les bords, en banquettes. Par rapport à cette disposition, l'enveloppe polynomiale des sédiments d'Orgnac occupe une position se rapprochant plutôt de la zone de sédimentation de bord, avec une enveloppe polynomiale parfaitement incluse dans cette zone pour les granulométries les plus grossières (zone 1, extrémité droite du graphique), puis qui s'évase en direction des granulométries plus fines.

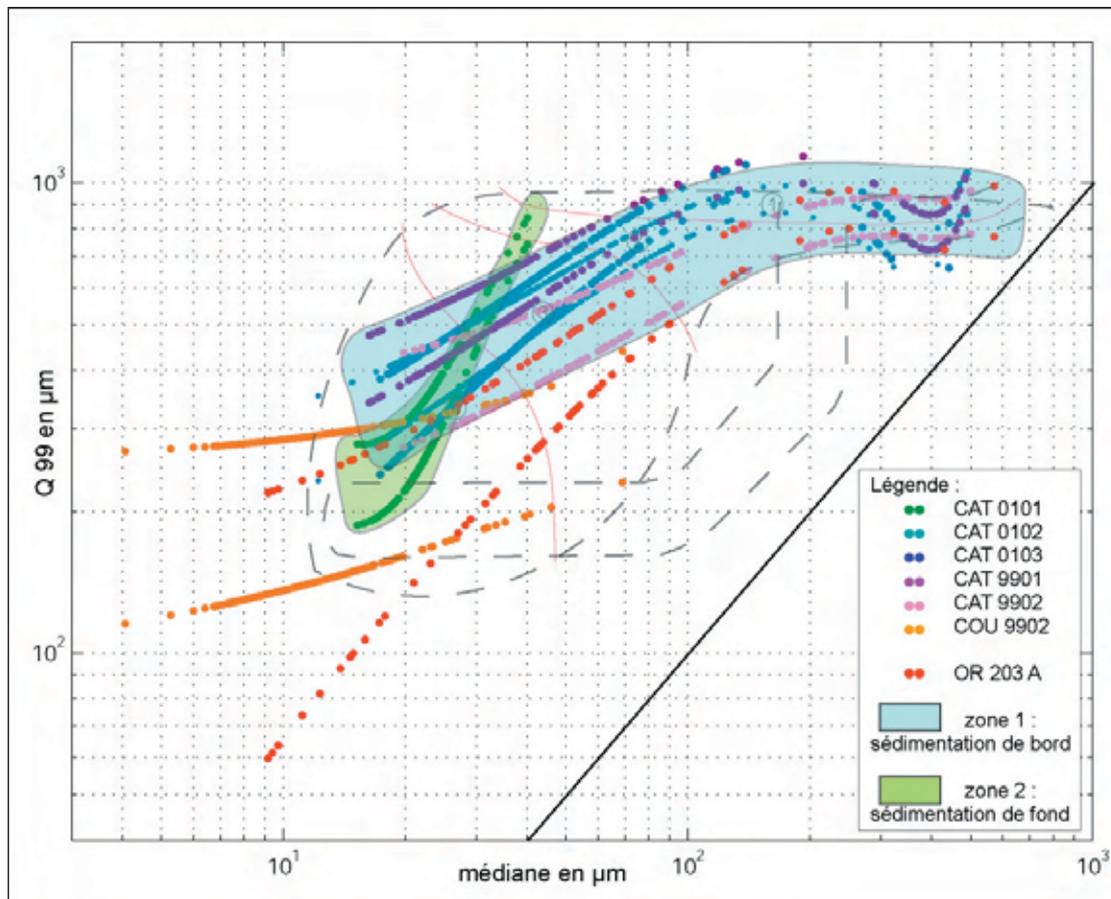


Figure IV.40 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés en contexte lacustre – Synthèse sur les lacs de Choranche et le « paléolac » d'Orgnac.

La forme ainsi que la position de l'enveloppe polynomiale offrent donc plusieurs comparaisons intéressantes avec la carte d'identité proposée sur la base des résultats de Choranche. L'analogie avec une sédimentation de bord de lac apparaît ici clairement. Mais cette analogie peut être développée, puisque la forme de l'enveloppe polynomiale présente la même évolution, d'une zone subhorizontale vers une zone inclinée, et ici particulièrement élargie dans le domaine des sédiments fins. On peut considérer que les inclinaisons, les pentes de l'enveloppe globale de la sédimentation de bord du Lac de la Cathédrale, et de l'enveloppe d'OR 203a sont analogues. Ce type d'enveloppe polynomiale semble donc bien être la signature, sur un diagramme C/M, d'une sédimentation détritique endokarstique en « contexte lacustre ».

La comparaison des pièges de Choranche et de la salle Nord d'Orgnac montre plusieurs cohérences, plaidant en faveur d'un piège endokarstique de type lacustre. Quelques différences subsistent néanmoins entre ces représentations bi-logarithmiques. Tout d'abord, il existe un biais inévitable dans la réalisation de ces cartes d'identités des sédiments ; biais lié à la granulométrie qui ne peut être parfaitement identique d'un site à l'autre. Ce n'est pas la géométrie, la stratigraphie des dépôts

qui pose problème ici, mais simplement la qualité des différents sédiments en présence. Les argiles et silts d'Ornac ne sont pas les mêmes qu'à Choranche, de même pour la fraction sableuse. C'est une première cause de variabilité dans la signature d'un dépôt. La morphologie de la cavité, au moins dans les secteurs immédiatement en connexion avec le point de piégeage est une autre cause de variabilité. Cet argument a déjà été mis en avant pour expliquer les différences entre l'enveloppe polynomiale de Coufin, et celles de la Cathédrale.

2. Premier bilan sur la qualité de la reproductibilité pour un même type de piège

En regard des commentaires que nous venons de faire sur le diagramme de Passega utilisé comme une carte d'identité du piégeage sédimentaire, la reproductibilité de la méthode, sur la base de cette seule comparaison entre deux pièges lacustres, apparaît intéressante, avec les précautions suivantes quant à la portée informationnelle de cette représentation :

- La comparaison entre le lac de la Cathédrale et le point bas de la salle Nord d'Ornac est bonne, attestant d'une *certaine reproductibilité entre des sites encore actifs et des sites non fonctionnels*.
- Cette reproductibilité est *testée dans un seul cas bien défini* qui est le piège à sédiments détritiques de type « lacustre », selon les termes définis au début de ce manuscrit (cf. *supra* : Partie I, Chap. II.3.a.3).
- La validité du diagramme de Passega en tant que « carte d'identité » des modalités de piégeage sédimentaire repose sur *l'analyse de la forme et de la position du nuage de points* dans un premier temps. Elle s'affirme dans un second temps grâce aux enveloppes polynomiales, celles-ci étant larges d'une unité et construites par une régression d'ordre 3. Dans ce second niveau de lecture, *la forme globale de l'enveloppe polynomiale devient l'indication majeure*, primant sur la position des courbes sur le diagramme.
- Cette *limitation sur le sens à donner à la position des courbes enveloppes* sur le diagramme bi-logarithmique est *liée à l'introduction d'une variabilité incontournable* entre les différents pièges. Cette variabilité s'exprime à travers deux paramètres au moins, à savoir la *nature granulométrique générale* propre à chaque secteur (d'extension locale à régionale) et la *morphologie de l'endokarst*, au moins dans *l'environnement immédiat* du piège sédimentaire.

L'identification des pièges sédimentaires endokarstiques par cette utilisation originale des diagrammes de Passega fournit une caractérisation globale du fonctionnement du piège. Autrement dit, on peut reconnaître des sédiments déposés dans un contexte lacustre, mais on ne peut déceler le fonctionnement interne, la structuration de l'archive sédimentaire. Le contraste de géométrie et de stratigraphie des sédiments entre le lac de la Cathédrale (sédimentation massive) et le piège sédimentaire d'Ornac (alternance régulière en minces lits), en est une très bonne illustration. La signature donnée à travers le diagramme C/M est la même, alors que la stratigraphie de détail des deux remplissages ne présente aucune similitude. Cette géométrie interne du remplissage est étudiée avec d'autres méthodes de notre démarche d'étude, et notamment les traitements de signaux.

b) Synthèse sur le fonctionnement du point bas de la salle Nord

Nous faisons ici une synthèse sur le fonctionnement de ce secteur d'Ornac, en tant que piège accumulateur de sédiments détritiques. Comme nous l'avons dit, la stratigraphie du remplissage, avec cette alternance de lits argileux et sableux, est très différente de ce que montraient les sédiments de Choranche. Aussi, le fonctionnement de ce piège semble fortement dépendant du régime de l'écoulement

responsable des apports. Compte tenu de la stratigraphie des sédiments, nous proposons l'hypothèse d'un écoulement pérenne, soumis aux variations extérieures (saisonnalité). En associant les différents résultats présentés au chapitre précédent, on ne peut pas vraiment trancher sur le rythme des apports de matière. En effet, la disposition du nuage de points dans l'image de Passega, renseignant déjà sur le type de piégeage et sur l'énergie de transport, n'est pas une expression du rythme des apports. Ce point pourra être éclairci à l'avenir par l'étude d'autres pièges lacustres.

Toutefois, l'hypothèse que nous proposons de retenir pour le fonctionnement du piège sera celle des apports permanents, grâce à un écoulement souterrain pérenne. La stratigraphie des sédiments, dans laquelle on ne distingue pas la succession de différentes unités sédimentaires, est plutôt en bon accord avec cette hypothèse. Dans un tel cas de figure, l'alternance des lits argileux et sableux suggère un fonctionnement très binaire des apports, avec un enchaînement de courants forts, produisant le dépôt des lits sableux, et de courants faibles permettant la formation des lits argileux. Ce double fonctionnement apparaissait bien à travers les ACP notamment. Mais nous avons également identifié un troisième mode de sédimentation, déconnecté du phénomène d'alternance et correspondant aux niveaux les plus grossiers. Là encore, ces niveaux apparaissent dans la stratigraphie sans produire la moindre perturbation sur les autres niveaux du remplissage. La mise en évidence de ces phénomènes hydrologiques majeurs, vraisemblablement de type crue, est d'ailleurs un argument de plus en faveur de l'hypothèse d'un piège fonctionnant comme un lac. Ce piège pouvait être le sommet de la zone noyée (ou d'une zone siphonnante) ; les écoulements pérennes y déposent comme dans un lac les particules détritiques transportées. Le niveau piézométrique a pu atteindre jusqu'à 250 m d'altitude au cours de la formation de la grotte, et nous sommes ici à 205 m environ [Jaillet, 2004 ; Noury, 2005]. Il est donc réaliste d'invoquer des mises en charge dans ce secteur (figure IV.41). Des conditions de piégeage en zone noyée *s.s.* n'auraient sans doute pas permis un marquage aussi net des événements hydrologiques majeurs.

La disposition stratigraphique du remplissage sédimentaire donne d'autres indices supplémentaires sur le piège. Tout d'abord, vu la netteté avec laquelle les lits se superposent, on peut penser que la masse d'eau était relativement importante, assurant une bonne inertie et permettant l'accumulation des dépôts en lits, sans la moindre perturbation par l'arrivée des courants les plus forts. Par contre, le pendage de ce remplissage pose question. En effet, la présence d'un piège de type lacustre implique plutôt une décantation uniforme des sédiments, recouvrant tout le fond. Le pendage que nous observons ici peut renvoyer à une autre hypothèse. Compte tenu de la morphologie de cette salle et de la forte inclinaison du sol à l'amont immédiat (cascade de gours), la sédimentation a pu se produire de façon progradante, formant un delta. La topographie de ce secteur d'Orgnac est, en effet, très différente des secteurs étudiés à Choranche. De plus, par rapport à la cavité dans son ensemble, le point bas de la salle Nord serait plutôt une zone de piégeage en amont du réseau, et non en bout de système comme cela est le cas à Choranche.

Enfin, l'analyse en ondelettes des signaux sédimentaires a montré, notamment sur le grain moyen, la prépondérance des phénomènes à haute fréquence dans la constitution du remplissage. La structuration à haute fréquence était d'ailleurs bien exprimée dans les deux autres signaux. De plus, ces signaux traduisent une grande sensibilité des écoulements aux fluctuations extérieures, intervenant à différentes fréquences. Les niveaux de gris notamment, montrent une participation de chaque composante de temps dans la structuration de l'archive sédimentaire. Ces données confortent

l'hypothèse d'apports de matières permanentes. En effet, un écoulement permanent peut transmettre des variations emboîtées sur plusieurs périodes.

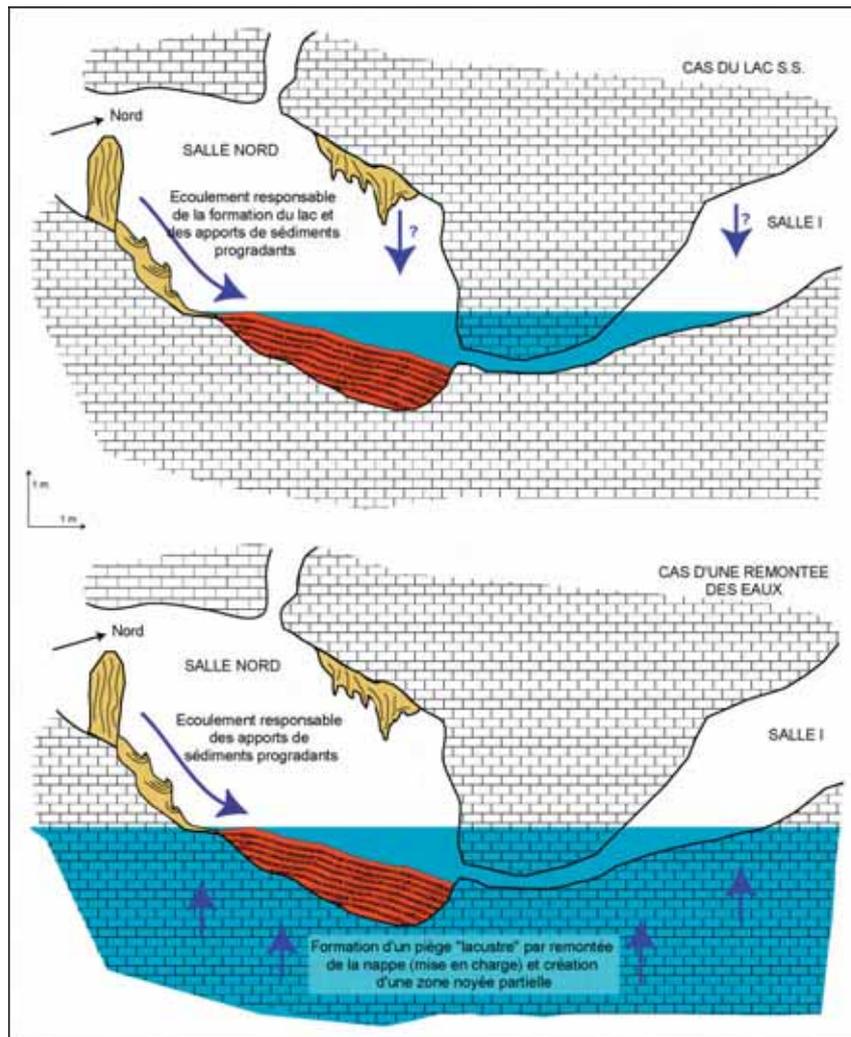


Figure IV.41 : Les différentes origines possibles de l'ancien piège du fond de la salle Nord.

Par rapport aux sédiments de Choranche, le remplissage du « paléolac » d'Orgnac serait donc le reflet d'une sédimentation régulièrement alternée, expression d'un écoulement « permanent » très influencé par les fluctuations extérieures. L'alternance des lits, et plus largement l'identification de trois degrés d'énergie hydrodynamique suggèrent que la rivière était très transmissive, avec un faible pouvoir tampon par rapport aux conditions extérieures. La fonction de filtre est donc très faiblement exprimée ici : ce secteur de la cavité n'étant pas à l'aval du système mais plutôt dans sa partie amont (proche de la surface). La position de ce remplissage dans les réseaux de l'Aven d'Orgnac nous permet de vérifier l'importance de la fonction filtre du karst. Avec un remplissage situé en tête de réseau, la structuration, le cryptage de l'archive sédimentaire est très différent. Ici, la fonction filtre semble n'intervenir que très peu. C'est un avantage par rapport à l'exercice de décryptage de la mémoire naturelle, mais c'est un inconvénient par rapport au pouvoir intégrateur des accumulations sédimentaires situées plus à l'aval dans les réseaux.

Sur la base de ces observations, et faute de cadre chronologique, il est difficile de parler d'une quelconque saisonnalité ou de remonter vers un contexte paléoenvironnemental et paléoclimatique plus précis. Nous avons d'ailleurs précisé au début de cette partie que cela n'était pas notre priorité

ici. Toutefois, les données collectées permettent de positionner le fonctionnement de ce piège de façon relative, par rapport à l'ensemble de l'histoire karstogénétique de la cavité. En effet, la place de cet ancien dépôt dans l'histoire de la cavité est probablement assez « récente ». Le principal élément appuyant cette hypothèse est la topographie. L'aven d'Orgnac dans son ensemble est le résultat d'un creusement paragénétique durant lequel les dépôts se constituent au fur et à mesure du creusement, sans relief marqué. Or, le secteur de la salle Nord présente un fort relief, causé par l'ouverture de l'aven et l'effondrement de la voûte calcaire. La cascade de gours à l'amont immédiat du remplissage étudié recouvre une partie des blocs d'effondrement correspondant à l'ouverture de l'aven. Compte tenu des résultats et hypothèses avancés jusqu'ici, nous pouvons donc préciser que la formation du remplissage détritique du fond de la salle Nord est postérieure à la formation de l'aven s.s. (figure IV.42). L'ouverture de celui-ci n'est pas précisément datée (entre le Pliocène et le Quaternaire), mais elle intervient en tout cas dans l'histoire récente de la cavité. Lorsque cette morphologie de blocs effondrés est mise en place, les grandes étapes de formation de ce secteur se succéderaient de la façon suivante (cf. *supra* : Partie IV, Chap. 2, Figure IV.10) : première phase de concrétionnement, remise en eau (lac ou zone noyée) et mise en place deltaïque du remplissage lité, assèchement, début de fonctionnement du soutirage, nouvelle phase de concrétionnement, soutirage.

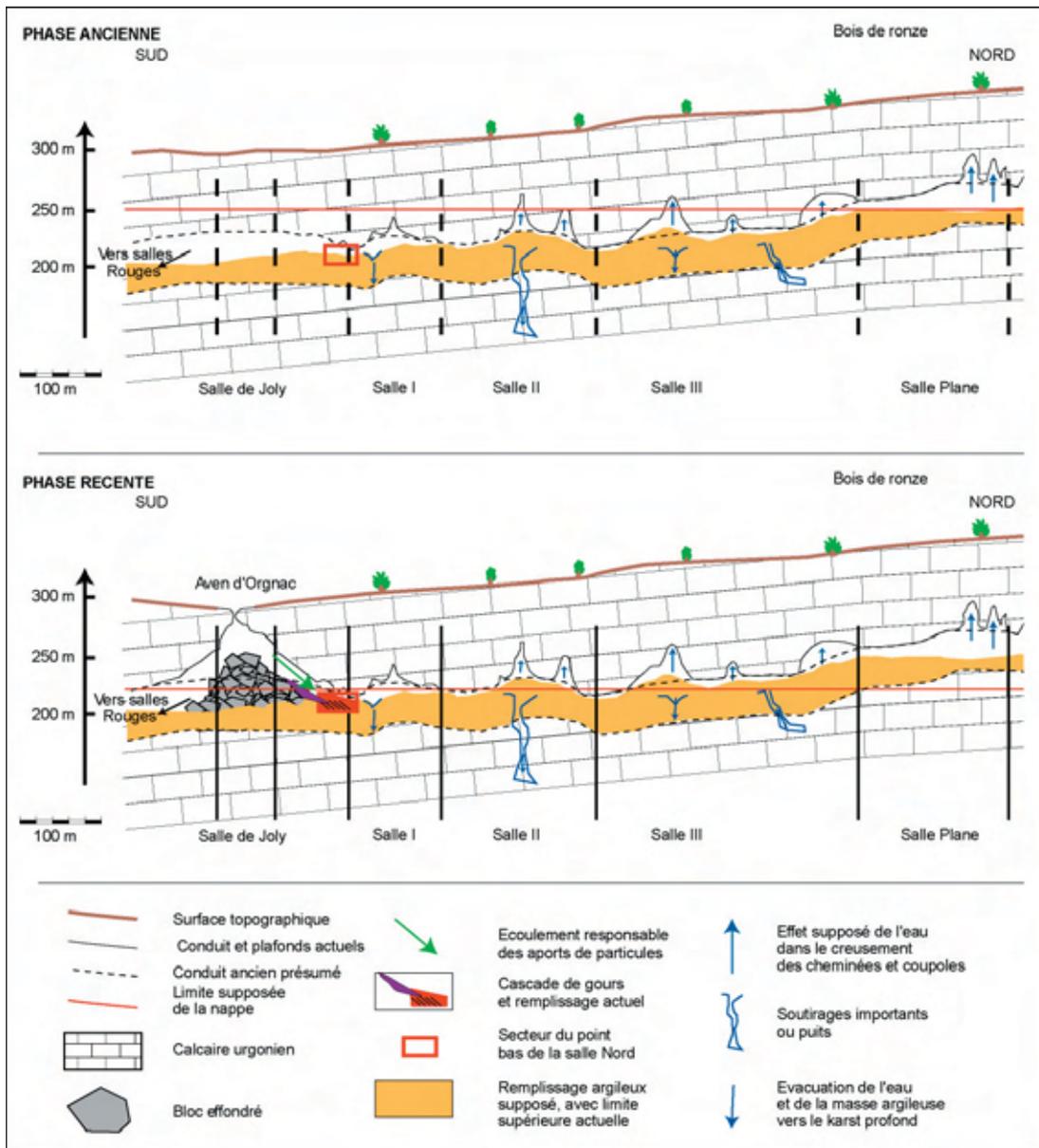


Figure IV.42 : La place du dépôt lité du point bas de la salle Nord dans l'histoire de la cavité (modifié d'après Noury, 2005).

2. Le fond de la Chatière des Sables

a) Passega : discussion sur la représentation graphique

Pour ce second secteur, la reproductibilité de la méthode, et en particulier de l'identification d'un piège par une image de Passega est évaluée par une étude complémentaire. Ce secteur de la chatière étant un piège différent des lacs, la signature par l'image de Passega devrait également être différente.

1. Premier niveau d'interprétation

Dans ce premier niveau d'analyse et de synthèse, nous avons construit l'enveloppe polynomiale des sédiments de la chatière (OR 04 S6) exactement selon les mêmes critères. Les deux courbes enveloppes donnent donc une fenêtre d'une unité, et sont le produit d'une régression polynomiale d'ordre 3, sur l'intégralité du nuage de points (figure IV.43).

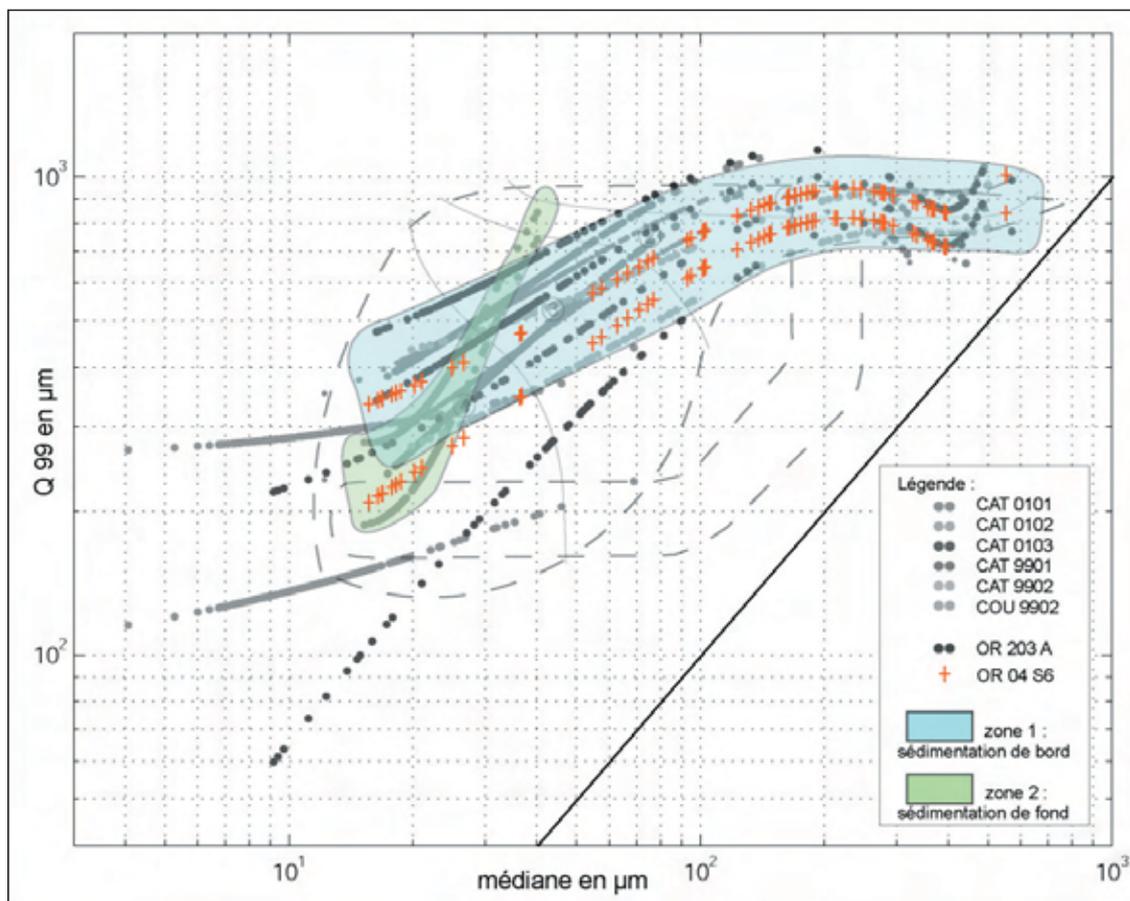


Figure IV.43 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques – Première confrontation entre les pièges lacustres et les sédiments de la Chatière des Sables à Orgnac.

Les deux courbes enveloppes se situent exactement sur la zone définie comme caractérisant une sédimentation de bord de lac. Le nuage de points, qui présentait pourtant quelques dissemblances avec les autres images des pièges lacustres, et notamment une rupture entre les zones 1,2 et la zone 4, donne ici une signature qu'il est difficile de distinguer des autres. La signature de la sédimentation de la chatière ne se différencie pas des signatures correspondant aux pièges de type lacustre. A ce stade, plusieurs constats peuvent se faire :

- soit la caractérisation des pièges par cette synthèse du nuage de points sur le diagramme bi-logarithmique n'est pas satisfaisante ;
- soit la sédimentation endokarstique en zone noyée siphonnante, au moins pour le cas de la Chatière des sables, ne présente pas une dynamique hydrologique très différente d'un piègeage lacustre ;
- soit il y a nécessité de considérer plus en détail le nuage de point initial de l'image C/M.

2. Second niveau d'interprétation

Avant de tirer les conclusions sur la signature des sédiments de la chatière, un second niveau d'analyse peut être testé. Puisque le nuage de points présente une rupture entre les granulométries grossières et les granulométries les plus fines, nous allons séparer ces deux parties de l'image C/M « brute » pour construire deux enveloppes polynomiales. Toujours avec une régression d'ordre 3 et une enveloppe d'une unité de large, nous proposons donc ce deuxième essai d'interprétation du nuage de points (figure IV.44).

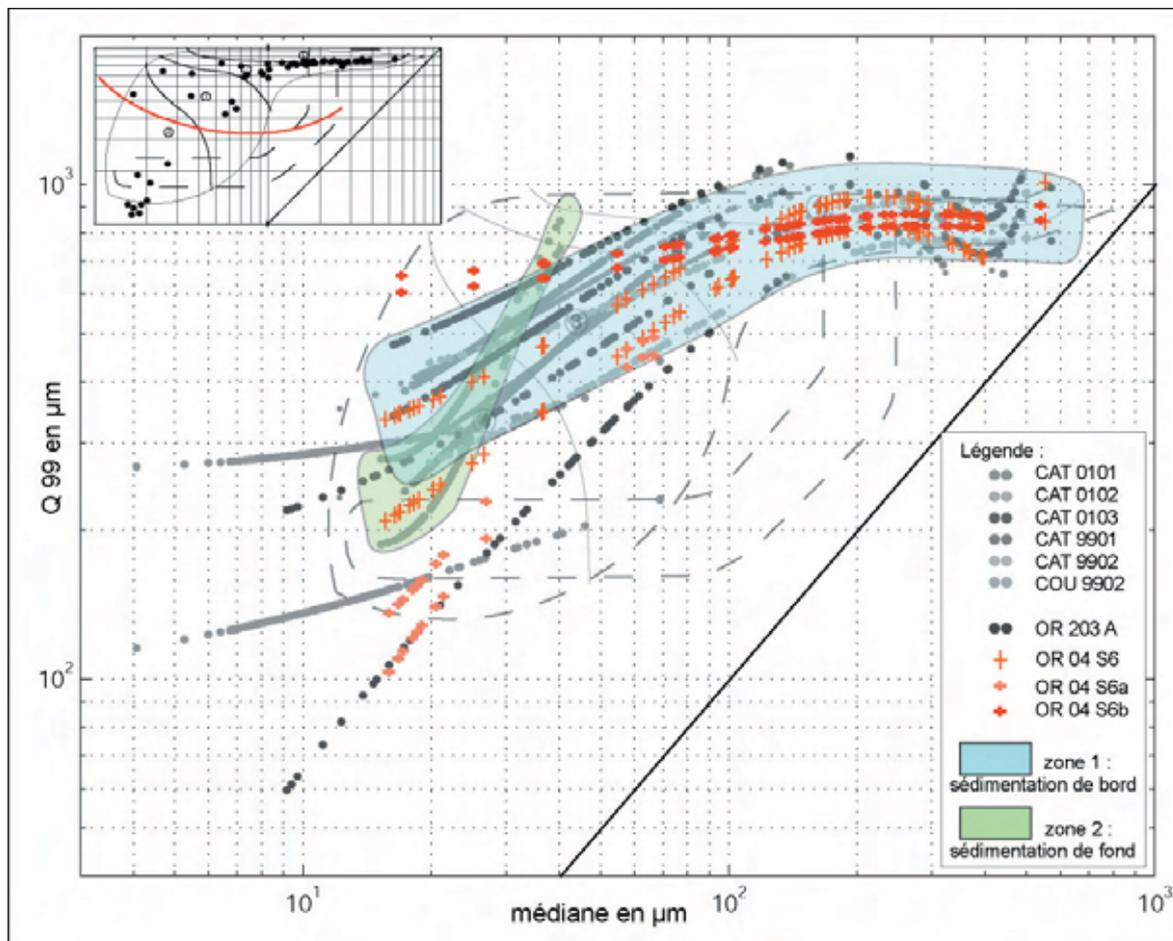


Figure IV.44 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques – Deuxième confrontation entre les pièges lacustres et les sédiments de la Chatière des Sables à Orgnac.

Sur cette seconde image, et compte tenu de sa construction, la distinction avec les pièges lacustres apparaît un peu mieux. Mais dans la mesure où l'on a précisé que les pentes globales des courbes polynomiales étaient la donnée prioritaire à considérer dans ces représentations, la différence de signature reste assez médiocre. En effet, l'enveloppe polynomiale du groupe de points OR 04 S6a, correspondant aux granulométries les plus fines de l'unité sédimentaire intermédiaire, présente une

inclinaison se rapprochant clairement de ce qui a été défini comme la zone de sédimentation de fond de lac. Seule la seconde enveloppe polynomiale OR 04 S6b, établie à partir des granulométries des deux unités sédimentaires sableuses de l'échantillon, donne une pente se distinguant légèrement plus de la zone de sédimentation de bord, avec des valeurs de Q99 restant assez élevées lorsque la médiane diminue. Les zones que nous pourrions proposer pour cette image C/M seraient donc : une zone calquée sur la courbe enveloppe OR 04 S6a, semblable en tous points à la sédimentation de fond précédemment définie ; et une zone calquée sur la courbe enveloppe OR 04 S6b, légèrement redressée, correspondant aux dépôts sableux remontants de la chatière vers la Salle II (figure IV.45).

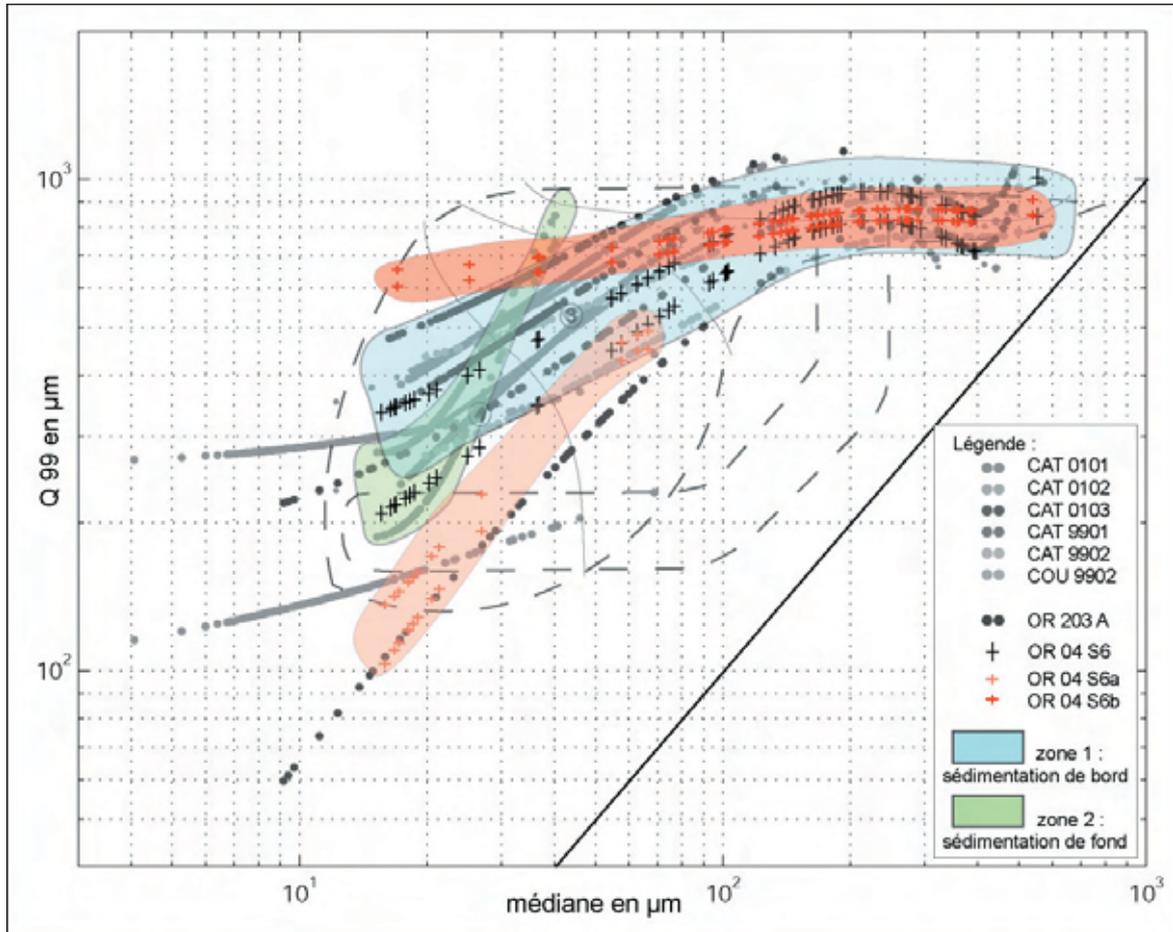


Figure IV.45 : Synthèse des enveloppes polynomiales de OR 04 S6.

La reproductibilité de la « carte d'identité » des pièges sédimentaires ne trouve pas, dans cette seconde interprétation, une meilleure validation que dans le premier cas.

3. Discussion sur les problèmes de reproductibilité entre différents pièges

La démarche d'étude globale que nous avons utilisé n'est pas remise en cause dans son intégralité. La caractérisation des modalités de la sédimentation dans un piège endokarstique, au travers des différentes méthodes utilisées, fonctionne et permet de s'avancer sur des interprétations sédimentologiques plus précises par rapport au milieu, en vue de reconstitutions environnementales mieux ajustées. Cela a été montré dans l'étude des sédiments de Choranche. Par contre, c'est la question pointue d'une identification « absolue » des différents types de pièges sédimentaires qui doit être révisée. En effet, la signature que nous avons proposé de retenir, à savoir les enveloppes polynomiales des nuages de points sur le diagramme C/M pour l'élaboration de ces « cartes d'identité » des

piégeages, ne semble pas totalement convenir. La signature polynomiale étant sensiblement la même, sa reproductibilité entre des pièges différents paraît faible ; ce qui jette le doute sur sa reproductibilité même entre des pièges identiques. Plusieurs remarques peuvent être faites ici, pour tenter d'expliquer ce problème.

En premier lieu, nous avons probablement un biais sur la méthode utilisée pour synthétiser les nuages de points. Les régressions polynomiales constituent une synthèse trop puissante des données pour permettre une distinction des différents pièges étudiés. Les nuages de points, entre les sédiments lacustres et ceux de la Chatière, montrent tout de même des différences dans leur répartition notamment. Ces différences apparaissent atténuées par les régressions polynomiales telles que nous les avons utilisées. Plusieurs possibilités se présentent pour contourner ces problèmes :

- soit *rester au niveau de représentation du nuage de points*, et en faire une description par zones, délimitées par un, voire plusieurs critères discriminants (le grain moyen et un signal non granulométrique par exemple).
- soit *tester d'autres représentations synthétiques des nuages de points*, et là plusieurs méthodes sont possibles. On peut tester des régressions plus précises (d'ordre supérieur à 3), et/ou plus nombreuses selon les zones identifiées dans le nuage de points. On peut également avoir recours à d'autres méthodes de synthèse des nuages de points, telles que des régressions logarithmiques par exemple.
- à l'extrême, si les différentes possibilités ne conduisent toujours pas à une caractérisation définitive valable des différents pièges sédimentaires, il faudra chercher à travailler à partir d'une *représentation des sédiments autre que l'image C/M*. Celle-ci avait été retenue car elle offre une vision synthétique des dépôts, et non contrainte par le temps. Mais le croisement d'autres données issues des mesures granulométriques pourrait se révéler plus pertinent.

De nombreux tests restent à effectuer pour tenter de trouver une représentation synthétique des dépôts capable d'identifier de façon systématique un type de piégeage sédimentaire endokarstique. Ces différentes possibilités seront explorées très rapidement.

En second lieu, ces différentes pistes méthodologiques gagneront à être testées à partir de pièges sédimentaires plus contrastés. En effet, ici, on ne peut exclure qu'une certaine similitude entre les lacs et le fond d'une chatière existe. Dans les deux cas, il s'agit d'un point bas ennoyé plus ou moins régulièrement. Pour un tout premier test de reproductibilité, la comparaison de ces deux secteurs a pu être un handicap, et rendre plus confuse leur distinction. Peut être l'étude de sédiments piégés dans un autre contexte, tel qu'une concrétion faisant obstacle sur le parcours d'une rivière souterraine, donnerait un troisième cas de figure permettant d'être plus clair sur la portée informationnelle de ces « cartes d'identités ».

Plusieurs pistes de travail s'ouvrent donc devant nous pour tenter de proposer une représentation plus pertinente de chaque piège endokarstique. Si la méthode proposée dans cette thèse présente des limites, l'espoir d'une identification « absolue » des pièges sédimentaires endokarstiques reste intact.

b) Fonctionnement général de la chatière en tant que piège

La stratigraphie de l'échantillon a permis de distinguer trois unités sédimentaires successives. Bien que visible à l'œil nu, la granulométrie et les ACP renvoient à deux dynamiques sédimentaires

différentes. Les courbes de contributions des sédiments, avec de très fortes corrélations entre les trois classes granulométriques permettent de s'assurer que la mise en place de chaque unité sédimentaire s'est faite par des écoulements uniques, provenant d'une seule direction. L'image de Passega indique une très faible présence des particules dans la zone 3 (grain moyen compris entre 125 et 62,5 μm). Les traitements de signaux, et en particulier la décomposition en ondelette du grain moyen, montrent une structuration du remplissage en grande partie dans les basses fréquences, autrement dit sur de grandes périodes.

Le cœur de la Chatière des Sables a connu un fonctionnement beaucoup moins rythmé que ce qui a été observé au point bas de la salle Nord. De plus, l'hypothèse d'un dépôt sableux formé par un écoulement remontant, allant de la salle III vers la salle II semble valable. Plusieurs arguments plaident en faveur de ce phénomène. Tout d'abord, le nappage sableux n'est présent que dans un secteur bien délimité, et réduit par rapport à la taille des Salles II et III (cartographie et sondages). Cette délimitation très nette peut avoir plusieurs causes, allant de la source de matière (quantité limitée), aux conditions hydrodynamiques (vitesse des écoulements) et/ou morphologiques (espace réduit) ; ce que confirmerait le creusement des coupoles de plafond de part et d'autre de l'étroiture s.s. qui suggère un écoulement allant bien de la salle III vers la salle II (figure IV.15). Enfin, les sables semblent provenir des poches karstiques localisées au dessus de ce secteur, poches qui se seraient vidées soit par gravité, soit lors de phases hydrologiques majeures.

Le fonctionnement de la Chatière des Sables, que nous proposons sur la base de ces données, est donc le suivant. Les deux niveaux sableux ont eu la même dynamique de dépôt, à savoir des écoulements limités à une certaine période de temps. Ces écoulements de sens Sud-Nord sont suffisamment puissants pour mobiliser les sables soutirés et les déposer selon un courant remontant, par diminution de l'énergie hydrodynamique avec l'augmentation de la pente en direction de la salle II. Entre ces deux phases, une sédimentation argileuse se met en place. Celle-ci peut avoir une origine beaucoup plus vaste, ces dépôts argileux rouges brunâtres se retrouvant partout dans la cavité. Un tel dépôt peut se produire lors d'une phase d'enneigement importante et durable. Compte tenu de sa disposition et de sa taille, la chatière subit alors un enneigement complet, et la masse d'eau inerte permet la décantation des particules argileuses.

Les transitions entre ces trois unités sédimentaires restent difficiles à cerner. Après le premier dépôt sableux, l'absence de limite érosive avec l'unité argileuse laisse penser que les deux phases ne se sont pas immédiatement succédées, soit au contraire qu'elles se sont enchaînées. La dernière transition entre les argiles et le nappage sableux donne les mêmes signes. Mais dans la mesure où il est beaucoup plus difficile de remobiliser des argiles sédimentées, il est difficile de dire si les phases hydrologiques à l'origine de ces deux dépôts se sont enchaînées ou si un assèchement de la cavité s'est installé entre temps.

§§§§§§§§

A l'issue de ce chapitre, l'intégralité de la démarche d'étude a donc été éprouvée. La reproductibilité de cette recherche à différents sites et différents types de pièges s'avère partiellement satisfaisante.

La diversité des méthodes employées pour travailler sur les modalités de la sédimentation dans un piège donné fourni un faisceau de résultats tout à fait intéressants, permettant d'analyser le cryptage des informations sédimentologiques et hydrologiques qui autoriseront, à terme, des reconstitutions, des interprétations paléoclimatiques et paléoenvironnementales convenables.

Par contre, l'essai de caractérisation des pièges sédimentaires à travers une représentation synthétique des images C/M n'est pas, à nos yeux, suffisamment concluant. Ce problème de reproductibilité quant à l'identification « absolue » des pièges endokarstiques a été discuté. Il ressort que de nombreuses autres pistes de recherches restent ouvertes pour travailler dans ce sens, notamment par l'étude d'autres pièges, aux caractéristiques très proches du contexte lacustre, mais aussi, pour enrichir les comparaisons, de pièges très différents, présentant un minimum de points communs. La pertinence des différentes méthodes envisagées pour retravailler sur ce point particulier de nos recherches sera ainsi beaucoup mieux évaluée.

CONCLUSION

Cette partie sur les sédiments de l'Aven d'Orgnac a permis de tester la méthodologie d'étude proposée sur un site non fonctionnel. En nous focalisant sur la question de la reproductibilité de l'approche, par rapport à l'étude des modalités de la sédimentation détritique endokarstique, nous avons pu faire ressortir plusieurs aspects importants dans ce travail.

La démarche d'étude, joignant des méthodes couramment utilisées permettant une approche globale, à des méthodes d'analyses plus originales, semble avoir une bonne cohérence. Les différents résultats sont complémentaires, et permettent de produire une réflexion de fond sur la sédimentation souterraine, selon le mode de piégeage des particules. Des informations renvoyant à des processus agissant à différentes échelles de temps et d'espace sont ainsi collectées. En cela, la pertinence de la méthode est bonne, puisqu'elle apporte un éclairage supplémentaire, *via* les écoulements et leur dynamique, en vue des reconstitutions paléoenvironnementales et paléoclimatiques. La reproductibilité de la méthode dans son ensemble, entre différents pièges et/ou différents sites, est plutôt satisfaisante.

Le principal point faible mis en évidence est la difficulté d'identifier de façon précise le type de piège endokarstique. Ici, sur ce questionnement précis, la reproductibilité, et donc la méthode employée pour établir cette caractérisation ne sont pas entièrement satisfaisantes. Fort heureusement, nous avons vu que de nombreuses autres approches sont possibles pour tenter de répondre à cette question essentielle de l'identification des pièges. En effet, ce questionnement particulier dans notre travail est très important. Si nous pouvons trouver une représentation graphique suffisamment fine pour distinguer les différents types de pièges de l'endokarst, cela pourrait permettre de bâtir une classification. Dans les différentes recherches sur les mémoires naturelles que sont les dépôts détritiques, cette caractérisation du mode de piégeage serait donc d'un grand intérêt.

Quoi qu'il en soit, nous pensons que cette démarche méthodologique, explorée et testée ici à travers deux sites karstiques, doit être mise en application sur de nombreux autres remplissages détritiques endokarstiques, à la fois identiques et différents aux sites présentés dans cette thèse. A ce stade des recherches, en effet, seule la multiplication des sites étudiés permettra de faire des comparaisons plus affinées et de renforcer la valeur et la pertinence de notre approche par rapport aux travaux menés sur les archives naturelles endokarstiques, voire continentales.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Plusieurs conclusions d'ensemble ont été proposées tout au long des parties de ce manuscrit, afin de couvrir les différents axes de ce travail sur les sédiments détritiques endokarstiques et leur intérêt en tant qu'archive naturelle. Cette conclusion générale permet de faire ressortir les éléments clés de notre recherche, sur la méthodologie mise en œuvre et sur sa reproductibilité, mais aussi sur ses limites et points faibles. Les perspectives mises au jour et/ou nécessitées par cette première étude seront proposées au terme de ce mémoire.

1. La méthodologie - Croisements de données

La méthodologie proposée et appliquée dans cette thèse, en s'articulant autour de la karstologie et de la sédimentologie, offre une vision intéressante et originale de la structuration des remplissages endokarstiques étudiés. Dans le cas des grottes de Choranche comme dans celui de l'Aven d'Orgnac, l'intérêt de connaissances générales sur chaque site, et même leur caractère indispensable a été largement démontré. Selon les cas (sites fonctionnels ou non), la réflexion théorique autour de la notion de piège sédimentaire endokarstique doit donc impérativement être accompagnée, entre autres, de données sur l'hydrologie du système karstique, de données sur sa morphogenèse, et de vues cartographiques.

L'ensemble de cette approche d'un site, toujours replacé dans son contexte environnemental local, permet d'appréhender les grandes fonctions du karst intervenant dans le piégeage sédimentaire. En effet, le choix des pièges étudiés, pour être pertinent, doit tenir compte de la nature des écoulements et de leur position par rapport à l'accumulation détritique (notion d'hydrodynamisme). Il doit aussi prendre en compte le degré de filtrage du système et le degré d'intégration, voire de mélange, des informations environnementales (par rapport à l'amont du système et l'extérieur). Par l'ensemble de cette démarche, il est possible d'avoir des données de tout premier intérêt quant au fonctionnement des pièges endokarstiques en tant qu'accumulateurs de sédiments, et donc d'informations environnementales. Ces données, où les écoulements occupent plus ou moins directement une place majeure, vont du repérage des différents pièges à l'estimation de la qualité de l'archivage sédimentaire (position du piège par rapport à l'ensemble du réseau, volume de l'accumulation, efficacité du piège en terme de conservation, problèmes de lacunes et/ou de départ de matière...). Ces connaissances générales sont la garantie d'une analyse raisonnée des sédiments et des modalités de leur accumulation au sein d'un karst, à travers le volet des méthodes sédimentologiques et de traitements de signal.

D'éventuelles interprétations sur les évolutions environnementales et climatiques archivées par les dépôts détritiques ne peuvent se soustraire à cette démarche dans sa totalité. En effet, l'étude des deux sites a montré la complexité mais aussi la grande diversité des archives détritiques. C'est pourquoi cette méthodologie est importante, car elle permet de dégager les spécificités de chaque site et de chaque piège, avant d'analyser plus étroitement les échantillons. L'association des approches karstologiques et sédimentologiques, jouant sur des échelles spatiales différentes, permet de comprendre le fonctionnement des pièges sédimentaires étudiés, en tant qu'objets propres mais aussi par rapport à leur environnement endokarstique. Les modalités d'accumulations de sédiments sont ainsi décrites, et des possibilités d'interprétations ou de reconstitutions peuvent alors s'ouvrir quant aux informations environnementales archivées dans ces dépôts.

2. La reproductibilité - Croisements de sites

Si la démarche méthodologique dans son ensemble s'avère plutôt bien construite et adaptée aux objets étudiés, sa reproductibilité vers une grande variété de pièges à sédiments endokarstiques apparaît plus nuancée, notamment sur la question précise de la caractérisation des différents pièges.

La démarche analytique proposée peut s'appliquer à tous les types de sites et de pièges endokarstiques. En effet, la collecte de données globales sur le système de drainage étudié et l'analyse de prélèvements telle que nous l'avons appliquée ne devraient pas rencontrer d'obstacles particuliers. Les analyses granulométriques, les analyses multifactorielles, l'acquisition et le croisement de données colorimétriques, magnétiques et autres, ainsi que le traitement de signal permettent de définir les différentes modalités de sédimentation qu'une accumulation peut présenter. Celles-ci, grâce aux données sur le système de drainage, peuvent être mises en rapport avec des conditions d'écoulement, des signes morphologiques conservés par la cavité, etc. En cela, la démarche méthodologique apparaît plutôt efficace.

Mais un volet particulier de cette recherche portait sur une identification précise, et si possible représentative des différents modes de piégeage endokarstique. Cet objectif de caractérisation n'a pas, à nos yeux, été entièrement atteint. Des incertitudes subsistent sur la clé de lecture choisie, et sur son degré de précision. En effet, le choix de l'image de Passega pour caractériser le piégeage endokarstique, à l'instar de ce qui se fait pour les systèmes sédimentaires de surface [Passega, 1964], s'est révélé difficile à exploiter. Les « cartes d'identités » proposées, par régression polynomiale sur les images C/M bi-logarithmiques, ne donnent pas entière satisfaction. A l'échelle des deux seuls sites étudiés et notamment pour les sites non fonctionnels, il reste parfois difficile de trancher sur la portée informationnelle du nuage de points ou de son enveloppe de régression, et la marge d'erreur est encore grande.

Cependant, cette première tentative a permis d'ouvrir de nombreuses autres pistes pour tenter de progresser vers une caractérisation plus performante des pièges à sédiments détritiques de l'endokarst, et vers une éventuelle possibilité de classification. C'est tout d'abord en multipliant les sites d'études, et en particulier les sites actifs, que la reproductibilité de la « carte d'identité » des pièges endokarstiques sera complètement testée. En se cantonnant dans un premier temps aux lacs souterrains actifs (en tant que piège « idéal » comme cela a été défini au début de ce manuscrit), il sera beaucoup plus évident d'éprouver la qualité de cette représentation graphique qu'est l'image C/M. Dans l'hypothèse d'une variabilité des représentations trop grande pour les conserver comme « carte d'identité », d'autres tests divers sont possibles :

- choix d'un autre critère discriminant que le grain moyen ;
- choix d'un autre outil mathématique synthétisant le nuage de point (régressions logarithmiques par exemple) ;
- possibilités de travailler à une caractérisation zone par zone (quatre régressions, pour chacune des zones définies à l'aide du grain moyen dans le cas du lac de la Cathédrale par exemple) ;
- à l'extrême, choix d'une autre représentation graphique, comme les diagrammes classement/asymétrie, ou les diagrammes triangulaires...
- tests allers-retours entre des pièges connus, actifs, et des pièges non fonctionnels afin de mesurer l'évolution de la précision graphique pour chacune des pistes proposées, et étalonner ainsi au mieux la « carte d'identité ».

Malgré cette faiblesse de la méthodologie à ce stade des recherches, les possibilités restent encore larges pour tenter de mener à terme cet objectif de signature graphique de la dynamique des différents pièges à sédiments de l'endokarst. La possibilité d'une classification des piégeages détritiques endokarstiques, si elle n'est pas satisfaisante dans les travaux restitués ici, reste donc tout à fait envisageable. Elle ne pourra être rejetée que si les différentes propositions ci-dessus se révèlent inexploitable.

3. Les limites et points faibles

Ce travail, initié sur les deux sites des grottes de Choranche et de l'Aven d'Ornac, montre également les limites et faiblesses de notre approche. Outre la question de la signature graphique des dynamiques de piégeage endokarstique par les images de Passega, d'autres points susceptibles de limiter la pertinence de cette recherche doivent être listés ici. Ils peuvent être regroupés en deux grands thèmes.

Tout d'abord, une certaine prudence est de mise en ce qui concerne l'extension de la méthodologie à différents sites karstiques, et ce en raison de la grande variabilité de fonctionnement des systèmes de drainage les uns par rapport aux autres. En effet, dans la première partie de ce mémoire, nous avons mis en avant certaines notions générales spécifiques au milieu karstique, telles que les karsts unaires ou les systèmes transmissifs. Ainsi, on ne peut pas affirmer que l'accumulation détritique d'un piège de type lacustre, même s'il possède un fonctionnement et une dynamique propres, donnera les mêmes informations selon qu'il se trouve dans un système de drainage plutôt capacitif ou plutôt transmissif, ou qu'il se trouve dans un karst unaire ou binaire. Ces différences générales n'ont pas forcément de conséquences gênantes sur l'étude de la structuration d'un remplissage détritique, dans la mesure où ces données sont prises en compte dans l'approche karstologique de la méthodologie. Mais du point de vue des signatures dynamiques de piégeage (« cartes d'identités ») et surtout de l'information environnementale archivée, ces notions deviennent prépondérantes. C'est en effet le transfert et l'archivage des données environnementales et climatiques externes, *via* les écoulements et les particules sédimentaires, qui s'en trouvent complètement modifiés.

Cet aspect du milieu karstique a une forte implication vis-à-vis de notre recherche, et notamment par rapport aux objectifs finaux de décryptage de l'archive naturelle et de reconstitutions paléoenvironnementales. Ces paramètres du milieu laissent entrevoir que même en étoffant les recherches présentées ici, par l'étude d'autres sites notamment, il sera vraisemblablement difficile d'en ressortir un unique protocole analytique, applicable dans tous les cas de figure. Les objectifs de reconstitutions n'ont pu être abordés durant la thèse. Mais toute la réflexion en amont et la méthodologie employée ont permis de mettre à jour cette importante spécificité, par rapport à la finalité envisagée.

Le deuxième grand point qui constitue une limitation à cette démarche d'étude concerne bien sûr les datations et l'établissement d'une chronologie, au moins relative, pour un remplissage détritique endokarstique. Le cas du lac de la Cathédrale, à Choranche, a parfaitement illustré les difficultés liées à cette partie des recherches. Les datations d'éléments piégés dans le sédiment, en l'occurrence ici des fragments de charbons de bois, se sont révélées inexploitable pour établir une chronologie. Seuls quelques rares jalons ont pu être proposés et discutés. Les datations sont pourtant indispensables pour apporter des éléments plus concrets sur la structuration du remplissage et sur les rythmes de

constitution de l'accumulation sédimentaire étudiée. Quant aux interprétations et reconstitutions paléoenvironnementales, elles sont totalement dépendantes de la qualité de ces données temporelles.

Devant ce constat, qui illustre une fois encore la complexité du milieu karstique, il ressort que la seule méthode pertinente pour dater efficacement les sédiments est celle du Plomb 210, portant sur le sédiment et non sur des éléments d'une autre origine. A l'avenir, pour pouvoir mettre en place des chronologies exploitables et proposer des modèles âge-profondeur, c'est donc vers cette méthode, déjà testée sur des sédiments souterrains, qu'il faudra se tourner [Pourchet *et al.*, 1997].

4. Les perspectives ouvertes

Notre travail sur les sédiments détritiques endokarstiques et sur leur potentiel en tant que mémoire naturelle des évolutions environnementales ouvre de nombreuses perspectives de recherche. Malgré l'absence de datations et calages chronologiques, l'ensemble des analyses exposées atteste d'une structuration bien réelle des accumulations détritiques endokarstiques, sous la forte dépendance des écoulements, eux-mêmes étant tributaires des conditions climatiques, météorologiques et géographiques de l'environnement local à régional extérieur. Ce premier pas est une donnée majeure dans les études sur les enregistreurs naturels continentaux, et plus particulièrement souterrains, car c'est la preuve que les sédiments détritiques fins des grottes sont une archive naturelle fonctionnant à une assez haute résolution de l'information. Ce résultat, et les différentes étapes de l'étude appellent d'autres pistes de travail.

C'est tout d'abord les aspects relatifs aux points faibles de la méthodologie utilisée, qui méritent d'être étudiés plus avant. Ces aspects regroupent :

- l'établissement d'une signature graphique fiable en vue d'une classification des pièges à sédiments de l'endokarst, un des intérêts de cette classification étant l'identification et la reconnaissance aisée de « paléo-pièges » dans des sites karstiques aujourd'hui non fonctionnels ;
- un travail plus poussé sur les datations (^{210}Pb) et la mise en place d'une chronologie des remplissages étudiés. Cela permettrait de pouvoir proposer des modèles âge-profondeur, puis des interprétations paléoenvironnementales et paléoclimatiques. L'établissement d'un cadre chronologique le plus précis possible serait aussi le moyen d'évaluer, voire de quantifier, les temps de réponse du milieu endokarstique aux différentes fluctuations environnementales extérieures archivées dans les dépôts ;
- un exercice de mise en commun des mémoires naturelles de l'endokarst, pour un site donné, en vue de mesurer plus concrètement leur degré de complémentarité, notamment entre les concrétions (archive « performante » en période de biostasie) et la sédimentation détritique fine (archive *a priori* plus pertinente pour les périodes de rhexistasie).

Ce dernier point permet d'élargir les perspectives quant aux reconstitutions paléoenvironnementales possibles, et surtout en ce qui concerne leur précision. En effet, la complémentarité de ces deux archives naturelles endokarstiques devrait permettre d'affiner des reconstitutions environnementales essentiellement basées sur l'étude des stalagmites.

Enfin, sur la base de notre approche, deux autres perspectives de recherche d'ordre plus général pourraient également être développées.

Ce sont d'abord tous les aspects relatifs au rôle de l'Homme et à l'impact de sa présence dans le karst. L'étude d'une accumulation sédimentaire souterraine telle que nous l'avons mise en œuvre peut, en effet, se rapprocher des questionnements posés par l'archéologie et la préhistoire. La grotte Chauvet est l'exemple par excellence de telles problématiques [Debard *et al.*, 2003 ; Ferrier *et al.*, 2005]. Mais le rôle de l'Homme peut aussi avoir des implications actuelles, dans des grottes touristiques ayant subi des aménagements et des perturbations anthropiques. Dans le cas des grottes de Choranche, le lac de Coufin est ceinturé par les axes de circulations mis en place pour les visites touristiques. La mise en place et/ou la consolidation de ces cordons sableux a forcément modifié la dynamique sédimentaire du lac. Ces perturbations, représentant un changement pour la constitution du remplissage lacustre, sont vraisemblablement enregistrées par les dépôts. Dans ce cas précis, et avec un cadre chronologique, il serait donc possible de repérer et de quantifier l'impact de l'Homme sur un lac actuel.

Enfin, un volet plus original de perspectives de recherches porte sur les études expérimentales. Notamment vis-à-vis de nos questionnements sur l'établissement d'une « carte d'identité » des différents types de pièges à sédiments de l'endokarst, des modèles et des simulations pourraient être mis en œuvre, en laboratoire. Cela pourrait être d'une grande utilité en vue de caractériser les différentes dynamiques sédimentaires, ou tout au moins de mieux cerner les paramètres susceptibles de les différencier les unes des autres. Dans l'objectif d'une classification des différents pièges, cette entrée expérimentale présenterait l'avantage de pouvoir contrôler les paramètres en jeu un à un, et donc de mieux observer leur impact réel sur les dynamiques de piégeage.

§§§§§§§§

Cette thèse est donc un premier pas dans les recherches menées à haute résolution sur les archives détritiques endokarstiques. Elle a permis de mettre à jour de réelles potentialités informationnelles de ces dépôts, par rapport aux évolutions environnementales. Cette étude, à travers toute la diversité et la complexité de ce milieu naturel qu'est le karst, a pu aussi dégager les pistes de recherche particulièrement intéressantes à poursuivre, pour atteindre l'objectif final de cette démarche : décrypter la mémoire paléoenvironnementale de ces dépôts.

BIBLIOGRAPHIE

A

ACKERT R.P., BARCLAY D.J., BORNS H.W., CALKIN P.E., KURZ M.D., FASTOOK J.L. et STEIG E.J. (1999)

Measurements of past ice sheet elevations in interior West Antarctica.

Nature, vol. 286, 8 octobre, p. 276-280.

ADAMS A.E., MACKENZIE W. S. et GUILFORD C. (1994)

Atlas des roches sédimentaires.

Ed. Masson, Paris, 104 pages.

AL-FARES W., BAKALOWICZ M., GUERIN R. et DUKHAN M. (2002)

Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar.

Journal of Applied Geophysics, vol. 51, issue 2-4, p. 97-106.

ALMOGI-LABIN A., BAR-MATTHEWS M., PATERNE M., SCHILMAN B. et AYALON A. (2003)

The relationship between the terrestrial (speleothems) and the marine climatic record during the last glacial/interglacial cycle in the Eastern Mediterranean.

Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 39.

ANGELIS M. et GAUDICHET A. (1991)

Saharan dust deposition over Mont-Blanc (French Alps)

during the last 30 years.

Tellus, vol. 43B, p. 61-75.

APPENZELLER C., SCHWANDER J., SOMMER S. et STOCKER T.F. (1998)

The North Atlantic Oscillation and its imprint on precipitation and ice accumulation in Greenland.

Geophysical Research Letters, avril 1998, 6 pages.

ARNAUD F. (2003)

Signatures climatique et anthropique dans les sédiments holocènes des lacs du Bourget et d'Anterne (Nord-Ouest des Alpes) – Paléohydrologie et contamination au Plomb.

Thèse de Doctorat, Univ. Lille 1, 248 pages.

ARNAUD H. (1981)

De la plate-forme urgonienne au bassin vocontien.

Thèse de Géologie de l'Université de Grenoble, 804 pages.

ARNAUD H. et MONJUVENT G. (1975)

Carte géologique de la France au 1/50 000^e, feuille Romans-sur-Isère (795) et notice explicative.

Ed. BRGM, 30 pages.

ARNAUD-FASSETTA G. (1996)

Les inondites rhodaniennes d'octobre 1993 et janvier 1994 en milieu fluvio-deltaïque. L'exemple du petit Rhône.

Quaternaire, vol. 7, n° 2-3, p. 139-153.

ARNAUD-FASSETTA G. et PROVENSAL M. (1993)

Etude géomorphologique du delta du Rhône : l'évolution des milieux de sédimentation fluviales au cours de l'Holocène récent.

Méditerranée, n° 3-4, p. 31-42.

ARNAUD-FASSETTA G., DE BEAULIEU J.-L., SUC J.-P., PROVENSAL M., WILLIAMSON D., LEVEAU P., ALOISI J.-C., GADEL E., GIRESSE P., OBERLIN C. et DUZER D. (2000)

Evidence for an early land use in the Rhône delta (Mediterranean France) as recorded by late Holocene fluvial paleoenvironments (1640-100 BC).

Geodinamica acta, vol. 13, p. 377-389.

ARNAUD-VANNEAU A. (1980)

Micropaléontologie, paléocéologie et sédimentologie d'une plate-forme carbonatée de la marge passive de la Téthys

: l'Urgonien du Vercors septentrional et de la Chartreuse (Alpes occidentales).

Thèse de Géologie de l'Université de Grenoble, 874 pages.

ASTRADE L. et BRAVARD J.-P. (1999)

Energy gradient and geomorphological processes along a river influenced by neotectonics (the Saône river, France).

Geodinamica acta, vol. 12, n° 1, p. 1-10.

ATTEIA O. et KOZEL R. (1997)

Particle size distributions in waters from a karstic aquifer : from particles to colloids.

Journal of Hydrology, vol. 201, p. 102-119.

AUBINEAU B. (1998)

Contribution à l'étude des entrées dans le système karstique de Choranche : les apports pluviaux et niveaux.

Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université de Savoie, 87 pages.

AUDRA P. (1994)

Karsts Alpains – Genèse de grands réseaux souterrains.

Karstologia Mémoires, n° 5, 280 pages.

AUDRA P. (1995)

Signification des remplissages des karsts de montagne – Quelques clés à l'usage des spéléologues.

Karstologia, n° 25, p. 13-20.

AUDRA P., DELANNOY J.-J. et HOBLEA F. (1993)

Signification paléogéographique des réseaux perchés des Préalpes françaises du Nord : exemples en Chartreuse et Vercors.

Travaux U.R.A. 903 CNRS, n° XXII, p.3-17.

AUDRA P., LAURITZEN S.E. et ROCHETTE P. (1999)

Datation de sédiments (U/Th et paléomagnétisme) d'un hyperkarst de Papouasie-Nouvelle-Guinée (Montagnes Nakanai, Nouvelle-Bretagne). Implications dans la connaissance spéléogénétique d'un réseau juvénile (Gouffre Muruk).

Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence, p. 43-48.

AUGER F. (1999)

Introduction à la théorie du signal et de l'information.

Ed. Technip, Coll. Sciences et Technologies, 465 pages.

B

BAENA ESCUDERO R., GUERRERO AMADO I. et GARCIA MARTINEZ B. (1997)

Travertinos y vertientes periglaciares en la reculada de Combe Laval (Vercors, Francia).

Et. Géogr. Phys., Suppl. n° XXVI, p. 107-110.

BAÏSSAS P. (1972)

Etude sédimentologique sommaire du remplissage de la grotte d'Aldène (Cesseras, Hérault).

Bull. Mus. Anthropol. Préhist. Monaco, n° 18, p. 69-88.

BAKALOWICZ M. (1975)

Géochimie des eaux karstiques et karstification.

Annales de Spéléologie, t. 30, fasc. 4, p. 581-589.

BAKALOWICZ M. (1979)

Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.

Thèse de Doctorat de Sciences Naturelles, Université Paris VI, 270 pages.

BAKALOWICZ M. (1994)

Géochimie des eaux et flux de matières dissoutes – L'approche objective du rôle du climat dans la karstogenèse.

In : *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*. Maire R., Pomel S. et Salomon J.-N., Presses universitaires de Bordeaux, p.61-74.

BAKALOWICZ M. et AMINOT A. (1974)

Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Partie III : Premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baget durant le cycle hydrologique 1973. *Annales de Spéléologie*, t. 29, fasc. 4, p. 484-493.

BAKER A. et SMART P.L. (1995)

Recent flowstone growth rates: Field measurements in comparison to theoretical predictions. *Chemical Geology*, n° 122, p. 121-128.

BAKER A., SMART P.L. et EDWARDS R.L. (1995)

Paleoclimate implications of mass spectrometric dating of a british flowstone. *Geology*, vol. 23, n° 4, p. 309-312.

BAKER A., SMART P.L., EDWARDS R.L. et RICHARDS D.A. (1993)

Annual growth banding in a cave stalagmite. *Nature*, vol. 364, 5 août, p. 518-520.

BAKER A., GENTY D., DREYBRODT W., BARNES W.L., MOCKLER N.J. et GRAPES J. (1998)

Testing theoretically predicted stalagmite growth rate with recent annually laminated samples : Implications for past stalagmite deposition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 62, n° 3, p. 393-404.

BALSAM W.L., DEATON B.C., DAMUTH J.E. (1998)

The effects of water content on diffuse reflectance spectrophotometry studies of deep-sea sediment cores. *Marine Geology*, vol. 149, p. 177-189.

BALSEINTE R. (1966)

Climats montagnards et stations climatiques d'altitude en France. Thèse de Doctorat, Paris, 525 pages.

BANNER J.L., MUSGROVE M., ASMEROM Y., EDWARDS R.L. et HOFF J.A. (1996)

High-resolution temporal record of Holocene groundwater chemistry : Tracing links between climate and hydrology. *Geology*, vol. 24, n° 11, p. 1049-1053.

BARD E., ROSTEK F. et MENOT-COMBES G. (2004)

Radiocarbon calibration beyond 20 000 ¹⁴C yr B.P. by means of planktonic foraminifera of the Iberian Margin. *Quaternary Research*, n° 61, p. 204-214.

BARONI C. et OROMBELLI G. (1996)

The alpine Iceman and Holocene climatic change. *Quaternary Research*, n° 46, p. 78-83.

BARRETT L.R. (2002)

Spectrophotometric color measurement in situ in well drained sandy soils. *Geoderma*, vol. 108, p. 49-77.

BASKARAN M. et ILIFFE T.M. (1993)

Age determination of recent cave deposits using excess ²¹⁰Pb – A new technique. *Geophysical Research Letters*, vol. 20, n° 7, p. 603-606.

BASKARAN M., ASBILL S., SANTSCHI P., BROOKS J., CHAMP M., ADKINSON D., COLMER M.R. et MAKEYEV V. (1996)

Pu, ¹³⁷Cs and excess ²¹⁰Pb in Russian Arctic sediments. *E.P.S.L.*, vol. 140, p. 243-257.

BASTIN B. (1978)

L'analyse pollinique des stalagmites : une nouvelle possibilité d'approche des fluctuations climatiques du Quaternaire.

Ann. Soc. Géol. Belg., T. 101, p. 13-19.

BASTIN B. (1982)

Premier bilan de l'analyse pollinique de stalagmites holocènes en provenance de grottes belges. *Revue Belge de Géographie*, fasc. 1, p. 87-97.

BASTIN B., DUPUIS C. et QUINIF Y. (1982)

Etude microstratigraphique et palynologique d'une croûte stalagmitique de la Grotte de la Vilaine Source (Arbre, Belgique) : méthodologie et résultats. *Revue Belge de Géographie*, fasc. 1, p. 109-120.

BASTIN B., CORDY J.-M., GEWELT M. et OTTE M. (1986)

Fluctuations climatiques enregistrées depuis 125 000 ans dans les couches de remplissage de la grotte Scladina (province de Namur, Belgique). *Bull. As. Fr. Et. Quat.*, vol. 1/2, p. 168-177.

BASTIN B., QUINIF Y., DUPUIS C. et GASCOYNE M. (1988)

La séquence sédimentaire de la Grotte de Bohon (Belgique). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, T. 111, p. 51-60.

BAVAUD F. (1998)

Modèles et données – une introduction à la statistique uni-, bi-, et trivariée. Ed. L'Harmattan, 256 pages.

BAZILE F., BAZILE-ROBERT E., DEBARD E. et GUILLERAULT P. (1986)

Le Pléistocène terminal et l'Holocène en Languedoc rhodanien ; domaines continental littoral et marin. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, vol. 27, fasc. 2, p. 95-103.

BEECHING A., BROCHIER J., MANDIER P. et MATTEUCCI S. (1987)

La moyenne vallée du Rhône à l'Holocène : contexte morphodynamique, occupation et circulation humaines, du Mésolithique à l'âge du Bronze. *112^{ème} Congrès National des Sociétés Savantes, Pré-Protohistoire*, Lyon, p. 153-171.

BEGIN Y. et TESSIER L. direction (1998)

Changements environnementaux en milieux alpins et boréaux. *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 52, n°2.

BEIERLE B.D., LAMOUREUX S.F., COCKBURN J.M.H. et SPOONER I. (2002)

A new method for visualizing sediment particle size distributions. *Journal of Paleolimnology*, vol. 27, p. 279-283.

BELLEUDY P. (2001)

Le transport solide en rivière : lacunes de connaissance et besoins méthodologiques. Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 75 pages.

BELLEVILLE L. (1985)

Hydrogéologie karstique : Géométrie, fonctionnement et karstogenèse des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche (Ardèche, Gard). Thèse de Doctorat de Géologie Appliquée, Université Grenoble I, 228 pages.

BERGER A. (1992)

Le climat de la Terre – Un passé pour quel avenir ? Ed. De Boeck-Wesmael, coll. De Boeck Université, 479 pages.

BERTRAN P. (1999)

Dynamique des dépôts de la grotte Bourgeois-Delaunay (La Chaise-de-Vouthon, Charente) : Apport de la micromorphologie.

Paleo, n° 11, p. 9-18.

BERTRAN P. et TEXIER J.-P. (1990)

L'enregistrement des phénomènes pédo-sédimentaires et climatiques dans les dépôts colluviaux d'Aquitaine : l'exemple de la coupe des Tares (Dordogne).
Quaternaire, n° 1, p. 77-90.

BERTRAND P. (2002)

Peut-on évaluer le rôle de la sédimentation sur l'effet de serre à l'échelle de temps des cycles orbitaux ?
C. R. Acad. Sci. Paris, Géosciences, vol. 334, p. 521-528.

BEUSELINCK L., GOVERS G., POESEN J., DEGRAER G. et FROYEN L. (1998)

Grain-size analysis by laser diffractometry : comparison with the sieve-pipette method.
Catena, vol. 32, p. 193-208.

BEYNEN P.E., FORD D.C. et SCHWARCZ H.P. (1997)

Chemical differences between light and dark coloured speleothem.
Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, Switzerland, vol. 1, p. 262.

BICHAIN J.-M., BOUDSOCQ C. et PRIE V. (2004)

Les mollusques souterrains du réseau karstique de Padirac (Lot, France) et micro-répartition de *Bythinella padiraci* Locard, 1903 (Mollusca, Caenogastropoda, Rissooidea).
Karstologia, n° 43, p. 9-18.

BIMBOT R. (1996)

Les énigmes de la radioactivité.
Pour la science, hors série oct 96, p. 18-26.

BINI A., TOGNINI P. et ZUCCOLI L. (1998)

Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du sud des Alpes.
Karstologia, n° 32, p. 7-26.

BINI A., CREMASCHI M., FORTI P. et PERNA G. (1988)

Paleokarstic fills in Iglesias (Sardinia, Italy) : Sedimentary processes and age.
Ann. Soc. Géol. Belg., T. 111, p. 149-161.

BINI A., QUINIF Y., SULES O. et UGGERI A. (1992)

Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte Campo dei Fiori (Lombardie, Italie).
Karstologia, n°19, p. 23-30.

BINTZ P. et PICAVET R. (1995)

Cadre chronologique et culturel de la fin du Tardiglaciaire au début de l'Holocène en Vercors.
In : *Epipaléolithique et Mésolithique en Europe*, Livret-Guide de l'excursion Préhistoire et Quaternaire en Vercors, p. 49-55.

BINTZ P. et VITAL J. (1995)

Les gisements préhistoriques des grottes de Choranche (Isère).
In : *Epipaléolithique et Mésolithique en Europe*, Livret-Guide de l'excursion Préhistoire et Quaternaire en Vercors, p. 86-103.

BINTZ P. (1994)

Les grottes Jean-Pierre 1 et 2 à Saint-Thibaud-de-Couz (Savoie).
Le remplissage sédimentaire (III) et la synthèse des données sur le paléoenvironnement (VII).
Gallia Préhistoire, vol. 36, p. 164-173 et 235-238.

BINTZ P. direction (1995)

Les grottes Jean-Pierre 1 et 2 à Saint-Thibaud-de-Couz (Savoie).
Paléoenvironnement et cultures du Tardiglaciaire à l'Holocène dans les Alpes du Nord.
Gallia Préhistoire, vol. 37, p. 155-157.

BINTZ P., DELANNOY J.-J., NATON H.-G., CARTONNET

M. et TILLET T. (1997)

Environnements karstiques dans les Alpes du Nord et le Jura méridional : Spéléogénèse, sédimentation, climats et archéologie.
Quaternaire, vol. 8, n° 2-3, p. 197-212.

BIOT V. (2003)

Etude géographique d'une forme ancienne de durabilité : l'exemple du tourisme souterrain en France.
Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Savoie, 317 pages.

BJÖRNSSON H. (1998)

Hydrological characteristics of the drainage system beneath a surging glacier.
Nature, vol. 395, 22 octobre, p. 771-774.

BLACHE J. (1931)

Les massifs de la Grande Chartreuse et du Vercors. Etude géographique.
Thèse d'état, vol.1 : Géog. Physique, 478 pages, vol.2 : Géog. Humaine, 514 pages, Université de Grenoble.

BLANC J. et CHAMLEY H. (1975)

Remplissages de réseaux karstiques à la grotte de St-Marcel d'Ardèche (Ardèche, France).
Bull. As. Fr. Et. Quat., vol. 2, p. 71-82.

BLANC J.-J. (1992)

Spéléothèmes zonés et signaux microclimatiques, essai d'interprétation.
Bull. Mus. Anthropol. Préhist. Monaco, n° 35, p. 5-35.

BLANC J.-J. (1997)

Géodynamique et histoire du karst – Application au Sud-Est de la France.
Quaternaire, vol. 8, n° 2-3, p. 91-105.

BLANC J.-J. et MONTEAU R. (1979)

Remplissages sédimentaires indurés dans le karst du massif des Calanques (Marseille).
Actes Symposium Inter. Erosion Karstique, Aix-Marseille-Nîmes, Mémoire n°1 AFK, p. 105-115.

BLANCHARD R. (1938)

Les Alpes Occidentales – Les Préalpes françaises du Nord.
Ed. Arthaud, Tome 1, 335 pages.

BLOCKMANS S., QUINIF Y., BINI A. et ZUCCOLI L. (1999)

Dynamique sédimentaire et paléoenvironnements durant la transition Weischélien – Holocène à partir des dépôts endokarstiques de la grotte de Han-sur-Lesse (Belgique).
Bull. Soc. Géol. Fr., t. 170, n° 6, p. 841-852.

BLOIS W. (2000)

Analyse sédimentologique du lac de Coufin – Grottes de Choranche : Etude paléoenvironnementale et impacts anthropiques.
Mémoire de DEA de Géographie, Université de Savoie, 50 pages.

BLUM P.-A. et BEREST P. (1993)

Mesures des déformations d'une caverne induites par les marées terrestres.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 316, série II, p. 1341-1347.

BOCHERENS H., BILLIOU D. et MARIOTTI A. (1999)

Palaeoenvironmental and palaeodietary implications of isotopic biochemistry of Last Interglacial Neanderthal and mammal bones in Scladina Cave (Belgium).
Journal of Archaeological Science, vol. 26, p. 599-607.

BONNET L., BODERGAT A.-M., CUBAYNES R. REY J. et RUGET C. (1992)

Fluctuations des biocoenoses d'Ostracodes dans le Toarcien

- du Quercy – Relation avec les cycles eustatiques.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 314, série II, p. 953-960.
- BOSAK P. (2003)**
Karst processes from the beginning to the end : How can they be dated ?
Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, vol. 3, p. 1-24.
- BOSSUET G., RUFFALDI P., MAGNY M., RICHARD H. et MOUTHON J. (1996)**
Dynamique et approche quantitative des remplissages fini- et post-würmiens du bassin lacustre de Cerin (Jura, France).
Bull. Soc. Géol. Fr., t. 167, n° 4, p. 483-494.
- BOUCHAOU L., MANGIN A. et CHAUVE P. (2002)**
Turbidity mechanism of water from a karstic spring : example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco).
Journal of Hydrology, vol. 265, p. 34-42.
- BOURGES F., MANGIN A. et D'HULST D. (2001)**
Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques : l'exemple de l'Aven d'Orgnac (Ardèche).
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 333, Série II, p.685-692.
- BOURGIN A. (1952)**
A propos du réseau souterrain du Vercors – Goule noire.
Revue de Géographie Alpine, p. 307-312.
- BOUROCHE J.M. et SAPORTA G. (2002)**
L'analyse des données.
Ed. PUF, QJ n° 1854, 8^{ème} édition, 126 pages.
- BOUTRON C., ROSMAN K., BARBANTE C., BOLSHOV M., ADDAMS F., HONG S. et FERRARI C. (2004)**
L'archivage des activités humaines par les neiges et glaces polaires : le cas du plomb.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 336, série II, p. 847-867.
- BRAVARD J.-P. (1983)**
Les sédiments fins des plaines d'inondations dans la vallée du Haut-Rhône (Approche qualitative et spatiale).
Revue de Géographie Alpine, 1983, n°4, p. 363-379.
- BRAVARD J.-P. (1993)**
Quelques caractères de la morphodynamique fluviale des gorges de l'Ardèche.
In : *Géomorphologie et Aménagement de la Montagne, Hommage à Pierre Gabert.*, Ed. CNRS, Caen, p. 23-32.
- BRAVARD J.-P., AMOROS C. et JACQUET C. (1986)**
Reconstitution de l'environnement de sites archéologiques fluviaux par une méthode interdisciplinaire associant la géomorphologie, la zoologie et l'écologie.
Revue d'Archéométrie, n° 10, p. 43-55.
- BRAVARD J.-P. et GILVEAR D.-J. (1983)**
Structure hydrogéomorphologique des hydrosystèmes.
In : *Hydrosystèmes fluviaux*, Amoros C. et Petts G.E., Ed. Masson, Paris, p. 83-103.
- BRAVARD J.-P. et PEIRY J.-L. (1999)**
The C/M pattern as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum.
In : *Floodplains : Interdisciplinary approaches*, Marriott S.B. & Alexander J., Geological Society of London, p. 259-268.
- BRAVARD J.-P. et PETIT F. (1997)**
Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial.
Ed. Armand Colin, 220 pages.
- BRAVARD J.-P., BARTHELEMY L., BROCHIER J., JOLY-SAAD M.-C., ROBERTS M., THIEBAULT S., ASTRADE L., EVIN J., LANDON N. et PETIOT R. (2003)**
Mouvements de masse et paléoenvironnement quaternaire : les paléo-lacs de Boulc (Haut-Diois, Alpes, France).
Revue de Géographie Alpine, vol. 1, p. 9-27.
- BRIFFA K.R. (2000)**
Annual climate variability in the Holocene : interpreting the message of ancient trees.
Quaternary Science Reviews, vol. 19, p. 87-105.
- BRIFFA K.R., OSBORN T.J. et SCHWEINGRUBER F.H. (2004)**
Large-scale temperature inferences from tree-rings : a review.
Global and Planetary Change, vol. 40, p. 11-26.
- BRIFFA K.R., JONES P.D., BARTHOLIN T.S., ECKSTEIN D., SCHWEINGRUBER F.H., KARLEN W., ZETTERBERG P. et ERONEN M. (1992)**
Fennoscandian summers from AD 500 : temperature changes on short and long timescales.
Climate Dynamics, n° 7, p. 111-119.
- BRUTHANS J. et ZEMAN O. (2003)**
Factors controlling exokarst morphology and sediment transport through caves : comparison of carbonate and salt karst.
Acta Carsologica, vol. 7, p. 83-99.
- BRUXELLES L. (2001)**
Dépôts et altérites des plateaux du Larzac central : Causes de l'Hospitalet et de Campestre (Aveyron, Gard, Hérault) – Evolution morphogénétique, conséquences géologiques et implications pour l'aménagement.
Thèse de 3^{ème} cycle, Milieux physiques méditerranées, Univ. Aix-Marseille I, 266 pages.
- BRUXELLES L., AMBERT P., GUENDON J.-L. et QUINIF Y. (1997)**
Les carbonates endokarstiques témoins de l'évolution superficielle du massif et de sa géodynamique interne : l'exemple du Causse du Larzac (Grands Causses, Aveyron).
Et. Géogr. Phys., Suppl. n° XXVI, p. 159-162.
- BRUYERE E., TURQUIN M.-J. et REYGROBELLET J.-L. (1993)**
Le traçage biologique, une nouvelle approche du milieu souterrain aquatique.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 317, série II, p. 479-485.
- BUFFIN-BELANGER T., ROY A.G. et KIRKBRIDE A.D. (2000)**
Vers l'intégration des structures turbulentes de l'écoulement dans la dynamique d'un cours d'eau à lit de graviers.
Géographie Physique et Quaternaire, vol. 54, n° 1, p. 105-117.
- BUHMANN D. et DREYBRODT W. (1985a)**
The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 1. Open system.
Chemical Geology, n° 48, p. 189-211.
- BUHMANN D. et DREYBRODT W. (1985b)**
The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 2. Closed system.
Chemical Geology, n° 53, p. 109-124.
- BUNTE K. et ERGENZINGER P. (1989)**
New tracer techniques for particles in gravel bed rivers.
Bull. Soc. Géog. Liège, n° 25, p. 85-90.
- BURGA C. (1995)**
Végétation et paléoclimatologie de l'Holocène moyen d'une ancienne tourbière située au front du Glacier du Rutor, 2510 m, vallée d'Aoste, Italie.
Revue de Géographie Alpine, 1995, n°1, p. 9-16.
- BURHENNE M. (1988)**
Apport de l'étude des sédiments à la compréhension de la stratigraphie et du paléoclimat de dépôts quaternaires en

grotte : le trou Jadot (Province de Liège, Belgique).
Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 113-123.

C

CABON-CANDELIER M. (1990)

Problématique d'une histoire des fluctuations climatiques et de leur spatialisation en cartographie.
Géopoint 90, Groupe Dupont, Université d'Avignon, p. 87-92.

CAILLAULT S., HAFFNER D. et KRATTINGER T. (1997)

Spéléologie dans le Vercors.
Ed. Edisud, Aix en Provence, p. 80-83.

CAILLERE S., HENIN S. et RAUTUREAU M. (1982)

Minéralogie des Argiles – Classification et nomenclature.
Ed. Masson, 2^{ème} édition, 190 pages.

CAMPY M. (1990)

L'enregistrement du temps et du climat dans les remplissages karstiques : l'apport de la sédimentologie.
Karstologia Mémoires n° 2, Colloque Remplissages Karstiques et Paléoclimats, p. 11-22.

CAMPY M., LAMY au ROUSSEAU R. et NICOUD G. (1990)

Modalités de la déglaciation würmienne dans le Nord-Ouest des Alpes (Nord Dauphiné, Savoie, bassin lémanique).
Geodinamica Acta, vol. 4, n° 4, p. 211-225.

CAMPY M., BINTZ P., EVIN J., LAVILLE H. et CHALINE J. (1992)

Enregistrement sédimentaire dans les remplissages karstiques français au cours du dernier cycle climatique.
C. R. Acad. Sci. Paris, tome 315, série II, p. 1509-1516.

CAMUS H. (2003)

Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée Sud-Cévenole - Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats.
Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Bordeaux III, 680 pages.

CANNON M.J., PERCIVAL D.B., CACCIA D.C., RAYMOND G.M. et BASSINGHTWAIGHTE J.B. (1997)

Evaluating scaled windowed variance methods for estimating the Hurst coefficient of times series.
Physica A, vol. 241, p. 606-626.

CANTILLANA R., QUINIF Y. et MAIRE R. (1986)

Uranium-thorium dating of stalagmites applied to study the Quaternary of Pyrénées (France) : The example of the Gouffre de la Pierre St Martin.
Chemical Geology, n° 57, p. 137-144.

CARCAILLET C. (2001)

Soil particles reworking evidences by AMS ¹⁴C dating of charcoal.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 332, Série II, p.21-28.

CARCAILLET C., ALMQUIST H., ASNONG H., BRADSHAW R.H.W., CARRION J.S., GAILLARD M.-J., GAJEWSKI K., HAAS J.N., HABERLE S.G., HADORN P., MULLER S.D., RICHARD P.J.H., RICHOSZ I., ROSCH M., SANCHEZ-GONI M.F., STEDINGK H., STEVENSON A.C., TALON B., TARDY C., TINNER W., TRYTERUD E., WICK L. et WILLIS K.J. (2002)

Holocene biomass burning and global dynamics of the carbon cycle.
Chemosphere, n° 49, p. 845-863.

CARRANZA-EDWARDS A., ROSALES-HOZ L., URRUTIA-FUCUGAUCHI J., SANDOVAL-FORTANEL A., MORALES DE LA GARZA E. et LOZANO SANTA CRUZ R. (2005)

Geochemical distribution pattern of sediments in an active continental shelf in Southern Mexico.
Continental Shelf Research, vol. 25, p. 521-537.

CASTANY G. (1982)

Principes et méthodes de l'hydrogéologie.
Ed. Dunod, 238 pages.

CAVILLE A. (1960)

Les argiles des grottes – Introduction à l'étude des sédiments souterrains.
Annales de Spéléologie, Colloque sur les argiles des grottes, t. 15, fasc. 2, p. 383-400.

Centre National de la Recherche Scientifique (1995)

Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement - Unité propre de recherche du CNRS n°5151, *Rapport d'Activité 1991-1995*.
Grenoble, Ed. du CNRS, 187 pages.

CHADULE (Groupe) (1994)

Initiation aux pratiques statistiques en Géographie.
Ed. Masson, Coll. Géographie, 203 pages.

CHALINE J. (1972)

Le Quaternaire – L'histoire humaine dans son environnement.
Ed. Doin, 338 pages.

CHAMLEY H. (1987)

Sédimentologie.
Ed. Dunod, Paris, 175 pages.

CHAMLEY H. (1988)

Les milieux de sédimentation.
Ed. BRGM, coll. Tec&Doc, 173 pages.

CHAPMAN M.R. et SHACKLETON N.J. (1998)

What level of resolution is attainable in a deep-sea core ? Results of a spectrometer study.
Paleoceanography, vol. 13, n° 4, p. 311-315.

CHAPRON E. (1999)

Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'avant-pays alpin (Lac du Bourget) durant le Quaternaire récent.
Thèse de 3^{ème} cycle, Universités de Savoie et Lille I, 261 pages.

CHARDON M. (1982)

Les glaciations quaternaires et leur influence sur le relief karstique des Préalpes : Vercors et Chartreuse.
Revue de Géographie Alpine, t. 70, n° 3, p. 207-214.

CHARDON M. (1989)

Les karsts de l'avant-pays alpin au Nord des Alpes occidentales françaises : le creusement glaciaire des réseaux souterrains.
Karstologia, n°13, p. 21-32.

CHARDON M. (1995)

L'impact anthropique dans le Vercors (France).
Acta Carsologica, Slovenska Akademija, vol. 24, p. 157-168.

CHEMLA G. (1995)

Statistique appliquée à la Géographie.
Ed. Nathan Université, Coll. Fac Géographie, 156 pages.

CHOPPY J. (1963)

Spéléologie du département de l'Isère.
CDS Isère, Coll. Archives et Documents n°1, Grenoble 1991, p. 624-625.

CHOPPY J. (1988)

Evolution des remplissages plastiques des cavités souterraines.
Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 141-147.

CHOPPY J. (1995)

Visite du nouvel Orgnac.
Fédération française de Spéléologie, *Actes de la 5^{ème} rencontre d'octobre*, Orgnac, p. 130.

CIBOIS P. (2000)

L'analyse factorielle.
Ed. PUF, QSJ n° 2095, 5^{ème} édition, 126 pages.

CLAUZON G. (1982)

Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du « desiccated deep-basin model » [Hsü, Cita et Ryan, 1973].
Bull. Soc. Géol. Fr., tome 24, n°3, p. 597-610.

CLAUZON G. (1996)

Limites de séquences et évolution géodynamique.
Géomorphologie, n° 1, p. 3-22.

CLOTES J., CHAUVET J.-M., BRUNEL-DESCHAMPS E., HILLAIRE C., DAUGAS J.-P., ARNOLD M., CACHIER H., EVIN J., FORTIN P., OBERLIN C., TISNERAT N. et VALLADAS H. (1995)

Les peintures paléolithiques de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche, France) : datations directes et indirectes par la méthode du radiocarbone.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 320, série IIa, p. 1133-1140.

CLOTES J. direction (2001)

La grotte Chauvet : l'art des origines.
Ed. Le Seuil, 224 pages.

COJAN I. et RENARD M. (1999)

Sédimentologie.
Ed. Dunod, coll. Sciences Sup, 418 pages.

COLLIGNON B. (1988)

Spéléologie : approches scientifiques.
Ed. Edisud, Aix-en-Provence, 238 pages.

CONDOMINES M. (2003)

²²⁶Ra-²¹⁰Pb dating of a young hydrothermal stalagmite and possible high resolution record of palaeohydrologic conditions.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 55.

COQUE R. (1993)

Géomorphologie.
Ed. Armand Colin, Coll. U Géographie, 5^{ème} édition, 495 pages.

COQUEREL G., LEFEBVRE D., RODET J. et STAIGRE J.-C. (1993)

La grotte du Funiculaire (Le mesnil sous Jumièges, Seine-Maritime) : spéléogénèse et étude d'un remplissage ferromanganique.
Karstologia, n° 22, p. 35-42.

CORBEL J. (1956)

Le karst du Vercors.
Revue de Géographie de Lyon, vol. 31, n°3, p. 221-241.

CORBEL J. (1959)

Erosion en terrain calcaire – Vitesse d'érosion et morphologie.
Annales de Géographie, n° 366, p. 97-120.

CORBEL J. (1964)

Les changements du climat au Quaternaire dans les Alpes françaises.
Réédité à partir du *Report of the VIth International Congress on Quaternary Warsaw*, 1961, vol. II, Palaeoclimatological Section, p.263-272.

CORBONNOIS J. (1991)

Crues et transports solides dans le ruisseau de Vezon

(Lorraine).
Mosella, XVIII, p. 161-188.

CORTIJO E., DUPLESSY J.-C., LABEYRIE L., DUPRAT J. et PAILLARD D. (2005)

Heinrich events : hydrological impact.
C. R. Acad. Sci. Paris, série II, sous presse.

COTILLON P. et BUSNARDO R. (1984)

Dynamique sédimentaire sur la marge cévenole au Crétacé.
Colloque National Géologie Profonde de la France, Thème 11 : Subsidence et Diagenèse (Ardèche), Ed. du B.R.G.M., p. 23-34.

CREGUT E. et FOSSE P. (2001)

Holocene brown bears (*Ursus arctos* L.) in natural traps : exceptional sites of Mont Ventoux (Vaucluse, France).
Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe Coruña, vol. 26, p. 325-340.

CREMER J.-F., LONG B., LOCAT J. et DESROSIERS G. (2000)

Application de la tomodynamométrie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans le Saguenay après la crue de 1996.
53^{ème} Conférence Canadienne de Géotechnique, Montréal, 7 pages.

D**DANSGAARD W., JOHNSEN S.H., CLAUSEN H.B., DAHL-JENSEN D., GUNDESTROP N.S., HAMMER C.U., HVIDBERG C.S., STEFFENSEN J.P., SVEINBJORNSDOTTIR A.E., JOUZEL J. et BOND G. (1993)**

Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record.
Nature, vol. 364, 15 juillet, p. 218-220.

DEARING J.A., LIVINGSTONE I.P., BATEMAN M.D. et WHITE K. (2001)

Palaeoclimate records from OIS 8.0-5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, Southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating.
Quaternary International, vol. 76/77, p. 43-56.

DEBARD E. (1988)

Le quaternaire du Bas-Vivarais d'après l'étude des remplissages d'avens, de porches de grottes et d'abris sous roche – Dynamique sédimentaire, paléoclimatologie et chronologie.
Thèse publiée dans les Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, Université Lyon I, n° 103, 317 pages.

DEBARD E. (1994)

Les sédiments de l'affluent Robert de Joly et leur histoire.
Spelunca Mémoires, n° 20, p. 105-109.

DEBARD E. (1997a)

Géochronologie des grottes : contexte et sédiments.
In : *Dynamique du paysage – Entretiens de Géochronologie*, Bravard J.-P. & Prestreau M., Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes, n° 15, p. 11-22.

DEBARD E. (1997b)

Les remplissages karstiques du Bas-Vivarais : Karstogénèse, Sédimentogénèse et Archéologie.
Quaternaire, vol. 8, n° 2-3, p. 305-317.

DEBARD E. (2002)

Expérience de l'Aven Marzal II (St Remèze – Ardèche) : les remplissages karstiques, archive scientifique de premier ordre.

Actes du Colloque « Echange d'expériences en matière de protection », St Marcel d'Ardèche, p. 39-44.

DEBARD E. et PASTRE J.-F. (1988)

Un marqueur chronostratigraphique du Pléistocène moyen à la périphérie du Massif Central : la retombée à clinopyroxène vert du Sancy dans le site acheuléen d'Orgnac III (Bas-Vivarais, SE France).

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 306, série II, p. 1515-1520.

DEBARD E., BAZILE F., BAZILE-ROBERT E., GILLES R. et GUILLERAULT P. (1986)

Les oscillations climatiques entre 125 000 ans et le maximum glaciaire dans le Bas-Vivarais (S-E de la France).

Bull. As. Fr. Et. Quat., vol. 1/2, p. 47-55.

DEBARD E., FAURE M., GUERIN C., ARGANT J. et JEANNET M. (1999)

Le gisement pléistocène de l'Aven Flahaut à St Remèze (Ardèche).

Ardèche Archéologie, n° 16, p. 1-6.

DEBARD E., DELANNOY J.-J., KERVAZO B., FERRIER C. et PERRETTE Y. (2002)

Grotte Chauvet, Etude géologique et karstologique de la cavité. In : *Rapport annuel d'opération*, 16 p.

DEBARD E., DELANNOY J.-J., FERRIER C., KERVAZO B., PERRETTE Y. et PERROUX A.-S. (2003)

Les études karstogéniques menées dans la grotte Chauvet Premiers résultats et implications paléoenvironnementales. *Revue de la Société de Préhistoire Ariégeoise*, n° 57, p. 29-52.

DEBELMAS J. (1983)

Alpes du Dauphiné.

Ed. Masson, Guides géologiques régionaux, 198 pages.

DEBELMAS J. (1995)

Aperçu sur la géologie du Vercors.

In : *Epipaléolithique et Mésolithique en Europe*, Livret-Guide de l'excursion Préhistoire et Quaternaire en Vercors, p. 14-16.

DEBLAERE C. et GULLENTOPS F. (1986)

Lithostratigraphie de la grotte Scladina.

Bull. As. Fr. Et. Quat., vol. 1/2, p. 178-181.

DEFLEUR A., CREGUT-BONNOURE E., DESCLAUX E. et THINON M. (2001)

Présentation paléo-environnementale du remplissage de la Baume Moula-Guercy à Soyons (Ardèche) : implications paléoclimatiques et chronologiques.

L'Anthropologie, vol. 105, p. 369-408.

DELANNOY J.-J. (1981)

Le Vercors septentrional - le karst de surface et le karst souterrain - Recherches géomorphologiques sur un karst de moyenne montagne alpine.

Thèse de 3^{ème} cycle, Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 517 pages.

DELANNOY J.-J. (1982a)

La « Karstographie » souterraine.

Revue Belge de Géographie, 106^{ème} année, fasc. 1, p. 61-68.

DELANNOY J.-J. (1982b)

Les variations spatio-temporelles de la corrosion karstique dans un massif de moyenne montagne : Le Vercors.

Revue de Géographie Alpine, t. 70, n° 3, p. 241-255.

DELANNOY J.-J. (1984)

Le Vercors : un massif de la moyenne montagne alpine.

Karstologia, 1^{er} semestre 1984, n°3, p. 34-45.

DELANNOY J.-J. (1985)

Le karst : un témoin des mutations socio-économiques dans la Sierra de Zongolica (Mexique).

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 108, p. 77-83.

DELANNOY J.-J. (1986a)

Contribution à l'étude des circulations aquifères dans le géosystème Coulmes-Choranche - Présentation du site expérimental de la grotte de Couffin.

Revue de Géographie Alpine, t. 74, n° 1-2, p. 83-92.

DELANNOY J.-J. (1986b)

Réflexion sur un géosystème forestier de moyenne montagne : le modèle du massif des Coulmes - cirque de Choranche (Vercors).

Travaux U.R.A. 903 C.N.R.S., Institut de Géographie Alpine de Grenoble, n° 15, p. 21-26.

DELANNOY J.-J. (1992)

Apport de l'endokarst dans la reconstitution morphogénique d'un karst. Exemple de l'Antre de Vénus (Vercors, France).

Travaux U.R.A. 903 CNRS, n° XXI, p. 47-59.

DELANNOY J.-J. (1995)

La spécificité karstique du massif du Vercors : la contribution du karst dans la reconstitution paléogéographique et paléoenvironnementale d'un massif calcaire.

In : *Epipaléolithique et Mésolithique en Europe*, Livret-Guide de l'excursion Préhistoire et Quaternaire en Vercors, p. 20-27.

DELANNOY J.-J. (1997)

Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie).

Thèse d'Etat de Géographie, Université Grenoble I, 612 pages.

DELANNOY J.-J., GUENDON J.-L. et QUINIF Y. (1988)

Les remplissages spéléologiques : un apport à la connaissance de la karstogenèse du massif des Coulmes (Vercors, Alpes).

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 21-38.

DELANNOY J.-J. et HAFFNER D. (1987)

Spéléo sportive dans le Vercors.

Ed. Edisud, Aix en Provence, p. 51-55.

DELANNOY J.-J. et PERROUX A.-S. (2002)

Les effets induits du karst sur le régime hydrologique des montagnes enneigées.

Séminaire International d'Hydrologie nivale en Méditerranée - Beyrouth.

DELANNOY J.-J., HOLLIGER P., AUBERT C., HAFFNER D., KRATTINGER T. et POMOT C. (1986)

Les apports du chronomètre géologique ²³⁴U-²³⁰Th dans la karstogenèse de la Grande Moucherolle-Rochers de la Balme (Vercors).

Karstologia, n° 7, p. 11-20.

DELANNOY J.-J., GUENDON J.-L., MAGNIN F. et QUINIF Y. (1989)

Datations de travertins : les exemples de Meyrargues et de Tolox.

Spéléochronos n°1, p. 29-32.

DELANNOY J.-J., PEIRY J.-L., PERRETTE Y. et DESTOMBES J.-L. (1999a)

Articulation des aspects expérimentaux, théoriques et méthodologiques de l'étude d'un système karstique à des fins environnementales : le laboratoire de Choranche.

Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence, p. 77-82.

DELANNOY J.-J., PERRETTE Y., DESTOMBES J.-L. et PEIRY J.-L. (1999b)

Le Vercors - Itinéraire de Sainte-Eulalie-en-Royans aux grottes de Choranche.

Karst 99, colloque européen, Livret guide des excursions, Cahiers savoisiens de Géographie, p. 75-108.

- DELANNOY J.-J., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B. et PERRETTE Y. (2001)**
La cartographie morphologique souterraine : Apports aux reconstitutions paléogéographiques et paléoenvironnementales. Application à la Grotte Chauvet (Ardèche-France).
Quaternaire, vol. 12, n° 4, p. 235-248.
- DELANNOY J.-J., BRUNEL E., CHAUVET J.-M. et HILLAIRE C. (2002)**
Autre regard sur la Grotte Chauvet : des formes spéléologiques à l'histoire du relief ardéchois.
Tube, Revue du CDS Ardèche.
- DELANNOY J.-J., PERRETTEY., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERROUX A.-S., JAILLET S. Et QUINIF Y. (2004)**
Intérêt de l'approche morphogénique pour la compréhension globale d'une grotte à haute valeur patrimoniale : la grotte Chauvet (Ardèche, France).
Karstologia, n° 44, p. 25-42.
- DERRUAU M. (1988)**
Précis de Géomorphologie.
Ed. Masson, 7^{ème} édition refondue, 533 pages.
- DESMET M., SCHAAF A. et KARPOFF A.-M. (1995)**
Analogies et différences des spectres chimiques dans un cycle sédimentaire d'origine climatique : l'exemple du Pléistocène supérieur du site ODP 852C.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 320, série II, p. 499-506.
- DESMET M. et SCHAAF A. (1998)**
Géochimie des sédiments plio-quadernaires dans l'océan Pacifique équatorial, Leg ODP 138.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 327, série II, p. 413-418.
- DETRAIN L., GUADELLI J.-L., KERVAZO B., BEYER C., BOURGUIGNON L., DIOT M.-F., LEGRAND Y., LEROYER C. et LIMONDIN N. (1996)**
La fouille de sauvetage du Musée National de Préhistoire des Eyzies (Dordogne) : Les données de l'archéométrie et leurs implications.
Actes du Colloque d'Archéométrie, Périgueux, supplément à la Revue d'Archéométrie, p. 205-210.
- DEVAUX N. (1999)**
Etude et modélisation du fonctionnement du système karstique de Choranche.
Mémoire de DEA, Université Grenoble I, 45 pages.
- DEVER L., DURAND R., FONTES J.-C. et VACHIER P. (1982)**
Géochimie et teneurs isotopiques des systèmes saisonniers de dissolution de la calcite dans un sol sur craie.
Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 46, p. 1947-1956.
- DIAZ DEL OLMO F., GUENDON J.-L., BAENA ESCUDE R. et DELANNOY J.-J. (1997)**
Crono-secuencias de travertinos recientes : estudio comparado del SE. de Francia y S. de Espana.
Et. Géogr. Phys., Suppl. n° XXVI, p. 95-97.
- DILL H. (1998)**
A review of heavy minerals in clastic sediments with case studies from the alluvial-fan through the nearshore-marine environments.
Earth-Science Reviews, vol. 45, p. 103-132.
- DILLON P.J. et EVANS H.E. (2001)**
Comparison of iron accumulation in lakes using sediment core and mass balance calculations.
The Science of the Total Environment, vol. 266, p. 211-219.
- DRAKE J.J. (1983)**
The effects of geomorphology and seasonality on the chemistry of carbonate groundwater.
Journal of Hydrology, n° 61, p. 223-236.
- DREYBRODT W. (1980)**
Deposition of calcite from thin films of natural calcareous solutions and the growth of speleothems.
Chemical Geology, n° 29, p. 89-105.
- DREYBRODT W. (1981)**
The kinetics of calcite precipitation from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems : Revisited.
Chemical Geology, n° 32, p. 237-245.
- DREYBRODT W. (1988)**
Processes in karst systems.
Ed. Springer-Verlag, Berlin, 288 pages.
- DRUCKER D., BOCHERENS H. et BILLIOU D. (2003)**
Evidence of shifting environmental conditions in Southwestern France from 33 000 to 15 000 years ago derived from carbon-13 and nitrogen-15 natural abundances in collagen of large herbivores.
E.P.S.L., vol. 216, p. 163-173.
- DRYSDALE R.N., PIEROTTI L., PICCINI L. et BALDACCI F. (2001)**
Suspended sediments in karst spring waters near Massa (Tuscany, Italy).
Environmental Geology, vol. 40, p. 1037-1050.
- DRYSDALE R.N., ZANCHETTA G., HELLSTROM J.C., FALLICK A.E., ZAO J.-X., ISOLA I., BRUSCHI G. (2004)**
Palaeoclimatic implications of the growth history and stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) geochemistry of a Middle to Late Pleistocene stalagmite from central-western Italy.
E.P.S.L., vol. 227, p. 215-229.
- DUBLYANSKY Y.V. (1997)**
Hydrothermal cave minerals.
In : *Cave Minerals of the World*, 2d edition, National Speleological Society, p. 252-255.
- DUBREUIL V. et MARCHAND J.-P. (1997)**
Le climat, l'eau et les hommes.
Presses universitaires de Rennes, 333 pages.
- DUCHADEAU-KERVAZO C. et KERVAZO B. (1983)**
Confrontation de plusieurs types de courbes climatiques et corrélations avec quelques dépôts du Quaternaire récent.
Bull. As. Fr. Et. Quat., vol. 1, p. 25-38.
- DUCHADEAU-KERVAZO C., KERVAZO B. et O'YL W. (1986)**
Approche des oscillations climatiques entre 135 000 B.P. et le maximum glaciaire par analyse des périodicités et implications.
Bull. As. Fr. Et. Quat., vol. 1-2, p. 70-77.
- DUFRESNE D.P. et DRAKE C.W. (1999)**
Regional groundwater flow model construction and wellfield site selection in a karst area, Lake City, Florida.
Engineering Geology, vol. 52, p. 129-139.
- DUPLESSY J.-C. (1992)**
Les certitudes des paléoclimatologues.
La Recherche, mai 1992, vol. 23, n°243, p. 558-565.
- DUPLESSY J.-C., LALOU C., DELIBRIAS G. et VAN NGUYEN H. (1972)**
Datations et études isotopiques des stalagmites – Application aux paléotempératures.
Annales de Spéléologie, t. 27, fasc. 3, p. 445-464.
- DURAND D. (1979)**
La Systémique.

Ed. PUF, QSJ n°1795, 110 pages.

DZIKOWSKI M., DELAY F., SAUTY J.-P., CRAMPON N. et DE MARSILY G. (1995)

Convolution à débit variable à partir des réponses de traçages artificiels ; application à un système karstique (Causse de Gramat, Lot, France).

Journal of Hydrology, vol. 164, p. 305-324.

E

EK C. (1979)

Variations saisonnières des teneurs en CO₂ d'une grotte belge : le Trou Joney à Comblain-au-Pont.

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 102, p. 71-75.

EK C. et QUINIF Y. (1988)

Les sédiments détritiques des grottes : aperçu synthétique.

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 1-7.

EKMAN S.R. (1998)

Pleistocene pollen stratigraphy from borehole 81/34, Devil's Hole area, Central North Sea.

Quaternary Science Reviews, vol. 17, p. 855-869.

ELLWOOD B.B., PETRUSO K.M. et HARROLD F.B. (1997)

High-resolution paleoclimatic trends for the Holocene identified using magnetic susceptibility data from archaeological excavations in caves.

Journal of Archaeological Science, vol. 24, p. 569-573.

ELLWOOD B.B., HARROLD F.B., BENOIST S.L., THACKER P., OTTE M., BONJEAN D., LONG G.J., SHAHIN A.M., HERMANN R.P. et GRANDJEAN F. (2004)

Magnetic susceptibility applied as an age-depth-climate relative dating technique using sediments from Scladina Cave, a Late Pleistocene cave site in Belgium.

Journal of Archaeological Science, vol. 31, p. 283-293.

ERASO A. (1975)

Le rôle des facteurs physico-chimiques dans le processus de la karstification.

Annales de Spéléologie, t. 30, fasc. 4, p. 567-580.

ESCOFIER B. et PAGES J. (1998)

Analyses factorielles simples et multiples – Objectifs, méthodes et interprétation.

Ed. Dunod, 3^{ème} édition, 284 pages.

EVIN J. (1994)

Les grottes Jean-Pierre 1 et 2 à Saint-Thibaud-de-Couz (Savoie).

Les datations radiométriques (IV).

Gallia Préhistoire, vol. 36, p. 183-189.

F

FABRE J.P. et PERRINEAU A. (2001)

Mise en évidence du phénomène du "renard" : exemple des crues exceptionnelles des sources du Boulet-Blagour (Causse de Martel, Lot).

Karstologia, n° 38, p. 41-48.

FAIRCHILD I.J., BORSATO A., TOOTH A.F., FRISIA S., HAWKESWORTH C.J., HUANG Y., MACDERMOTT F. et SPIRO B. (2000)

Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters : Implications for speleothem climatic record.

Chemical Geology, n° 166, p. 255-269.

FARGE M. et RABREAU G. (1988)

Transformée en ondelettes pour détecter et analyser les structures cohérentes dans les écoulements turbulents

bidimensionnels.

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 307, série II, p. 1479-1486.

FAUQUETTE S., GUIOT J. et SUC J.-P. (1998)

A method for climatic reconstruction of the Mediterranean Pliocene using pollen data.

Palaeo, n° 144, p. 183-201.

FAUQUETTE S., SUC J.-P., GUIOT J., DINIZ F., FEDDI N., ZHENG Z., BESSAIS E. et DRIVALIARI A. (1999)

Climate and biomes in the West Mediterranean area during the Pliocene.

Palaeo, n° 152, p. 15-36.

FERRARI C., CLOTTEAU T., THOMPSON L.G., BARBANTE C., COZZI G., CESCONE P., HONG S., MAURICE-BOURGOIN L., FRANCOU B. et BOUTRON C. (2001)

Heavy metals in ancient tropical ice : initial results.

Atmospheric Environment, vol. 35, p. 5809-5815.

FERRARI C., DOMMERGUE A., VEYSSEYRE A., PLANCHON F. et BOUTRON C. (2002)

Mercury speciation in the French seasonal snow cover.

The Science of the Total Environment, vol. 287, p. 61-69.

FERRARI C., DOMMERGUE A., BOUTRON C., SKOV H., GOODSITE M. et JENSEN B. (2004)

Nighttime production of elemental gaseous mercury in interstitial air of snow at Station Nord, Greenland.

Atmospheric Environment, vol. 38, n°1, p. 2727-2735.

FERREIRA D., DOLE-OLIVIER M.-J., MALARD F., DEHARVENG L. et GIBERT J. (2003)

Faune aquatique souterraine de France : base de données et éléments de biogéographie.

Karstologia, n° 42, p. 15-22.

FERRIER C. (1988)

Quelques aspects de l'évolution de la sédimentation quaternaire dans le karst de Karloukovo (Bulgarie du Nord).

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 79-89.

FERRIER C. et LEBLANC J.-C. (1990)

Le Bernat, un site paléontologique du Würm ancien en Gironde. Premiers résultats de l'étude géologique et karstique.

Paleo, n° 2, p. 137-142.

FERRIER C. et KERVAZO B. (1999)

Réflexions sur la variabilité de l'enregistrement sédimentaire en entrée de grotte.

Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence, p. 89-94.

FERRIER C. et KERVAZO B. (2001)

Signification dynamique et environnementale de la séquence solutréenne et badegoulienne du gisement du Placard (Charente).

Notes et Comptes-rendus du groupe Régionalisation du Périglacière, Assoc. Fr. Périglacière, vol. 8, 6 pages.

FERRIER C., DEBARD E., KERVAZO B., PERROUX A.-S., DELANNOY J.-J. et PERRETTE Y. (2005)

Grotte Chauvet – Salle Hillaire et Salle du Crâne : Contexte sédimentologique des vestiges d'origine humaine et animale. Recherches pluridisciplinaires dans la Grotte Chauvet, Journées SPF, Octobre 2003.

Karstologia Mémoires, n° 11, p. 35-42.

FOLK R.L. et WARD W. (1957)

Brazos River Bar : a study of significance of grain size parameters.

Journal of Sedimentary Petrology, vol. 27, p. 3-26.

FORD D. (1997)

Dating and palaeo-environmental studies of speleothems.
In : *Cave Minerals of the World*, 2d edition, National Speleological Society, p. 271-284.

FORD D. et WILLIAMS P. (1991)
Karst geomorphology and hydrology.
Ed. Chapman & Hall, Londres, 601 pages.

FOUCAULT A. (1993)
Climat, histoire et avenir du milieu terrestre.
Ed. Fayard, Coll. Le Temps des Sciences, 328 pages.

FRANCUS P. (1998)
An image-analysis technique to measure grain-size variation in thin section of soft clastic sediments.
Sedimentary Geology, vol. 121, p. 289-298.

FRIHY O.E. et DEWIDAR K.M. (2003)
Patterns of erosion/sedimentation, heavy mineral concentration and grain size to interpret boundaries of littoral sub-cells of the Nile Delta, Egypt.
Marine Geology, vol. 199, p. 27-43.

FRISIA S., BORSATO A., SOMOGYI A. et SUSINI J. (2003)
Synchrotron X-ray fluorescence analysis of annually laminated stalagmites.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 73.

G

GACHE R. (1936)
Exploration du bassin d'Autrans-Méaudre.
Spelunca n°7, p. 31-35.

GALL J.-C. (1976)
Environnements sédimentaires anciens et milieux de vie – Introduction à la Paléocologie.
Ed. Doin, Paris, 230 pages.

GAUCHON C. (1997)
Des cavernes et des hommes.
Karstologia Mémoire, n° 7, 248 p.

GAUTAM P., RAJ PANT S. et ANDO H. (2000)
Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles : a case study from Pokhara valley, Central Nepal.
Journal of Applied Geophysics, vol. 45, p. 97-110.

GAUTIER F., CLAUZON G., SUC J.-P., CRAVATTE J. et VIOLANTI D. (1994)
Age et durée de la crise de salinité messinienne.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 318, série II, p. 1103-1109.

GAY J.-C. (1995)
Les discontinuités spatiales.
Ed. Economica, Coll. Poche Géographie, 112 pages.

GENTY D. (1992)
Les spéléothèmes du tunnel de Godarville (Belgique) – un exemple exceptionnel de concrétionnement moderne – intérêt pour l'étude de la cinétique de la précipitation de la calcite et de sa relation avec les variations d'environnement.
Spéléochronos n°4, p. 3-30.

GENTY D. (1993)
Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites – Intérêts pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 317, série II, p. 1229-1236.

GENTY D. (1994a)

Corrélation entre l'épaisseur des lamines de deux stalagmites modernes et les données météorologiques.
Spéléochronos, n°6, p. 35-40.

GENTY D. (1994b)
Les réservoirs carbonatés : un exemple de milieu enregistreur confiné.
In : *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale.* Maire R., Pomel S. et Salomon J.-N., Presses universitaires de Bordeaux, p.103-125.

GENTY D., VOKAL B., OBELIC B. et MASSAULT M. (1998)
Bomb ¹⁴C time history recorded in two modern stalagmites – importance of soil organic matter dynamics and bomb ¹⁴C distribution over continents.
E.P.S.L., vol. 160, p. 795-809.

GENTY D., PLAGNES V., CAUSSE C., BAKALOWICZ M., CATTANI O., STIEVENARD M., BLAMART D., OUAHDI R. et VAN EXTER S. (2003)
Macroscopic fluid inclusions in stalagmites from Clamouse and Villars caves.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 77.

GENTY D., GHALEB B., PLAGNES V., CAUSSE C., VALLADAS H., BLAMART D., MASSAULT M., GENESTE J.-M. et CLOTTES J. (2004)
Datations U/TH (TIMS) et ¹⁴C (AMS) des stalagmites de la grotte Chauvet (Ardèche, France) : Intérêt pour la chronologie des événements naturels et anthropiques de la grotte.
C. R. Palevol, vol. 3, p. 629-642.

GENTY D., COMBOURIEU NEBOUT N., HATTE C., BLAMART D., GHALEB B. et ISABELLO L. (2005)
Rapid climatic changes of the last 90 kyr recorded on the European continent.
C. R. Acad. Sci. Paris, série II, sous presse.

GEWELT M. (1981)
Les variations isotopiques du carbone et de l'oxygène dans une stalagmite de la grotte de Remouchamps (Belgique) – Méthodes et premiers résultats.
Ann. Soc. Géol. Belg., t. 104, p. 269-279.

GEWELT M. (1985)
Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges : Apport des datations ¹⁴C et ²³⁰Th/²³⁴U.
Ann. Soc. Géol. Belg., t. 108, p. 267-273.

GEWELT M. et JUVIGNE E. (1988)
Téphrochronologie du Tardiglaciaire et de l'Holocène dans le Cantal, le Cézallier et les Monts Dore (Massif Central, France) : Résultats nouveaux et synthèse.
Bull. Ass. Fr. Et. Quat., vol. 1, p. 25-34.

GEZE B. (1979)
Languedoc méditerranéen – Montagne Noire
Ed. Masson, Guides géologiques régionaux, 191 pages.

GIBERT J. (1991)
Vers une vision intégrée des eaux souterraines – Résumé et recommandations.
Hydrologie, n° 3, p. 257-263.

GILLI E. (1995)
La spéléologie.
Ed. PUF, QSJ n° 709, 1^{ère} édition, 127 pages.

GILLI E. (1999)
Rupture de spéléothèmes par fluage d'un remplissage endokarstique. L'exemple de la grotte de Ribière (Bouches du Rhône).
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 329, série II, p. 807-813.

GILLIESON D. (1996)

Caves : Processes, Development, Management.
Ed. Blackwell Publishers, 324 pages.

GOGUEL J. direction (1967)

Carte géologique de la France au 1/50 000^e, feuille Vif (796) et notice explicative.
Ed. BRGM, 11 pages.

GOMBERT P. (1995)

Approche théorique simplifiée de la dissolution karstique.
Karstologia, n° 24, p. 41-51.

GORDON D., SMART P.L., FORD D.C., ANDREWS J.N., ATKINSON T.C., ROWE P.J. et CHRISTOPHER N.S.J. (1989)

Dating of late Pleistocene interglacial and interstadial periods in the United Kingdom from speleothem growth frequency.
Quaternary Research, n° 31, p. 14-26.

GOSLAR T., BALAGA K., ARNOLD M., TISNERAT N., STARNAWSKA E., KUZNIARSKI M., CHROST L., WALANUS A. et WIECKOWSKI K. (1999)

Climate-related variations in the composition of the Lateglacial and Early Holocene sediments of Lake Perespiłno (eastern Poland).
Quaternary Science Reviews, vol. 18, p. 899-911.

GOSPODARIC R. (1988)

Paleoclimatic record of cave sediments from Postojna karst.
Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 91-95.

GRAHAM I.J., CARTER R.M., DITCHBURN R.G. et ZONDERVAN A. (2004)

Chronostratigraphy of ODP 181, Site 1121 sediment core (Southwest Pacific Ocean), using ¹⁰Be/⁹Be dating of entrapped ferromanganese nodules.
Marine Geology, vol. 205, p. 227-247.

GRAMS P.E. et SCHMIDT J.C. (2002)

Streamflow regulation and multi-level flood plain formation : channel narrowing on the aggrading Green River in the eastern Uinta Mountains, Colorado and Utah.
Geomorphology, vol. 44, p. 337-360.

Greenland Ice-core Project (GRIP) Members (1993)

Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice-core.
Nature, vol.364, 15 juillet, p. 203-207.

GUENDON J.-L. (1984)

Les paléokarsts des Alpes occidentales du Trias à l'Eocène.
Karstologia, n° 4, p. 3-9.

GUIOT J., DE BEAULIEU J.-L., CHEDDADI R., DAVID F., PONEL P. et REILLE M. (1993)

The climate in Western Europe during the last Glacial/Interglacial cycle derived from pollen and insect remains.
Palaeo, n° 103, p. 73-93.

GUITER F., ANDRIEU-PONEL V., DE BEAULIEU J.-L., CHEDDADI R., CALVEZ M., PONEL P., REILLE M., KELLER T. et GOEURY C. (2003)

The last climatic cycles in Western Europe : a comparison between long continuous lacustrine sequences from France and other terrestrial records.
Quaternary International, vol. 111, p. 59-74.

GUYOMARC'H F., BINET A. et DUFOSSE L. (2000)

Characterization of *Brevibacterium linens* pigmentation using spectrophotometry.
International Journal of Food Microbiology, vol. 57, p. 201-210.

H**HALIHAN T., WICKS C.M. et ENGELN J.F. (1998)**

Physical response of a karst drainage basin to flood pulses : example of the Devil's Icebox cave system (Missouri, USA).
Journal of Hydrology, vol. 204, p. 24-36.

HAUNS M., JEANNIN P.-Y. et ATTEIA O. (2001)

Dispersion, retardation and scale effect in tracer breakthrough curves in karst conduits.
Journal of Hydrology, vol. 241, p. 177-193.

HARDY H.H. et BEIER R. (1994)

Fractals in reservoir engineering.
Ed. World Scientific, 359 pages.

HARMON R.S., GLAZEK J. et NOWAK K. (1980)

²³⁰Th/²³⁴U dating of travertine from the Bilzingsleben archaeological site.
Nature, vol. 284, 13 mars, p. 132-135.

HÄUSELMANN P., JEANNIN P.-Y. et BITTERLI T. (1999)

Relationships between karst and tectonics : case-study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland).
Geodinamica Acta, vol. 12, p. 377-388.

HÄUSELMANN P., JEANNIN P.-Y., MONBARON M. et LAURITZEN S.E. (2002)

Reconstruction of Alpine Cenozoic paleorelief through the analysis of caves at Siebenhengste (BE, Switzerland).
Geodinamica Acta, vol. 15, p. 261-276.

HEINZ J. et AIGNER T. (2003)

Hierarchical dynamic stratigraphy in various Quaternary gravel deposits, Rhine glacier area (SW Germany) : implications for hydrostratigraphy.
Int. J. Earth Sciences, vol. 92, p. 923-938.

HENROT E. (1996)

Caractérisation sédimentaire de quelques plages du delta du Rhône.
Mémoire de DEA, Université de Provence, Aix-Marseille.

HILTON S. et LISLE T. (1993)

Measuring the fraction of pool volume filled with fine sediment.
Research note PSW-RN-414, *Department of Agriculture*, Berkeley, California, 11 pages.

HJORTH T. (2004)

Effects of freeze-drying on partitioning patterns of major elements and trace metals in lake sediments.
Analytica Chimica Acta, vol. 526, p. 95-102.

HOBLEA F. (1999)

Contribution à la connaissance et à la gestion environnementale des géosystèmes montagnards – Etudes savoyardes.
Thèse de Doctorat de Géographie, Université Lyon II, 995 pages.

HOFFMANN F. et PELLEGRIN J.-C. (1996)

Méthodologies hydrochimiques.
Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, Univ. M. de Montaigne, Bordeaux III, n°14, p. 13-79.

HOUNSLOW M.W. et MORTON A.C. (2004)

Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates : comparison with heavy mineral analysis.
Sedimentary Geology, vol. 171, p. 13-36.

HOYEZ B. (1992)

Analyse fractale de la forme des grains de sable.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 314, série II, p. 945-951.

HU S., RAO GODDU S., APPEL E., VEROSUB K., XIANGDONG Y. et WANG S. (2005)

Palaeoclimatic changes over the past 1 million years derived from lacustrine sediments of Heqing basin (Yunnan, China). *Quaternary International*, sous presse.

HUH C.-A., CHU K.-S., WEI C.-L. et LIEW P.-M. (1996)

Lead-210 and plutonium fallout in Taiwan as recorded at a subalpine lake.

Journal of Southeast Asian Earth Sciences, vol. 14, n° 5, p. 373-376.

HURAUT S. (1997)

Travaux préliminaires à l'étude du bilan hydrologique de la rivière karstique souterraine Coufin (unité de Choranche). Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Grenoble I, 131 pages.

J

JAILLET S. (2000)

Un karst couvert de bas-plateau : le Barrois – Structure, fonctionnement, évolution.

Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 3, 710 pages.

JAILLET S. coordination (2004)

Aven d'Ornac – Etude spéléogénique et karstogénique – Etude des mémoires paléogéographiques et paléoenvironnementales du Bas-Vivarais.

EDYTEM, UMR CNRS 5204, Rapport d'étape n°1, 193 pages.

JAILLET S. coordination (2005)

Aven d'Ornac – Etude spéléogénique et karstogénique – Etude des mémoires paléogéographiques et paléoenvironnementales du Bas-Vivarais.

EDYTEM, UMR CNRS 5204, Rapport d'étape n°2, 68 pages.

JEANNIN P.-Y. (1991)

Mise en évidence d'importantes glaciations anciennes par l'étude des remplissages karstiques du réseau des Siebenhengste (chaîne bordière helvétique).

Eclogae Geol. Helv., t. 84, n° 1, p. 207-221.

JEANNIN P.-Y. (1996)

Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques.

Thèse de Doctorat d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 238 pages.

JORDA M. et RODITIS J.-C. (1993)

Les épisodes de gel du Rhône depuis l'an Mil. Périodisation, fréquence, interprétation paléoclimatique.

Méditerranée, n° 3-4, p. 19-30.

JOUSSAUME S. (1999)

Climat d'hier à demain.

Ed. du CNRS/CEA, Paris, 143 pages.

JOUZEL J., BARKOV N.I., BARNOLA J.M., BENDER M., CHAPPELLAZ J., GENTHON C., KOTLYAKOV V.M., LIPENKOV V., LORIS C., PETIT J.R., RAYNAUD D., RAISBECK G., RITZ C., SOWERS T., STIEVENARD M., YIOU F. et YIOU P. (1993)

Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period.

Nature, vol. 364, 29 juillet, pp 407-411.

JOUZEL J., PETIT J.R., SOUCHEZ R., BARKOV N.I., LIPENKOV V.Y., RAYNAUD D., STIEVENARD M., VASSILIEV N.I., VERBEKE V. et VIMEUX F. (1999)

More than 200 meters of lake ice above subglacial lake, Vostok Antarctica.

Science, vol. 286, 10 décembre, p. 2138-2141.

JULIAN M. et NICOD J. (1984)

Paléokarsts et paléo-géomorphologie néogènes des Alpes occidentales et régions adjacentes.

Karstologia, n° 4, p. 11-18.

K

KASHIWAYA K., ATKINSON T.C. et SMART P.L. (1991)

Periodic variations in late Pleistocene speleothem abundance in Britain.

Quaternary Research, n° 35, p. 190-196.

KAUFMANN O. (2002)

Rapport de synthèse de la prospection géophysique réalisée dans la Salle Plane de l'Aven d'Ornac.

Rapport interne, Laboratoire Edytem, Université de Savoie, 12 pages.

KENNETT J.P., ROARK E.B., CANNARIATO K.G., INGRAM B.L. et TADA R. (2000)

Latest quaternary paleoclimatic and radiocarbon chronology, hole 1017, Southern California margin.

Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific results, vol. 167, p. 249-254.

KERVAZO B. et LAVILLE H. (1988)

Caractéristiques physico-chimiques d'une séquence sédimentaire en milieu karstique et signification : exemple de la grotte Vaufrey.

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 41-49.

KERVAZO B. et KONIK S. (2002)

Etude géologique du gisement de Solutré.

In : *Solutré 1968-1998*, Combier J. & Montet-White A., Société Préhistorique Française, Mémoire n° XXX, p. 135-154.

KERVAZO B., FERRIER C., DEBARD E., DELANNOY J.-J., PERRETTE Y. et PERROUX A.-S. (2003)

Grotte Chauvet (Ardèche - France) : Les dépôts de la Salle Hillaire et les occupations préhistoriques associées.

Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 91-92.

KILIAN M.R., VAN DER PLICHT J., VAN GEEL B. et GOSLAR T. (2002)

Problematic 14C-AMS dates of pollen concentrates from Lake Gosiaz (Poland).

Quaternary International, vol. 88, p. 21-26.

KONERT M. et VANDENBERGHE J. (1997)

Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis : a solution for the underestimation of the clay fraction.

Sedimentology, vol. 44, p. 523-535.

KONIK S. et KERVAZO B. (2001)

Mise en place des dépôts de l'abri solutréo-badegoulien du Cuzoul de Vers (Lot - France).

Actes du Colloque UISPP, Liège, 9 pages, sous presse.

KUKLA G.J., DE BEAULIEU J.-L., SVOBODOVA H., ANDRIEU-PONEL V., THOUVENY N. et STOCKHAUSEN H. (2002)

Tentative correlation of pollen records of the last interglacial at Grande Pile and Ribains with marine isotope stages.

Quaternary Research, n° 58, p. 32-35.

L

LABAT D., ABABOU R. et MANGIN A. (1999a)

Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 1^{ère} partie : analyse univariée de pluies et débits de sources karstiques.

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 329, série II, p. 873-879.

- LABAT D., ABABOU R. et MANGIN A. (1999b)**
Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 2^{ème} partie : analyse en ondelettes croisée pluie-débit.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 329, série II, p. 881-887.
- LACROIX M., LEBOULANGER T., WANG H., FEENY V., DUPONT J.-P. et MEYER R. (1998)**
Mise en évidence des relations surface-endokarst par la microgranulométrie, exemple du karst crayeux haut-normand.
Bull. Soc. Géol. Fr., tome 169, n°2, p. 177-187.
- LACROIX M., RODET J., WANG H., MASSEI N. et DUPONT J.-P. (2000)**
Origine des matières en suspension dans un système aquifère karstique : apports de la microgranulométrie.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 330, série II, p. 347-354.
- LAGANIER R. (1990)**
Les crues de l'Ardèche et leur prévention.
Etudes Hydrologiques Méditerranéennes, publications du Laboratoire de Géographie de l'Université de Montpellier et de l'U.R.A. 906 du CNRS, n° 21, p. 17-85.
- LAIGNEL B., MASSEI N., DUPUIS E., DECONINCK J.-E., OGIER S., PELLENARD P. et RODET J. (2003)**
The sedimentary infill of the Petites Dalles cave (Normandy) – Preliminary investigations.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 95.
- LALOU C., DUPLESSY J.-C. et HUU VAN N. (1971)**
Données géochronologiques actuelles sur les niveaux des mers et la paléoclimatologie de l'interglaciaire Riss-Würm.
Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique, vol. 13, fasc. 5, p. 447-462.
- LANGMUIR D. et HERMAN J.S. (1980)**
The mobility of Thorium in natural waters at low temperatures.
Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 44, p. 1753-1766.
- LAROCQUE M., MANGIN A., RAZACK M. et BANTON O. (1998)**
Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France).
Journal of Hydrology, n° 205, p. 217-231.
- LATHAM A.G., SCHWARCZ H.P. et FORD D.C. (1987)**
Secular variation of the Earth's magnetic field from 18.5 to 15.0 ka B.P., as recorded in a Vancouver Island stalagmite.
Can. J. Earth Sci., n° 24, p. 1235-1241.
- LAURITZEN S.-E. (1995)**
High-resolution paleotemperature proxy record for the last interglaciation based on norwegian speleothems.
Quaternary Research, n° 43, p. 133-146.
- LAVILLE H., PAQUEREAU M.-M. et BRICKER H. (1985)**
Précisions sur l'évolution climatique de l'interstade würmien et du début du Würm récent : les dépôts du gisement castelperronien des Tambourets (Haute-Garonne) et leur contenu pollinique.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 301, série II, p. 1137-1140.
- LAVILLE H., RAYNAL J.-P. et TEXIER J.-P. (1986)**
Le dernier interglaciaire et le cycle climatique würmien dans le Sud-Ouest et le Massif Central français.
Bull. Ass. Fr. Et. Quat., vol. 1-2, p. 35-46.
- LEBART L., MORINEAU A. et PIRON M. (2000)**
Statistique exploratoire multidimensionnelle.
Ed. Dunod, 3^{ème} édition, 439 pages.
- LE FILLATRE V. (2000)**
Signification des dépôts karstiques et dangers d'interprétation (exemple du Périgord, du Quercy et des Grands Causses).
Trav. Lab. Géol. Phys. Appl. Bordeaux, n° 18, p. 11-31.
- LE FILLATRE V. (2001)**
Les dépôts dans le karst en Périgord-Quercy et leurs significations.
Thèse de 3^{ème} cycle, Géographie, Université Bordeaux 3, 497 pages.
- LEHMAN S.J., SACHS J.P., CROTWELL A.M., KEIGWIN L.D. et BOYLE E.A. (2002)**
Relation of subtropical Atlantic temperature, high-latitude ice rafting, deep water formation, and european climate 130 000-60 000 years ago.
Quaternary Science Reviews, vol. 21, p. 1917-1924.
- LE ROY LADURIE E. (1983)**
Histoire des climats depuis l'An Mil.
Ed. Flammarion, coll. Champs, 2 volumes, 287 et 254 pages.
- LIGNIER V. (2001)**
Les sédiments lacustres et l'enregistrement de la paléosismicité - Etude comparative de différents cas dans le Quaternaire des Alpes Nord-Occidentales et du Tien-Shan Kyrghyze.
Thèse de 3^{ème} cycle, Sc. Terre, Université de Savoie.
- LIGNIER V., BECK C. et CHAPRON E. (1998)**
Caractérisation géométrique et texturale de perturbations synsédimentaires attribuées à des séismes, dans une formation quaternaire glacio-lacustre des Alpes (les Argiles du Trièves).
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 327, série II, p. 645-652.
- LIGNIER V. et DESMET M. (2002)**
«Les archives sédimentaires quaternaires de la grotte sous les Sangles (Bas-Bugey, Jura méridional, France) – Indices paléoclimatiques et sismo-tectoniques.
Karstologia, n° 39, p. 27-46.
- LIGNIER V., DESMET M., GERBAUD G., BECK C., MENARD G., DELANNOY J.-J., QUINIF Y. et Groupe Ulysse Spéléo (1999)**
Climatic and tectonic control of varved deposits in a jura cave – Grotte sous les sangles, Burbanche.
Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence.
- LISLE T. (1987)**
Using «residual depths» to monitor pool depths independently of discharge.
Research note PSW-394, *Department of Agriculture*, Berkeley, California, 4 pages.
- LISLE T. et HILTON S. (1992)**
The volume of fine sediment in pools : an index of sediment supply in gravel-bed streams.
Water Resources Research, vol. 35, n° 4, p. 1291-1304.
- LISLE T. et HILTON S. (1999)**
Fine bed material in pools of natural gravel bed channels.
Water Resources Bulletin, vol. 28, n° 2, p. 371-383.
- LISMONDE B. (1993)**
Diffusion induite par les fluctuations de la pression atmosphérique – Rôle sur le creusement.
Fédération française de Spéléologie, *Actes de la 3^{ème} rencontre d'octobre*, Montpellier, p. 56-58.
- LISMONDE B. (1999)**
Quelques mécanismes chimiques du creusement des cavernes.
Karstologia, n°33, p. 41-50.
- LISMONDE B. et FRACHET J.-M. (1979)**
Grottes et scialets du Vercors.

CDS Isère, Tome 2 : le Vercors Nord, p. 39-43 et 279-285.

LISMONDE B. et LAGMANI A. (1987)

Les vagues d'érosion.
Karstologia, n° 10, p. 33-38.

LISMONDE B. (1999)

La grotte de la Ture (Vercors), un piège à air froid.
Publications du Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère, 7 pages.

LLIBOUTRY L. (1965)

Traité de Glaciologie.
Tomes I et II, Ed. Masson et Cie, 1040 pages.

LOCAT J., GAGNON C. et PELLETIER E. direction (1998)

Le déluge du Saguenay.
Comptes rendus du symposium, Carrefour des Sciences de la Terre, Québec, 27 pages.

LOIZEAU J.-L., ARBOUILLE D., SANTIAGO S. et VERNET J.-P. (1994)

Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments.
Sedimentology, vol. 41, p. 353-361.

LOLCAMA J.L., COHEN H.A. et TONKIN M.J. (2002)

Deep karst conduits, flooding, and sinkholes : lessons for the aggregates industry.
Engineering Geology, vol. 65, p. 151-157.

LOPEZ M. (2002)

Le système karstique des Echelles : ses caractéristiques morphologiques et hypothèses d'évolution.
Mémoire de Maîtrise, Université de Savoie, 260 pages.

LORIUS C. (1991)

Glaces de l'Antarctique : une mémoire, des passions.
Ed. Odile Jacob, 301 pages.

LOSSON B. (2003)

Karstification et capture de la Moselle (Lorraine, France) : vers une identification des interactions.
Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Metz, 510 pages et vol. annexes, 226 pages.

LOUP J. (1969)

L'hydrologie karstique du Vercors.
Revue de Géographie Alpine, n°2, p. 329-332.

LOUP J. (1974)

L'hydrologie karstique dans les Préalpes françaises du Nord et le Jura.
Revue de Géographie Alpine, p. 255-258.

LU S. et MOLZ F.J. (2001)

How well are hydraulic conductivity variations approximated by additive stable processes ?
Advances in Environmental Research, vol. 5, p. 39-45.

LUCKMAN B. (1998a)

Dendroglaciologie dans les Rocheuses du Canada.
Géographie Physique et Quaternaire, vol. 52, n°2, 16 pages.

LUCKMAN B. (1998b)

Landscape and climate change in the Central Canadian Rockies during the 20th century.
The Canadian Geographer, vol. 42, n° 4, p. 319-336.

LUETSCHER M., SCHLATTER F. et JEANNIN P.-Y. (2003)

Temperature records in an ice cave of the Swiss Jura mountains and their significance for paleoclimatological investigations.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 101.

LUTERBACHER J., XOPLAKI E., DIETRICH D., JONES P.D., DAVIES T.D., PORTIS D., GONZALES-ROUCO J.F., VON STORCH H., GYALISTRAS D., CASTY C. et WANNER H. (2001)

Extending North Atlantic Oscillation reconstructions back to 1500.
Atmospheric Science Letters, vol. 2, p. 114-124.

M

MACAIRE J.-J. (1990)

L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels : de la géodynamique à la chronostratigraphie.
Quaternaire, n° 1, p. 41-49.

MACCAVE I.N., BRYANT R.J., COOK H.F. et COUGHANOWR C.A. (1986)

Evaluation of a laser-diffraction-size analyser for use with natural sediments.
Journal of Sedimentary Petrology, vol. 56, n° 4, p. 561-564.

MACKENZIE W.S. et GUILFORD C. (2000)

Atlas de pétrographie.
Ed. Dunod, Paris, 98 pages.

MACLAREN P. et BOWLES D. (1985)

The effects of sediment transport on grain-size distributions.
Journal of Sedimentary Petrology, vol. 55, n° 4, p. 457-470.

MAGNIN F., GUENDON J.-L., QUINIF Y., ROIRON P. et THINON M. (1990)

Datations isotopiques et étude des paléoenvironnements de la formation à travertins de la papeterie Vasino (Meyrargues, Bouches-du-Rhône, France). Mise en évidence de deux périodes de réchauffement durant le Riss.
C. R. Acad. Sci. Paris, t. 310, série II, p. 1285-1292.

MAGNY M. (1995)

Une histoire du climat - Des derniers mammoths au siècle de l'automobile.
Ed. Errance, Coll. des Hespérides, Paris, 176 pages.

MAGNY M. (1999)

Les archives climatiques des lacs du Jura.
Pour la Science, nov. 1999, n°265, p. 76-82.

MAGNY M. (2004)

Holocene climate variability as reflected by mid-european lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements.
Quaternary International, vol. 113, p. 65-79.

MAGNY M., GUIOT J. et SCHOELLAMMER P. (2001)

Quantitative reconstruction of Younger Dryas to Mid-Holocene paleoclimates at Le Locle, Swiss Jura, using pollen and lake-level data.
Quaternary Research, n° 56, p. 170-180.

MAHLER B.J. et LYNCH F.L. (1999)

Muddy waters : temporal variation in sediment discharging from a karst spring.
Journal of Hydrology, n° 214, p. 165-178.

MAHLER B.J., PERSONNE J.-C., LODS G.F. et DROGUE C. (2000)

Transport of free and particulate-associated bacteria in karst.
Journal of Hydrology, n° 238, p. 179-193.

MAIRE R. (1976)

Recherches géomorphologiques sur les karsts hauts-alpins des massifs de Platé, du Haut-Giffre, des Diablerets, et de l'Oberland occidental.
Thèse de 3^{ème} cycle, Géographie, Université de Nice, 455 pages.

- MAIRE R. (1978)**
Valeur de l'agressivité des eaux de fusion de neige et de glace dans les karsts haut-alpins du Haut-Giffre et de l'Oberland. Laboratoire de géographie de Nice, p. 1-17.
- MAIRE R. (1980)**
Éléments de karstologie physique : les glaciers. *Spelunca*, n°1, supplément, p. 26-27.
- MAIRE R. (1982)**
Les remplissages souterrains dans les karsts de haute montagne – Types et méthodes d'études. *Actes du 7^{ème} Congrès National de Spéléologie*, Suisse, p. 133-156.
- MAIRE R. (1995)**
Point de vue sur l'évolution récente de la spéléologie – Conséquences sur l'exploration et la recherche scientifique. *Karstologia*, n° 24, p. 1-12.
- MAIRE R., POMEL S. et QUINIF Y. (1990)**
Les conglomérats souterrains. Morphologie, genèse et âges U/Th d'après quelques exemples alpins et pyrénéens. *Spéléochronos*, n° 2, p. 3-10.
- MAIRE R. et QUINIF Y. (1988)**
Chronostratigraphie et évolution sédimentaire en milieu alpin dans la Galerie Aranzadi (Gouffre de la Pierre St Martin, Pyrénées, France). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 111, p. 61-77.
- MAIRE R., POMEL S. et SALOMON J.-N. (1994)**
Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale. P.U.B., Talence, 492 pages.
- MAIRE R. direction (2000)**
Rapport d'activité du GDR 440 du CNRS : Enregistrement à haute résolution de l'Environnement dans les dépôts laminés karstiques. UMR 5064, Bordeaux 3, 66 pages.
- MALEVAL V. et ASTRADE L. (2003)**
Le modelage d'une cuvette lacustre artificielle après son remplissage : quantification et chronologie de l'érosion des rives du lac de Saint-Pardoux, Limousin, France. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 1, p. 29-40.
- MALEVAL V. et JIGOREL A. (2002)**
La sédimentation dans un lac artificiel. Exemple du lac de Saint-Pardoux, Massif d'Ambazac, Limousin, France. *Géomorphologie*, n° 4, p. 307-320.
- MANDELBROT B. (1997)**
Fractales, hasard et finances (1959-1997). Ed. Flammarion, coll. Champs, 246 pages.
- MANGIN A. (1974)**
Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Première partie : Généralités sur le karst et les lois d'écoulement utilisées. *Annales de Spéléologie*, t. 29, n° 3, p. 283-332.
- MANGIN A. (1981)**
Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 293, série II, p. 401-404.
- MANGIN A. (1982)**
L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. *Réunion monographica sobre el karst*, Larra, p. 141-157.
- MANGIN A. (1984)**
Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of Hydrology*, n° 67, p. 25-43.
- MANGIN A. (1998)**
L'approche hydrogéologique des karsts. *Spéléochronos*, n°9, p. 3-26.
- MANGIN A., BOURGES F. et D'HULST D. (1999)**
La conservation des grottes ornées : un problème de stabilité d'un système naturel (l'exemple de la grotte préhistorique de Gargas, Pyrénées françaises). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 328, série II, p. 295-301.
- MARNEZY A. (1980)**
Le Vercors Méridional : Etude de géomorphologie karstique et glaciaire. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Grenoble I, 173 pages.
- MARTIN P. (1999)**
Modélisation des structures spatiales du karst. *Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence*, p. 135-140.
- MARTINSON D.G., PISIAS N.G., HAYS J.D., IMBRIE J., MOORE T.C. et SHACKLETON N.J. (1987)**
Age dating and the orbital theory of the ice ages : Development of a high-resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, n° 27, p. 1-29.
- MASSEI N., LACROIX M., WANG H. et DUPONT J.-P. (2001)**
Transport de particules en suspension d'un milieu karstique à un milieu alluvial : approche expérimentale et mesures in situ. *Proceedings of the 7th conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, Sciences et Techniques de l'Environnement, Université de Franche-Comté, mémoire hors série n° 13, p. 243-247.
- MASSEI N., LACROIX M., WANG H., MALHER B.J. et DUPONT J.-P. (2002)**
Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer : the role of the karst/alluvial interface. *Journal of Hydrology*, n° 260, p. 88-101.
- MAX J. et LACOUME J.-L. (1996)**
Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Ed. Masson, 355 pages.
- MERZERAUD G. et COLOMBIE C. (1999)**
Evolution morphologique des profils de dépôts dans le Sinémurien de la marge cévenole (région de Lodève). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 329, série II, p. 779-786.
- MILANA J.-P. et LOPEZ S. (1998)**
Solar cycles recorded in carboniferous glaci-marine rhythmites (Western Argentina) : relationships between climate and sedimentary environment. *Palaeo*, vol. 144, p. 37-63.
- MIRAMONT C., JORDA M. et PICHARD G. (1998)**
Evolution historique de la morphogénèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne Durance (France du sud-est). *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 52, n° 3, 15 pages.
- MISCHKE S., HERZSCHUH U., ZHANG C., BLOEMENDAL J. et RIEDEL F. (2005)**
A Late Quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China) : lake level and salinity changes inferred from sediment properties and ostracod assemblages. *Global and Planetary Change*, sous presse.
- MISKOVSKY J.-C. direction (1987)**
Géologie de la Préhistoire : Méthodes, techniques, applications. Ed. GéoPré, Paris, 1297 pages.
- MOCOCHAIN L. (2002)**

Utilisation des marqueurs chronostratigraphiques miocènes et pliocènes pour l'étude karstologique et hydrogéologique du Bas-Vivarais.

Mémoire de DEA, Université de Provence, 43 pages.

MOEYERSONS J., VERMEERSCH P.M. et VAN PEER P. (2002)

Dry cave deposits and their palaeoenvironmental significance during the last 115 ka, Sodmein Cave, Red Sea Mountains, Egypt.

Quaternary Science Reviews, vol. 21, p. 837-851.

MOLLARD A. (1973)

Le flanc Est du synclinal de Rencurel et le flanc Ouest du synclinal d'Autrans-Méaudre.

Essai de géomorphologie karstique, Institut de Géographie Alpine, Grenoble, p. 69-70.

MONJUVENT G. (1995)

Le Vercors au Quaternaire.

In : *Epipaléolithique et Mésolithique en Europe*, Livret-Guide de l'excursion Préhistoire et Quaternaire en Vercors, p. 17-19.

MOREL P. (1990)

Aspects zoologiques et paléontologiques : possibilités et limites d'une interprétation paléoclimatologique.

Karstologia Mémoires n° 2, Colloque Remplissages Karstiques et Paléoclimats, p. 33-35.

MOREL S. et VILLARD H. (1993)

Pollution automobile et forêt dans la vallée de Chamonix.

Mémoire de Maîtrise de Géographie, IGA – Université Grenoble I, 198 pages.

MORELLO P. (1996)

Réchauffement climatique et transformations récentes de la végétation provençale.

Géopoint 96, Groupe Dupont, Université d'Avignon, p. 149-151.

MOURER-CHAUVIRE C., PHILIPPE M., QUINIF Y., CHALINE J., DEBARD E., GUERIN C. et HUGUENEY M. (2003)

Position of the palaeontological site Aven I des Abîmes de la Fage, at Noailles (Corrèze, France), in the european Pleistocene chronology.

Boreas, vol. 32, p. 521-531.

MULLER R.A. et MACDONALD G.J. (2000)

Ice ages and astronomical causes – Data, spectral analysis and mechanisms.

Ed. Springer-Verlag, Londres, et Ed. Praxis, Chichester, 318 pages.

MUNSELL (1994)

Soil Color Charts.

Macbeth division of Kollmorgen Instruments Corporation, Revised Edition.

MURRAY J.W. (1954)

The deposition of calcite and aragonite in caves.

Journal of Geology, n° 62, p. 481-492.

MUXART T. (1977)

Note sur l'agressivité potentielle des eaux de percolation des différents sols dans le Vercors.

Revue de Géographie Alpine, tome 65, p. 177-183.

N

NAUD G. (1971)

Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du massif des Coirons (partie orientale, Ardèche).

Thèse de 3^e cycle, Université de Marseille.

NEULLY M. (1993)

Modélisation et estimation des erreurs de mesures.

Ed. Lavoisier, Techniques et documents, 644 pages.

NIKORA V. et GORING D. (2004)

Mars topography : bulk statistics and spectral scaling.

Chaos, solitons and fractals, vol. 19, p. 427-439.

NINTCHEU-FATA N., KATINAS G., HALBERG F., CORNELISSEN G., TOLSTYKH V., MICHAEL H.N., OTSUKA K., SCHWARTZKOPFF O. et BAKKEN E. (2003)

Chronomics of tree rings for chronoastrobiology and beyond.

Biomedicine and Pharmacotherapy, vol. 57, p. 24-30.

NORDHOFF P., WIEGAND B., ROSENDAHL W., SIMON K., HANSEN B.T. et KEMPE S. (2003)

Stable isotopes and trace element variations in a speleothem from the Swabian Albs, Southern Germany.

Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 119.

NOURY M. (2005)

Cartographie géomorphologique de la Salle Plane - Orgnac/Issirac - Étude comparative de deux grands vides karstiques (salle II et salle Plane).

Mémoire de Master1, Edytem, Université de Savoie, 86 pages.

P

PASCAL M. direction (1989)

Carte géologique de la France au 1/50 000^e, feuille Bourg-St-Andéol (889) et notice explicative.

Ed. BRGM, 67 pages.

PASSEGA R. (1964)

Grain size representation by C/M patterns as a geological tool.

Journal of Sedimentary Petrology, vol. 34, n° 4, p. 830-847.

PASTRE J.-F., DEBARD E. et CHENNAOUI K. (1994)

Un téphra-repère du volcanisme phréatomagmatique du Vivarais dans la séquence Pléistocène supérieur de l'abri Moula (Soyons, Ardèche, France).

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 319, série II, p. 937-943.

PATTERSON R.T., PROKOPH A. et CHANG A. (2004)

Late Holocene sedimentary response to solar and cosmic ray activity influenced climate variability in the NE Pacific.

Sedimentary Geology, sous presse.

PEIRY J.L. (1994)

Application de l'analyse statistique multivariée et de l'image CM des dépôts fluviaux à la reconstitution des paléoenvironnements fluviaux – L'exemple d'un bras mort du Rhône en amont de Lyon.

Quaternaire, vol. 5, n° 2, p. 59-67.

PEIRY J.L. (1997)

Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord.

H.D.R. , Université Grenoble I, 308 pages.

PELLEGRIN J.-C. (1996)

Dynamique sédimentaire en milieu dunaire littoral : quantification du transport des sédiments sableux. Problèmes de mesure.

Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, Univ. M. de Montaigne, Bordeaux III, n°14, p. 81-86.

PERRETTE Y. (1997a)

Les spéléothèmes : un outil performant pour l'étude des évolutions environnementales.

Mémoire de DEA, Université Grenoble I, Institut de Géographie Alpine, 97 pages.

PERRETTE Y. (1997b)

Structure interne des spéléothèmes et paléoenvironnements. *Et. Géogr. Phys.*, Suppl. n° XXVI, p. 163-165.

PERRETTE Y. (1998)

La validité spatiale des informations contenues dans la structure interne des spéléothèmes. *Etudes de Géographie Physique*, supplément au n°XXVII, p. 35-43.

PERRETTE Y. (1999)

Les stalagmites : archives environnementales et climatiques à haute résolution. *Karstologia*, n° 34, p. 23-44.

PERRETTE Y. (2000)

Etude de la structure interne des stalagmites : contribution à la connaissance géographique des évolutions environnementales du Vercors (France). Développement et application d'une approche multiparamètre des archives stalagmitiques. Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Savoie, 319 pages.

PERRETTE Y., DELANNOY J.-J. et DESTOMBES J.-L. (1999)

Stratigraphic, image processing and spectroscopic studies of some stalagmitic samples from the Vercors (France): preliminary results. *Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence*, p. 151-156.

PERRETTE Y., DELANNOY J.-J., GENTY D., DESTOMBES J.-L. et QUINIF Y. (1997a)

Enregistrement de l'activité charbonnière dans les spéléothèmes de Choranche (Vercors, France). *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, Switzerland*, vol. 1, p. 61-64.

PERRETTE Y., GENTY D., DESTOMBES J.-L., DELANNOY J.-J. et QUINIF Y. (1997b)

Characterisation of speleothem crystalline fabrics by spectroscopic and digital image processing methods (Choranche, Vercors, France). *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, Switzerland*, vol. 1, p. 257-260.

PERRETTE Y., DELANNOY J.-J., BOLVIN H., CORDONNIER M., DESTOMBES J.-L., ZHILINSKAYA E.A. et ABOUKAIS A. (1999)

Comparative study of a stalagmite sample by stratigraphy, laser induced fluorescence spectroscopy, EPR spectrometry and reflectance imaging. *Chemical Geology*, Vol. 162/3-4, p. 221-243.

PERRETTE Y., DELANNOY J.-J., DESMET M., LIGNIER V. et DESTOMBES J.-L. (2005)

Speleothem organic matter content imaging. The use of a fluorescence index to characterise the maximum emission wavelength. *Chemical Geology*, Vol. 214, p. 193-208.

PERROUX A.-S. (1999)

L'enregistrement et la conservation des paléoclimats dans la glace souterraine. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université de Savoie, 130 pages.

PERROUX A.-S. (2000)

Contribution aux recherches sur le *Local Change* au travers des enregistreurs continentaux à haute résolution : Etude de la mémoire paléoclimatique et paléoenvironnementale de la glace souterraine.

Mémoire de DEA, Universités de Savoie et Grenoble I, 83 pages.

PERROUX A.-S. (2001)

Etude du fonctionnement d'une cavité englacée durant un cycle climatique – Site de la Glacière d'Autrans (Vercors) : Premiers résultats. *Karstologia*, n° 37, p. 41-46.

PERROUX A.-S., PERRETTE Y., DELANNOY J.-J. et DESMET M. (2003)

Contribution of karstic lake sediments to the historic environment evolution understanding - Comparison with stalagmite records. (Choranche caves, Vercors, France). *Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France*, p. 129-130.

PERROUX A.-S., DESMET M., DELANNOY J.-J. et PERRETTE Y. (2004a)

Endokarstic sedimentological processes in the Alpine area: attempt of Holocene palaeoenvironmental and palaeohydrological reconstructions. *Holocene climate variability in the Alps : Toward a common framework ?*, European workshop, Aix-Les-Bains.

PERROUX A.-S., DELANNOY J.-J., PERRETTE Y. et DESMET M. (2004b)

Les sédiments détritiques de grotte : un processus d'archivage original. *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement, Table Ronde en l'honneur de R. Neboit-Guilhot, Clermont-Ferrand*, p. 60.

PERROUX A.-S., DESMET M., PERRETTE Y. et DELANNOY J.-J. (2004c)

Underground sedimentary deposits as a natural record : high resolution study in view of palaeoenvironmental reconstructions (Choranche caves, Vercors, France). *The 30th congress of the International Geographical Union "One Earth – Many Worlds", Glasgow, UK*.

PERROUX A.-S., DELANNOY J.-J., PERRETTE Y., et DESMET M. (2004d)

Les sédiments détritiques endokarstiques : Une approche dynamique pour une meilleure compréhension de l'archive. *Colloque du GDR 440 du CNRS, Han-sur-Lesse, Belgique*.

PETTS G. et FOSTER I. (1985)

Rivers and landscape. Ed. Arnold, Londres, 272 pages.

PEYBERNES B. et COMBES P.J. (1999)

Paléosurfaces d'érosion et paléokarsts dans la série de passage Crétacé/Tertiaire des Corbières occidentales (Aude, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 329, série II, p. 815-822.

PICCINI L., DRYSDALE R. et HEIJNIS H. (2003)

Karst morphology and cave sediments as indicators of the uplift history in the Alpi Apuane (Tuscany, Italy). *Quaternary International*, vol. 101-102, p. 219-227.

PION G. (1990)

L'abri de la Fru à Saint-Christophe (Savoie). *Gallia Préhistoire*, vol. 32, p. 65-123.

PISSART A., VAN VLIET-LANOE B., EK C. et JUVIGNE E. (1988)

Des traces de glace de ségrégation dans la grotte de Remouchamps (Belgique) : Conséquences en ce qui concerne la sédimentation et la paléoclimatologie. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 111, p. 125-133.

PLAGNES V. et BAKALOWICZ M. (2002)

The protection of a karst water resource from the example of the Larzac karst plateau (south of France) : a matter of regulations or a matter of process knowledge? *Engineering Geology*, vol. 65, p. 107-116.

PLAGNES V., CAUSSE C., GENTY D., PATERNE M. et BLAMART D. (2002)

A discontinuous climatic record from 187 to 74 ka from a speleothem of the Clamouse Cave (south of France). *E.P.S.L.*, vol. 201, p. 87-103.

PLENET S. et GIBERT J. (1995)

Comparison of surface water/groundwater interface zones in fluvial and karstic systems. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 318, Sc. de la Vie, p. 499-509.

PLUMMER L.N. et WIGLEY T.M.L. (1976)

The dissolution of calcite in CO₂-saturated solutions at 25°C and 1 atmosphere total pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 40, p. 191-202.

POCHON M. (1976)

Les processus d'altération de quelques types de calcaire dans les sols du Haut-Jura suisse. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, tome 18, n°1, p. 33-39.

POMEROL C. et RENARD M. (1989)

Eléments de Géologie. Ed. A. Colin, coll. U, 9^{ème} édition refondue, 615 pages.

PONS E., HAMELIN B. et BRULHET J. (1999)

Anomalies dans le développement des spéléothèmes observés dans le Gard rhodanien - Datations U/Th par spectrométrie de masse à thermo-ionisation. *Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence*, p. 157-158.

POURCHET M., MELIERES M.-A., SILVESTRU E., LOIZEAU J.-L., RAJKA G., CANDAUDAP F. et CARBONNEL J.-P. (1997)

Radionuclides in a cave sediment core from Ghetarul de Sub Zgurasti (Romania). *Symposium International OM2, Observation de l'environnement de montagne en Europe*, fasc. 7, Bulgarie, p. 259-266.

PRICE C.P. et NEWMAN D.E. (2001)

Using the R/S statistic to analyse AE data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 63, p. 1387-1397.

PRIGOGINE I. (1996)

La fin des certitudes. Ed. Odile Jacob, 225 pages.

Q

QUINIF Y. (1983)

Eléments d'une approche énergétique du karst - Application à quelques exemples réels de karsts. *Karstologia*, n° 1, p. 47-54.

QUINIF Y. (1988)

Analyse des isotopes de la famille de l'uranium 238 par spectrométrie alpha d'échantillons de travertins des coupes de Roquevaire et de Meyrargues en vue de datations radiométriques. *Travaux U.R.A. 903 CNRS*, n° XVII, p. 37-38.

QUINIF Y. (1989a)

La datation Uranium-Thorium. *Spéléochronos* n°1, p. 3-22.

QUINIF Y. (1989b)

Datation d'un interstade au sein de la dernière glaciation. *Spéléochronos* n°1, p. 23-28.

QUINIF Y. (1990)

La datation des spéléothèmes appliquée aux séquences

sédimentaires souterraines pour une mise en évidence des ruptures paléoclimatiques.

Karstologia Mémoires, n°2, Colloque Remplissages karstiques et paléoclimats, p. 23-32.

QUINIF Y. (1992)

Datation uranium/thorium d'une séquence stalagmitique du Pléistocène supérieur en Languedoc (le couloir blanc, Grotte de Clamouse).

C. R. Acad. Sci. Paris, t. 314, série II, p. 1035-1042.

QUINIF Y. (1994)

Les dépôts karstiques : Concepts et méthodologies.

In : *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*, Maire R., Pomel S. et Salomon J.-N., P.U.B., p. 55-71.

QUINIF Y. (2002)

La grotte de Montfat : un jalon dans l'évolution de la vallée de la Meuse.

Karstologia, n° 40, p. 13-18.

QUINIF Y. et BASTIN B. (1989)

Modalités et chronologie de la sédimentation souterraine en Belgique au Pléistocène moyen et supérieur.

Acta Carsologica, vol. XVIII, p. 71-87.

QUINIF Y. et BASTIN B. (1990)

Datation d'une séquence pollinique éémienne dans une stalagmite par la datation U/Th.

Spéléochronos, n° 2, p. 11-20.

QUINIF Y. et DEFLANDRE G. (1990)

Datation U/Th et analyse pollinique d'une séquence stalagmitique.

Spéléochronos, n° 2, p. 29-32.

QUINIF Y. et QUINIF G. (2002)

Méthodes et éléments de cartographie d'un paléokarst - L'exemple de la carrière du Clypot (Hainaut, Belgique).

Karstologia, n° 39, p. 1-8.

QUINIF Y., GENTY D. et BASTIN B. (1992)

Une série sédimentaire endokarstique Tardiglaciaire et Holocène : le remplissage de la nouvelle galerie de la grotte de Rochefort.

Spéléochronos, n° 4, p. 31-40.

QUINIF Y., GENTY D. et MAIRE R. (1994)

Les spéléothèmes : un outil performant pour les études paléoclimatiques.

Bull. Soc. Géol. Fr., tome 165, n°6, p. 603-612.

QUINIF Y. et MAIRE R. (1989)

Intérêt des datations U/Th sur les concrétionnements endokarstiques pour l'étude du Quaternaire. Méthodologie et applications aux grandes cavités pyrénéennes et alpines.

Travaux U.R.A. 903 CNRS, n° XXVIII, p. 53-57.

QUINIF Y. et MAIRE R. (1998)

Pleistocene deposits in Pierre St Martin Cave, French Pyrenees.

Quaternary Research, n° 49, p. 37-50.

QUINIF Y., DUPUIS C., BASTIN B. et JUVIGNE E. (1979)

Etude d'une coupe dans les sédiments quaternaires de la grotte de la Vilaine Source (Arbre, Belgique).

Ann. Soc. Géol. Belg., t. 102, p. 229-241.

R

RACOVITA G. (1972)

Sur la corrélation entre l'évolution du climat et la dynamique des dépôts souterrains de glace dans la grotte de Scarisoara.

Travaux de l'Institut de Spéléologie de Bucarest, Tome XI, p. 373-392.

RAYMOND G.M., PERCIVAL D.B., et BASSINGHTWAIGHTE J.B. (2003)

The spectra and periodograms of anti-correlated discrete fractional Gaussian noise.
Physica A, vol. 322, p. 169-179.

RENAULT P. (1967)

Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse.
Annales de Spéléologie, t. 22 et t. 23.

RENAULT P. (1970)

La formation des cavernes.
Ed. PUF, QJS n° 1400, 126 pages.

RENAULT P. (1987)

Phénomènes karstiques.
In : *Géologie de la Préhistoire*, Miskovsky J.-C. dir, Ed. GéoPré Paris, p. 169-196.

RENAULT P. (1990a)

Introduction à une histoire des études karstiques.
Karstologia, n° 15, p. 1-10.

RENAULT P. (1990b)

Réflexions sur la notion de remplissages karstiques.
Karstologia Mémoires n° 2, Colloque Remplissages Karstiques et Paléoclimats, p. 61-62.

RENAULT-MISKOVSKY J. (1986)

Relations entre les spectres archéo-polliniques du Sud-Est de la France et les oscillations climatiques entre 125 000 ans et le maximum glaciaire.
Bull. As. Fr. Et. Quat., vol. 1-2, p. 56-62.

RISER J. direction (1999)

Le Quaternaire – Géologie et milieux naturels.
Ed. Dunod, coll. Sciences Sup, 319 pages.

RIVIERE A. (1977)

Méthodes granulométriques – Techniques et interprétations.
Ed. Masson, Paris, 170 pages.

ROBERT C. (2004)

Late Quaternary variability of precipitation in Southern California and climatic implications : clay mineral evidence from the Santa Barbara Basin, ODP Site 893.
Quaternary Science Reviews, vol. 23, p. 1029-1040.

RODITIS J.-C. et PONT D. (1993)

Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta.
Méditerranée, n° 3-4, p. 5-18.

ROQUES H. (1969)

Problèmes de transferts de masse posés par l'évolution des eaux souterraines.
Annales de Spéléologie, tome 24, fasc. 3, p. 455-494.

ROSIQUE T. (1996)

Morphogénèse et évolution des paléoenvironnements alpins de la fin des temps glaciaires au début de l'Holocène. L'exemple de la moyenne Durance (Alpes françaises du Sud).
Et. Géogr. Phys., n° XXV, p. 45-48.

ROSIQUE T. (1997)

Détritisme et morphogénèse à la fin du Würm dans les Alpes françaises méridionales (moyenne Durance).
Quaternaire, vol. 8, n° 1, p. 39-48.

ROUBAULT M. (1982)

Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant.

Ed. Lamarre-Poinat, Paris, 3^{ème} éd., 364 pages.

ROUSSEAU D.-D. et PUISSEGUR J.-J. (1999)

Climatic interpretation of terrestrial malacofaunas of the last interglacial in southeastern France.
Palaeo, vol. 151, p. 321-336.

ROUSSET P. (1982)

Carte d'hydrogéologie du Vercors.
Parc naturel régional du Vercors et Institut Dolomieu de Géologie, Grenoble.

RUFFALDI P., BOSSUET G. et SCHOELLAMMER P. (1997)

Dynamique sédimentaire et chronologie de remplissages lacustres fini- et post-würmiens du massif jurassien. Le bassin lacustre de Cerin (Jura, France).
Et. Géogr. Phys., Suppl. n° XXVI, p. 21-24.

RUIZ BUSTOS A. (1997)

Climatic and biostratigraphic data obtained from the Quaternary mammals collected in carbonated lacustrine and karstic environments in the south of Spain.
Et. Géogr. Phys., Suppl. n° XXVI, p. 17-19.

S

SABAUT M. (2005)

Géomorphologie de l'interfluve Ardèche/Céze – Cartographie et emboîtements de surface.
Mémoire de Master1, Edytem, Université de Savoie, 85 pages.

SADIER B. (2004)

Etude géomorphologique d'un grand volume karstique – Exemple de la alle 2 du réseau II d'Ornac – Issirac (Ardèche, France).
Mémoire de Maîtrise, Edytem, Université de Savoie, 81 pages.

SAINT-MARTIN J.-P. (2003)

La Méditerranée à sec.
La Recherche, hors série n° 11, p. 52-55.

SAINT-ONGE G., LEDUC J., BILODEAU G., DE VERNAL A., DEVILLERS R., HILLAIRES-MARCEL C., LOUCHEUR V., MARMEN S., MUCCI A. et ZHANG D. (1999)

Caractérisation des sédiments récents du fjord du Saguenay (Québec) à partir de traceurs physiques, géochimiques, isotopiques, et micropaléontologiques.
Géographie Physique et Quaternaire, vol. 53, n° 3, p. 339-350.

SALOMON J.-N. (1997)

Les influences climatiques sur la géomorphologie karstique : exemples des milieux tropicaux et arides.
Quaternaire, vol. 8, n° 2-3, p. 107-117.

SALOMON J.-N. (2000)

Précis de Karstologie.
P.U.B., Coll. « Scieteren », 250 pages.

SALVADOR P.-G. (1999)

L'édification holocène de la plaine alluviale du Rhône dans le bassin de Malville-Sault-Brénaz (Ain et Isère, France).
Géomorphologie, n° 1, p. 3-22.

SALVADOR P.-G. (2001)

L'évolution holocène de la plaine alluviale de l'Isère dans l'ombilic de Moirans (Isère, France).
Quaternaire, vol. 12, n° 1-2, p. 127-135.

SALVATI R. et SASOWSKY I.D. (2002)

Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge.
Journal of Hydrology, vol. 264, P. 1-11.

SANDERS L. (1989)

L'analyse statistique des données en Géographie.
Ed. GIP Reclus, 267 pages.

SARROT-REYNAULD J. (1971)

Etudes hydrogéologiques dans le Vercors.
Annales de Besançon, Colloque d'Hydrogéologie Karstique,
fasc. 15, p. 33-36.

SAVARD J. (2000)

Evolution temporelle des couches accidentelles (crués, séismes, glissements de terrain) récentes du fjord de Saguenay d'après des profils de radio-isotopes de courte période (^{210}Pb , ^{137}Cs , $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$).
Mémoire de Maîtrise de Sciences de la Terre, Université du Québec, Montréal, 89 pages.

SAVY B. et TOUCHART L. (2003)

Les lacs à destratificateur thermique et le cas de Mas Chaban (Charente, France).
Revue de Géographie Alpine, vol. 1, p. 81-91.

SBAI A., EK C., DROUIN P., CHIROL B., ARIAGNO J.-C., PELISSON A. et QUINIF Y. (1995)

Les remplissages karstiques de la grotte Sous-les-Sangles : Sédimentologie et évolution spéléomorphologique d'une grotte du Jura Méridional (France).
Quaternaire, vol. 6, n° 1, p. 35-45.

SCHMIDT V.A. (1982)

Magnetostratigraphy of sediments in Mammoth Cave, Kentucky.
Science, vol. 217, p. 827-829.

SCHROEDER J. et DESMARAIS L. (1988)

Morphologie et sédiments de la plus grande grotte du bouclier canadien : la Caverne Lafleche, Québec.
Ann. Soc. Géol. Belg., t. 111, p. 173-182.

SCHWARCZ H.P., HARMON R.S., THOMPSON P. et FORD D.C. (1976)

Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance.
Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 40, p. 657-665.

SEDIK K.N. et AMER A.M. (2001)

Sedimentological and technological studies of Abu Tartur black shales, Western Desert, Egypt.
Physicochemical Problems of Mineral Processing, vol. 35, p. 141-152.

SHEFFER N.A., ENZEL Y., BENITO G., GRODEK T., POART N., LANG M., NAULET R. et COEUR D. (2003)

Paleofloods and historical floods of the Ardèche river, France.
Water Resources Research, vol. 39, n° 12, p. 1376-1389.

SHOPOV Y.Y. (2003)

20 years of speleothem paleoluminescence records of environmental changes. A step forward to high resolution quantitative records of the Global Change.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 151.

SHOPOV Y.Y., FORD D.C. et SCHWARCZ H.P. (1994)

Luminescent microbanding in speleothems : High-resolution chronology and paleoclimate.
Geology, vol. 22, p. 407-410.

SLABE T. (1995)

Cave rocky relief and its speleogenetical significance.
Ed. ZRC 10, Ljubljana, 128 pages.

SMART P.L. et RICHARDS D.A. (2003)

Paleoclimate determination from speleothems : progress, problems and prospects.

Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 27-29.

SORDOILLET D. (1999)

Un exemple d'enregistrement anthropique et climatique : le remplissage de la grotte du Gardon (Ambérieu-en-Bugey, Ain, France).
Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de Géographie Physique de l'Université de Provence, p. 179-184.

SORRIAUX P. (1982)

Contribution à l'étude de la sédimentation en milieu karstique. Le système de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées ariégeoises).
Thèse de Troisième Cycle, Laboratoire Souterrain du CNRS Moulis, 255 pages.

SPADINI L., STURM M., WEHRLI B. et BOTT M. (2003)

Analysis and dating of Pb, Cd, Cu, Zn sediment profiles from the Vitznau basin of lake Lucerne (Switzerland).
Revue de Géographie Alpine, vol. 1, p. 41-49.

SPIEGEL M. (1988)

Statistique.
Série Schaum, 430 pages.

SPÖTL C. et MANGINI A. (2002)

Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard-Oeschger events during isotope stage 3 : implications for the absolute chronology of Greenland ice cores.
E.P.S.L., vol. 203, p. 507-518.

STE A.R.R. et MOTT R.J. (1998)

Deglaciation of Nova Scotia : Stratigraphy and chronology of lake sediment cores and buried organic sections.
Géographie Physique et Quaternaire, vol. 52, n° 1, p. 1-19.

STUIVER M. et REIMER P.J. (1993)

Extended ^{14}C data base and revised calib 3.0 ^{14}C age calibration program.
Radiocarbon, vol. 35, n° 1, p. 215-230.

STUIVER M., GROOTES P.M. et BRAZUNIAS T.F. (1995)

The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, oceans and volcanoes.
Quaternary Research, n° 44, p. 341-354.

STURM M. et MATTER A. (1978)

Turbidites and varves in Lake Brienz (Schweiz) : deposition of clastic detritus by density currents.
In : *Modern and ancient lake sediments*, Matter A. and Tucker M.E., sp. publ. intern. Assoc. Sedim, vol. 2, p. 145-166.

SUANEZ S. et PROVENSAL M. (1993)

Etude des modifications morphosédimentaires du littoral à l'embouchure du Rhône : plages de Piémanson et Napoléon.
Méditerranée, n° 3-4, p. 43-56.

SUC J.-P. (1989)

Distribution latitudinale et étagement des associations végétales au Cénozoïque supérieur dans l'aire ouest-méditerranéenne.
Bull. Soc. Géol. Fr., t. 5, n° 3, p. 541-550.

SUC J.-P., VIOLANTI D., LONDEIX L., POU MOT C., ROBERT C., CLAUZON G., GAUTIER F., TURON J.-L., FERRIER J., CHIKHI H. et CAMBON G. (1995)

Evolution of the Messinian Mediterranean environments : the Tripoli Formation at Capodarso (Sicily, Italy).
Review of Palaeobotany and Palynology, vol. 87, p. 51-79.

SUN D., BLOEMENDAL J., REA D.K., VANDEBBERGHE J., JIENG F., AN Z. et SU R. (2002)

Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical

partitioning of the sedimentary components.
Sedimentary Geology, vol. 152, p. 263-277.

SZABO B.J., KOLESAR P.T., RIGGS A.C., WINOGRAD I.J. et LUDWIG K.R. (1994)

Paleoclimatic inferences from a 120 000 yr calcite record of water-table fluctuation in Browns Room of Devils Hole, Nevada.
Quaternary Research, n° 41, p. 59-69.

T

TALOUR B. (1973)

La Glacière d'Autrans.
CDS Isère, Bull. annuel, Scialet n°2, p. 17-18.
CDS Isère, *Scialet* spécial 2ème congrès d'hydrologie karstique dans les Préalpes françaises du Centre et du Jura, Grenoble, p.81-86.

TAYLOR R.E., STUIVER M. et REIMER P.J. (1996)

Development and extension of the calibration of the radiocarbon time scale : archaeological applications.
Quaternary Science Reviews, vol. 15, p. 655-668.

TERRANOVA S. (1997)

Contribution à la connaissance des modes d'infiltration des eaux à l'origine des spéléothèmes en milieu karstique – Exemple d'un traçage artificiel des eaux du réseau Coufin-Chevaline (Choranche –Vercors – France).
Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Grenoble I, 161 pages.

TEXIER J.-P. (1997)

Les dépôts du site magdalénien de Gandil à Bruniquel (Tarn-et-Garonne) : Dynamique sédimentaire, signification paléoenvironnementale, lithostratigraphie et implications archéologiques.
Paleo, n° 9, p. 263-277.

TEXIER J.-P. et BERTRAN P. (1995)

Les dépôts du site moustérien de Combe-Capelle Bas (Dordogne) : Leur signification dynamique et paléoenvironnementale.
Paleo, n° 7, p. 27-48.

THIEBAULT S. (1991)

Approche de l'environnement végétal préhistorique pendant la fin du Tardiglaciaire et l'Holocène entre Alpes et Jura par l'analyse anthracologique.
Quaternaire, vol. 2, p. 49-58.

THIEBAULT S., GIRARD M. et BUI THI MAI (1995)

Le milieu végétal du Tardiglaciaire à l'Holocène d'après les analyses de charbons de bois et de pollens.
In : *Epipaléolithique et Mésolithique en Europe*, Livret-Guide de l'excursion Préhistoire et Quaternaire en Vercors, p. 32-37.

TORRENCE C. et COMPO G.P. (1998)

A practical guide to wavelet analysis.
Bull. Am. Meteor. Soc., vol. 79, n° 1, p. 61-78.

TRENTESAUX A., RECOURT P., BOUT-ROUMAZEILLES V. et TRIBOVILLARD N. (2001)

Carbonate grain-size distribution in hemipelagic sediment from a laser particule sizer.
Journal of Sedimentary Research, sect. A, vol. 71, n° 5, p. 859-863.

TRUDGILL S.T., PICKLES A.M. et SMETTEM K.R.J. (1983)

Soil-water residence time and solute uptake – 2. Dye tracing and preferential flow predictions.
Journal of Hydrology, n° 62, p. 279-285.

TRUDGILL S.T., PICKLES A.M., SMETTEM K.R.J. et CRABTREE R.W. (1983)

Soil-water residence time and solute uptake – 1. Dye tracing and rainfall events.
Journal of Hydrology, n° 60, p. 257-279.

TSIROPOULA G. (2003)

Signatures of solar activity variability in meteorological parameters.
Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 65, p. 469-482.

U

UGGERI A., BINI A. et QUINIF Y. (1990)

Datation des sédiments de la Grotte Marelli (Italie, Lombardie, Varèse).
Spéléochronos, n° 2, p. 21-28.

V

VAIL P.R., COLIN J.-P., DU CHENE R.J., KUCHLY J., MEDIAVILLA F. et TRIFILIEFF V. (1987)

La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du bassin de Paris.
Bull. Soc. Géol. Fr., tome 3, n°7, p. 1301-1321.

VANARA N. (2000)

Le karst du massif des Arbaillies (Pyrénées Occidentales, France). Contrôle tectonique, climatique, hydrogéologique et anthropique de la morphogenèse.
Karstologia Mémoires, n° 8, 320 pages.

VANDENBERGHE J. (2000)

A global perspective of the European chronostratigraphy for the past 650 ka.
Quaternary Science Reviews, vol. 19, p. 1701-1707.

VANDENBERGHE J., LU H., SUN D., VAN HUISSTEDEN J. et KONERT M. (2003)

The late Miocene and Pliocene climate in East Asia as recorded by grain size and magnetic susceptibility of the Red Clay deposits (Chines Loess Plateau).
Palaeo, vol. 3254, p. 1-17.

VAN DE VELDE K., BOUTRON C., FERRARI C., BELLOMI T., BARBANTE C., RUDNEV S. et BOLSHOV M. (1998)

Seasonal variations of heavy metals in the 1960s Alpine ice : sources versus meteorological factors.
E.P.S.L., vol. 164, p. 521-533.

VATAN A. (1967)

Manuel de sédimentologie.
Ed. Technip, Paris, 397 pages.

VAUDOUR J. (1994)

Evolution holocène des travertins de vallée dans le midi méditerranéen français.
Géographie Physique et Quaternaire, vol. 48, n° 3, p. 315-326.

VAUTE L., DROGUE C., GARRELLY L. et GHELLENSTEIN M. (1997)

Relations between the structure of storage and the transport of chemical compounds in karstic aquifers.
Journal of Hydrology, vol. 199, p. 221-238.

VERHEYDEN S., KEPPENS E., QUINIF Y. et GENTY D. (1999)

Holocene palaeoclimatic and palaeo-environmental reconstruction inferred from stable isotopic and geochemical studies in Belgian caves and tunnels.
Karst 99, colloque européen, supplément n°XXVIII aux Travaux de

Géographie Physique de l'Université de Provence,
p. 205-208.

VERVIER P., LAURENTR., MARTIN D. et REYGROBELLET J.-L. (1991)

Informations fournies par les communautés animales sur l'hydrologie d'un système karstique : exemple du système de Foussoubie (Ardèche, France).
Hydrologie, n° 3, p. 225-233.

VIALA C. (2000)

Dictionnaire de la Spéléologie.
Ed. Spelunca Librairie, 264 pages.

VIGNERON E. (1997)

Géographie et statistique.
Ed. PUF, QSJ n° 3177, 128 pages.

VILLARD G. (1997)

Le plateau des Coulmes : l'occupation humaine, ses activités et les conséquences sur l'endokarst.
Mémoire de Maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 104 pages.

VINCENT E. (1985)

Distribution stratigraphique de la teneur en carbonate dans les sédiments néogènes et quaternaires de l'océan Pacifique.
Bull. Soc. Géol. Fr., t. 1, n° 6, p. 915-924.

VINTER J.-P. (1973)

Etude hydrogéologique du synclinal d'Autrans-Méaudre, massif du Vercors.
Thèse de 3ème cycle, Institut Dolomieu de Géologie de Grenoble.

VITAL J. et BINTZ P. (1991)

Les occupations protohistoriques et historiques des sites du cirque de Choranche (Isère).
Gallia Préhistoire, vol. 33, p. 207-267.

VIVIAN R. direction (1991)

Paléo-environnement holocène et archéologie dans les Alpes françaises du Nord et leur piémont.
Comité des travaux historiques et scientifiques, Section de Préhistoire et de Protohistoire, Paris, 183 pages.

VIVIAN R. (1997)

La mesure de l'érosion des glaciers tempérés.
Revue de Géographie Alpine, 1997, n°1, p. 10-32.

VON RAD U., SCHAAF M., MICHELS K.H., SCHULZ H., BERGER W.H. et SIROCKO F. (1999)

A 5000-yr record of climate change in varved sediments from the oxygen minimum zone off Pakistan, Northeastern Arabian Sea.
Quaternary Research, n° 51, p. 39-53.

W

WALLISER B. (1977)

Systèmes et modèles – Introduction critique à l'analyse de systèmes.
Ed. Seuil, Paris, 245 pages.

WEHLAND F., PANAIOTU C., APPEL E., HOFFMANN V., JORDANOVA D., JORDANOVA N. et DENUT I. (2002)

The dam breakage of Baia Mare – a pilot study of magnetic screening.
Physics and Chemistry of the Earth, vol. 27, p. 1371-1376.

WHITE W.B. (1988)

Geomorphology and hydrology of karst terrains.
Oxford University Press, New York, 464 pages.

WHITE W.B. (2002)

Karst hydrology : recent developments and open questions.
Engineering Geology, vol. 65, p. 85-105.

WIENIN M. (non daté)

Etude succincte des sables du siphon des sables d'Orgnac II.
Note de synthèse, inédit.

WILLIAMS P.W. (1983)

The role of the subcutaneous zone in karst hydrology.
Journal of Hydrology, n° 61, p. 45-67.

WILLIAMS P.W., FINK D., ZHAO J. et COLLERSON K. (2003)

Speleothem and cosmogenic evidence for climatic change and glacial advance in New Zealand indicates lack of synchronicity with the Northern Hemisphere.
Climate Changes : the Karst Record III, 3rd international conference, Montpellier, France, p. 178-179.

WINOGRAD I.J., COPLEN T.B., LANDWEHR J.M., RIGGS A.C., LUDWIG K.R., SZABO B.J., KOLESAR P.T., REVESZ K.M. (1992)

Continuous 500 000 year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada.
Science, vol. 258, 9 octobre, p. 255-260.

WOILLARD G. et MOOK W. (1982)

Carbon-14 dates at Grande Pile : Correlation of land and sea chronologies.
Science, vol. 215, 8 janvier, p. 159-161.

Y

YANG Y., LI B. et TAO Z. (1994)

Characterization of humic substances by Laser Raman spectroscopy.
Spectroscopy Letters, vol. 27, n° 5, p. 649-660.

Z

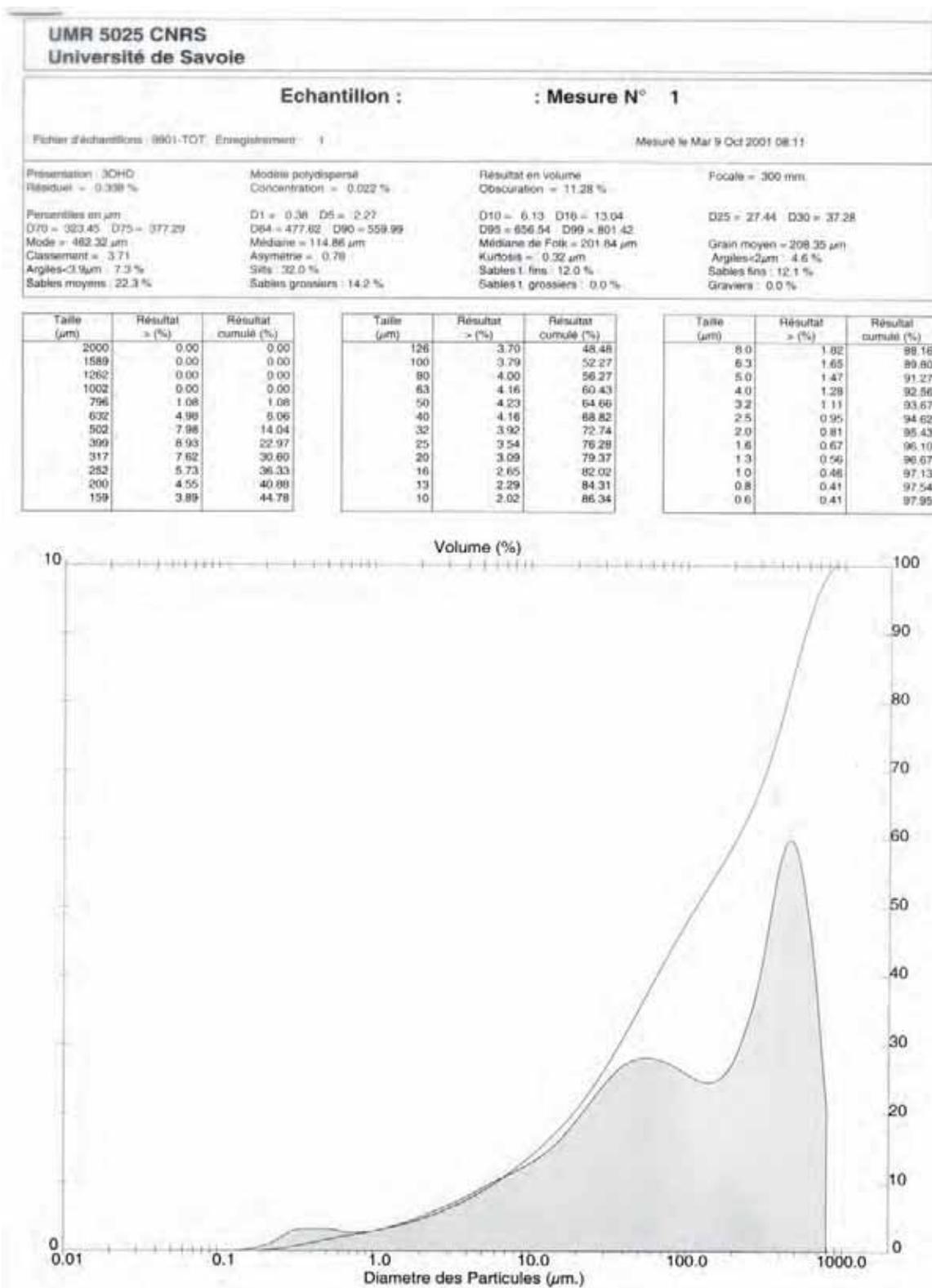
ZAMBO L. et FORD D.C. (1997)

Limestone dissolution processes in beke doline, Aggtelek National Park, Hungary.
Earth Surface Processes and Landforms, vol. 22, p. 531-543.

ANNEXES

ANNEXE 1

Les rapports de mesures du microgranulomètre laser Mastersizer de Malvern Instruments™ - Quelques exemples.

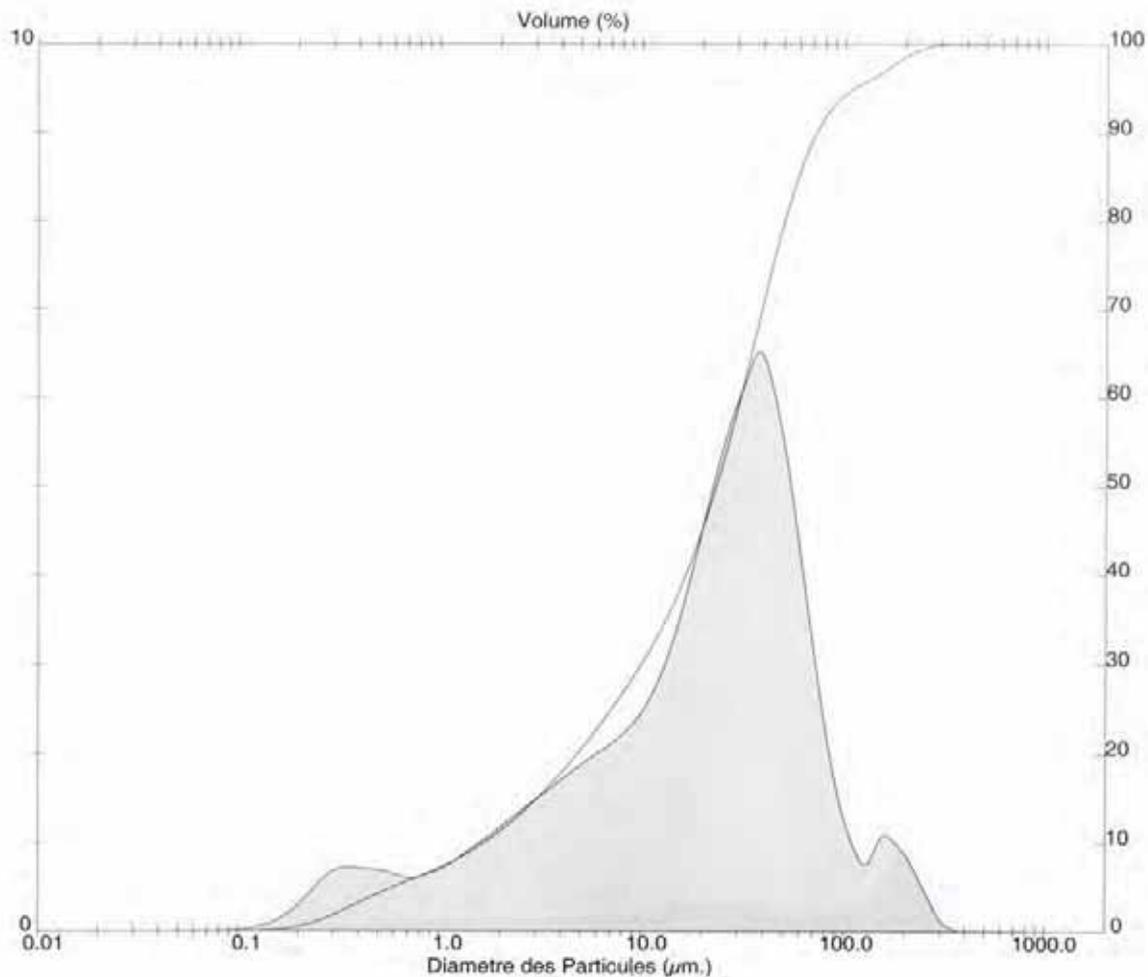


UMR 5025 CNRS Université de Savoie			
Echantillon :		: Mesure N° 2	
Fichier d'échantillons : 9901-TOT, Enregistrement : 2		Mesuré le Mar 9 Oct 2001 08:18	
Présentation : JCHD Résiduel = 0.639 %	Modèle polydispersé Concentration = 0.011 %	Résultat en volume Obscuracion = 12.55 %	Focale = 300 mm
Percentiles en µm D70 = 39.30 D75 = 44.31 Mode = 38.33 µm Classement = 2.49 Argiles < 3 µm : 17.5 % Sables moyens : 0.4 %	D1 = 0.24 D5 = 0.60 D84 = 56.92 D90 = 72.25 Médiane = 23.50 µm Asymétrie = 0.57 Sifs : 69.2 % Sables grossiers : 0.0 %	D10 = 1.68 D16 = 3.39 D95 = 110.69 D99 = 215.72 Médiane de Folk = 27.94 µm Kurtosis = 0.28 µm Sables t. fins : 9.0 % Sables t. grossiers : 0.0 %	D25 = 7.14 D30 = 10.01 Grain moyen = 29.35 µm Argiles < 2 µm : 11.3 % Sables fins : 3.9 % Gravier : 0.0 %

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
2000	0.00	0.00
1569	0.00	0.00
1262	0.00	0.00
1002	0.00	0.00
798	0.00	0.00
632	0.00	0.00
502	0.00	0.00
399	0.00	0.00
317	0.03	0.03
252	0.35	0.39
200	1.02	1.41
159	1.51	2.92

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
126	1.37	4.29
100	1.42	5.71
80	2.61	8.32
63	4.70	13.03
50	7.19	20.22
40	9.15	29.37
32	9.60	38.97
25	8.88	47.85
20	7.44	55.09
16	6.05	61.14
13	4.85	65.99
10	4.00	69.99

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
8.0	3.48	73.47
6.3	3.17	76.65
5.0	2.94	79.59
4.0	2.69	82.28
3.2	2.42	84.70
2.5	2.16	86.86
2.0	1.89	88.75
1.6	1.62	90.37
1.3	1.37	91.75
1.0	1.14	92.89
0.8	0.98	93.86
0.6	0.91	94.77

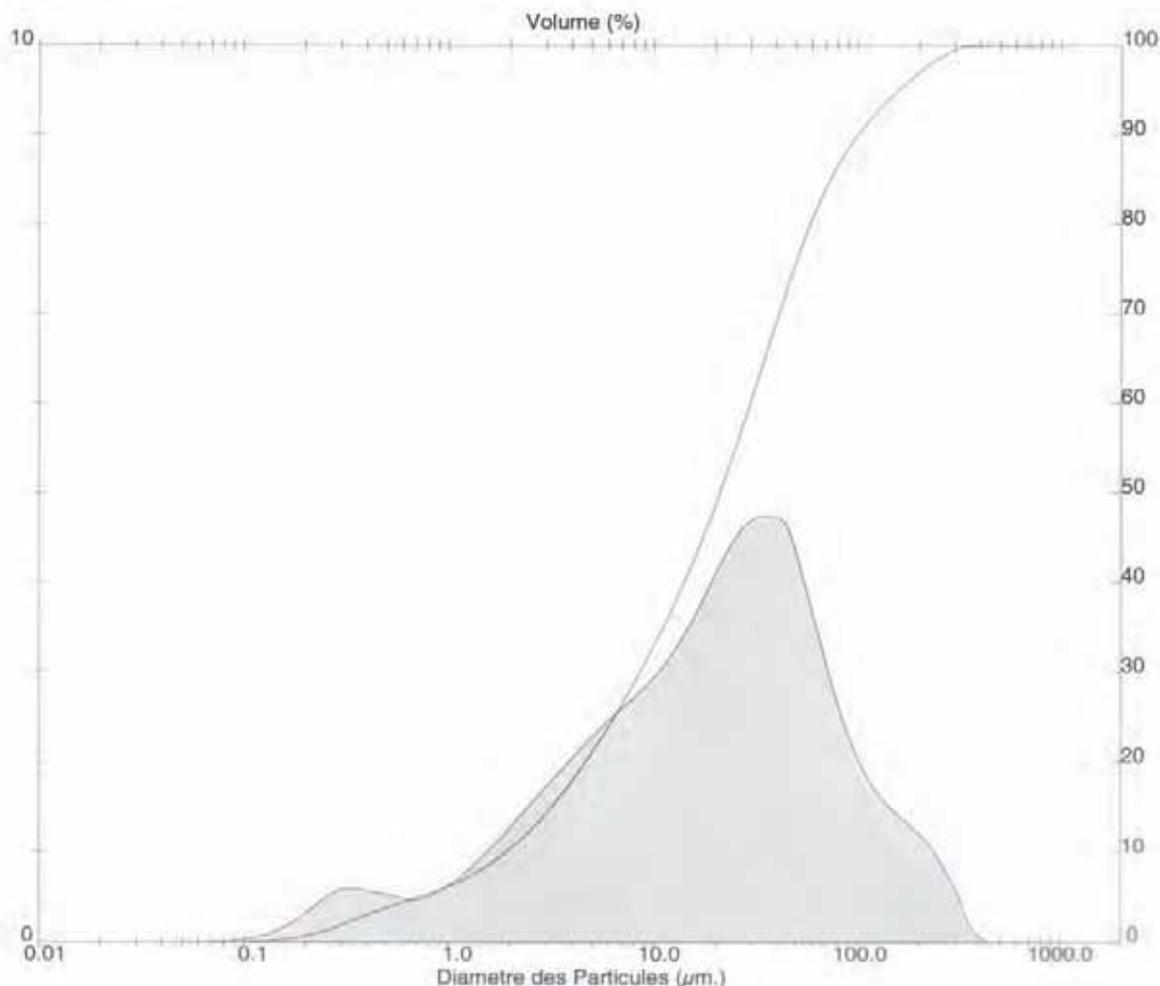


UMR 5025 CNRS			
Université de Savoie			
Echantillon :		: Mesure N° 7	
Fichier d'échantillons : 9901-TOT, Enregistrement : 7		Mesuré le Mar 9 Oct 2001 09:03	
Présentation : 30HD Résiduel = 0.332 %	Modèle polydispersé Concentration = 0.011 %	Résultat en volume Obscurcation = 12.84 %	Focale = 300 mm
Percentiles en µm D70 = 41.31 D75 = 48.72 Mode = 34.08 µm Classement = 2.75 Argiles < 3.9 µm : 17.5 % Sables moyens : 1.5 %	D1 = 0.23 D5 = 0.72 D84 = 70.12 D90 = 100.84 Médiane = 21.22 µm Asymétrie = 0.70 Sils : 64.0 % Sables grossiers : 0.0 %	D10 = 1.92 D16 = 3.46 D95 = 159.33 D99 = 271.68 Médiane de Folk = 31.60 µm Kurtosis = 0.21 µm Sables t. fins : 11.1 % Sables t. grossiers : 0.0 %	D25 = 6.44 D30 = 8.60 Grain moyen = 34.78 µm Argiles < 2 µm : 10.3 % Sables fins : 6.0 % Graviers : 0.0 %

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
2000	0.00	0.00
1589	0.00	0.00
1262	0.00	0.00
1002	0.00	0.00
796	0.00	0.00
632	0.00	0.00
502	0.00	0.00
399	0.01	0.01
317	0.33	0.34
252	1.09	1.43
200	1.63	3.05
159	1.98	5.03

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
126	2.30	7.33
100	2.78	10.09
80	3.52	13.61
63	4.63	18.24
50	5.90	24.14
40	6.95	31.09
32	7.12	38.20
25	6.96	45.16
20	6.46	51.62
16	5.78	57.40
13	5.14	62.54
10	4.62	67.16

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
8.0	4.24	71.40
6.3	3.92	75.32
5.0	3.61	78.92
4.0	3.25	82.17
3.2	2.88	85.05
2.5	2.50	87.55
2.0	2.11	89.67
1.6	1.72	91.39
1.3	1.38	92.76
1.0	1.06	93.83
0.8	0.85	94.68
0.6	0.72	95.39



UMR 5025 CNRS
Université de Savoie

Echantillon : : Mesure N° 12

Fichier d'échantillons : 9901-TOT, Enregistrement : 12

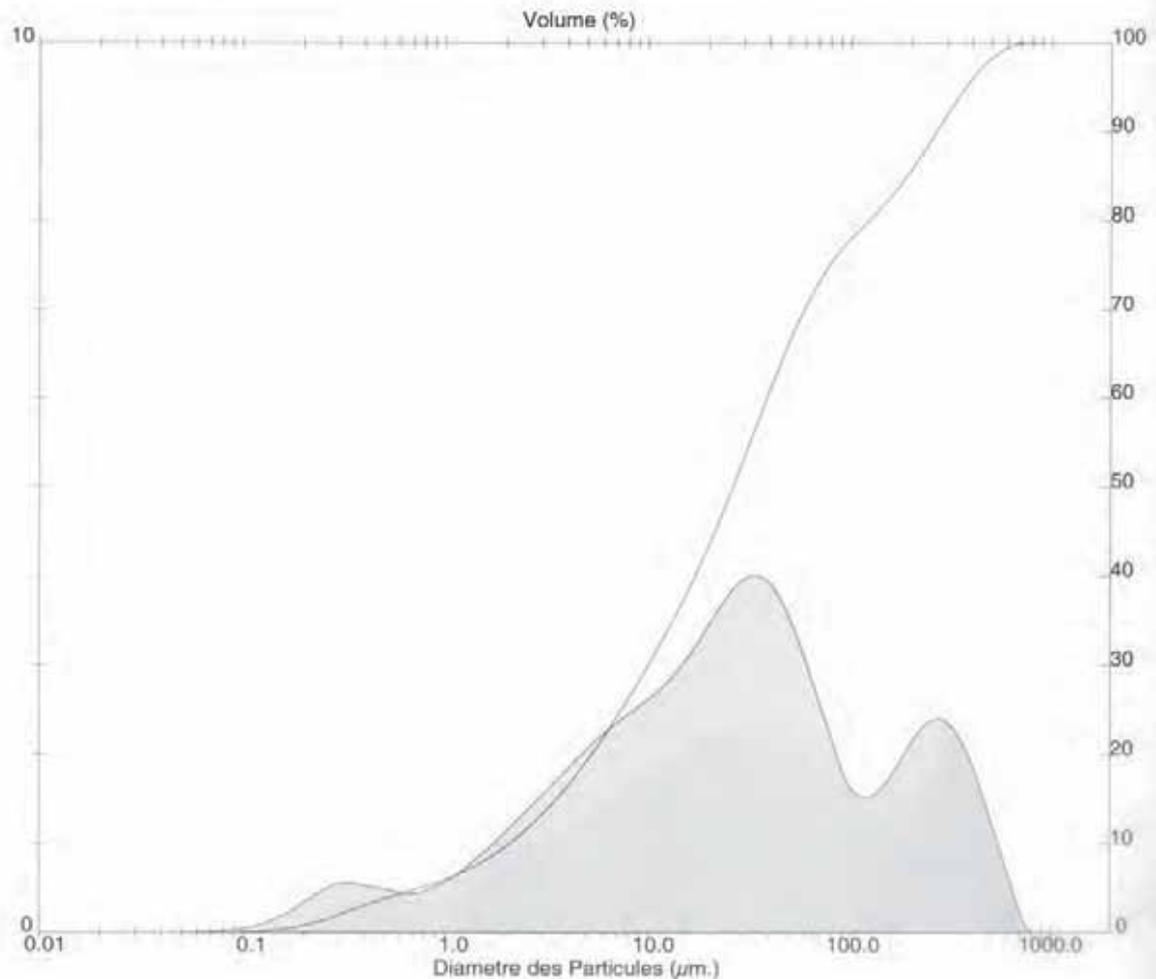
Mesuré le Mar 9 Oct 2001 09:30

Présentation : 3OHD Résiduel = 0.314 %	Modèle polydispersé Concentration = 0.013 %	Résultat en volume Obscurcissement = 13.41 %	Focale = 300 mm
Percentiles en µm D70 = 59.16 D75 = 78.70 Mode = 33.81 µm Classement = 3.26 Argiles < 3.0 µm : 16.2 % Sables moyens : 9.3 %	D1 = 0.22 D5 = 0.75 D84 = 175.70 D90 = 265.89 Médiane = 26.30 µm Asymétrie = 0.84 Sils : 54.9 % Sables grossiers : 1.7 %	D10 = 2.07 D15 = 3.85 D95 = 370.67 D99 = 550.10 Médiane de Folk = 68.62 µm Kurtosis = 0.14 µm Sables t fins : 9.2 % Sables t grossiers : 0.0 %	D25 = 7.39 D30 = 10.02 Grain moyen = 72.68 µm Argiles < 2 µm : 9.7 % Sables fins : 8.8 % Graviers : 0.0 %

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
2000	0.00	0.00
1599	0.00	0.00
1262	0.00	0.00
1002	0.00	0.00
796	0.00	0.00
632	0.31	0.31
502	1.34	1.65
399	2.39	4.04
317	3.23	7.27
252	3.59	10.86
200	3.43	14.29
159	2.93	17.21

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
126	2.44	19.66
100	2.33	21.99
80	2.85	24.84
63	3.86	28.70
50	4.87	33.56
40	5.65	39.22
32	6.00	45.22
25	5.09	51.11
20	5.46	56.57
16	4.92	61.49
13	4.44	65.93
10	4.08	70.02

Taille (µm)	Résultat > (%)	Résultat cumulé (%)
8.0	3.81	73.82
6.3	3.55	77.38
5.0	3.27	80.65
4.0	2.93	83.58
3.2	2.58	86.16
2.5	2.23	88.40
2.0	1.89	90.29
1.6	1.54	91.83
1.3	1.23	93.06
1.0	0.97	94.03
0.8	0.76	94.81
0.6	0.67	95.48



ANNEXE 2

Le principe des analyses en composantes principales (ACP).

Données de base

Cette méthode a pour objet la description des données contenues dans un tableau individus/ caractères numériques : p caractères sont mesurés sur n individus. Dès que le nombre p de caractères devient supérieur ou égal à 4, l'étude visuelle, la représentation graphique devient impossible. L'ACP intervient dans ces cas. C'est une méthode de réduction des caractères, permettant des représentations géométriques des individus et des q caractères, q étant inférieur à p et q étant appelées les composantes principales. Cette réduction n'est possible que si les p caractères initiaux ne sont pas indépendants et ont des coefficients de corrélation non nuls. L'ACP est une méthode factorielle et linéaire car la réduction des caractères s'opère par la construction de nouveaux caractères synthétiques par des combinaisons linéaires.

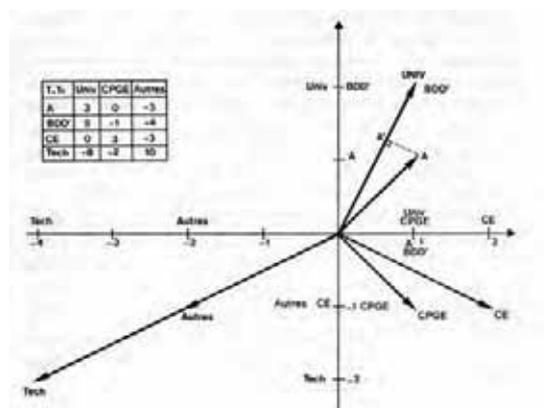
Exemple : ACP sur l'orientation des bacheliers de 1975 - cas d'une résolution graphique

Tableau initial

Séries	Destination			Total
	Université	CPGE	Autres	
A	13	2	5	20
BDD'	20	2	8	30
CE	10	5	5	20
Technique	7	1	22	30
Total	50	10	40	100

Légende : A, BDD', CE et Technique = séries du baccalauréat ; Univ = université ; CPGE = classes prépas grandes écoles

Résultat graphique de l'ACP



Commentaire : La figure montre le plan factoriel principal, porté par les axes qui sont les composantes principales. Sur un tel graphique, trois cas de comportement des individus peuvent alors être identifiés. Si l'angle entre deux individus est supérieur à 90° , on dit qu'il y a **opposition** (valeurs numériques négatives) et cela caractérise une répulsion entre les individus considérés. C'est le cas entre la série technique et l'Université, le nombre de bacheliers du technique qui va à l'Université est inférieur à la moyenne. Si l'angle entre deux individus est proche voire égal à 90° , on dit qu'il y a **quadrature** (valeurs nulles) et cela caractérise l'indépendance des individus considérés. En effet, on observe qu'il n'y a aucune relation entre les bacheliers de série A et les candidats aux CPGE. Enfin, si l'angle entre deux individus est inférieur à 90° , on dit qu'il y a **conjonction** (valeurs numériques positives) et cela caractérise une attraction, un lien entre les individus considérés. Il en va ainsi des bacheliers des séries A, B, D et D' qui vont en masse à l'Université.

Pour des informations plus complètes sur cette méthode d'analyse des données, se reporter aux références suivantes, dont cette annexe s'est largement inspirée.

BOUROCHE J.M. et SAPORTA G. (2002)

L'analyse des données.

Ed. PUF, QSJ n° 1854, 8^{ème} édition, 126 pages.

CIBOIS P. (2000)

L'analyse factorielle.

Ed. PUF, QSJ n° 2095, 5^{ème} édition, 126 pages.

ESCOFIER B. et PAGES J. (1998)

Analyses factorielles simples et multiples – Objectifs, méthodes et interprétation.

Ed. Dunod, 3^{ème} édition, 284 pages.

LEBART L., MORINEAU A. et PIRON M. (2000)

Statistique exploratoire multidimensionnelle.

Ed. Dunod, 3^{ème} édition, 439 pages.

ANNEXE 3

Le principe des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH).

Données de base

Cette méthode a pour objet de regrouper les individus en un nombre restreint de classes homogènes, par des classifications automatiques. La hiérarchisation produit des suites de partitions en classes de plus en plus vastes, emboîtées les unes dans les autres. Chaque classe d'une partition est incluse dans une classe de la partition suivante. La partition en k classes est obtenue en regroupant deux des classes de la partition en $k+1$ classes. Il y a donc au total $n-2$ partitions à déterminer puisque la partition en n classes est celle où chaque individu est isolé et la partition en une classe est celle où tous les individus sont regroupés. Le principal problème des méthodes de classification hiérarchique consiste à définir le critère de regroupement de deux classes, ce qui revient à définir une distance entre classes. Cela implique la notion d'inertie interclasse, prise en compte grâce à une méthode classiquement utilisée dans les CAH, la méthode de Ward.

Exemple : CAH sur les caractères climatiques de quelques grandes villes de France

Tableau initial

	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	aoû	sept	octo	nove	déce	lati	longi	moy	ampli
Bordeaux	5.6	6.6	10.3	12.8	15.8	19.3	20.9	21.0	18.6	13.8	9.1	6.2	44.50	-.34	13.33	15.4
Brest	6.1	5.8	7.8	9.2	11.6	14.4	15.6	16.0	14.7	12.0	9.0	7.0	48.24	-4.29	10.77	10.2
Clermont	2.6	3.7	7.5	10.3	13.8	17.3	19.4	19.1	16.2	11.2	6.6	3.6	45.47	3.05	10.94	16.8
Grenoble	1.5	3.2	7.7	10.6	14.5	17.8	20.1	19.5	16.7	11.4	6.5	2.3	45.10	5.43	10.98	18.6
Lille	2.4	2.9	6.0	8.9	12.4	15.3	17.1	17.1	14.7	10.4	6.1	3.5	50.38	3.04	9.73	14.7
Lyon	2.1	3.3	7.7	10.9	14.9	18.5	20.7	20.1	16.9	11.4	6.7	3.1	45.45	4.51	11.36	18.6
Marseille	5.5	6.6	10.0	13.0	16.8	20.8	23.3	22.8	19.9	15.0	10.2	6.9	43.18	5.24	14.23	17.8
Montpellier	5.6	6.7	9.9	12.8	16.2	20.1	22.7	22.3	19.3	14.6	10.0	6.5	43.36	3.53	13.89	17.1
Nantes	5.0	5.3	8.4	10.8	13.9	17.2	18.8	18.6	16.4	12.2	8.2	5.5	47.13	-1.33	11.69	13.8
Nice	7.5	8.5	10.8	13.3	16.7	20.1	22.7	22.5	20.3	16.0	11.5	8.2	43.42	7.15	14.84	15.2
Paris	3.4	4.1	7.6	10.7	14.3	17.5	19.1	18.7	16.0	11.4	7.1	4.3	48.52	2.20	11.18	15.7
Rennes	4.8	5.3	7.9	10.1	13.1	16.2	17.9	17.8	15.7	11.6	7.8	5.4	48.05	-1.41	11.13	13.1
Strasbourg	.4	1.5	5.6	9.8	14.0	17.2	19.0	18.3	15.1	9.5	4.9	1.3	48.35	7.45	9.72	18.6
Toulouse	4.7	5.6	9.2	11.6	14.9	18.7	20.9	20.9	18.3	13.3	8.6	5.5	43.36	1.26	12.68	16.2
Vichy	2.4	3.4	7.1	9.9	13.6	17.1	19.3	18.8	16.0	11.0	6.6	3.4	46.08	3.26	10.72	16.9
Moyenne	4.0	4.8	8.2	11.0	14.4	17.8	19.8	19.6	17.0	12.3	7.9	4.9	46.0	2.58	11.8	15.9
Ecart-type	1.94	1.81	1.48	1.37	1.45	1.73	2.06	1.94	1.79	1.77	1.74	1.89	2.22	3.21	1.55	2.25

Tableau 2.1. Moyennes des températures mensuelles de 15 villes de France. La latitude et la longitude (négative à l'ouest du méridien de Greenwich) sont exprimées en degrés. Moy : moyenne des 12 moyennes mensuelles. Ampli : amplitude thermique (moyenne mensuelle maximum – moyenne mensuelle minimum).

Résultat graphique de la CAH

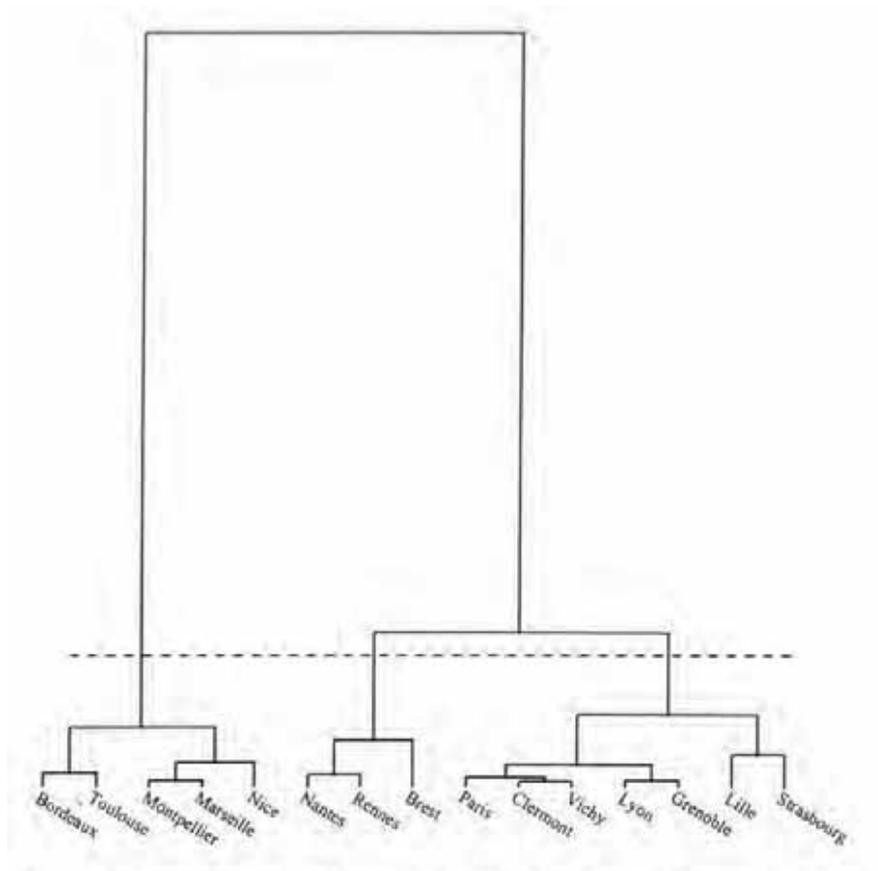


Figure 2.3. Arbre hiérarchique issu de l'algorithme de Ward appliqué au tableau 2.1.

Commentaire : On voit sur ce graphique que les deux villes les plus similaires sont Vichy et Clermont. Viennent ensuite d'autres paires comme Lyon / Grenoble, Montpellier et Marseille, Bordeaux et Toulouse. À ce niveau de lecture de l'arbre hiérarchique, ces trois « paires » sont indépendantes. Par contre, si on souhaite faire une analyse plus large de cette figure, on peut utiliser la ligne en pointillés qui fait apparaître une partition en trois grandes classes : les 5 villes méridionales, les 3 villes occidentales, et les 7 autres cités dans la dernière classe.

Pour des informations plus complètes sur cette méthode d'analyse des données, et notamment les travaux de Ward, se reporter aux références suivantes, dont cette annexe s'est largement inspirée.

BOUROCHE J.M. et SAPORTA G. (2002)
L'analyse des données.
 Ed. PUF, QSJ n° 1854, 8^{ème} édition, 126 pages.

CIBOIS P. (2000)
L'analyse factorielle.
 Ed. PUF, QSJ n° 2095, 5^{ème} édition, 126 pages.

ESCOFIER B. et PAGES J. (1998)
Analyses factorielles simples et multiples – Objectifs, méthodes et interprétation.
 Ed. Dunod, 3^{ème} édition, 284 pages.

LEBART L., MORINEAU A. et PIRON M. (2000)
Statistique exploratoire multidimensionnelle.
 Ed. Dunod, 3^{ème} édition, 439 pages.

ANNEXE 4

**Protocole de préparation des minéraux argileux pour
l'analyse diffractométrique – Réalisation des pâtes orientées.***Préparation de l'échantillon*

1. Broyer l'échantillon si nécessaire et le mettre dans un Erlenmeyer à col large
2. Ajouter un peu d'eau distillée de manière à diluer l'échantillon
3. Agiter le tout afin d'obtenir une solution homogène (sans grumeaux) ; passer aux ultrasons si nécessaire, pour désagréger l'échantillon.

Décarbonatation

4. Ajouter par petites quantités successives de l'HCl, diluer jusqu'à l'obtention d'un pH acide (vérification au papier pH ou au pH-mètre).

Rinçage

5. Laisser reposer et évacuer l'eau acide surnageante après floculation des argiles
6. Rajouter de l'eau distillée, laisser à nouveau reposer
7. Répéter plusieurs fois l'opération jusqu'à ce que les argiles restent en suspension ; si la floculation persiste malgré la désacidification, diviser l'échantillon en plusieurs pots (concentration d'argiles trop élevée).

Sédimentation

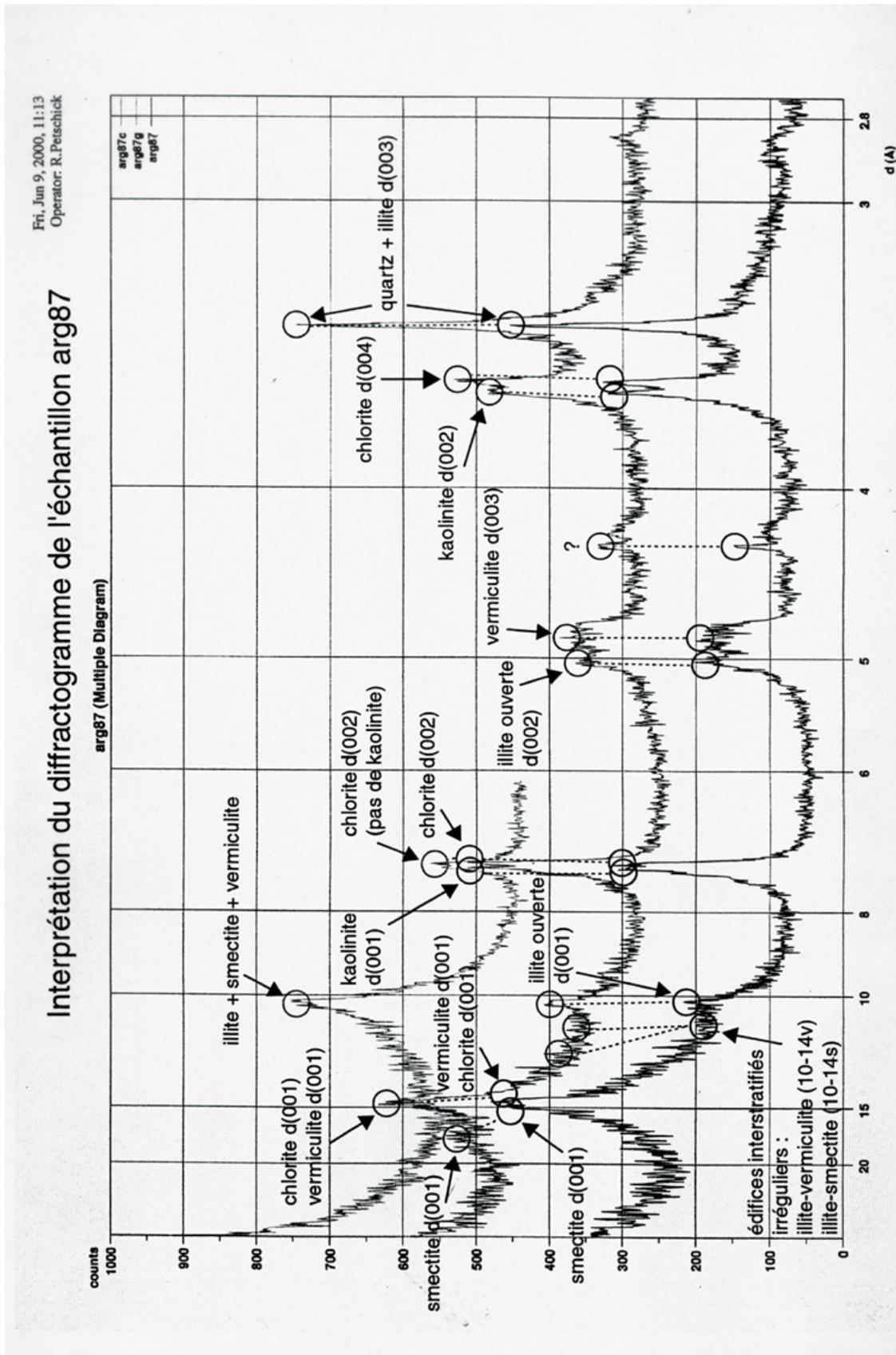
8. Bien mélanger la solution et la verser dans un pilulier que l'on bouche. Secouer à nouveau puis retirer immédiatement les bouchons et déclencher le chronomètre pour 48 minutes de repos
9. Prélever à l'aide de la seringue à 1 cm de profondeur (fraction de 2 μm) en plongeant l'aiguille jusqu'au trait, et mettre la solution prélevée dans les tubes à essai pour la centrifugeuse
10. Centrifuger, après équilibrage des tubes, à 3500 tours/minute pendant 40 minutes.

Etallement de l'argile sur la lame orientée

11. Après élimination du surnageant, le culot d'argile obtenu après centrifugation est mélangé et prélevé avec une spatule puis déposé en bordure d'une lame de verre à rainure
12. Etaler l'argile avec une lamelle de verre et nettoyer les bordures de la rainure
13. Laisser sécher les lames de pâtes orientées sous la hotte aspirante pendant 30 à 60 minutes puis les ranger dans une boîte prévue à cet effet.

ANNEXE 5

Exemple de diffractogramme interprété (d'après Blois, 2000).



ANNEXE 6

**Les critères d'interprétation pour les corrélations de Pearson
(d'après Chadule, 1994).**

TABLE DU r DE BRAVAIS-PEARSON

Sa construction repose sur le test d'hypothèse nulle (annexe I) :

$$H_0 : r = 0$$

Il y a indépendance entre la variable expliquée Y et la (les) variable(s) explicative(s) X .

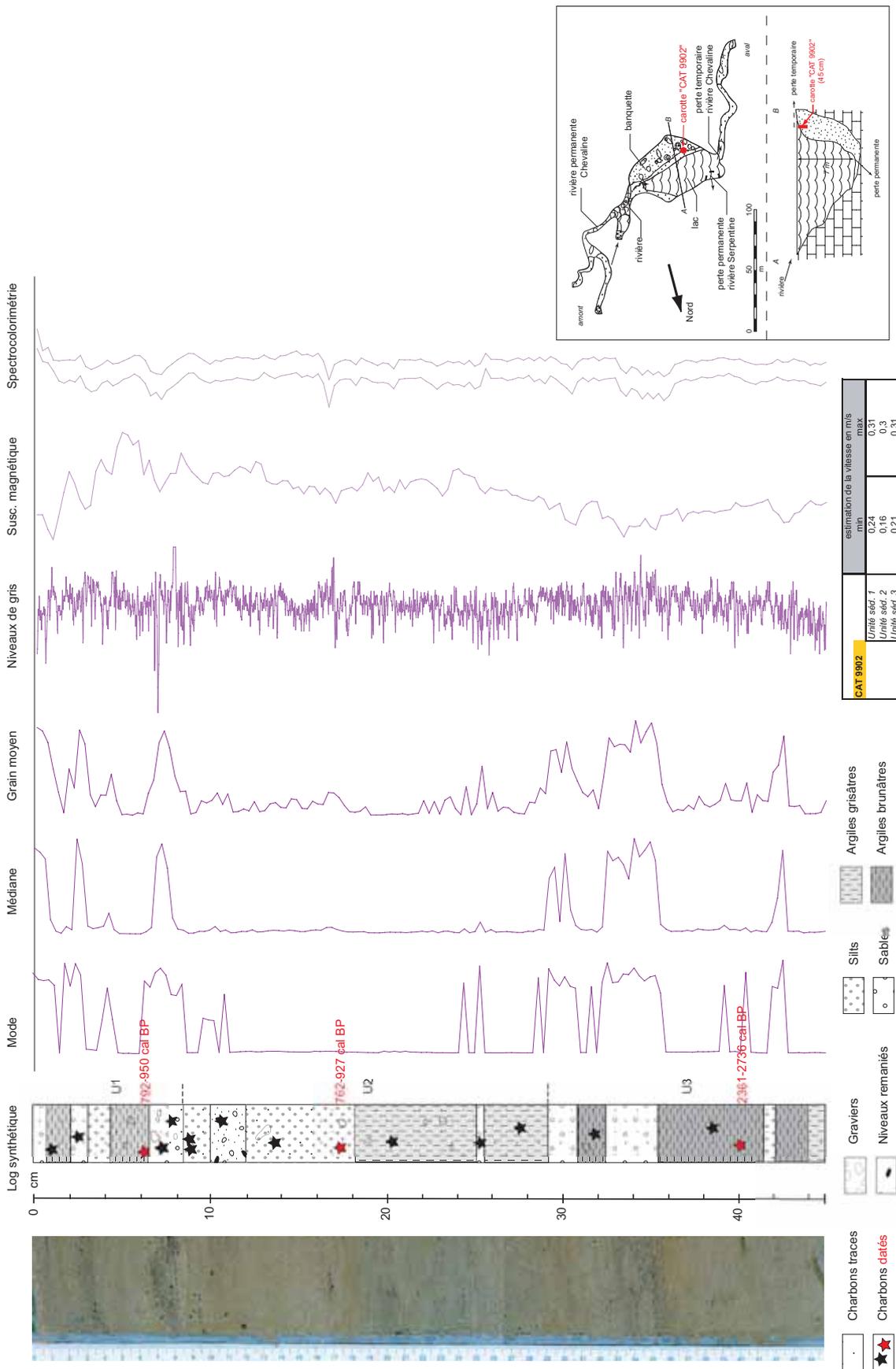
Pour un risque d'erreur α fixé et un nombre de degrés de liberté ν (annexe H), cette table indique le seuil inférieur de significativité d'un coefficient de corrélation linéaire : si r calculé est supérieur à r lu dans la table, on conclut qu'il existe une corrélation linéaire significative, avec un risque d'erreur α ; r se lit en fonction de ν .

$\nu = n - p - 1$ où n : nombre de valeurs d'une variable;

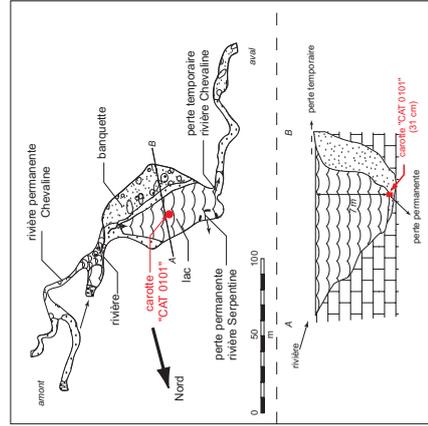
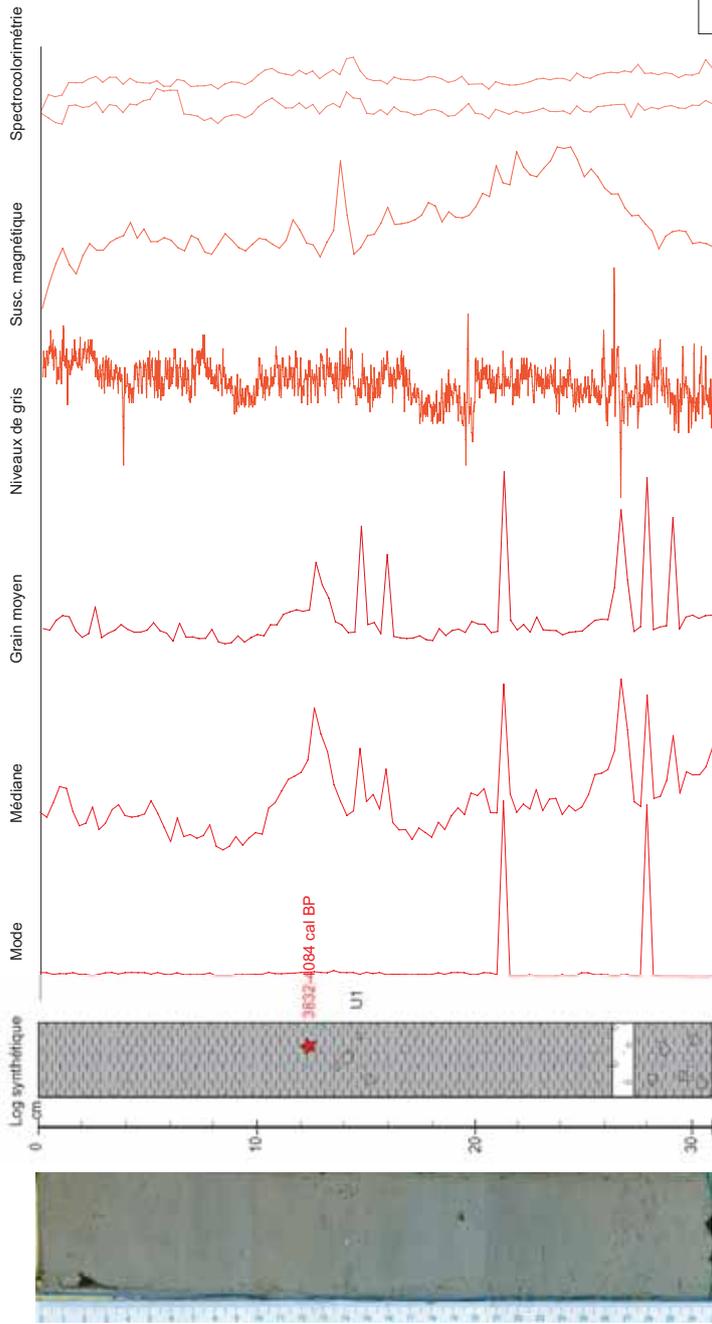
p : nombre de variables explicatives (une seule dans le cas d'une corrélation simple).

ν $\alpha \rightarrow$ ↓	0,10	0,05	0,02	ν $\alpha \rightarrow$ ↓	0,10	0,05	0,02
1	0,9877	0,9969	0,9995	16	0,4000	0,4683	0,5425
2	0,9000	0,9500	0,9800	17	0,3887	0,4555	0,5285
3	0,8054	0,8783	0,9343	18	0,3783	0,4438	0,5155
4	0,7293		0,8822	19	0,3687	0,4329	0,5034
5	0,6694	0,8114	0,8329	20	0,3598	0,4227	0,4921
6	0,6215	0,7545	0,7887				
7	0,5822	0,7067	0,7498	25	0,3233	0,3809	0,4451
8	0,5494	0,6664	0,7155	30	0,2960	0,3494	0,4093
9	0,5214	0,6319	0,6851	35	0,2746	0,3246	0,3810
10	0,4973	0,6021	0,6581	40	0,2573	0,3044	0,3578
				45	0,2428	0,2875	0,3384
11	0,4762	0,5529	0,6339	50	0,2306	0,2732	0,3218
12	0,4575	0,5324	0,6120	60	0,2108	0,2500	0,2948
13	0,4409	0,5139	0,5923	70	0,1954	0,2319	0,2737
14	0,4259	0,4973	0,5742	80	0,1829	0,2172	0,2565
15	0,4124	0,4821	0,5577	90	0,1726	0,2050	0,2422
				100	0,1638	1,1946	0,2301

Annexe 8
Choranche - Lac de la Cathédrale - Prélèvement CAT 9902 - Fiche descriptive complète



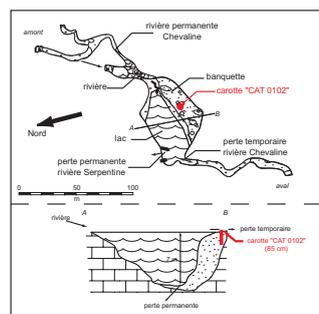
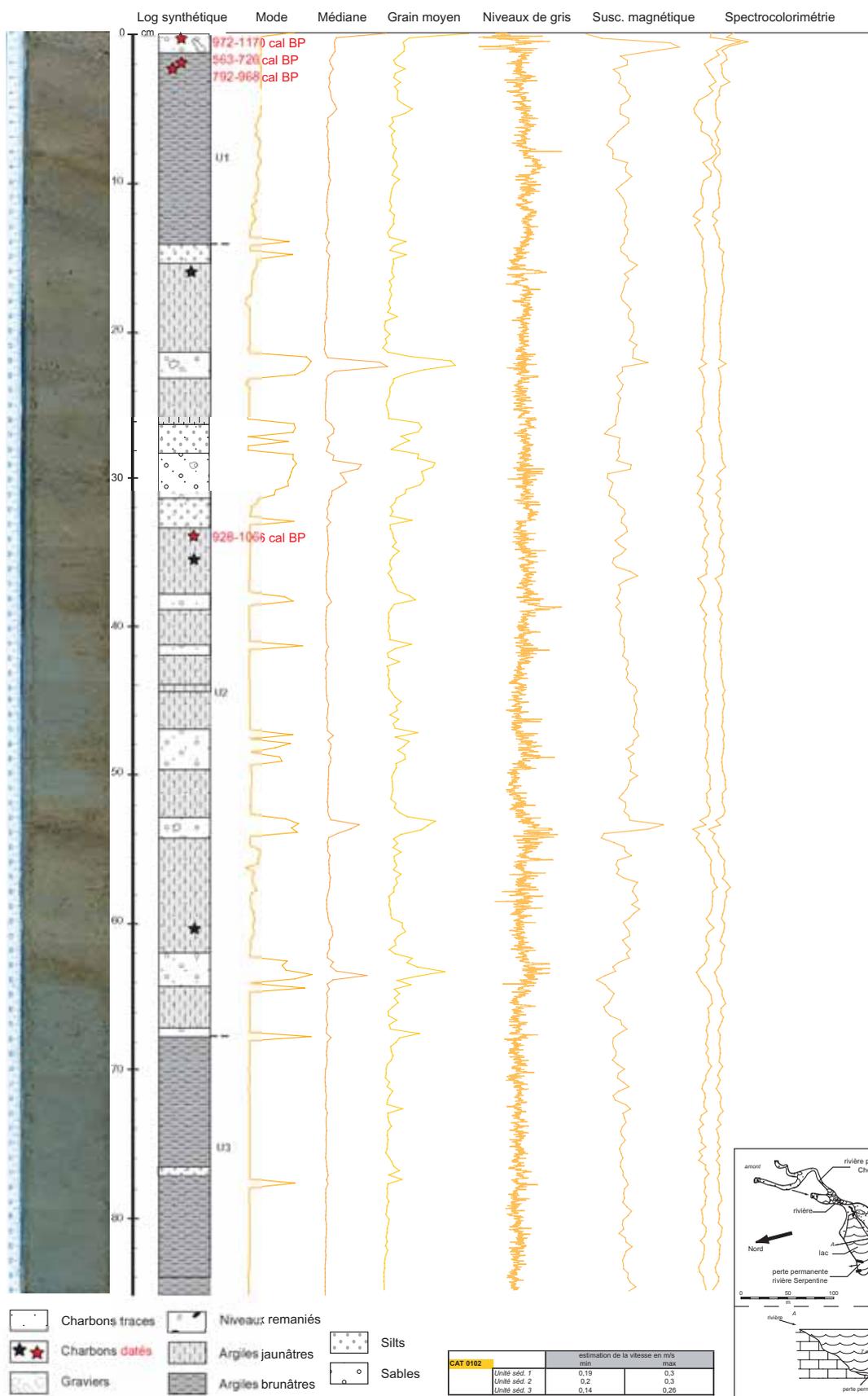
Annexe 9
Choranche - Lac de la Cathédrale - Prélèvement CAT 0101 - Fiche descriptive complète



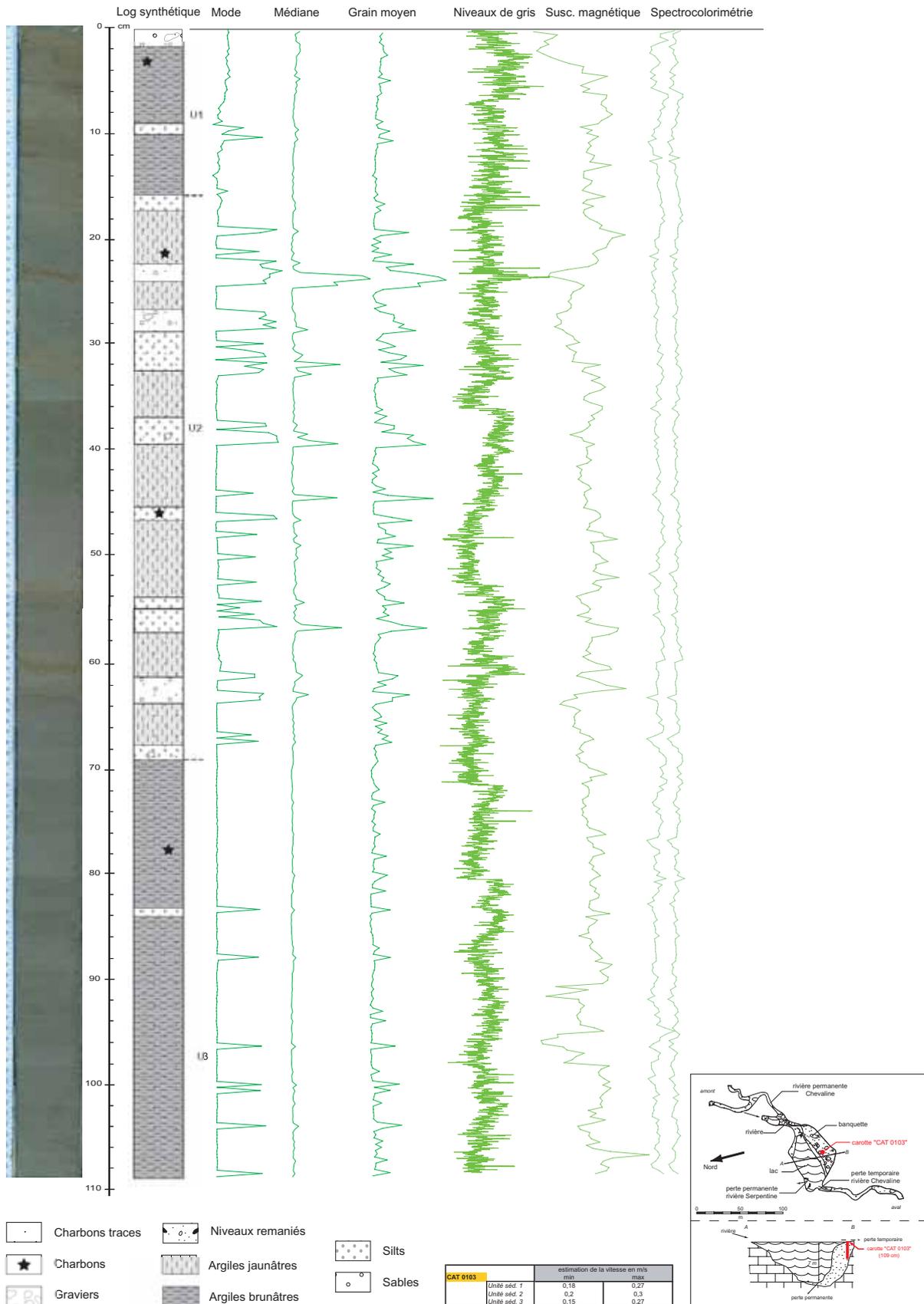
- Charbons traces
- Charbons datés
- Graviers
- Niveaux remaniés
- Argiles jaunâtres
- Argiles brunâtres
- Silts
- Sables

CAT 0101	<i>Unité séd. T</i>	estimation de la vitesse en m/s	
		min	max
		0.14	0.23

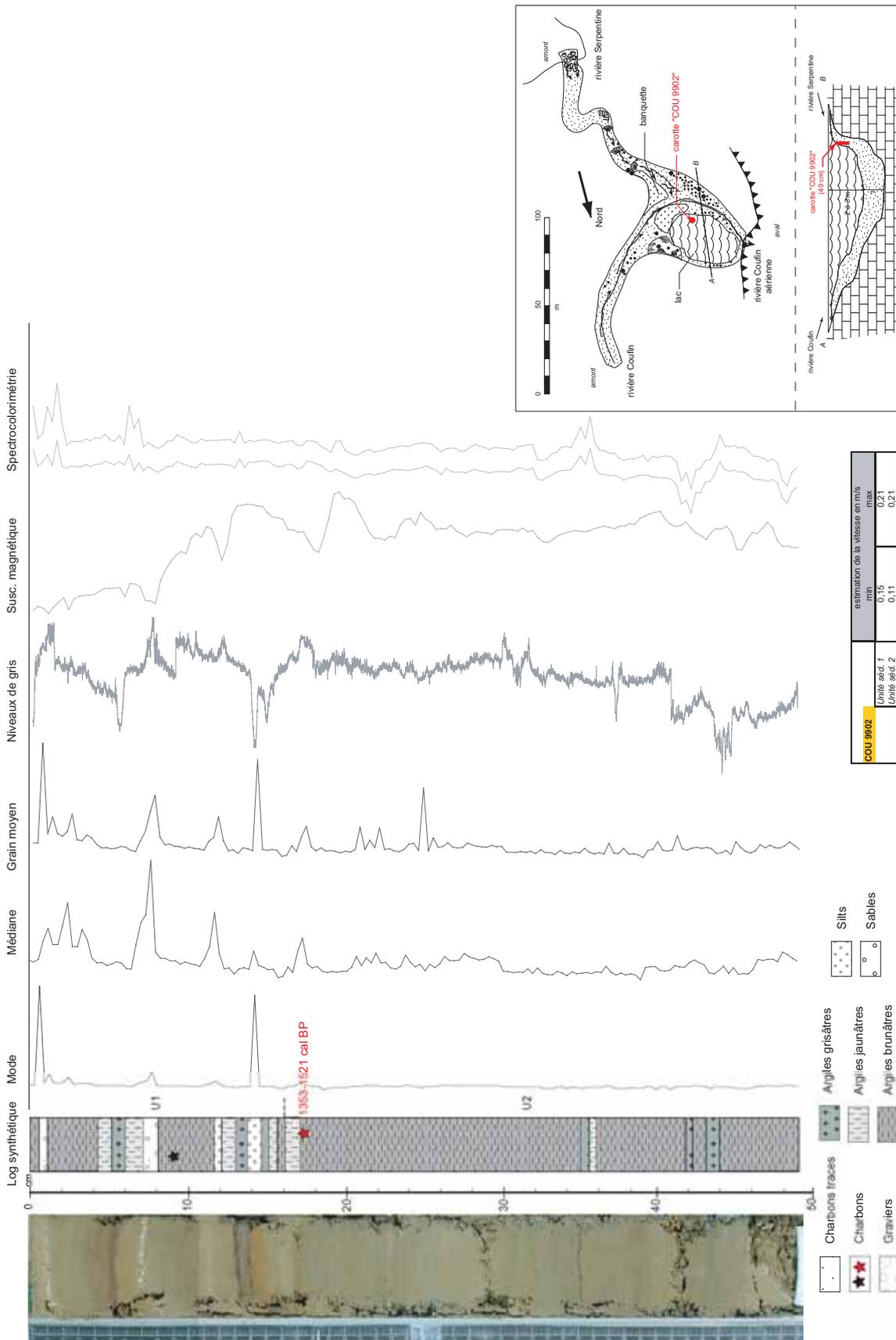
Annexe 10
Choranche - Lac de la Cathédrale - Prélèvement CAT 0102 - Fiche descriptive complète



Annexe 11
 Choranche - Lac de la Cathédrale - Prélèvement CAT 0103 - Fiche descriptive complète



Annexe 12
Choranche - Lac de Coufin - Prélèvement COU 9902 - Fiche descriptive complète



Annexe 13
Détails des ACP et CAH sur CAT0101

Poids significatifs des valeurs propres par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	8,330	1,845	1,028	0,032	0,007	0,000	0,000
% variance	55,148	12,280	6,970	0,210	0,040	0,000	0,000
% cumulé	55,148	67,428	74,398	74,608	74,648	74,648	74,648

Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :							
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Argiles <2	17,058	0,783	30,252	0,013	1,256	50,638	0,000
Argiles <3,9	15,209	3,795	32,018	0,052	0,025	43,938	0,000
sables très fins	6,743	32,826	6,181	39,705	9,849	0,009	4,686
sables fins	12,301	21,717	6,729	23,986	27,602	1,843	5,823
sables moyens	19,150	10,812	1,375	14,077	36,322	0,043	17,812
sables grossiers	10,281	0,080	22,220	23,824	3,824	1,122	0,000

Matrice de corrélation

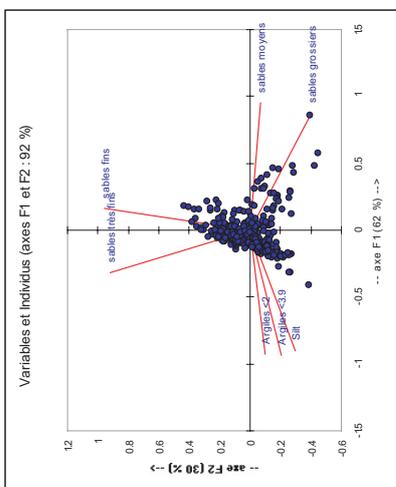
	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0,969	0,324	0,054	0,013	0,000	0,000
Argiles <3,9	0,969	1	0,342	-0,435	-0,189	-0,120	-0,143
Silt	0,324	0,342	1	-0,341	-0,521	-0,857	-0,713
sables très fins	-0,375	-0,435	-0,341	1	0,863	0,086	-0,184
sables fins	-0,487	-0,521	-0,521	0,863	1	0,371	-0,031
sables moyens	-0,694	-0,694	-0,694	0,086	0,371	1	0,931
sables grossiers	-0,433	-0,433	-0,713	-0,184	-0,031	0,931	1

En gras, valeurs significatives (non diagonales) au seuil alpha=0,0501 (test bilatéral)

Coordonnées des variables, triées par composante

	cat 01			cat 02			cat 03		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ARGLES2	0,85	0,75	0,15	0,65	0,85	0,05	0,65	0,85	0,05
ARGLES3,9	-0,81	-0,71	0,08	0,86	-0,44	0,13	0,86	-0,44	0,13
ARGLES4	-0,77	-0,74	0,08	0,86	-0,44	0,13	0,86	-0,44	0,13
SILTS	0,51	0,74	0,25	-0,87	0,49	0,58	-0,87	0,49	0,58
SABLES3,9	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES5	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES6	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES7	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES8	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES9	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES10	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES11	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES12	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES13	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES14	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES15	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES16	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES17	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES18	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES19	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES20	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES21	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES22	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES23	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES24	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES25	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES26	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES27	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES28	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES29	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES30	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES31	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES32	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES33	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES34	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES35	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES36	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES37	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES38	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES39	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES40	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES41	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES42	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES43	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES44	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES45	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES46	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES47	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES48	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES49	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES50	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES51	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES52	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES53	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES54	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES55	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES56	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES57	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES58	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES59	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES60	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES61	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES62	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES63	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES64	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES65	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES66	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES67	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES68	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES69	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES70	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES71	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES72	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES73	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES74	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES75	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES76	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES77	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES78	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES79	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES80	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES81	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES82	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES83	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES84	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES85	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES86	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES87	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES88	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES89	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES90	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES91	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES92	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES93	0,69	0,72	0,22	-0,78	0,52	0,57	-0,78	0,52	0,57
SABLES94	0,69	0,72							

Annexe 14
Détails des ACP et CAH sur CAT 0102



Poids significatifs des valeurs propres par composante

cat.02	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	4.340	2.076	0.330	0.145	0.045	0.003	0.000
% variance	61.996	29.660	5.578	2.071	0.647	0.045	0.000
% cumulé	61.996	91.656	97.236	99.307	99.955	100.000	100.000

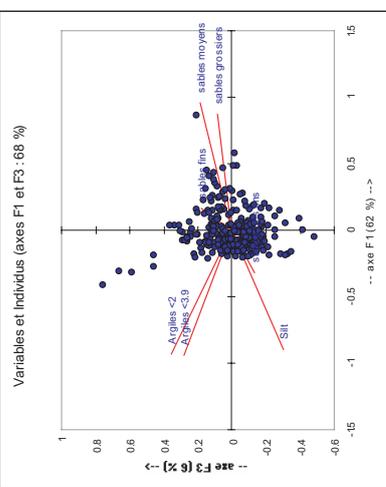
Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :

cat.02	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Argiles <2	19.797	0.486	32.295	0.941	4.376	42.105	0.000
Argiles <3,9	20.192	1.987	20.560	0.341	0.059	52.034	4.827
Sables très fin	19.656	4.272	23.774	5.430	1.975	3.598	42.494
Sables fins	20.592	44.425	8.187	2.393	36.379	0.832	7.193
Sables moyen	20.912	0.211	8.803	30.065	22.319	0.047	17.643
Sables grossier	17.553	7.806	1.771	47.128	2.022	0.701	23.020

Matrice de corrélation

cat.02	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0.88	0.752	0.163	-0.189	-0.814	-0.731
Argiles <3,9	0.88	1	0.814	0.073	-0.295	-0.891	-0.716
Silt	0.752	0.814	1	0.035	0.785	-0.404	-0.624
sables très fin	0.163	0.073	0.035	1	0.122	0.122	-0.243
sables fins	-0.189	-0.295	-0.476	0.785	1	0.122	0.122
sables moyen	-0.814	-0.891	-0.878	-0.404	0.122	1	0.816
sables grossier	-0.731	-0.716	-0.624	-0.243	0.122	0.816	1

Entrées valeurs significatives (test diagonal) au seuil alpha=0.050 (test bilatéral)

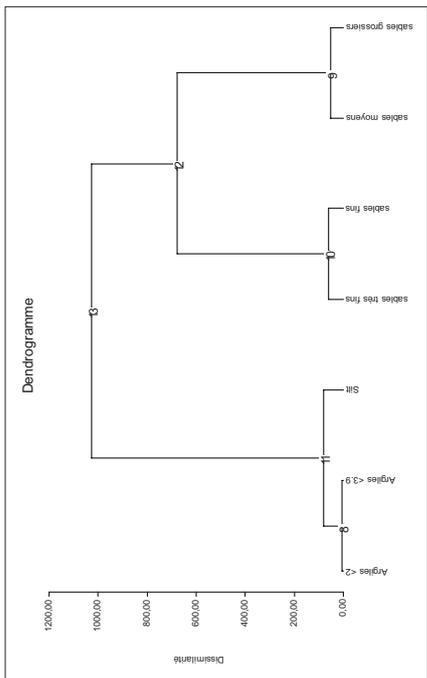


Coordonnées des variables, triées par composante

cat.02	1	2	3	4	5	6	7
SILT	-0.945	0.068	0.163	-0.923	0.403	0.085	0.000
SABLESG	-0.872	-0.403	0.093	-0.923	-0.298	0.000	0.000
SABLESF	-0.166	0.960	0.179	0.936	-0.263	0.356	0.000
SABLESFI	0.316	-0.134	-0.100	0.927	-0.100	0.356	0.000
ARGILESA	0.927	-0.100	0.356	0.316	-0.134	0.923	0.000
ARGILESB	0.836	-0.203	0.283	-0.160	0.894	0.179	0.000

Description du dendrogramme :

Nœud	Étiquette	Échelle	Effectif	Poids	Niveau
13			7	7.000	1026.427
12			3	3.000	677.531
10			5	2.000	61.148
9			2	2.000	52.470
8			2	2.000	3.276



CAT 0102

97,2 (92 % pour le triplan factoriel F1-F2)

% variance expliquée (3 composantes)

variables explicatives par composante (les deux premières)

F1 sables moyens et argiles <3,9μ

F2 sables très fins et fins

F3 argiles <2μ et silts

lous proches de 1 ou -1 sur les cercles de corrélation

degré d'indépendance des variables entre elles

cat.02	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0.98	0.98	0.814	0.785	0.816	0.816
Argiles <3,9	0.98	1	0.98	0.073	0.073	0.073	0.073
Silt	0.98	0.98	1	0.035	0.035	0.035	0.035
sables très fin	0.814	0.073	0.035	1	0.122	0.122	0.122
sables fins	0.785	0.073	0.035	0.122	1	0.122	0.122
sables moyen	0.816	0.073	0.035	-0.404	0.122	1	0.816
sables grossier	0.816	0.073	0.035	-0.243	0.122	0.816	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 sables moyens et argiles <3,9μ

F2 sables fins et grossiers

F3 argiles <2μ et silts

conjonction

opposition > quadrature (0,2)

opposition < quadrature (-0,2)

opposition

1

0,785

-0,476

-0,295

-0,169

-0,814

-0,878

-0,531

-0,731

-0,706

-0,624

-0,243

0,816

1

Commentaire de synthèse

97,2 (92 % pour le triplan factoriel F1-F2)

variables explicatives par composante (les deux premières)

F1 sables moyens et argiles <3,9μ

F2 sables très fins et fins

F3 argiles <2μ et silts

lous proches de 1 ou -1 sur les cercles de corrélation

degré d'indépendance des variables entre elles

cat.02	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0.98	0.98	0.814	0.785	0.816	0.816
Argiles <3,9	0.98	1	0.98	0.073	0.073	0.073	0.073
Silt	0.98	0.98	1	0.035	0.035	0.035	0.035
sables très fin	0.814	0.073	0.035	1	0.122	0.122	0.122
sables fins	0.785	0.073	0.035	0.122	1	0.122	0.122
sables moyen	0.816	0.073	0.035	-0.404	0.122	1	0.816
sables grossier	0.816	0.073	0.035	-0.243	0.122	0.816	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 sables moyens et argiles <3,9μ

F2 sables fins et grossiers

F3 argiles <2μ et silts

conjonction

opposition > quadrature (0,2)

opposition < quadrature (-0,2)

opposition

1

0,785

-0,476

-0,295

-0,169

-0,814

-0,878

-0,531

-0,731

-0,706

-0,624

-0,243

0,816

1

dispersion des individus sur les plans factoriels de l'ACP

P1-F1-F2

P2-F1-F3

P3-F2-F3

plan moins pertinent, on ne voit plus le glissement vers les composantes grossières, c'est la décentration qui est le mieux illustré ici

on retire les mêmes regroupements (cf. indépendance entre les variables), en liaison totale avec les critères granulométriques, soit du nœud le plus fort au nœud le plus faible :

argiles <2μ et <3,9μ -> fraction fine

sables moyens et grossiers -> fraction grossière

sables fins et très fins -> fraction médiane

argiles <2μ et silts -> fraction médiane et fraction grossière

lien final de l'arbre avec la fraction fine, silts inclus

Annexe 15
Détails des ACP et CAH sur CAT 0103

Poids significatif des valeurs propres par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
cat 03							
Valeur propre	4,285	2,905	0,539	0,194	0,088	0,009	0,000
% variance	27,139	18,156	3,396	1,231	0,544	0,056	0,000
% cumulé	60,926	88,139	95,846	98,616	99,889	100,000	100,000

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
cat 03							
Argiles <2	18,783	1,786	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Argiles <3,9	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables très fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables très fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables moyen	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables grossiers	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Silt	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000

Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
cat 03							
Argiles <2	18,783	1,786	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Argiles <3,9	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables très fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables très fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables fins	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables moyen	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Sables grossiers	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000
Silt	18,852	1,780	27,493	3,831	6,542	41,784	0,000

Matrice de corrélation

	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	Sables très fins	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers
cat 03							
Argiles <2	1	0,983	0,738	0,160	-0,097	-0,754	-0,730
Argiles <3,9	0,983	1	0,738	0,160	-0,097	-0,754	-0,730
Silt	0,738	0,738	1	0,100	0,171	0,734	-0,486
Sables très fins	0,160	0,160	0,100	1	0,027	0,027	0,160
Sables fins	0,160	0,160	0,100	0,027	1	0,027	0,160
Sables moyens	-0,097	-0,097	0,171	0,027	0,027	1	0,750
Sables grossiers	-0,754	-0,754	-0,486	0,027	0,027	0,750	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonal) au seuil alpha=0,050 (Test de Wilcoxon)

Coordonnées des variables, triées par composante

	cat 03	1	2	3	cat 03	1	2	3
SABLEM		-0,914	0,054	0,304	SILTS		0,648	-0,326
SABLETG		-0,914	0,054	0,304	SABLETG		-0,603	0,006
SABLESTF		-0,914	0,054	0,304	SABLESTF		-0,603	0,006
SABLESG		-0,914	0,054	0,304	SABLESG		-0,603	0,006
SABLESF		-0,914	0,054	0,304	SABLESF		-0,603	0,006
SABLESM		-0,914	0,054	0,304	SABLESM		-0,603	0,006
SABLESTF		-0,914	0,054	0,304	SABLESTF		-0,603	0,006
SABLESG		-0,914	0,054	0,304	SABLESG		-0,603	0,006
SABLESF		-0,914	0,054	0,304	SABLESF		-0,603	0,006
SABLESM		-0,914	0,054	0,304	SABLESM		-0,603	0,006
SABLESTF		-0,914	0,054	0,304	SABLESTF		-0,603	0,006
SABLESG		-0,914	0,054	0,304	SABLESG		-0,603	0,006
SABLESF		-0,914	0,054	0,304	SABLESF		-0,603	0,006
SABLESM		-0,914	0,054	0,304	SABLESM		-0,603	0,006
SABLESTF		-0,914	0,054	0,304	SABLESTF		-0,603	0,006
SABLESG		-0,914	0,054	0,304	SABLESG		-0,603	0,006
SABLESF		-0,914	0,054	0,304	SABLESF		-0,603	0,006
SABLESM		-0,914	0,054	0,304	SABLESM		-0,603	0,006

Commentaire de synthèse

CAT 0103

% variance expliquée (3 composantes) 95,8 (88 % pour le 1er plan factoriel F1-F2)

variables explicatives par composante (les deux premières)

F1 sables moyens et grossiers
F2 sables fins et très fins
F3 argiles

degré d'indépendance des variables entre elles

cat 03	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0,983	0,738	0,160	-0,097	-0,754	-0,730
Argiles <3,9	0,983	1	0,738	0,160	-0,097	-0,754	-0,730
Silt	0,738	0,738	1	0,100	0,171	0,734	-0,486
sables très fins	0,160	0,160	0,100	1	0,027	0,027	0,160
sables fins	0,160	0,160	0,100	0,027	1	0,027	0,160
sables moyen	-0,097	-0,097	0,171	0,027	0,027	1	0,750
sables grossiers	-0,754	-0,754	-0,486	0,027	0,027	0,750	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 sables fins et silt
F2 sables moyens et argiles <3,9
F3 argiles <2 et silt

conjonction
conjonction > quadrature (0,2)
opposition > quadrature (-0,2)
opposition

dispersion des individus sur les plans factoriels de l'ACP

F1-F1-F2 amas très groupés selon les directions des composantes des fractions fines, limitant un peu sur les composantes grossières mais sans point isolé

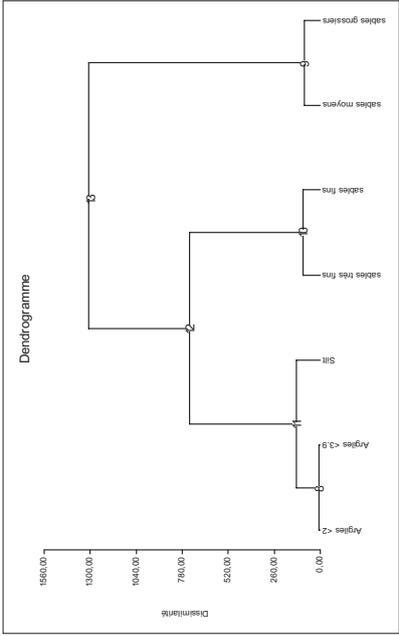
F2-F1-F3 même commentaire, la concentration des points paraît plus forte, avec un point isolé sur F3 (mes 102, fraction médiane, zone 3 dans Passéga)

F3-F2-F3 plan moins pertinent, on ne voit plus le glissement vers les composantes grossières; 15 un point isolé, le même n° 102

commentaire sur la CAH

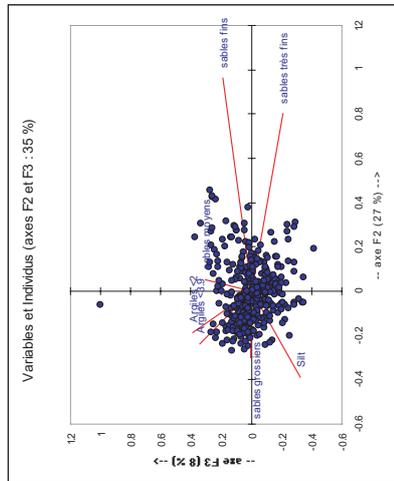
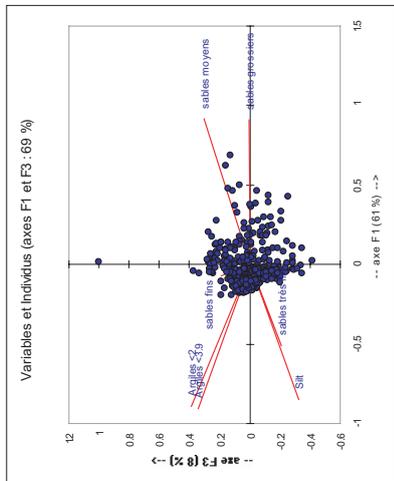
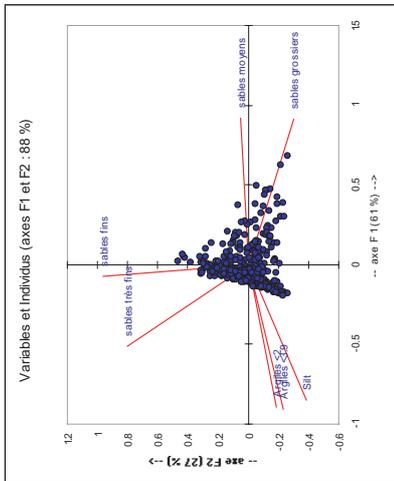
on retrouve les mêmes regroupements (cf. indépendance entre les variables), en liaison totale avec les critères granulométriques, soit du nœud le plus fort au nœud le plus faible :

- argiles <2 et <3,9 >>> fraction fine
- sables moyens et grossiers >>> fraction grossière
- sables fins et très fins >>> fraction médiane
- fraction fine et silt
- fraction fine et silt et fraction médiane
- lien final de l'arbre avec la fraction grossière

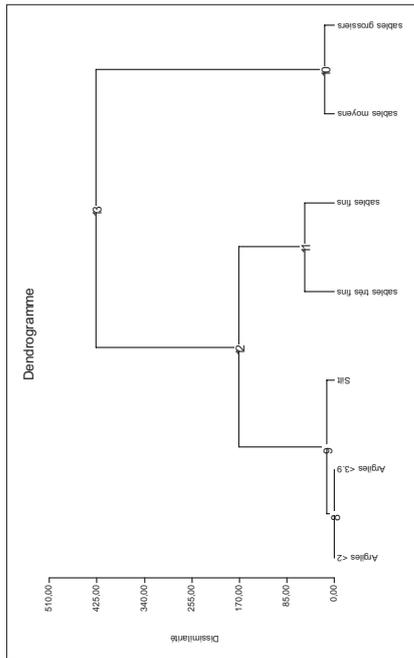
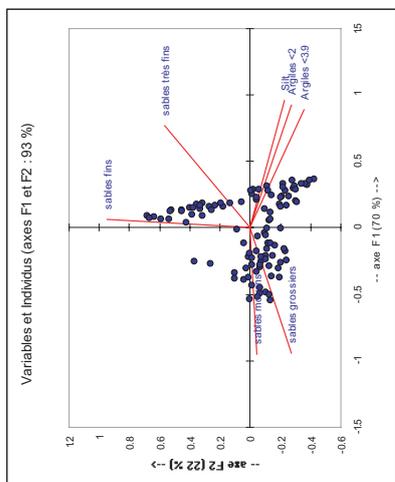


Description du dendrogramme :

Nœud	Fils gauche	Fils droit	Effectif	Poids	Niveau
3	1	2	10	5,000	200,000
12	3	4	11	5,500	250,000
11	5	6	10	5,000	200,000
8	7	9	8	4,000	160,000
3	10	11	3	3,000	135,000
10	4	5	2	2,000	90,000
9	6	7	2	2,000	90,000
2	8	12	2	2,000	90,000



Annexe 16
Détails des ACP et CAH sur CAT 9901



Poids significatifs des valeurs propres par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	14,933	7,545	0,419	0,084	0,076	0,032	0,000
% variance	70,472	22,070	5,992	1,199	2,236	0,332	0,000
% cumulé	70,472	92,543	98,534	99,733	100,000	100,000	100,000

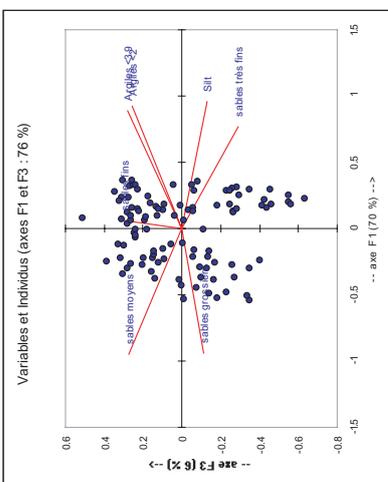
Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Argiles <2	17,332	4,774	14,422	3,995	63,148	46,398	0,000
Argiles <3,9	16,035	8,138	18,894	4,795	8,857	49,841	1,740
sables très fin	18,618	3,368	4,004	10,471	23,576	2,175	37,788
sables fins	0,950	20,900	0,026	0,000	38,946	1,330	4,944
sables moyen	18,129	0,116	17,865	32,827	13,565	0,048	17,649
sables grossier	17,825	4,716	2,892	42,602	0,448	0,395	31,180

Matrice de corrélation

	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0,993	0,907	0,464	-0,123	-0,801	-0,810
Argiles <3,9	0,993	1	0,890	0,464	-0,195	-0,760	-0,757
Silt	0,907	0,890	1	0,195	-0,195	-0,195	-0,195
sables très fins	0,464	0,464	0,195	1	0,482	-0,825	-0,842
sables fins	-0,123	-0,195	-0,195	0,482	1	-0,030	-0,334
sables moyen	-0,801	-0,760	-0,195	-0,825	-0,030	1	0,837
sables grossiers	-0,810	-0,757	-0,195	-0,842	-0,334	0,837	1

En gras, valeurs significatives (avec diagramme) au seuil supérieur de 0,05 (Test de Fisher)



Description du dendrogramme :

	Niveau	Effectif	File 1	File 2	Niveau
1	13	7	7	7	7
2	12	10	11	5	5
3	11	9	4	2	2
4	10	8	3	3	3
5	9	8	2	2	2
6	8	7	1	1	1
7	7	6	1	1	1
8	6	5	1	1	1
9	5	4	1	1	1
10	4	3	1	1	1
11	3	2	1	1	1
12	2	1	1	1	1

Coordonnées des variables, triées par composante

	1	2	3
Argiles <2	0,993	0,907	0,464
Argiles <3,9	0,993	0,890	0,464
Silt	0,907	0,890	0,195
sables très fins	0,464	0,464	0,195
sables fins	-0,123	-0,195	-0,195
sables moyen	-0,801	-0,760	-0,195
sables grossiers	-0,810	-0,757	-0,195

Commentaire de synthèse

CAT 9901 : 98,5 % pour le 1er plan factoriel (F1-F2)

% variance expliquée (6 composantes)

variables explicatives par composante (les deux premières)

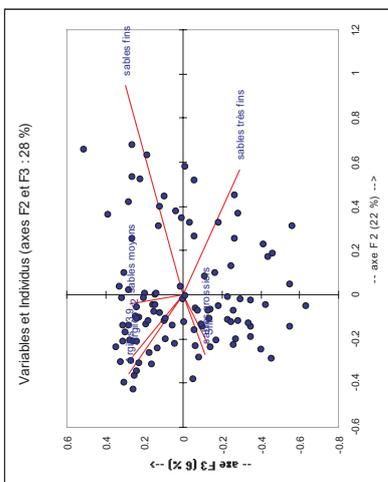
F1 : silt et sables moyens
F2 : sables fins et très fins
F3 : sables fins et très fins

degré d'indépendance des variables entre elles

	Argiles <2	Argiles <3,9	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0,993	0,907	0,464	-0,123	-0,801	-0,810
Argiles <3,9	0,993	1	0,890	0,464	-0,195	-0,760	-0,757
Silt	0,907	0,890	1	0,195	-0,195	-0,195	-0,195
sables très fin	0,464	0,464	0,195	1	0,482	-0,825	-0,842
sables fins	-0,123	-0,195	-0,195	0,482	1	-0,030	-0,334
sables moyen	-0,801	-0,760	-0,195	-0,825	-0,030	1	0,837
sables grossier	-0,810	-0,757	-0,195	-0,842	-0,334	0,837	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 : silt et sables moyens
F2 : sables fins et argiles <3,9
F3 : sables fins et très fins



dispersion des individus sur les plans factoriels de l'ACP

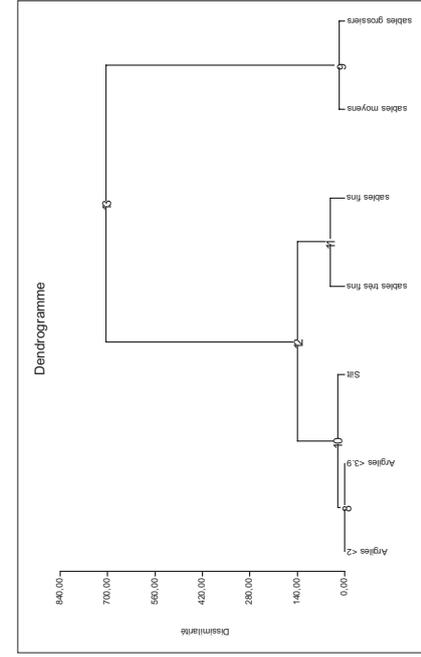
P1=F1+P2 : 100% de points regroupés selon deux directions différentes, une entre fractions fine et grossière et une entre fractions fine et médiane ;
P2=F1+P3 : 100% de points regroupés selon deux directions différentes, une entre fractions fine et médiane et une entre fractions médiane et grossière ;
P3=F2+P3 : 100% de points regroupés selon deux directions différentes, une entre fractions médiane et grossière et une entre fractions fine et médiane ;
elle correspond à la délimitation de zone saline sur l'image de Passage

commentaire sur la CAH

on retrouve les mêmes regroupements (cf l'indépendance entre les variables), en liaison totale avec les critères granulométriques, soit du moule le plus fort au moule le plus faible :

argiles <2> et <3,9> -> fraction fine
sables moyens et grossiers -> fraction grossière
sables fins et médiane -> fraction médiane
fraction fine et silt et fraction médiane
lien final de fabrique avec la fraction grossière

Annexe 17
Détails des ACP et CAH sur CAT 9902



Poids significatifs des valeurs propres par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	3.56	0.73	0.75	0.51	0.53	0.25	0.07
% de la variance	79.824	14.463	3.974	1.164	0.954	0.225	0.000
% cumulé	79.824	94.292	98.264	99.422	99.975	100.000	100.000

Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Argiles <3>	15.927	6.869	7.753	22.228	5.887	1.401	39.636
sables très fin	13.608	13.923	28.174	9.707	32.080	0.284	2.224
sables fins	6.291	66.256	12.397	10.523	0.036	1.867	1.867
Silt	17.210	0.327	0.132	40.359	5.052	0.930	36.021

Matrice de corrélation

	Argiles <2>	Argiles <3>	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2>	1	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996
Argiles <3>	0.996	1	0.991	0.981	0.981	0.981	0.981
Silt	0.991	0.981	1	0.749	0.281	-0.963	-0.930
sables très fin	0.981	0.981	0.749	1	0.726	-0.930	-0.880
sables fins	0.981	0.981	0.281	0.726	1	-0.930	-0.880
sables moyens	-0.963	-0.963	-0.930	-0.930	-0.930	1	0.891
sables grossiers	-0.930	-0.930	-0.880	-0.880	-0.880	0.891	1

En gras, valeurs significatives (test de Hotelling) au seuil alpha=0.05 (Test bilatéral)

Contournées des variables, triées par composante

	cat92	1	2	3
Argiles <2>	0.996	-0.008	0.000	0.000
Argiles <3>	0.996	0.000	0.000	0.000
Silt	0.991	0.000	0.000	0.000
sables très fin	0.981	0.000	0.000	0.000
sables fins	0.981	0.000	0.000	0.000
sables moyens	-0.963	0.000	0.000	0.000
sables grossiers	-0.930	0.000	0.000	0.000

Description du dendrogramme :

Nœud	Fil gauche	Fil droit	Efficacité	Paix	Nœuds
13	7	9	7	7,000	104,134
12	10	11	5	2,000	138,624
11	4	5	2	2,000	41,082
10	8	3	2	2,000	19,895
9	1	2	2	2,000	0,590

Commentaire de synthèse

98.2 (94 % pour le 1er plan factoriel F1-F2)

% variance expliquée (0 composantes)

variables explicatives par composante (les deux premières)

F1 sables grossiers et argiles <2>

F2 sables fins et très fins

F3 sables très fins et argiles <3,9>

degré d'indépendance des variables entre elles

	cat 92	Argiles <2>	Argiles <3,9>	Silt	sables très fins	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2>	1	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996
Argiles <3,9>	1	0.996	1	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996
Silt	0.991	0.991	0.749	1	0.749	0.749	0.749	0.749
sables très fin	0.981	0.981	0.726	0.726	1	0.726	0.726	0.726
sables fins	0.981	0.981	0.281	0.281	0.281	1	0.281	0.281
sables moyen	-0.963	-0.963	-0.930	-0.930	-0.930	-0.930	1	-0.930
sables grossiers	-0.930	-0.930	-0.880	-0.880	-0.880	-0.880	0.891	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 sables grossiers et argiles <2>

F2 sables fins et silt

F3 sables très fins et argiles <3,9>

dispersion des individus sur les plans factoriels de l'ACP

P1=F1+F2 : amas très groupé selon les directions des composantes des fractions fines, tirant un peu sur les composantes grossières mais sans point véritablement isolé

P2=F1+F3 : même commentaire pour l'absence de lamas de points, en moins net toutefois

P3=F2+F3 : plan nettement moins intéressant, amas très dispersé

commentaire sur la CAH

on retrouve les mêmes regroupements (cf l'indépendance entre les variables), un liaison totale avec les critères granulométriques, soit du nœud le plus fort au nœud le plus faible :

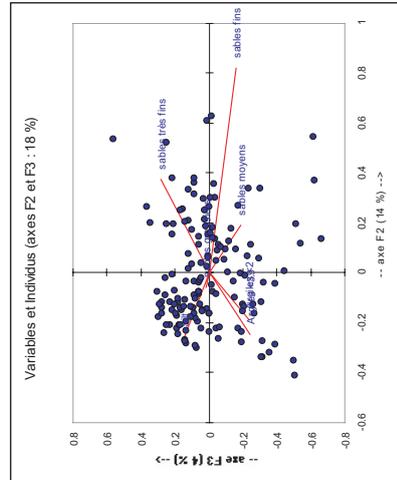
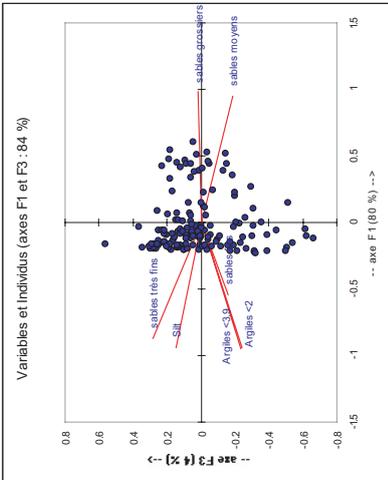
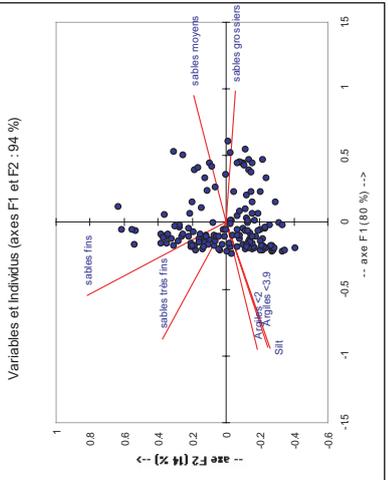
argiles <2> et <3,9>

sables moyens et grossiers >>> fraction fine

fraction fine et silt >>> fraction médiane

fraction fine et très fins >>> fraction médiane

lien final de l'arbre avec la fraction grossière



Annexe 18
Détails des ACP et CAH sur COU 9902

Poids significatif des valeurs propres par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	3.148	2.275	1.138	0.317	0.111	0.008	0.000
% variance	44.988	32.493	16.276	4.533	1.592	0.119	0.000
% cumulée	44.988	77.480	93.756	98.289	99.881	100.000	100.000

Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Argiles <2	22.040	9.394	2.251	0.219	0.176	0.320	0.000
Argiles <5,9	23.518	8.203	6.113	0.287	0.116	25.754	36.009
Silt	2.282	34.208	10.926	7.312	1.450	9.541	34.281
sables très fin	26.718	0.551	4.899	19.054	25.550	2.099	17.418
sables fins	4.750	4.750	7.636	44.206	13.893	0.583	2.132
sables moyens	4.750	4.750	7.636	44.206	13.893	0.583	2.132
sables grossiers	0.501	16.820	44.994	24.828	9.149	0.603	3.105

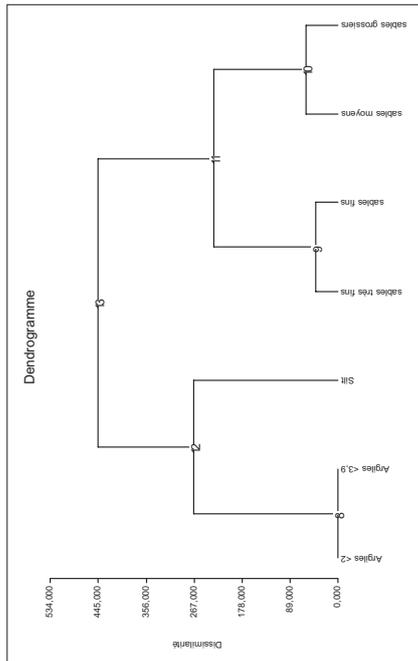
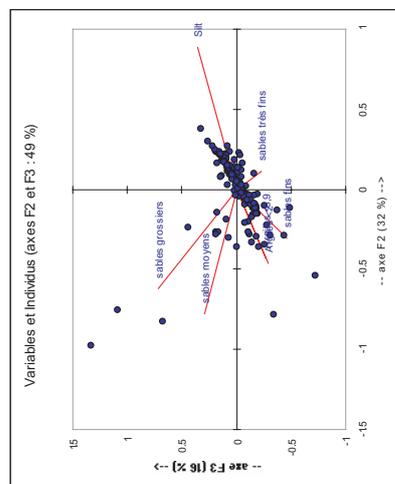
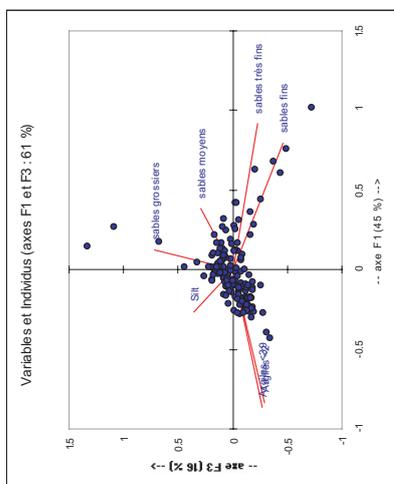
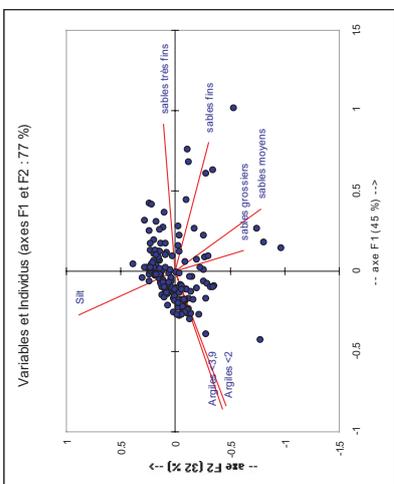
Matrice de corrélation

	Argiles <2	Argiles <5,9	Silt	sables très fin	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0.991	-0.295	-0.729	-0.403	-0.096	-0.010
Argiles <5,9	0.991	1	-0.295	-0.729	-0.403	-0.096	-0.010
Silt	-0.295	-0.295	1	0.397	0.462	0.386	0.303
sables très fin	-0.729	-0.729	0.397	1	0.738	0.131	-0.067
sables fins	-0.403	-0.403	0.462	0.738	1	0.421	-0.044
sables moyens	-0.096	-0.096	0.386	0.131	0.421	1	0.624
sables grossiers	-0.010	-0.010	0.303	-0.067	-0.044	0.624	1

En gras, valeurs significatives (seuls diagonaux) au seuil alpha=0,05 (test bilatéral)

Coordonnées des variables, triées par composante

	1	2	3
Argiles <2	-0.851	0.452	-0.297
Argiles <5,9	-0.933	0.432	-0.264
Silt	-0.295	0.397	0.393
sables très fin	-0.729	0.393	0.393
sables fins	-0.403	0.462	0.462
sables moyens	-0.096	0.386	0.386
sables grossiers	-0.010	0.303	0.303



Description du dendrogramme :

Nœud	Fuseauche	Fuse. droit	Effectif	Poids	Niveau
13			7	7.000	445.206
12			11	7.000	445.206
11			3	3.000	230.824
10			9	9.000	59.381
9			7	7.000	41.474
8			4	4.000	2.000
7			2	2.000	2.000
6			2	2.000	2.000
5			2	2.000	2.000
4			2	2.000	2.000
3			2	2.000	2.000

Commentaire de synthèse

COU 9902

93.7 (77.5 % pour le 1er plan factoriel (F1-F2))

% variance expliquée (3 composantes)

variables explicatives par composante (les deux premières)
F1 : sables très fin et argiles <3,9µ
F2 : silt et sables moyens
F3 : sables grossiers et fins

degré d'indépendance des variables entre elles

	Argiles <2	Argiles <5,9	Silt	sables très fin	sables fins	sables moyens	sables grossiers
Argiles <2	1	0.991	-0.295	-0.729	-0.403	-0.096	-0.010
Argiles <5,9	0.991	1	-0.295	-0.729	-0.403	-0.096	-0.010
Silt	-0.295	-0.295	1	0.397	0.462	0.386	0.303
sables très fin	-0.729	-0.729	0.397	1	0.738	0.131	-0.067
sables fins	-0.403	-0.403	0.462	0.738	1	0.421	-0.044
sables moyen	-0.096	-0.096	0.386	0.131	0.421	1	0.624
sables grossier	-0.010	-0.010	0.303	-0.067	-0.044	0.624	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 : sables très fin et argiles <2µ
F2 : silt et sables moyens
F3 : sables grossiers et fins

dispersion des individus sur les plans factoriels de l'ACP

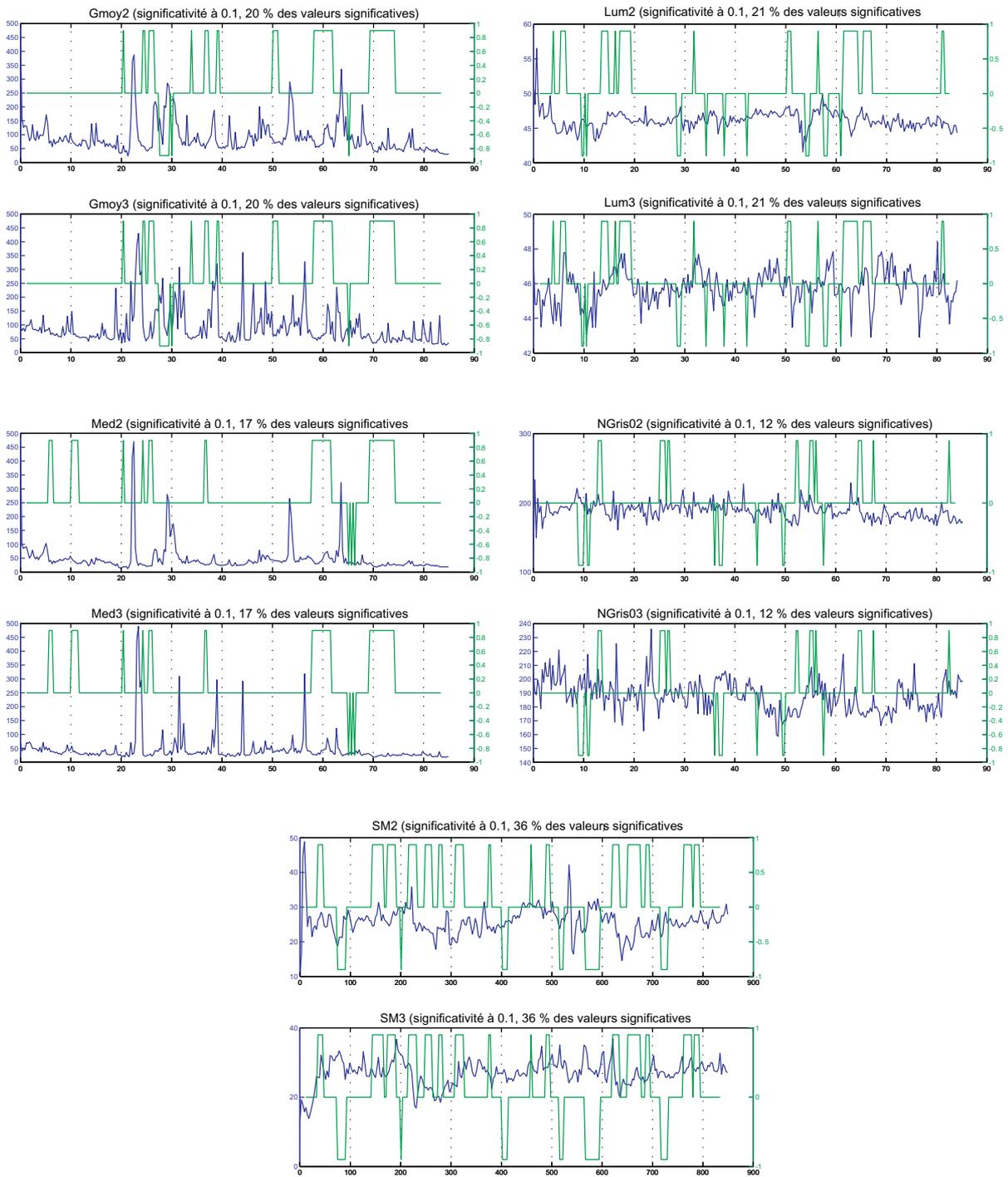
P1=F1+F2 : axes groupés selon les directions des composantes des fractions fines, tirant un peu sur les composantes grossières avec quelques points isolés
P2=F1+F3 : même commentaire / Argiles et silt concentrent le maximum des points
P3=F2+F3 : moins intéressant, seuls les sables moyens et grossiers sont à part ; les distinctions selon les composantes sont donc moins précises

commentaire sur la CAH

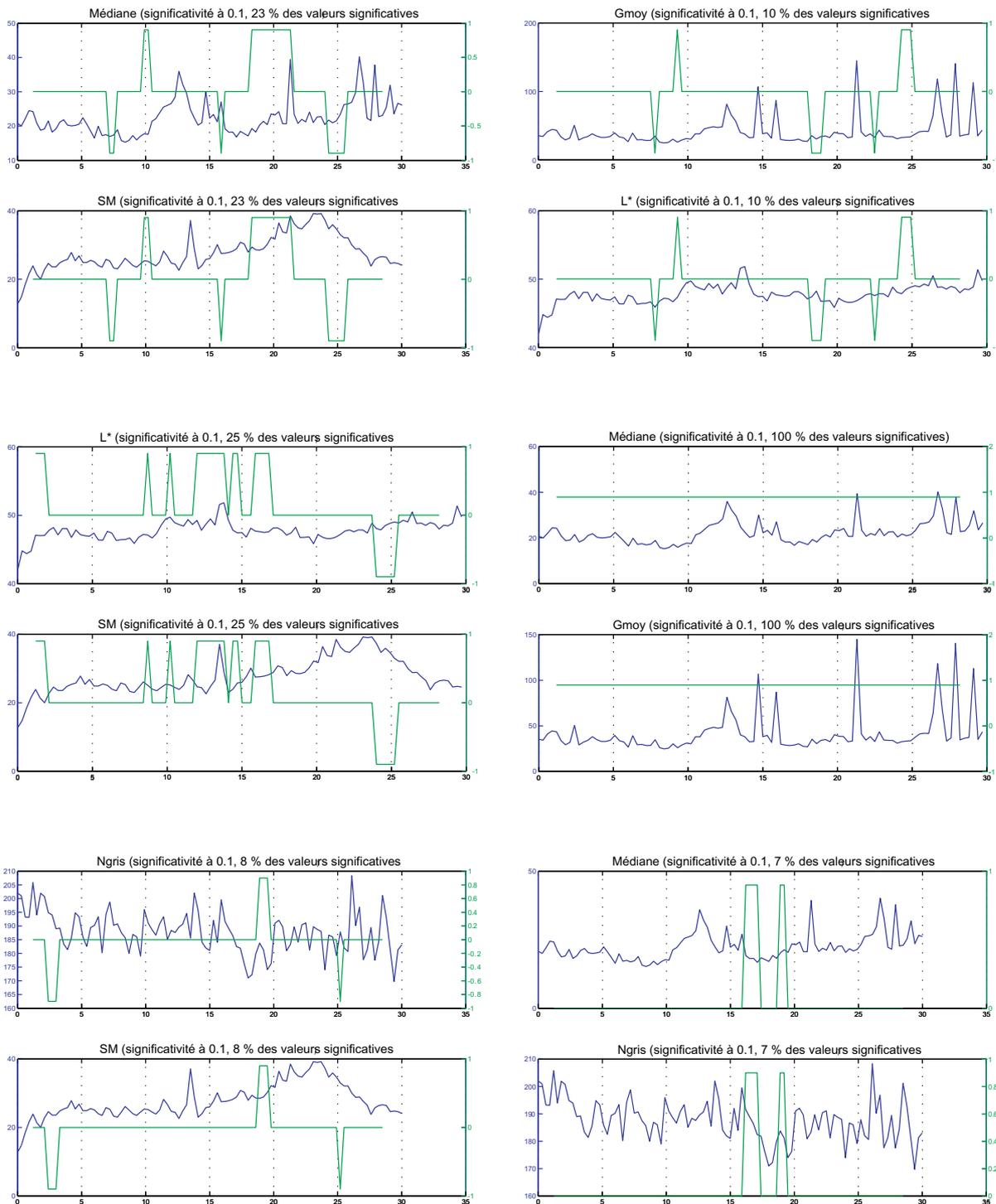
on retrouve une même regroupements (cf. indépendance entre les variables), en liaison totale avec les critères granulométriques, soit du nœud le plus fort au nœud le plus faible :
argiles <2µ et <3,9µ
>> fraction fine
sables moyens et grossiers
>> fraction grossière
tous les sables
fraction fine et silt
lien final de l'arbre avec les fractions médiane et grossière

Annexe 19

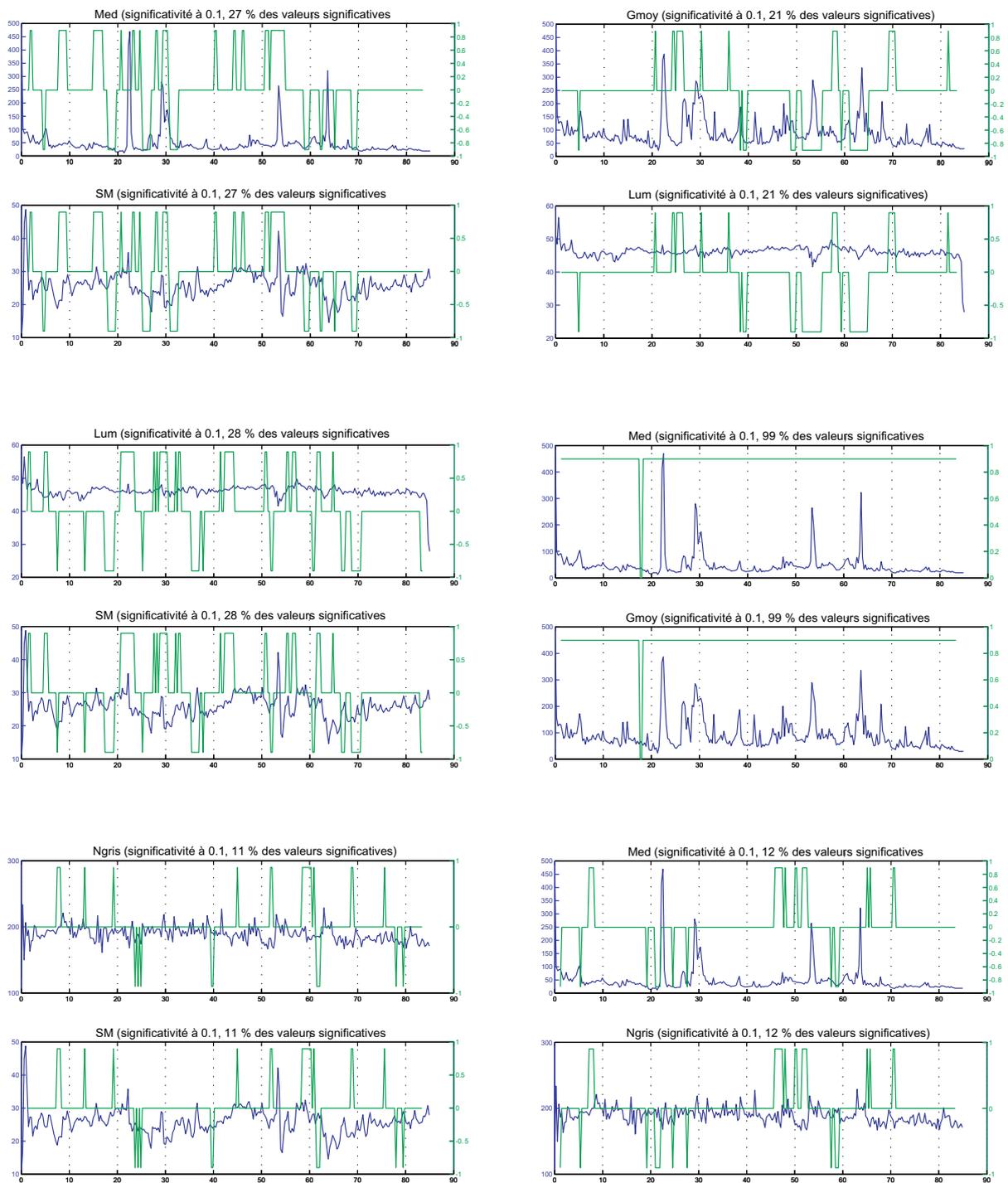
Les cinq cas de corrélation entre les signaux de CAT 0102 et CAT 0103



Annexe 20 Les corrélations entre les différents signaux de CAT 0101

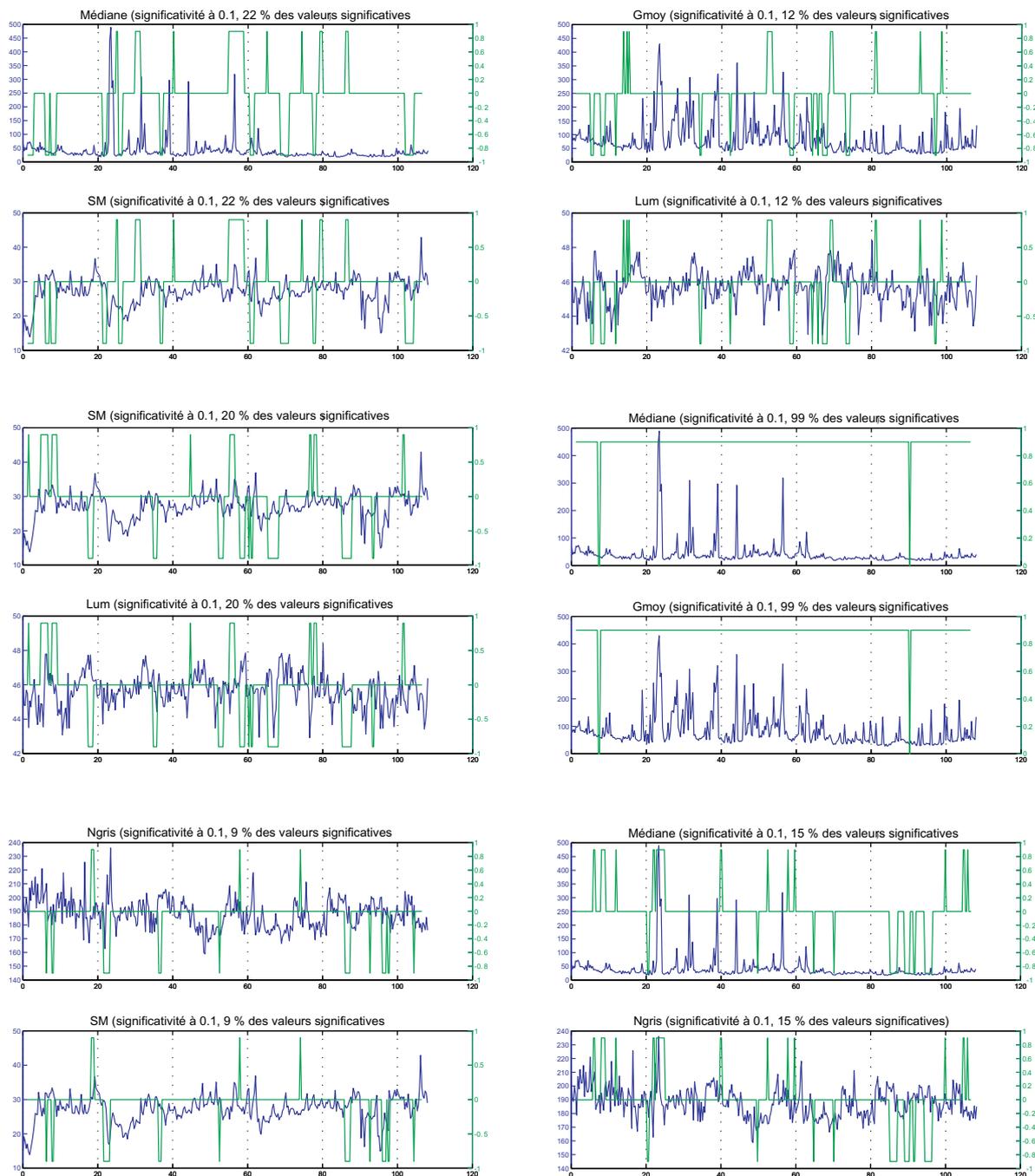


Annexe 21 Les corrélations entre les différents signaux de CAT 0102



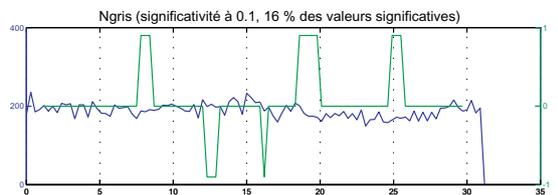
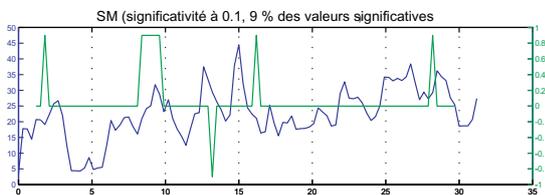
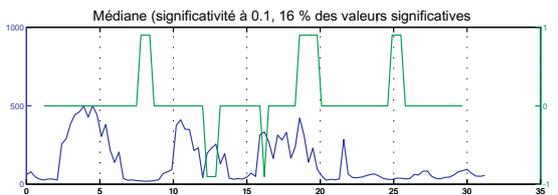
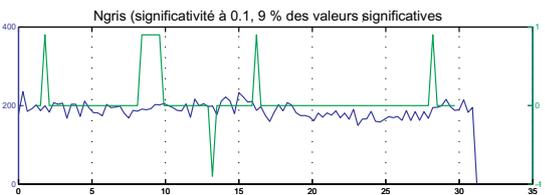
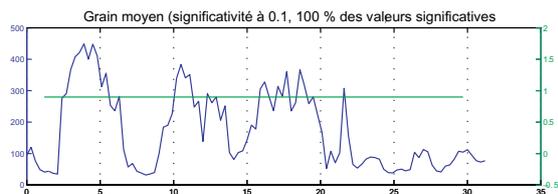
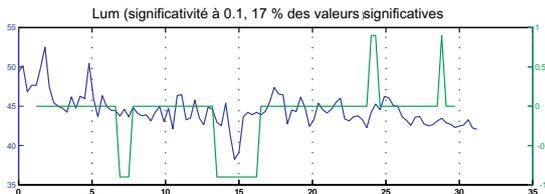
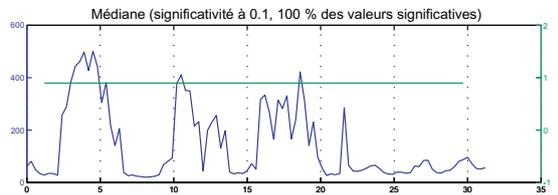
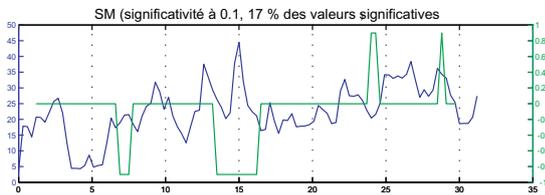
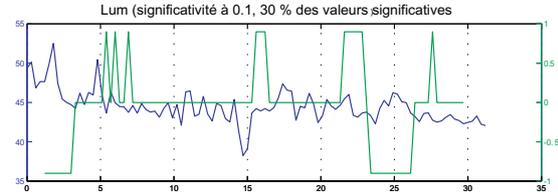
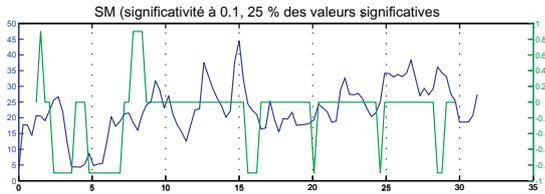
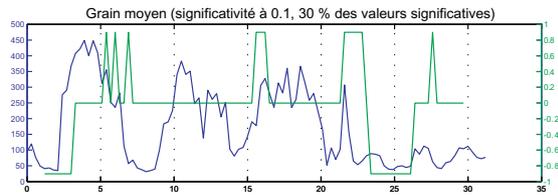
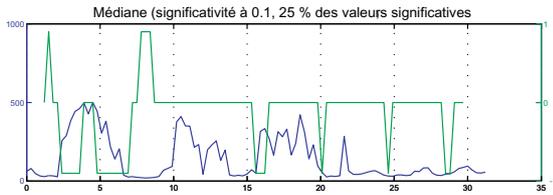
Annexe 22

Les corrélations entre les différents signaux de CAT 0103

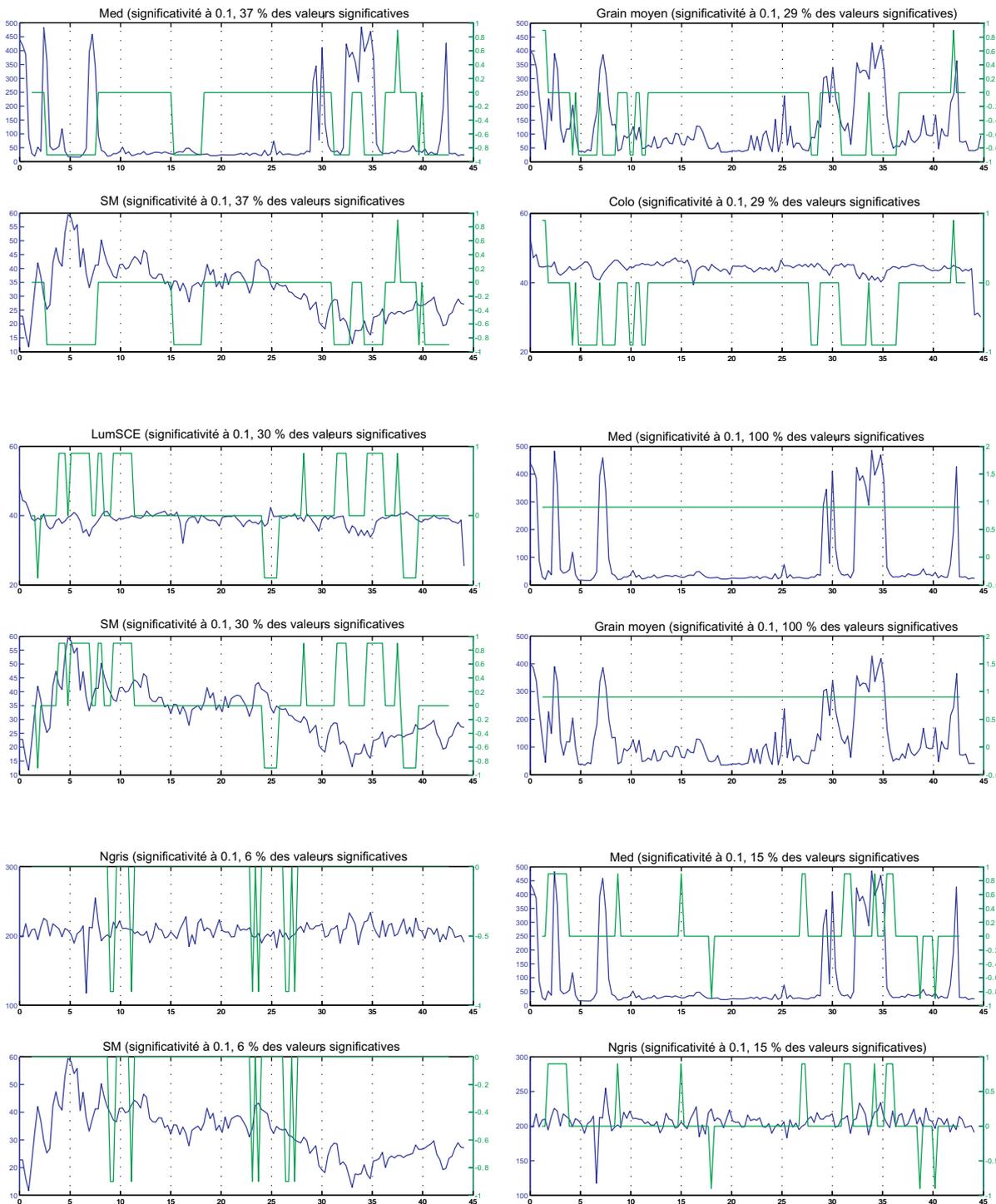


Annexe 23

Les corrélations entre les différents signaux de CAT 9901

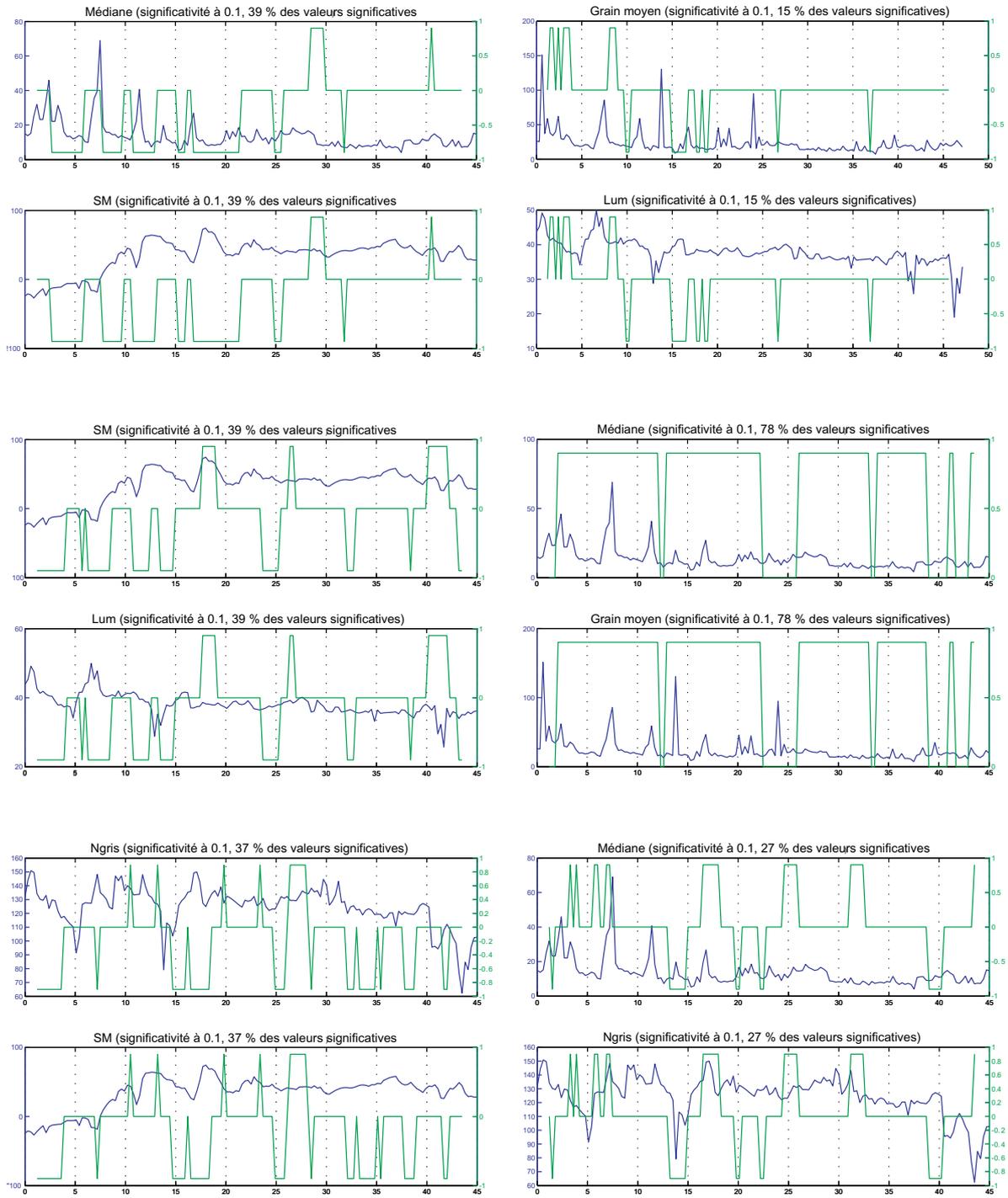


Annexe 24 Les corrélations entre les différents signaux de CAT 9902

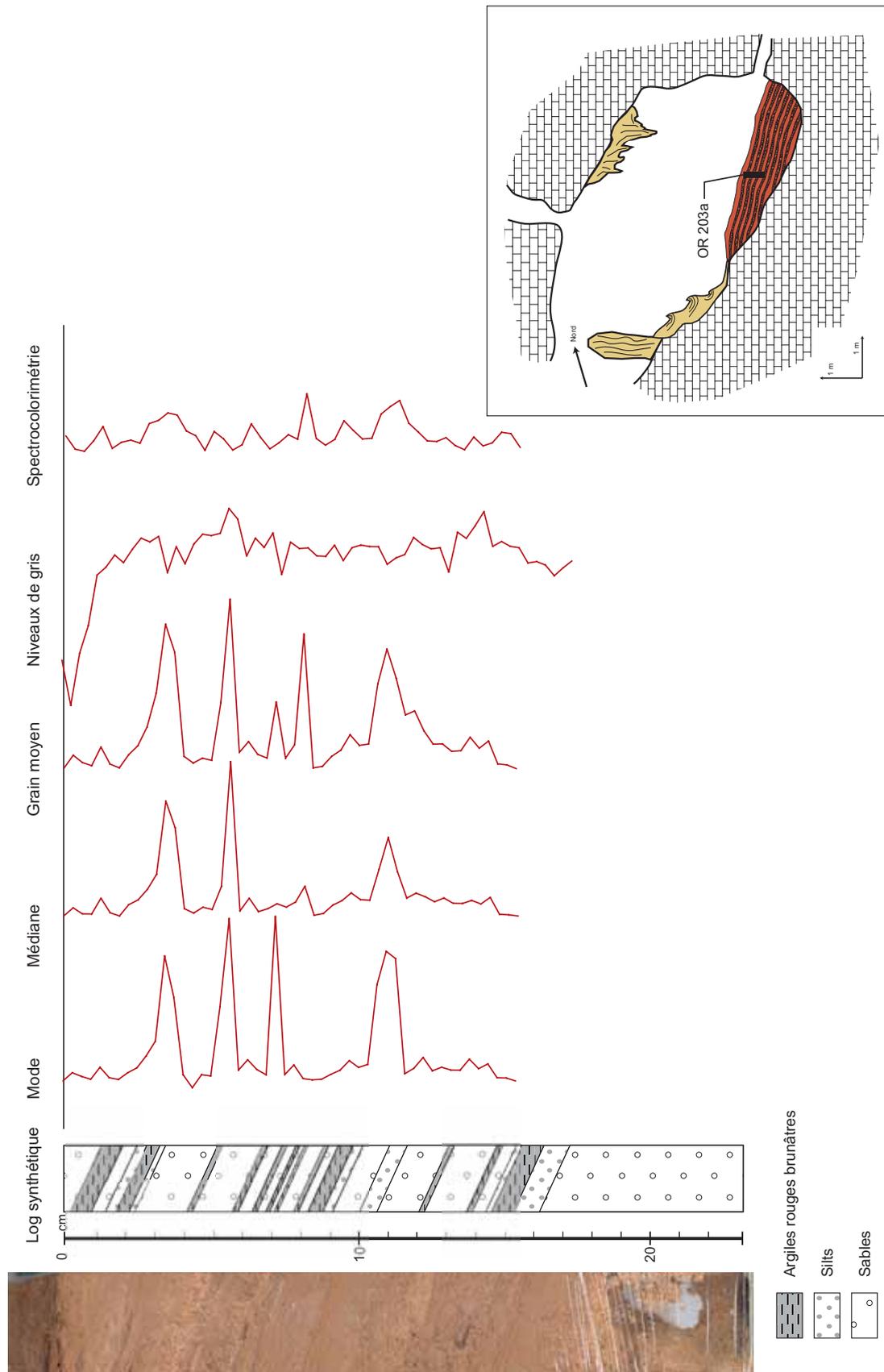


Annexe 25

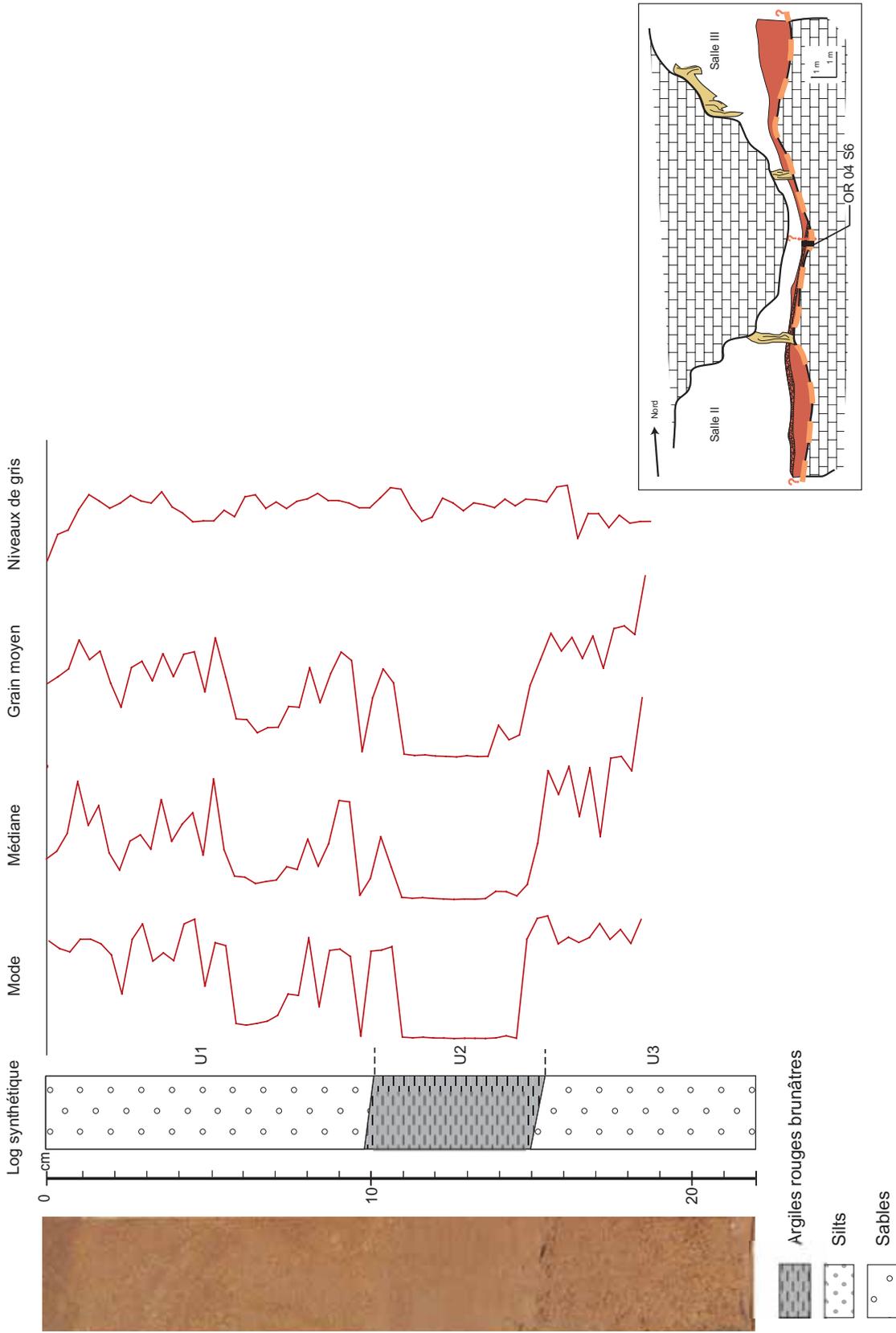
Les corrélations entre les différents signaux de COU 9902



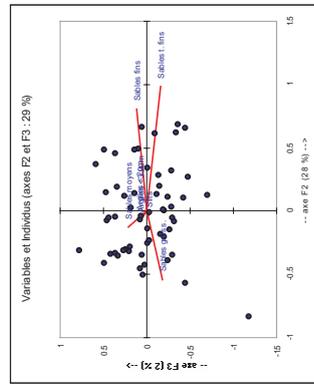
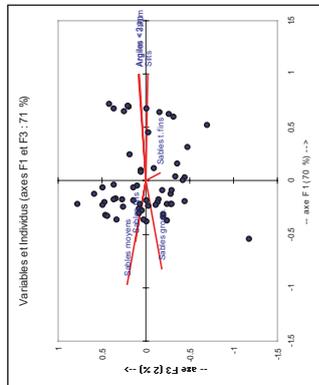
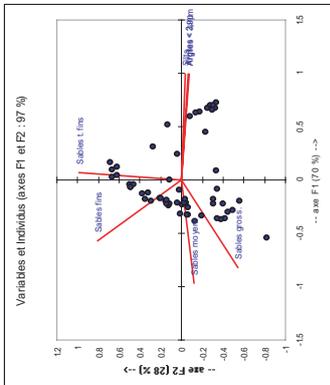
Annexe 26
 Orgnac - Point bas de la Salle Nord - Prélèvement OR 203a - Fiche descriptive complète



Annexe 27
 Orgnac - Fond de la Chatière des Sables - Prélèvement OR 04 S6 - Fiche descriptive complète



Annexe 29
Détails des ACP et CAH sur OR 04 S6



Poids significatif des valeurs propres par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	4.881	1.929	0.124	0.056	0.011	0.000	0.000
% variance	69.727	27.553	1.767	0.787	0.152	0.004	0.000
% cumulée	69.727	97.280	99.047	99.834	99.986	100.000	100.000

Contributions des variables (%) à la constitution des composantes principales :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Argiles < 2µm	20.103	0.212	6.393	11.583	13.547	46.162	0.000
Sables gross.	20.140	0.303	3.966	8.292	13.726	47.677	5.895
Sables t. fins	20.287	0.067	0.266	10.524	21.804	1.713	45.340
Sables l. fins	0.108	50.043	19.363	5.863	21.575	0.205	2.822
Sables l. gross.	6.572	33.569	10.646	30.585	12.422	0.008	5.799
Sables moyen	19.085	0.789	35.018	15.166	14.033	0.496	15.414
Sables gross.	13.704	15.017	25.348	17.588	2.883	0.739	24.730

Matrice de corrélation

	Argiles < 2µm	Sables t. fins	Sables l. fins	Sables l. gross.	Sables moyens	Sables gross.
Argiles < 2µm	1	0.999	0.979	-0.006	-0.894	-0.937
Sables t. fins	0.999	1	0.981	-0.016	-0.607	-0.775
Sables l. fins	-0.006	0.981	1	0.042	-0.603	-0.955
Sables l. gross.	-0.994	-0.607	-0.603	1	0.722	-0.566
Sables moyen	-0.894	-0.607	-0.603	0.722	1	0.458
Sables gross.	-0.937	-0.775	-0.955	-0.566	0.458	1

Coordonnées des variables, triées par composante

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Sables moyen	-0.965	-0.123	0.208	Sables gross.	-0.818	-0.177	-0.538
Sables gross.	-0.926	-0.835	-0.117	Sables t. fins	-0.990	0.023	0.052
Sables t. fins	0.073	0.982	-0.155	Argiles < 2µm	0.981	-0.070	-0.058
Sables l. fins	0.991	0.064	0.082	Sables l. fins	0.991	-0.076	0.070
Argiles < 2µm	0.991	-0.076	0.070	Sables l. fins	0.991	-0.064	0.092
Argiles < 3.9µ	0.991	-0.076	0.070	Sables t. fins	-0.566	0.805	0.115
Sables l. fins	0.995	-0.036	-0.018	Sables l. fins	0.073	-0.155	-0.155
Sables l. gross.	-0.937	-0.775	-0.955	Sables l. fins	0.073	-0.155	-0.155

Commentaire de synthèse

98 (97.2 %) pour le 1er plan (axe) F1-F2)

% variance expliquées (3 composantes)

variables explicatives par composante (les deux premières)

F1 sables très fins et fins

F2 sables moyens et grossiers, mais peu représentatif

F3 sables moyens et grossiers, mais peu représentatif

degré d'indépendance des variables principales

	Argiles < 2µm	Argiles < 3.9µ	Sils	Sables l. fins	Sables l. gross.	Sables moyens	Sables gross.
Argiles < 2µm	1	0.999	0.979	-0.006	-0.894	-0.937	-0.538
Argiles < 3.9µ	0.999	1	0.981	-0.016	-0.607	-0.775	-0.177
Sils	-0.006	-0.016	1	0.042	-0.603	-0.955	0.023
Sables l. fins	0.991	0.064	0.082	1	0.722	-0.566	-0.070
Sables l. gross.	-0.994	-0.607	-0.603	0.722	1	0.458	-0.064
Sables moyen	-0.894	-0.607	-0.603	-0.566	0.458	1	0.115
Sables gross.	-0.937	-0.775	-0.955	-0.566	0.458	0.115	1

variables les plus représentées par composante (pôles + et -) et en valeur absolue

F1 argiles, sils et sables moyens

F2 sables très fins, fins et grossiers

F3 sables moyens et grossiers, mais peu représentatif

dispersion des individus sur les plans factoriels de l'ACP

P1=F1-F2 Dispersion claire autour de deux directions : une pour les fractions sableuses, une pour les fractions argileuses et silteuse

P2=F1-F3 Ces deux groupes sont toujours variables, mais ils apparaissent moins distinctement

P3=F2-F3 Plan privilégiant la représentation des éléments grossiers, qui sont assez écartés

commentaire sur la CAH

on retrouve les mêmes regroupements (cf. l'indépendance entre les variables), en liaison totale avec les critères granulométriques, soit du moule le plus fin au moule le plus sable :

argiles < 2µ et < 3.9µ >> fraction fine

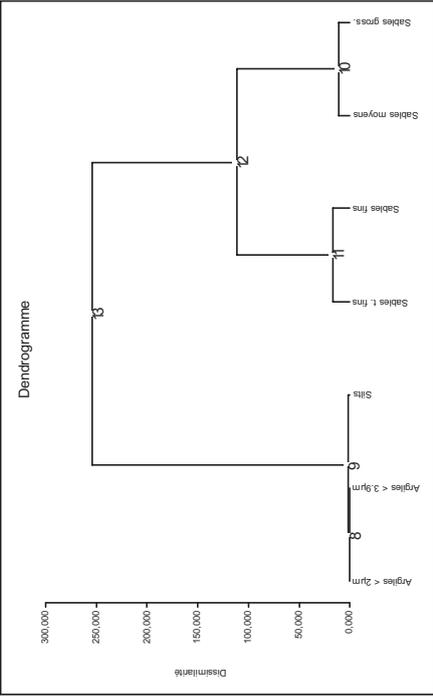
fraction fine et sils >> fraction grossière

sables moyens et grossiers >> fraction médiane

sables fins et très fins >> fraction médiane

tous les sables >> fraction médiane

lien l'air de l'arbre avec la fraction fine et les sils



Description du dendrogramme :

Nœud	Fils gauche	Fils droit	Effectif	Poids	Niveau
13	9	12	7	4,000	254,177
12	11	10	4	4,000	111,208
11	4	5	2	2,000	18,106
10	6	7	2	2,000	10,989
9	8	3	3	3,000	1,556
8	1	2	2	2,000	0,030

TABLES

TABLE DES FIGURES

PARTIE I : LA FONCTION MEMOIRE DU KARST.
PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.

Figure I.1 : Définition graphique de l'approche systémique (d'après Durand, 1979).	20
Figure I.2 : Schéma de synthèse montrant l'articulation des trois mémoires morphogéniques du karst (modifié d'après Delannoy et al., 1999).	21
Figure I.3 : Schéma montrant les conséquences de la migration de l'exutoire sur l'évolution d'un réseau de drainage (commentaire dans le texte).	23
Figure I.4 : Les systèmes karstiques unaires et binaires (d'après Delannoy, 1997).	24
Figure I.5 : Exemple de creusement d'une galerie en régime noyé puis d'évolution en régime vadose (modifié d'après Renault, 1970).	25
Figure I.6 : Les vagues d'érosion sur les parois d'une galerie en « conduite forcée » et leur signification (d'après Lismonde et Lagmani, 1987 ; Slabe, 1995).	26
Figure I.7 : Exemple de creusement et d'évolution paragenétique d'une galerie, en régime vadose, avec présence simultanée de dépôts (d'après Renault, 1970).	27
Figure I.8 : Exemple d'un mécanisme tectonique sur une galerie endokarstique (d'après Bini et al., 1992).	27
Figure I.9 : Exemple de mémoires naturelles de l'endokarst emboîtées (commentaire dans le texte).	32
Figure I.10 : Une galerie « idéale » - synthèse graphique de la richesse informationnelle constituée par les dépôts endokarstiques.	33
Figure I.11 : Lamination infra-annuelle dans un spéléothème du Vercors (d'après Perrette, 1999).	35
Figure I.12 : Famille radioactive de l' ²³⁸ U et comportement géochimique des éléments ²³⁸ U, ²³⁴ U et ²³⁰ Th dans les eaux de percolation et les stalagmites (d'après Quinif, 1990).	37
Figure I.13 : Les différentes émissions de lumière d'un spéléothème en réponse à une excitation par source laser (d'après Perrette, 1999).	38
Figure I.14 : Dispositif expérimental permettant de mesurer le régime hydrologique des concrétions dans les grottes de Choranche (d'après Perrette, 1999).	38
Figure I.15 : Exemple d'une coupe mettant en relation des éléments climatiques et archéologiques – Coupe stratigraphique du sondage préhistorique de Balme Rousse (Cirque de Choranche) issu des fouilles de Bintz (d'après Delannoy et al., 1988).	46
Figure I.16 : Exemples de différents remplissages et problème de la connexion des prélèvements en vue d'une spatialisation de l'information.	57
Figure I.17 : Les différentes causes possibles dans l'initiation d'une sédimentation en zone noyée capacitive.	63
Figure I.18 : Le problème de l'instabilité hydrodynamique en zone vadose, et ses effets sur le fonctionnement des pièges sédimentaires.	65
Figure I.19 : Le système lacustre endokarstique et son comportement en tant que piège sédimentaire.	66
Figure I.20 : Schéma de la hiérarchisation d'un réseau de drainage karstique sous l'effet de la concentration des écoulements (modifié d'après Perrette, 1999).	69
Figure I.21 : Les remplissages lacustres comme marque d'une sédimentation endokarstique complexe agissant à différentes échelles spatiales et temporelles.	72
Figure I.22 : Différentes perturbations dans la continuité de l'enregistrement sédimentaire dans un lac endokarstique, causées par des événements extérieurs exceptionnels.	73
Figure I.23 : L'évolution des contrôles intrinsèques du karst sur son contenu en archives naturelles du type sédiments détritiques.	75

PARTIE II : LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION.
MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.

Figure II.1 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement par carottier-tube (d'après Lignier, 2001).	86
Figure II.2 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement par carottier-boîte (d'après Lignier, 2001).	86
Figure II.3 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement depuis la surface, à l'aide d'une barge.	87
Figure II.4 : Les différentes étapes de la technique de prélèvement depuis la surface, à l'aide du petit carottier.	88
Figure II.5 : Schéma des étapes de l'acquisition des courbes de niveaux de gris.	93
Figure II.6 : Les relations des trois paramètres de colorimétrie (d'après documentation constructeur).	96
Figure II.7 : Les composantes de la réflexion lumineuse totale : la réflexion diffuse et la réflexion spéculaire (d'après documentation constructeur).	98
Figure II.8 : La représentation des courbes granulométriques sous la forme d'un diagramme surfacique (d'après Beierle et al., 2002).	99
Figure II.9 : Exemple d'évolution de la granulométrie sur une carotte du Lac du Bourget (d'après Arnaud, 2003).	100
Figure II.10 : Diagramme de Passega, permettant de travailler sur la mise en place de sédiments en hydrologie de surface (d'après Passega, 1964).	101
Figure II.11 : Exemples d'environnements sédimentaires caractérisés par la disposition des points sur le diagramme de Passega (d'après Passega, 1964).	101
Figure II.12 : L'association des différents traitements cités : le cas d'un méandre de la plaine alluviale du Rhône en amont de Lyon (d'après Peiry, 1994).	102
Figure II.13 : Analyse spectrale des taux de croissance sur une stalagmite du Gouffre Berger – Vercors (d'après Perrette et al., 1999).	105
Figure II.14 : L'ondulette de Daubechies éditée par le logiciel MatlabTM.	105

Figure II.15 : Schéma théorique du raisonnement produit grâce aux analyses spectrales et aux ondelettes.	106
Figure II.16 : Terminologie et structure des principaux minéraux argileux (d'après Cojan et Renard, 1999).	107
Figure II.17 : La loi de décroissance radioactive (d'après Bimbot, 1996).	110
Figure II.18 : La calibration des âges carbone – Explication graphique.	111
Figure II.19 : La stratification thermique des eaux dans un lac de surface et la sédimentation qui en découle (d'après Sturm et Matter, 1978).	117
Figure II.20 : La sédimentation dans un lac endokarstique, ne subissant pas de stratification thermique (modifié d'après Sturm et Matter, 1978).	118
Figure II.21 : La légende de la cartographie morphologique appliquée à la Grotte Chauvet (d'après Delannoy et al., 2001).	121
Figure II.22 : Modèle du quadripôle Wenner, lignes de courant et équipotentielles dans un milieu homogène (d'après Kaufmann, 2002).	122
PARTIE III : ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES ACTIFS - LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).	
Figure III.1 : Topographie partielle du système Coufin-Chevaline des grottes de Choranche : partie aval (topo GSV, d'après Caillaud et al., 1997).	131
Figure III.2 : Le lac de la Cathédrale vu en plan et en coupe.	132
Figure III.3 : Le lac de Coufin vu en plan et en coupe.	134
Figure III.4 : Vue en plan de la disposition générale des réseaux du système de Choranche dans le massif calcaire.	137
Figure III.5 : Détails des réseaux de Gournier et de Coufin-Chevaline et localisation des différentes phases de creusement (d'après Delannoy, 1997).	138
Figure III.6 : Evolution de la distribution des paléo-drains et des circulations actuelles du système de Choranche (d'après Delannoy, 1997).	138
Figure III.7 : Réaction des rivières de Coufin et de Gournier à la crue de mai 1999 (d'après Delannoy et al., 1999a).	140
Figure III.8 : Localisation du système karstique de Choranche (Coufin-Chevaline) par rapport à la topographie actuelle.	141
Figure III.9 : Carte et coupe simplifiées du Massif des Coulmes – Vercors (d'après Delannoy, 1997).	142
Figure III.10 : Les grandes unités hydrogéologiques et karstiques des Coulmes – Exutoires et bassins d'alimentation (d'après Delannoy, 1997).	143
Figure III.11 : Le Massif des Coulmes et les grandes étapes de sa karstification (dessin, Y. Perrette).	143
Figure III.12 : Localisation des prélèvements dans le lac de la Cathédrale – Grottes de Choranche – Vercors.	146
Figure III.13 : Schéma descriptif de la carotte CAT 9901.	147
Figure III.14 : Schéma descriptif de la carotte CAT 9902.	148
Figure III.15 : Schéma descriptif de la carotte CAT 0101.	149
Figure III.16 : Schéma descriptif de la carotte CAT 0102.	151
Figure III.17 : Schéma descriptif de la carotte CAT 0103.	152
Figure III.18 : Localisation des prélèvements dans le lac de Coufin – Grottes de Choranche – Vercors (modifié d'après Blois, 2000).	153
Figure III.19 : Schéma descriptif de la carotte COU 9902.	154
Figure III.20 : Schéma descriptif de la carotte COU 9901 (d'après Blois, 2000).	155
Figure III.21 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques sur CAT 0103.	157
Figure III.22 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques pour les quatre autres carottes du lac de la Cathédrale et leurs valeurs de corrélation correspondantes.	158
Figure III.23 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques sur COU 9902 et les tests de corrélation associés.	159
Figure III.24 : La comparaison de trois critères synthétiques de l'information granulométrique : mode, médiane et grain moyen pour CAT 0103.	161
Figure III.25 : Les courbes de mode, de médiane et de grain moyen pour les autres carottes prélevées à Choranche.	162
Figure III.26 : Les diagrammes triangulaires des trois grandes classes granulométriques pour les six carottes étudiées.	164
Figure III.27 : Les graphiques asymétrie/classement des six carottes étudiées à Choranche.	165
Figure III.28 : Relations entre le grain moyen et la qualité du classement vue à travers les représentations classement/asymétrie (A) et les représentations mode/classement (B) pour la carotte CAT 9902.	166
Figure III.29 : Les graphiques classement/mode des six carottes étudiées à Choranche.	167
Figure III.30 : Le croisement du kurtosis et du grain moyen comme critère de définition de la qualité d'une distribution granulométrique dans les six prélèvements.	168
Figure III.31 : Exemple de comparaison des courbes granulométriques pour une mesure, (centimètre 15 de CAT 0103).	170
Figure III.32 : Visualisations 2D de la granulométrie de CAT 0103 selon la nature des fractions.	171
Figure III.33 : Evolution du taux de carbonates dans les sédiments de la carotte COU 9901 (d'après Blois, 2000).	171
Figure III.34 : Planche photographique de quelques observations au microscope (clichés A.S. Perroux).	172
Figure III.35 : Planche photographique de quelques observations à la loupe sur les sédiments du lac de la Cathédrale (clichés A.S. Perroux).	174
Figure III.36 : Planche photographique de quelques observations à la loupe sur les sédiments du lac de Coufin (clichés A.S. Perroux).	175
Figure III.37 : Les images C/M pour les cinq carottes du lac de la Cathédrale.	177
Figure III.38 : Les images C/M du lac de la Cathédrale - essai de caractérisation de la sédimentation lacustre endokarstique.	178
Figure III.39 : Les images C/M pour les deux carottes du lac de Coufin.	180
Figure III.40 : Les images C/M du lac de Coufin confrontées au modèle proposé pour le lac de Cathédrale.	181
Figure III.41 : L'ACP de CAT 0101 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.	185
Figure III.42 : L'ACP de CAT 0102 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.	186
Figure III.43 : L'ACP de CAT 0103 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.	187
Figure III.44 : L'ACP de CAT 9901 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.	188
Figure III.45 : L'ACP de CAT 9902 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.	190

Figure III.46 : L'ACP de COU 9902 dans le premier plan factoriel et la CAH associée.	191
Figure III.47 : Le diagramme de Hjulström (d'après Chamley, 1987).	192
Figure III.48 : Les images C/M avec distinction des différentes unités sédimentaires définies pour chaque carotte prélevées à Choranche.	193
Figure III.49 : Pertinence des différentes mesures effectuées, testée à travers les analyses multifactorielles – Cas du lac de la Cathédrale (CAT 0103).	196
Figure III.50 : Pertinence des différentes mesures effectuées, testée à travers les analyses multifactorielles – Cas du lac de Coufin (COU 9902).	197
Figure III.51 : Le grain moyen et les trois signaux sédimentaires « non granulométriques » des carottes de Choranche – Evolution comparée.	200
Figure III.52 : Corrélation croisée sur les deux valeurs du L* de CAT 0103 – Lac de la Cathédrale.	201
Figure III.53 : Corrélation croisée sur les deux valeurs du L* de COU 9902 – Lac de Coufin.	201
Figure III.54 : La colorimétrie des carottes de Choranche.	201
Figure III.55 : Localisation des carottes de Choranche dans l'espace colorimétrique a*/b* du spectrorimètre utilisé.	202
Figure III.56 : Courbes de corrélations entre CAT 0102 et CAT 0103.	205
Figure III.57 : Corrélation entre médiane et grain moyen, exemple de CAT 0101.	206
Figure III.58 : Deux exemples de corrélations illustrant respectivement les sous groupes (ABC) et (EF).	206
Figure III.59 : Les trois grandes tendances corrélatoires.	207
Figure III.60 : Hétérogénéité de la corrélation de type C (SM/L*) à travers les différentes carottes étudiées.	208
Figure III.61 : Quelques courbes corrélatives particulières de COU 9902.	209
Figure III.62 : Les familles de crue identifiées grâce aux images de Passega - Exemple sur CAT 0103.	210
Figure III.63 : Le cas intermédiaire de l'évolution d'une crue - Exemple sur CAT 0103.	211
Figure III.64 : La comparaison graphique des différents signaux pour les principales crues de la carotte CAT 0102.	212
Figure III.65 : Périodogrammes en fréquence du grain moyen et des niveaux de gris de CAT 0102.	213
Figure III.66 : Les pentes β des densités spectrales et leur signification sur la constitution du signal (d'après Hardy et Beier, 1994).	214
Figure III.67 : L'ondelette de Daubechies à travers 9 niveaux de décomposition (réalisé avec le logiciel MatlabTM).	214
Figure III.68 : Les densités spectrales de niveaux de gris et du grain moyen comparées entre CAT 0102 et CAT 0103.	215
Figure III.69 : Les courbes brutes de la SM et du L* de spectrorimétrie – perception du mouvement brownien fractionnaire et de l'effet Noé.	216
Figure III.70 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 0101.	217
Figure III.71 : Décomposition en ondelette de la susceptibilité magnétique sur CAT 0101.	218
Figure III.72 : Les décompositions par ondelettes à travers les pourcentages de variance expliquée pour le L*, les niveaux de gris et le grain moyen de CAT 0101.	219
Figure III.73 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 0102.	220
Figure III.74 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 0102.	220
Figure III.75 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 0103.	221
Figure III.76 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 0103.	223
Figure III.77 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 9901.	223
Figure III.78 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 9901.	224
Figure III.79 : Les densités spectrales des signaux sur CAT 9902.	225
Figure III.80 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de CAT 9902.	226
Figure III.81 : Les densités spectrales des signaux sur COU 9902.	227
Figure III.82 : Les décompositions par ondelettes et les pourcentages de variance expliquée pour les signaux de COU 9902.	227
Figure III.83 : Localisation précise des charbons datés dans le remplissage détritique du lac de la Cathédrale et taux de sédimentation correspondants.	233
Figure III.84 : Les premières descriptions des images de Passega proposées pour les lacs de Choranche.	238
Figure III.85 : Exemple d'une régression polynomiale sur les données de la carotte CAT 0102.	238
Figure III.86 : Comparaison de la pertinence des différentes régressions testées sur les échantillons du lac de la Cathédrale.	239
Figure III.87 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés en contexte lacustre, élaborée à partir des carottes du lac de la Cathédrale.	240
Figure III.88 : Le fonctionnement de la perte permanente au fond du lac de la Cathédrale, impact sur le remplissage détritique profond.	242
Figure III.89 : Hypothèse sur la dynamique du processus de la vidange accidentelle de 1980.	243
Figure III.90 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés en contexte lacustre, élaborée à partir des carottes du lac de la Cathédrale – Positionnement des courbes de l'échantillon du lac de Coufin.	244
Figure III.91 : Disposition et chronologie des différentes carottes prélevées dans le lac de la Cathédrale.	250
Figure III.92 : Les archives naturelles de surface (d'après Magny, 1995) et les archives stalagmitiques du Vercors (d'après Perrette, 2000) – Eléments de comparaison.	251
Figure III.93 : La décomposition par ondelettes du grain moyen de CAT 0102 : importance du signal sur l'unité sédimentaire grossière.	253

PARTIE IV : APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES
HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).

Figure IV.1 : Localisation du site et carte géologique simplifiée du secteur (d'après Jaillet, 2004).	264
Figure IV.2 : Synthèse de l'évolution des Gorges de l'Ardeche en fonction des grands événements méditerranéens (d'après J.J. Delannoy « L'eau et le Calcaire » - Musée Régional de la Préhistoire – Orgnac).	264
Figure IV.3 : Coupe géologique du secteur de l'Aven d'Orgnac, entre Ardèche et Cèze (d'après Sabaut, 2005).	265
Figure IV.4 : La formation d'un aven (modifié d'après Combier in Debard, 1988).	268
Figure IV.5 : Topographie de l'Aven d'Orgnac et la localisation des secteurs d'étude.	270
Figure IV.6 : Le point bas de la salle Nord, vue schématique en coupe.	271
Figure IV.7 : Schéma du secteur étudié dans la Chatière des Sables – Coupes longitudinale et transversale.	272
Figure IV.8 : Topographie de la salle II de l'Aven d'Orgnac (d'après Sadier, 2004).	276

Figure IV.9 : Les apports de la cartographie géomorphologique souterraine (modifié d'après Sadier, 2004).	277
Figure IV.10 : La carte géomorphologique du fond de la salle Nord de l'Aven d'Orgnac.	278
Figure IV.11 : La carte géomorphologique de la salle II de l'Aven d'Orgnac (d'après Sadier, 2004).	280
Figure IV.12 : Synthèse graphique des sondages effectués dans la salle II de l'Aven d'Orgnac (d'après Sadier, 2004).	282
Figure IV.13 : Coupe générale situant les deux sondages A et B et description.	284
Figure IV.14 : Croquis de synthèse sur l'évolution du niveau sableux dans la Chatière des Sables (pour le confort de lecture, les échelles ne sont pas forcément respectées).	286
Figure IV.15 : Interprétation dynamique proposée pour le dépôt sableux entre le fond de la Chatière des Sables et l'extrémité Nord de la Salle II.	289
Figure IV.16 : Les différentes étapes d'un prélèvement de sédiments à l'aide de profilés aluminium.	290
Figure IV.17 : Schéma descriptif du profilé OR 203a.	292
Figure IV.18 : Schéma descriptif du profilé OR 04 S6.	293
Figure IV.19 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques de OR 203a.	295
Figure IV.20 : Evolution des contributions des trois grandes classes granulométriques de OR 04 S6.	296
Figure IV.21 : La comparaison des indices granulométriques synthétiques : mode, médiane et grain moyen pour OR 203a.	297
Figure IV.22 : La comparaison des indices granulométriques synthétiques : mode, médiane et grain moyen pour OR 04 S6.	298
Figure IV.23 : Croisements de données granulométriques complémentaires sur OR 203a.	300
Figure IV.24 : Croisements de données granulométriques complémentaires sur OR 04 S6.	301
Figure IV.25 : Planche photographique de quelques observations à la loupe binoculaire sur les sables de la chatière (clichés A.S. Perroux)	302
Figure IV.26 : L'image C/M du prélèvement OR 203a, dans le point bas de la salle Nord.	304
Figure IV.27 : L'image C/M du prélèvement OR 04 S6, dans le point bas de la Chatière des Sables.	305
Figure IV.28 : Premier plan factoriel de l'ACP sur les classes granulométriques de OR 203a et CAH associée.	307
Figure IV.29 : Premier plan factoriel de l'ACP sur les classes granulométriques de OR 04 S6 et CAH associée.	309
Figure IV.30 : Rapports entre les différents signaux sédimentaires de OR 203a par les analyses multifactorielles.	312
Figure IV.31 : Rapports entre les différents signaux sédimentaires de OR 04 S6 par les analyses multifactorielles.	313
Figure IV.32 : Evolution comparée du grain moyen et des autres signaux sédimentaires.	314
Figure IV.33 : Les différentes corrélations croisées sur OR 203a.	315
Figure IV.34 : Les différentes corrélations croisées sur OR 04 S6.	315
Figure IV.35 : La comparaison des espaces colorimétriques des différents sédiments étudiés.	316
Figure IV.36 : Les densités spectrales et les pentes correspondantes pour les différents signaux sédimentaires de OR 203a.	318
Figure IV.37 : Les densités spectrales et les pentes correspondantes pour les différents signaux sédimentaires de OR 04 S6.	318
Figure IV.38 : Les décompositions par ondelette pour les différents signaux sédimentaires de OR 203a.	320
Figure IV.39 : Les décompositions par ondelette pour les différents signaux sédimentaires de OR 04 S6.	320
Figure IV.40 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques piégés en contexte lacustre – Synthèse sur les lacs de Choranche et le « paléolac » d'Orgnac.	324
Figure IV.41 : Les différentes origines possibles de l'ancien piège du fond de la salle Nord.	327
Figure IV.42 : La place du dépôt lité du point bas de la salle Nord dans l'histoire de la cavité (modifié d'après Noury, 2005).	328
Figure IV.43 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques – Première confrontation entre les pièges lacustres et les sédiments de la Chatière des Sables à Orgnac.	329
Figure IV.44 : La carte d'identité des sédiments détritiques endokarstiques – Deuxième confrontation entre les pièges lacustres et les sédiments de la Chatière des Sables à Orgnac.	330
Figure IV.45 : Synthèse des enveloppes polynomiales de OR 04 S6.	331

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

PARTIE I : LA FONCTION MEMOIRE DU KARST.
PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.

Photo I.1 : Photographie d'une galerie en tube, creusée en zone noyée – Grotte de St Marcel – Ardèche (cliché A.S. Perroux).	26
Photo I.2 : Edifices stalagmitiques massifs de la salle de la Cathédrale - Grottes de Choranche (cliché Grottes de Choranche – Ed. Flash cartes).	30
Photo I.3 : Accumulation de glace souterraine (cliché S. Caillault).	30
Photo I.4 : Accumulation détritique avec la trace d'un ancien chenal comblé – Grotte de St Marcel – Ardèche (cliché A.S. Perroux).	30
Photo I.5 : Exemples de dépôts d'origine biologique. A : ossements – Grotte Chauvet – Ardèche, B : guano nappant un remplissage – Grotte de St Marcel – Ardèche (clichés A.S. Perroux).	39
Photo I.6 : Détail d'une accumulation de glace souterraine où la lamination est visible – Glacière d'Autrans – Vercors (cliché A.S. Perroux).	40
Photo I.7 : Vue d'un dépôt détritique d'origine gravitaire (cliché J.J. Delannoy).	42
Photo I.8 : Vue en coupe d'un remplissage détritique d'origine « fluviatile » – Grotte Chauvet – Ardèche (cliché A.S. Perroux).	43

PARTIE II : LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION.
MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.

Photo II.1 : Le petit carottier utilisé pour notre étude, dans le lac de la Cathédrale à Choranche (cliché A.S. Perroux).	88
Photo II.2 : Carottage direct sur la banquette argileuse du lac de la Cathédrale à Choranche (cliché A.S. Perroux).	89
Photo II.3 : Ouverture d'une carotte au laboratoire (cliché A.S. Perroux).	90
Photo II.4 : Le microgranulomètre laser Mastersizer TM de Malvern Instruments (cliché A.S. Perroux).	91
Photo II.5 : Le banc de numérisation utilisé pour le traitement des carottes en images (cliché A.S. Perroux).	93
Photo II.6 : La sonde MS2E/1 du susceptibilitémètre Bartington TM et le boîtier de contrôle MS2 (cliché constructeur).	95
Photo II.7 : Le spectrocromimètre Minolta CM 2600 d TM (cliché A.S. Perroux).	97
Photo II.8 : Les différents supports pour les observations à la loupe et au microscope (cliché A.S. Perroux).	109
Photo II.9 : Le dispositif nécessaire pour la méthode de prospection géophysique par tomographie électrique (cliché A.S. Perroux).	123

PARTIE III : ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES
ACTIFS - LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).

Photo III. 1 : La salle de la Cathédrale et le lac vu depuis l'amont (cliché Grottes de Choranche/EdyCP).	132
Photo III. 2 : La salle d'entrée et le lac de Coufin vu depuis l'amont de la rivière de Coufin (cliché Grottes de Choranche/EdyCP).	134
Photo III.3 : Les gorges de la Bourne, dominées par les falaises urgoniennes au niveau du village de Choranche (cliché J.J. Delannoy).	138
Photo III.4 : Le massif des Coulmes vu depuis le sud du Vercors (cliché J.J. Delannoy).	142

PARTIE IV : APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES
HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).

Photo IV.1 : La salle De Joly et l'entrée naturelle (cliché J.M. André).	269
Photo IV.2 : L'accumulation détritique du point bas de la salle Nord (cliché A.S. Perroux).	271
Photo IV.3 : Structure globale du talus d'argile de la salle Nord (cliché A.S. Perroux).	279
Photo IV.4 : Sondage profond à la grande tairie (cliché S. Jaillet).	283
Photo IV.5 : Argile retirée à la tairie (cliché S. Jaillet).	283
Photo IV.6 : Les premiers centimètres du sondage A (cliché A.S. Perroux).	285
Photo IV.7 : Début du rétrécissement vers la chatière et dernière extrémité de « la plage » (cliché A.S. Perroux).	287
Photo IV.8 : Dans la chatière, vue des blocs éboulés noyés dans un remplissage fin sablonneux (cliché A.S. Perroux).	287
Photo IV.9 : Le diverticule rempli de sables (cliché A.S. Perroux).	287
Photo IV.10 : Dans la chatière, vue de la petite niche entre la sortie de l'étranglement et la remontée vers la salle III (cliché A.S. Perroux).	288
Photo IV.11 : Prélèvement dans les dépôts du fond de la salle Nord (cliché A.S. Perroux).	291
Photo IV.12 : Prélèvement dans la chatière des sables (cliché A.S. Perroux).	294

TABLE DES TABLEAUX

PARTIE I : LA FONCTION MEMOIRE DU KARST.
PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.

Tableau I.1 : Récapitulatif des différentes formes endokarstiques façonnées par les écoulements et de l'information paléogéographique associée (d'après Renault, 1967 et 1970 ; Delannoy, 1981 ; Lismonde et Lagmani, 1987 ; Gilli, 1995 ; Slabe, 1995).	28
Tableau I.2 : Synthèse chronologique paléoclimatique et archéologique du Quaternaire récent (d'après Miskovsky, 1987).	47
Tableau I.3 : Les différentes mémoires environnementales incluses dans les archives détritiques endokarstiques.	50
Tableau I.4 : Schéma de synthèse représentant tous les enregistreurs continentaux contribuant aux recherches sur le « Local Change », en fonction de leur complémentarité spatio-temporelle.	52
Tableau I.5 : Les principaux types de dépôts détritiques endokarstiques classés en fonction de leur mode de transport et de leur origine (simplifié d'après Delannoy, 1997).	59
Tableau I.6 : Correspondance des échelles et dénominations granulométriques (d'après Chamley, 1987).	61
Tableau I.7 : Les différents pièges à sédiments de l'endokarst, et leur intérêt en tant que support à la constitution de mémoires environnementales.	68

PARTIE II : LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION.
MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.

Tableau II.1 : Les unités d'expression des âges 14C.	111
Tableau II.2 : Récapitulatif des méthodes présentées et de leur intérêt pour notre étude des dépôts détritiques endokarstiques.	113

PARTIE III : ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES
ACTIFS - LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).

Tableau III.1 : Récapitulatif des stations de mesures hydrologiques et météorologiques placées en entrée et sortie du système karstique de Choranche (d'après Delannoy et al., 1999a).	139
Tableau III.2 : Les tests de corrélation entre les trois composantes granulométriques de CAT 0103.	157
Tableau III.3 : Les tests de corrélation entre les trois paramètres synthétiques des six carottes.	161
Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 1.	175
Tableau III.4 : Données numériques de l'ACP sur CAT 0101 – Indépendance des variables.	185
Tableau III.5 : Données numériques de l'ACP sur CAT 0102 – Indépendance des variables.	186
Tableau III.6 : Données numériques de l'ACP sur CAT 0103 – Indépendance des variables.	188
Tableau III.7 : Données numériques de l'ACP sur CAT 9901 – Indépendance des variables.	189
Tableau III.8 : Données numériques de l'ACP sur CAT 9902 – Indépendance des variables.	190
Tableau III.9 : Données numériques de l'ACP sur COU 9902 – Indépendance des variables.	191
Tableau III.10 : Les vitesses d'écoulement estimées pour chaque unité sédimentaire des carottes de Choranche.	194
Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 2.	194
Tableau III.11 : Tableau récapitulatif des valeurs significatives des différentes corrélations croisées calculées à partir des données des carottes de Choranche.	204
Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 3.	209
Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 4.	229
Tableau III.12 : Caractéristiques des différents charbons prélevés.	231
Tableau III.13 : Les datations finales des charbons des sédiments lacustres de Choranche.	231
Tableau synoptique : Cheminement méthodologique et informations apportées – niveau 5.	234
Tableau III.14 : Les stades et les phases chronologiques couvertes par le remplissage détritique du lac de la Cathédrale (d'après Vivian et al. 1991).	249
Tableau III.15 : Les périodicités intervenant sur la sédimentation détritique du lac de la Cathédrale, tirées des traitements par ondelettes.	252

PARTIE IV : APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES
HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).

Tableau IV.1 : Les coefficients de corrélation entre les trois composantes granulométriques des prélèvements d'Orgnac.	295
Tableau IV.2 : Les coefficients de corrélation entre les trois indices granulométriques génériques calculés pour les deux prélèvements d'Orgnac.	297
Tableau IV.3 : Données numériques de l'ACP sur OR 203a – Indépendance des variables.	307
Tableau IV.4 : Données numériques de l'ACP sur OR 04 S6 – Indépendance des variables.	309
Tableau IV.5 : Récapitulatif des valeurs et de la qualité des corrélations croisées.	316

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	1
SOMMAIRE	3
INTRODUCTION GENERALE	7
PARTIE I : LA FONCTION MEMOIRE DU KARST. PLACE, ROLE ET POTENTIEL DES DEPOTS DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.	13
INTRODUCTION	17
CHAPITRE I : LES FONCTIONS MÉMOIRES DU KARST – RAPPELS ET ETAT DE L'ART.	19
1. Précisions sur le cadre conceptuel	19
a) L'approche systémique : notions élémentaires	19
b) Le système « Karst »	20
c) Intérêt de l'approche systémique	21
2. La morphologie endokarstique	22
a) La formation du karst	22
b) Les données paléogéographiques	25
3. Les remplissages	29
a) Une diversité de mémoires naturelles protégées	29
b) Des informations environnementales combinées	31
4. Les spéléothèmes : archive privilégiée des recherches environnementales	34
a) Un dépôt souterrain naturellement favorisé	34
b) Les premières recherches : un enregistreur prometteur	34
c) Une diversité des méthodes d'étude disponibles	36
5. Vers une étude des autres mémoires endokarstiques	38
a) Des enregistreurs potentiels nombreux	38
1. <i>Dépôts d'origine biologique</i>	39
2. <i>Dépôts d'origine physique</i>	39
3. <i>Dépôts d'origine détritique</i>	41
b) L'étude des dépôts détritiques s.l.	44
1. <i>Les recherches sur la spéléogenèse</i>	44
2. <i>Les premières études stratigraphiques : entrées environnementale et archéologique</i>	46
3. <i>Des méthodes d'étude connexes : une mémoire environnementale enrichie</i>	48
c) Un fort atout : la complémentarité spatio-temporelle	51
CHAPITRE II : APPROCHE ORIGINALE DES ARCHIVES DETRITIQUES ENDOKARSTIQUES.	55
1. Positionnement de notre étude des remplissages détritiques	55
a) Nécessité d'une approche complémentaire	56
b) Une démarche de travail différente : l'entrée hydrodynamique	56
c) Incidences sur le travail de terrain	57
2. Discussion : quels sont les sédiments détritiques les plus appropriés pour notre démarche analytique ?	58
a) Dépôts à valeur informationnelle inadaptée à notre approche	58
b) Dépôts retenus pour l'application de notre approche	60
3. Rôle et pertinence des pièges à sédiments de l'endokarst.	61

a) La fonction de piégeage : diversité et aspects énergétiques	62
1. <i>En zone noyée</i>	62
2. <i>En zone vadose</i>	64
3. <i>Le lac endokarstique : piège sédimentaire par excellence</i>	65
b) La place des pièges dans le réseau de drainage : données spatiales	67
1. <i>Rappels sur la hiérarchisation intrinsèque du karst</i>	67
2. <i>Choix de la zone d'étude</i>	69
c) Réflexion sur le type d'archive naturelle constituée : intérêts et limites	70
1. <i>L'empreinte du réseau de drainage</i>	70
2. <i>Les perturbations induites sur l'archivage des fluctuations extérieures</i>	71
3. <i>Le parallèle avec les lacs de surface en tant que pièges à sédiments</i>	74
 CONCLUSION	 77
 PARTIE II : LES METHODES D'ETUDE A DISPOSITION. MISE AU POINT D'UNE DEMARCHE ANALYTIQUE.	 79
<hr/>	
INTRODUCTION	83
CHAPITRE I : LES MÉTHODES D'ÉTUDE DES SYSTÈMES SÉDIMENTAIRES DE SURFACE : BASE À LA CONSTITUTION DE NOTRE PROPRE DÉMARCHE.	85
1. Echantillonnage des sédiments	85
a) Les modes de prélèvements	85
b) Avantages et inconvénients des carottes de sédiments	89
2. Acquisitions de données	90
a) La granulométrie	90
1. <i>Méthode</i>	90
2. <i>Mise en œuvre et limites</i>	91
b) L'imagerie en niveaux de gris	92
c) La susceptibilité magnétique	94
d) La spectrocromimétrie	96
3. Etude dynamique : caractérisation du piégeage sédimentaire	99
a) Utilisation directe des données de granulométrie	99
b) Images de Passega et autres croisements de données	100
c) Statistiques multifactorielles	102
4. Etude dans les domaines temporel et fréquentiel	103
a) Comparaisons et corrélations : domaine temporel	103
b) Traitement du signal et ondelettes : domaine fréquentiel	104
5. Les autres méthodes utilisables	107
a) L'identification des argiles	107
b) Observations au microscope et à la loupe	108
c) Le contenu en éléments non détritiques	109
d) Les datations	109
1. <i>Plomb 210 et Césium 137 et 134</i>	109
2. <i>Carbone 14</i>	110
e) Les minéraux lourds et les éléments majeurs	111
CHAPITRE II : APPLICATION AU MILIEU ENDOKARSTIQUE - UNE DÉMARCHE METHODOLOGIQUE SPECIFIQUE.	115
1. La pression de l'endokarst sur la sédimentation souterraine	115
a) Le filtrage endokarstique : conséquences méthodologiques	116
b) Le fonctionnement particulier du lac endokarstique	116

2. Approche karstologique : des méthodes complémentaires	118
a) Nécessité de méthodes d'études spécifiques au karst	119
b) Exemples d'études complémentaires	119
1. <i>L'hydrologie</i>	120
2. <i>La cartographie morphologique</i>	120
3. <i>La tomographie électrique</i>	122
CONCLUSION	124
PARTIE III : ETUDE DE DEUX PIEGES ENDOKARSTIQUES ACTIFS - LES LACS DE CHORANCHE (VERCORS).	125
INTRODUCTION	129
CHAPITRE I : LE CHOIX DU SITE DE CHORANCHE ET LE CONTEXTE VERCUSIEN.	131
1. Les lacs souterrains de Choranche	131
a) Le lac de la Cathédrale	132
b) Le lac de Coufin	133
c) Pertinence des pièges lacustres du système karstique de Choranche	135
2. Les grottes de Choranche : un véritable laboratoire souterrain	136
a) Présentation karstologique du réseau des grottes de Choranche	136
b) Les connaissances accumulées sur ce système karstique	139
3. Le Massif des Coulmes et le Vercors Septentrional : grands traits	140
a) Localisation et grands traits géologiques	141
b) La « contribution » humaine et ses effets sur l'environnement local	144
CHAPITRE II : L'ETUDE DES CAROTTES DE CHORANCHE – MISE EN APPLICATION DE NOTRE APPROCHE.	145
1. Prélèvements effectués et description des carottes	145
a) Echantillons du lac de la Cathédrale	145
1. <i>CAT 9901</i>	146
2. <i>CAT 9902</i>	146
3. <i>CAT 0101</i>	149
4. <i>CAT 0102</i>	150
5. <i>CAT 0103</i>	150
b) Echantillons du lac de Coufin	150
1. <i>COU 9902</i>	153
2. <i>COU 9901</i>	153
2. Les analyses granulométriques	156
a) Etude directe des données granulométriques	156
1. <i>Evolution de quelques données en fonction de la profondeur</i>	156
2. <i>Analyses de données granulométriques croisées</i>	163
3. <i>Les mesures granulométriques après décarbonatation</i>	169
4. <i>Les analyses minéralogiques</i>	172
b) Les traitements de données granulométriques : approche dynamique	176
1. <i>Les images C/M d'après les théories de Passega</i>	176
2. <i>Les outils statistiques multifactoriels : ACP et CAH</i>	183
3. <i>L'apport du diagramme de Hjulström</i>	192
3. Le signal sédimentaire à travers d'autres proxy et leurs traitements	195
a) Lecture comparative des différents signaux	195
1. <i>Pertinence des différents paramètres</i>	195
2. <i>Comparaisons et qualité de la réponse de chaque signal</i>	198
3. <i>Corrélations croisées</i>	203
b) Etude approfondie des niveaux grossiers	210

1. Etude par les images C/M	210
2. Par la granulométrie et les évolutions des différents paramètres mesurés	211
c) Traitement des signaux par analyse spectrale et ondelettes	213
1. La qualité du signal	213
2. Résultats et raccords avec les paramètres environnementaux	215
4. Les datations	230
a) Argumentation et résultats	230
b) Degré de concordance entre les différentes dates	231
CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET INTERPRÉTATIONS.	237
1. Le point sur la caractérisation des pièges lacustres de l'endokarst	237
a) Le lac de la Cathédrale	237
1. Les images C/M comme carte d'identité des pièges	237
2. Le modèle de fonctionnement de ce piège	240
b) La reproductibilité piège à piège : le lac de Coufin	244
1. La carte d'identité du piège lacustre endokarstique mise à l'épreuve	244
2. Le fonctionnement sédimentaire du lac de Coufin	245
3. Discussion sur la reproductibilité de la méthode	246
2. Evaluation de la capacité mémoire des dépôts détritiques endokarstiques	248
a) Hypothèses sur l'archivage détritique du lac de la Cathédrale	248
1. Positionnement du cadre chronologique global du remplissage	248
2. Discussion sur l'histoire sédimentaire et les évolutions environnementales extérieures	249
b) Remarques sur la structuration de l'archivage et les forçages extérieurs	252
CONCLUSION	255
PARTIE IV : APPLICATION A DES SITES ENDOKARSTIQUES HERITES - AVEN D'ORGNAC (SUD ARDECHE).	257
<hr/>	
INTRODUCTION	261
CHAPITRE I : LE CHOIX DE L'AVEN D'ORGNAC ET LE CONTEXTE ARDECHOIS.	263
1. Les plateaux calcaires du Bas-Vivarais	263
a) Données générales	263
1. Grands traits géologiques et géomorphologiques	263
2. Données de l'endokarst	265
b) La crise messinienne	267
2. L'Aven d'Orgnac : présentation générale	268
a) Description et données globales	268
b) Connaissances et questionnements sur ce site	269
3. Les secteurs d'étude choisis	269
a) Le point bas de la Salle Nord	270
b) La Chatière des Sables	271
CHAPITRE II : L'ETUDE DES PRÉLEVEMENTS D'ORGNAC – TRANSFERT DE NOTRE APPROCHE AUX PIÈGES FOSSILES.	275
1. Approche globale préliminaire des dépôts	275
a) La cartographie morphologique des sols	275
1. Principe	275
2. Intérêts et limites du document	277
3. Carte morphologique du point bas de la salle Nord	278
4. Carte morphologique de la salle II : premières données	279

b) Les sondages	281
1. Sondages dans la première partie de la salle II	281
2. Sondages au niveau de la Chatière	284
2. Description des prélèvements	290
a) Mode particulier d'échantillonnage	290
b) Profilé du point bas de la salle Nord	290
c) Profilé de la Chatière des Sables	291
3. Les analyses granulométriques et les traitements associés	294
a) Données de base sur l'évolution granulométrique	295
1. Le comportement des indices granulométriques majeurs	295
2. Analyses de données granulométriques croisées	299
3. Les analyses minéralogiques et morphoscopiques	301
b) Les traitements graphiques et statistiques	303
1. Les images C/M selon Passega	303
2. Les analyses multifactorielles d'ACP et de CAH associée	306
4. Les autres lectures du signal sédimentaire	311
a) La réponse spécifique de chaque signal	311
1. Pertinence des autres cryptages du signal sédimentaire	311
2. Lecture comparée et corrélations	313
3. Colorimétrie	316
b) Les analyses spectrales et les ondelettes	317
1. Densités spectrales : structure globale des signaux	317
2. Décompositions en ondelettes : structure interne	319
CHAPITRE III : INTERPRÉTATIONS ET ESTIMATION DE LA REPRODUCTIBILITÉ.	323
1. Le point bas de la salle Nord	323
a) Synthèse sur l'image de Passega	323
1. Régression sur le nuage de points	323
2. Premier bilan sur la qualité de la reproductibilité pour un même type de piège	325
b) Synthèse sur le fonctionnement du point bas de la salle Nord	325
2. Le fond de la Chatière des Sables	329
a) Passega : discussion sur la représentation graphique	329
1. Premier niveau d'interprétation	329
2. Second niveau d'interprétation	330
3. Discussion sur les problèmes de reproductibilité entre différents pièges	331
b) Fonctionnement général de la chatière en tant que piège	332
CONCLUSION	335
CONCLUSION GENERALE	337
BIBLIOGRAPHIE	345
ANNEXES	369
TABLES	405
Table des Figures	407
Table des Photographies	411
Table des Tableaux	412
Table des Matières	413

