

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
SOMMAIRE	7
INTRODUCTION GÉNÉRALE	9
PARTIE I - DE LA 2D À LA 3D EN GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE.....	17
INTRODUCTION	19
CHAPITRE 1 - LES VERROUS ACTUELS EN GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE.....	21
1.1. LE SYSTÈME KARSTIQUE :	
LE PARADIGME ACTUEL DE GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE	24
1.1.1. Le système karstique, définition et concepts.....	24
1.1.2. Les apports de l'approche systémique pour comprendre la karstification	25
1.2. LES VERROUS DES RECHERCHES ACTUELLES EN GÉOMORPHOLOGIE DU KARST	26
1.2.1. Géomorphologie et karstogenèse	26
<i>1.2.1.1. Les connaissances actuelles en géomorphologie karstique</i>	<i>27</i>
<i>1.2.1.2. Les limites d'observation :</i>	
<i>le verrou principal à la connaissance de la karstogenèse</i>	<i>30</i>
1.2.2. Etude de la spéléogenèse : les connaissances des conduits et des formes élémentaires du karst	31
<i>1.2.2.1. L'état des recherches actuelles.....</i>	<i>31</i>
<i>1.2.2.2. Les verrous à l'étude de la spéléogenèse</i>	<i>32</i>
1.3. LA GÉOMORPHOLOGIE KARSTIQUE APPLIQUÉE AUX QUESTIONNEMENTS ARCHÉOLOGIQUES : L'OUTIL 3D COMME UN ÉLÉMENT FÉDÉRATEUR ET PLURIDISCIPLINAIRE	34
1.3.1. La place de la géomorphologie dans les études archéologiques	34
1.3.2. Les apports de la géomorphologie pour répondre aux questionnements archéologiques.....	35
1.3.3. Les outils d'investigations de la géomorphologie karstique appliqués z aux sites archéologiques : de la cartographie 2D aux relevés 3D.....	37
CONCLUSIONS : LA CARTOGRAPHIE 3D : UN OUTIL NÉCESSAIRE À L'APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE DU KARST.....	37

CHAPITRE 2 - LA CONSTRUCTION DE MODÈLES 3D	
POUR L'ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE DU KARST	39
2.1. DE LA DEUXIÈME À LA TROISIÈME DIMENSION : DÉFINITION, MÉTHODES	
ET OUTILS DE LA REPRÉSENTATION TRIDIMENSIONNELLE	41
2.1.1. Les différents supports cartographiques et de visualisation.	41
2.1.2. Comment visualiser le karst ?	43
2.1.3. La discrétisation des conduits du karst.....	46
2.2. LA CONSTRUCTION DE MODÈLE 3D À L'ÉCHELLE DU SYSTÈME KARSTIQUE	47
2.2.1. La visualisation 3D des structures karstiques :	
analyse des données spéléométriques	48
2.2.1.1. Discrétisation et analyse des relevés topographiques	48
2.2.1.2. Géo-référencement des topographies spéléologiques.....	50
2.2.2. La représentation 3D du contexte de la karstification	51
2.2.2.1. Méthodologie	52
2.2.2.2. Base de données topographiques et modélisation	53
2.2.2.3. Les données géologiques : de l'intégration géographique à la modélisation des	
surfaces géologiques de référence.....	56
2.2.2.4. La modélisation des couches géologiques.....	58
2.2.3. Restitution d'un système karstique en 3D	61
2.3 CONSTRUCTION DE MODÈLE 3D À L'ÉCHELLE DES DRAINS DU KARST	63
2.3.1 Les outils LiDAR	63
2.3.2 Protocole de construction de modèles 3D à haute résolution spatiale :	
de l'acquisition des données au maillage 3D	65
2.3.2.1 L'acquisition et le recalage des données sur le terrain.....	67
2.3.2.2. Segmentation et triangulation des nuages de points.....	71
2.4. LES INCERTITUDES DES RELEVÉS LASERGRAMMÉTRIQUES SUR CALCITE.....	77
2.4.1. La validité des mesures lasergrammétriques sur calcite ?	77
2.4.2. Mise en place du protocole expérimental.....	77
CONCLUSIONS	82

CHAPITRE 3 - UN ESPACE DE RESTITUTION DE L'ART PARIÉTAL. EXEMPLE DE LA GROTTTE CHAUVET-PONT D'ARC. LES APPORTS DE L'APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE ET DE LA MODÉLISATION 3D	83
3.1. L'ERGC : UN « FAC-SIMILÉ » HORS NORME ?.....	86
3.1.1. Le fac-similé : un support privilégié pour représenter l'art pariétal au plus large public.....	86
3.1.2. Une représentation anamorphosée : la réponse choisie aux dimensions importantes de la grotte Chauvet.....	88
3.1.3. Les contraintes techniques à la réalisation du projet de l'ERGC	89
3.2. LA MODÉLISATION ET LA REPRÉSENTATION 3D DE L'ANAMORPHOSE DE LA GROTTTE CHAUVET	91
3.2.1. L'anamorphose : du concept à la réalisation	92
3.2.2. L'élaboration du modèle 3D de l'anamorphose : segmentation et surface de raccordement	93
3.3. L'INTÉGRATION DE DONNÉES PARIÉTALES ET GÉOMORPHOLOGIQUES DANS LE MODÈLE 3D DE L'ANAMORPHOSE.....	96
3.3.1. Identification de la nature et des faciès des sols et des parois de l'anamorphose	97
3.3.1.1. La segmentation par nature de sol.....	97
3.3.1.2. Identification des faciès de sols et de parois.....	99
3.3.2. Identification colorimétrique des écailles de l'anamorphose de la grotte Chauvet	101
CONCLUSIONS.....	104
CONCLUSIONS DE LA PARTIE I	105

PARTIE II - LES APPORTS DES MODÈLES 3D À LA CONNAISSANCE DE LA KARSTOGENÈSE ET DE LA MORPHOGENÈSE KARSTIQUE.....	107
INTRODUCTION.....	109
CHAPITRE 4 - SPÉLÉOGENÈSE, KARSTIFICATION ET PALÉOGÉOGRAPHIE DES GORGES DE L'ARDÈCHE : ÉTAT DES CONNAISSANCES ET QUESTIONNEMENTS	111
4.1. LES GORGES DE L'ARDÈCHE : LE RÉSULTAT D'UNE LONGUE HISTOIRE GÉOMORPHOLOGIQUE.....	113
4.1.1. Le contexte topographique et géologique des gorges de l'Ardèche.....	113
4.1.2. Le contexte géologique.....	115
<i>4.1.2.1. Les réseaux karstiques souterrains : une composante majeure du bas-Vivarais calcaire.....</i>	<i>119</i>
<i>4.1.2.2. Une diversité topographique marquée</i>	<i>119</i>
4.2. LES CONNAISSANCES ACTUELLES DE L'ÉVOLUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE ET DE LA MORPHOGENÈSE KARSTIQUE ASSOCIÉE AUX GORGES DE L'ARDÈCHE.	122
<i>4.2.1.2. Les surfaces structurales.....</i>	<i>125</i>
4.2.2. Les vallons secs : des indicateurs paléogéographiques et du fonctionnement des drains karstiques	126
<i>4.2.2.1. Les vallons déconnectés de l'Ardèche : marqueurs de la stabilité du niveau de base hydrographique régional</i>	<i>126</i>
<i>4.2.2.2. Les vallons secs connectés à l'Ardèche.....</i>	<i>129</i>
4.3.2. Les enseignements des connaissances géomorphologiques des surfaces.....	130
4.3. BILAN DES CONNAISSANCES KARSTOGÉNIQUES ET SPÉLÉOGÉNIQUES EN ARDÈCHE : LES APPORTS DU KARST À LA CONNAISSANCE DE L'ÉVOLUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUES DES GORGES DE L'ARDÈCHE	131
4.3.1. Les modèles construits avant la découverte de la crise de salinité messinienne	131
4.3.2. Les premières hypothèses identifiant le rôle de la crise messinienne dans la karstification	133
<i>4.3.2.1. Les premiers modèles d'évolution spéléogénique basés sur la géométrie formes et dépôts de surfaces.....</i>	<i>134</i>
<i>4.3.2.2. Les modèles d'évolution construits à partir de la géomorphologie de l'endokarst.....</i>	<i>135</i>
<i>4.3.2.2.1. Les apports des recherches géomorphologiques dans l'endokarst pour des modèles d'évolution paléogéographique</i>	<i>135</i>

4.3.2.2.2. <i>Les apports des connaissances du cycle messino/pliocène à la connaissance fondamentale des formes élémentaires du karst : implications spéléogéniques et paléogéographiques</i>	136
4.3.3. L'approche croisée de la géomorphologie et de niveaux repères souterrains et de surfaces : validation du modèle d'évolution «per ascensum» de la spéléogénèse des gorges de l'Ardèche ?	140
4.4. DISCUSSION SUR L'ORIGINE DES PROBLÈMES RENCONTRÉS POUR LA CORRÉLATION DES MODÈLES ISSUS DE L'ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE DE L'ENDOKARST ET DES MODÈLES GÉODYNAMIQUES DE SURFACE	142
4.5. L'APPORT DES CONNAISSANCES GÉOMORPHOLOGIQUES DE L'ENDO ET DE L'EXOKARST POUR RÉPONDRE AUX QUESTIONNEMENTS PALÉOGÉOGRAPHIQUES DES GORGES DE L'ARDÈCHE	144
CHAPITRE 5 - SPÉLÉOGENÈSE DES CAVITÉS DES GORGES DE L'ARDÈCHE. LES APPORTS DE L'ANALYSE 3D POUR L'ÉTUDE DES FORMES ÉLÉMENTAIRES DE L'ENDOKARST	149
5.1. LA MULTIPLICITÉ DES FORMES ET DES FORMATIONS ENDOKARSTIQUES : LE REFLET D'UNE ÉVOLUTION SPÉLÉOGÉNIQUE COMPLEXE	152
5.1.1. La spéléogénèse syngénétique	152
5.1.1.1. <i>Les formes syngénétiques</i>	152
5.1.1.2. <i>Les formations synchrones à l'établissement des formes syngénétiques</i>	154
5.1.1.3. <i>Les formations postérieures à l'établissement des formes syngénétiques</i>	154
5.1.2. La spéléogénèse paragénétique	155
5.1.2.1. <i>Les formes paragénétiques</i>	156
5.1.2.2. <i>Les formations sédimentaires concomitantes au creusement paragénétique</i>	158
5.1.3. La complexité de la répartition spatiale des formes et formations endokarstiques	159
5.1.3.1. <i>La dispersion des formes paragénétiques et syngénétiques : une dissymétrie rive droite /rive gauche</i>	159
5.1.3.2. <i>Un étagement des morphologies paragénétiques ?</i>	160
5.1.3.3. <i>La géométrie des formations sédimentaires</i>	162
5.1.3.3.1. <i>Une topographie des sols perturbée : le rôle fondamental du processus de soutirage</i>	162
5.1.3.3.2. <i>Une topographie plane des sols : le rôle de mise en charge temporaire des galeries</i>	164

5.2. LES APPORTS DE L'ANALYSE 3D DE LA STRUCTURE GÉOMÉTRIQUE DES FORMES ET DES FORMATIONS ENDOKARSTIQUES	165
5.2.1. Les apports de l'analyse 3D à la connaissance morphogénique des banquettes limites de remplissages.	165
5.2.1.1. <i>Hypothèses sur la morphogenèse d'une banquette limite de remplissage.....</i>	166
5.2.1.2. <i>La lasergrammétrie : un support pertinent d'analyse géométrique et géomorphologique des banquettes limites.....</i>	168
5.2.1.3. <i>Les banquettes limites : témoins de paléo remplissages sédimentaire.....</i>	170
5.2.1.4. <i>De la détermination des paléo débits à l'aven d'Orgnac au contexte paléogéographique</i>	176
5.2.2. Une morphogenèse paragenétique en contexte épinoyé : le paragenétisme d'inondation.	181
5.2.2.1. <i>Les hypothèses morphogéniques</i>	182
5.2.2.2. <i>Les modèles 3D lasergrammétiques : un support pertinent d'analyse géométrique et géomorphologique des morphologies paragenétiques de voûtes et de paroi.....</i>	184
5.2.2.3. <i>Les pendants de voûtes de la grotte Chauvet : une morphogenèse où prévalent les faiblesses lithologiques.....</i>	184
5.2.3. Les apports de l'analyse de modèles 3D à la connaissance des processus d'évacuation des sédiments endokarstiques.....	190
5.2.3.1. <i>Le processus de soutirage : un fonctionnement contraint par la géométrie initiale des conduits karstiques ?.....</i>	190
5.2.3.2. <i>Le fonctionnement actuel du processus de soutirage en grotte : les apports de l'analyse 3D des stalagmites translitées.....</i>	191
5.2.3.3. <i>Analyse spatiale du processus de soutirage. Les apports de l'analyse 2.5D d'un ensemble de données 3D.....</i>	196
5.2.4. Conclusion	207
5.3. RECONSTITUTIONS SPÉLÉOGÉNIQUES DES CAVITÉS DES GORGES DE L'ARDÈCHE.....	207
5.3.1. Reconstitutions spélogéniques des réseaux syngénétiques.....	208
5.3.1.1. <i>Etude spélogénique du réseau des Fées.....</i>	208
5.3.1.2. <i>Etude spélogénique de la Goule de Foussoubie.</i>	211
5.3.1.2.1. <i>L'organisation spatiale des drains de la goule de Foussoubie</i>	213
5.3.1.2.2. <i>Des enregistrements morpho-sédimentaire de différentes phases d'érosion</i>	214
5.3.1.2.2. <i>Reconstitution spélogénique de la goule de Foussoubie</i>	217
5.3.1.2.3 <i>Les apports de l'étude spélogénique des conduits syngénétiques.....</i>	219
5.3.2 Reconstitutions spélogéniques des réseaux paragenétiques creusés dans la zone noyée du karst.....	220
5.3.2.1 <i>Les cavités des Huguenots et de Cayre-Crêt</i>	220
5.3.2.2 <i>Evolution spélogénique de l'aven d'Orgnac</i>	223

5.3.2.3. <i>La cavité de l'aven Double</i>	226
5.3.3. Reconstitutions spéléogéniques des réseaux paragénétiques d'inondation creusés dans la zone épinoyée du karst.	229
5.3.3.1. <i>Un panorama des formes et des formations endokarstiques des réseaux spéléologiques au environ de 180/200 m NGF</i>	229
5.3.3.1.1. <i>Des formes de corrosion paragénétiques</i>	230
5.3.3.1.2. <i>La richesse des formations endokarstiques</i>	231
5.3.3.1.2.1. <i>Les dépôts fluviatiles</i>	231
5.3.3.1.2.2. <i>Les formations carbonatées</i>	236
5.3.3.1.2.3. <i>Questionnements à propos de l'évolution spéléogéniques des cavités à 180/200 m NGF</i>	237
5.3.3.2. <i>Etude géomorphologique de l'ensemble spéléologique à 180/200 m NGF</i>	237
5.3.3. Reconstitutions spéléogéniques du niveau karstique à 180/200 m NGF	241
5.3.3.1. <i>Scénario d'évolution spéléogénique</i>	241
5.3.3.2. <i>Discussion du scénario d'évolution spéléogénique des cavités à 180/200 m NGF</i>	243
5.3.4. Conclusions sur l'étude spéléogénique des cavités du secteur d'étude.	247
5.4. CONCLUSIONS	248
CHAPITRE 6 - RECONSTITUTIONS PALÉOGÉOGRAPHIQUES	
DES GORGES DE L'ARDÈCHE. LES APPORTS DE L'ANALYSE 3D	
POUR L'ÉTUDE DE LA KARSTOGENÈSE ET DES EMBOITEMENTS	
GÉOMORPHOLOGIQUES	251
6.1. APPORTS DE L'ANALYSE 3D À LA CONNAISSANCE	
DU PROCESSUS DE KARSTIFICATION	254
6.1.1. Typologie des galeries analysées	255
6.1.2. Analyse géostatistique des drains karstiques à l'échelle du massif : méthode et discrétisation des données	256
6.1.3 Résultats de l'analyse 3D	259
6.1.3.1 <i>L'influence de la structure géologique dans la géométrie des drains karstiques</i>	259
6.1.3.2 <i>Mise en évidence, dans le réseau de Foussoubie, d'horizons d'inception favorisant la karstification</i>	262
6.1.3.3. <i>Niveau de base, chemin de drainage et coût énergétique : l'origine de la géométrie du karst</i>	266
6.1.4. Discussion	268

6.2. APPORTS DE L'ANALYSE DE L'ÉTAGEMENT KARSTIQUE ET DES SURFACES GÉOMORPHOLOGIQUES À LA CONNAISSANCE DU RELIEF	269
6.2.1. L'étagement des galeries dans les gorges de l'Ardèche : géométrie, datations et questionnements	269
6.2.1.1. <i>Un étagement spéléologique dissymétrique entre les deux rives de l'Ardèche....</i>	270
6.2.1.2. <i>Un contexte de karstification différenciée entre l'amont et l'aval de l'Ardèche.</i>	271
6.2.2. Emboitements des structures de drainage endokarstiques et superficielles : apports de l'étude géomorphologique et de la visualisation 3D	276
6.2.2.1. <i>Emboitement des structures endokarstiques horizontales et verticales.....</i>	276
6.2.2.2. <i>L'emboitement des structures de drainage superficielles et endokarstiques : approche géomorphologique.....</i>	281
6.2.2.2.1. <i>Emboitement des structures karstiques par rapport à la surface SA2 en rive droite.....</i>	281
6.2.2.2.2. <i>Emboitement des structures karstiques par rapport à la surface S2 en rive gauche</i>	284
6.2.3. Conclusions sur l'étude de l'étagement karstique et des emboitements géomorphologiques des structures de drainage	287
6.3. SCÉNARIO D'ÉVOLUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE DES GORGES DE L'ARDÈCHE	289
6.3.1. Les niveaux repères chrono-stratigraphiques	289
6.3.1.1. <i>Les niveaux repères dans la vallée du Rhône</i>	290
6.3.1.2. <i>La datation des sédiments dans les grottes de la Basse Ardèche</i>	292
6.3.2. Karstification et évolution géomorphologique des gorges de l'Ardèche	294
6.3.2.1. <i>La surface d'aplanissement à 260 m NGF, témoin de la surface d'abandon pliocène ?.....</i>	294
6.3.2.2. <i>La surface d'aplanissement à 260 m NGF : un témoin du fonctionnement en poljé d'un paléo-karst de l'Ardèche ?.....</i>	295
6.3.2.3. <i>Chronologie de la mise en place du drainage endokarstique.</i>	300
6.3.3. Reconstitution paléogéographique du Bas Vivarais calcaire.....	304
6.3.3.1. <i>La période pré-messinienne : paléogéographie ardéchoise et première phase de karstification.....</i>	304
6.3.3.1.1. <i>Paléogéographie pré-messinienne</i>	304
6.3.3.1.2. <i>Caractérisation géométrique et reconstitution de surfaces géomorphologiques</i>	305
6.3.2. Le cycle messino-pliocène : caractérisation d'une intense période de karstification suivie d'une longue période de dysfonctionnement du drainage karstique.....	307
6.3.2.1. <i>Impact de la crise de salinité messinienne sur l'évolution des reliefs de la basse Ardèche.....</i>	308
6.3.2.1.1. <i>Un creusement du canyon de l'Ardèche modéré.....</i>	308
6.3.2.1.2. <i>Une karstification en lien avec l'incision du Rhône.</i>	308

6.3.2.2. <i>Impact de la remise en eau pliocène.</i>	310
6.3.2.2.1. <i>L'envolement des drains de l'endokarst sous la cote altitudinale 130 m NGF</i>	311
6.3.2.2.2. <i>Le dysfonctionnement du drainage endokarstique et la genèse concomitante de la surface d'aplanissement SA 2</i>	313
6.3.3. Le Quaternaire : aboutissement du paysage actuel du canyon de l'Ardèche et nouvelle phase de karstification.	314
6.3.3.1. <i>La mise en place d'un nouveau réseau de drainage aérien : le canyon de l'Ardèche</i>	314
6.3.3.2. <i>La mise en place des structures de drainages endokarstiques actuelles</i>	315
6.4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS	317
CONCLUSIONS DE LA PARTIE II	249
PARTIE III - RECONSTITUTION DE LA FERMETURE DE LA GROTTTE CHAUVET : APPORTS DE L'APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE, DES MODÈLES 3D ET DES ISOTOPES COSMOGÉNIQUES DU ³⁶CL	319
INTRODUCTION	321
CHAPITRE 7 - MODALITÉS DE FERMETURE DE LA GROTTTE CHAUVET : LES APPORTS DE L'APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE	325
7.1. LA COMBE D'ARC, LE PONT D'ARC ET LA GROTTTE CHAUVET	328
7.1.1. <i>Le contexte géographique et topographique</i>	328
7.1.2. <i>Description de la zone d'entrée</i>	330
7.1.3 <i>La cartographie géomorphologique : un support d'analyse pertinent pour l'étude du dépôt d'écroulement</i>	337
7.2 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE GÉOMORPHOLOGIQUE DU DÉPÔT D'ÉCROULEMENT	338
7.2.1. <i>Données morphogéniques issues de la cartographie de l'éboulis interne</i>	338
7.2.2. <i>Les données morphogéniques issus de l'étude du dépôt d'écroulement externe. Identification d'un ancien prolongement de la grotte Chauvet</i>	341
7.3 IDENTIFICATION DE SURFACES GÉOMORPHOLOGIQUES REPÈRES ET ÉVOLUTION MORPHOGÉNIQUE DE LA ZONE D'ENTRÉE DE LA GROTTTE CHAUVET	344
7.4 CONCLUSIONS	345

CHAPITRE 8 - RECONSTITUTION 3D DE L'ENTRÉE NATURELLE DE LA GROTTA CHAUVET ET DYNAMIQUE DE FERMETURE : LES APPORTS DE LA MODÉLISATION 3D	347
8.1. ACQUISITION DES DONNÉES 3D	350
8.2. ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE DE LA NICHE D'ARRACHEMENT : LES APPORTS DES DONNÉES 3D	352
8.2.1. La niche d'arrachement	352
8.2.2. Analyse morphologique de la niche d'arrachement.....	353
8.2.3. Reconstitution de l'écaille et calcul du volume écroulé.	355
8.3. LES APPORTS DE LA MODÉLISATION 3D COUPLÉE À LA GÉOMORPHOLOGIE QUANTITATIVE.....	358
8.3.1. Les apports de l'analyse géomorphologique 3D dans la compréhension de la mise en place et de l'évolution du dépôt d'écroulement	358
<i>8.3.1.1. Les apports de l'approche géomorphologique 3D dans la compréhension de la structure géométrique du dépôt d'écroulement.....</i>	<i>358</i>
<i>8.3.1.2. Le dépôt d'écroulement, une topographie stable dans le temps ?</i>	<i>360</i>
8.3.2. Reconstruction 3D des surfaces géomorphologiques pré-écroulement. Les apports de la modélisation 3D	360
8.3.2.1. Hypothèses topographiques des sols et de voûtes du paléo-porche d'entrée de la grotte Chauvet.....	361
<i>8.3.2.1.2. Reconstruction topographique des voûtes du porche d'entrée ante écroulement</i>	<i>361</i>
<i>8.3.2.1.2. Reconstruction topographique du sol du porche d'entrée de la grotte Chauvet</i>	<i>363</i>
8.3.2.2. Modélisation 3D du paléo porche d'entrée de la grotte Chauvet : représentation 3D et géomorphologie quantitative.....	365
8.3.2.3. Calcul du volume de roche obstruant l'entrée naturelle : les apports du modèle 3D à la connaissance de la dynamique de fermeture	366
8.3.3. Apports des simulations de chutes de blocs en 3D pour l'étude de la fermeture de la grotte Chauvet	368
<i>8.3.3.1. Les modèles de trajectographie</i>	<i>370</i>
<i>8.3.3.2. La méthode des éléments discrets</i>	<i>372</i>
CONCLUSIONS	374

CHAPITRE 9 - CHRONOLOGIE ET ÂGE DE FERMETURE DE LA GROTTTE CHAUVET : IMPLICATIONS ARCHÉOLOGIQUES. LES APPORTS DES ISOTOPES COSMOGÉNIQUES ET DE LA MODÉLISATION 3D	379
9.1. LE CADRE CHRONOLOGIQUE DES FRÉQUENTATIONS HUMAINES ET ANIMALES DANS LA GROTTTE CHAUVET : L'ENJEU DE LA DATATION DE LA FERMETURE DE L'ENTRÉE	382
9.2. CONCEPTS ET PRINCIPE DE DÉTERMINATION DES ÂGES D'EXPOSITION DES ROCHES .	385
9.2.1. Le rayonnement cosmique	386
<i>9.2.1.1. Le rayonnement primaire et secondaire</i>	<i>386</i>
<i>9.2.1.2. La réaction nucléaire issue du rayonnement cosmique dans l'atmosphère</i>	<i>386</i>
9.2.2. La production in situ du ³⁶Cl.....	388
<i>9.2.2.1. La production des nucléides cosmogéniques par spallation</i>	<i>388</i>
<i>9.2.2.2. La production muonique de nucléides cosmogéniques</i>	<i>389</i>
<i>9.2.2.3. La production des nucléides cosmogéniques par des neutrons thermiques et épithermiques.....</i>	<i>390</i>
<i>9.2.2.4. La production des nucléides cosmogéniques par désintégration de ²³⁵U.....</i>	<i>390</i>
9.2.3. Le taux de production du ³⁶Cl : définition et ajustement spatial et temporel	390
<i>9.2.3.1. Les effets du géomagnétisme terrestre</i>	<i>391</i>
<i>9.2.3.2. Le taux de production à la position de référence SLHL</i>	<i>392</i>
<i>9.2.3.3. Les effets topographiques multi échelles sur le taux de production du ³⁶Cl</i>	<i>393</i>
<i>9.2.3.4. Les effets de l'érosion sur la production de ³⁶Cl.....</i>	<i>393</i>
9.3. LA DATATION DE L'ESCARPEMENT CALCAIRE DE LA GROTTTE CHAUVET : STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE ET PROCÉDURE D'EXTRACTION CHIMIQUE.....	395
9.3.1. L'échantillonnage sur la paroi calcaire	395
<i>9.3.1.1. Stratégie d'échantillonnage</i>	<i>395</i>
<i>9.3.1.2. Échantillonnage complémentaire pour contraindre le taux de production.....</i>	<i>396</i>
9.3.2. L'extraction chimique du ³⁶Cl d'un échantillon calcaire	399
9.3.3. Détermination du coefficient d'écrantage topographique et du facteur d'échelle dans le calcul du taux de production.....	401
9.3.4. La détermination de l'héritage en ³⁶Cl et de l'érosion	402
<i>9.3.4.1. La détermination de l'héritage.....</i>	<i>402</i>
<i>9.3.4.2. Le calcul de l'érosion</i>	<i>403</i>
9.4. LA DATATION DE LA FERMETURE DE LA GROTTTE CHAUVET : L'APPORT DES NUCLÉIDES COSMOGÉNIQUES	403
9.4.1. Taux de production, coefficient d'écrantage et concentration héritée.....	403
9.4.2. Calcul des âges d'exposition	404

9.4.3. Scénario de fermeture de la grotte Chauvet et implications sur les fréquentations humaines et animales	405
9.4.3.1. La chronologie de la fermeture de la grotte	405
9.4.3.1.1. <i>Implications pour la connaissance du processus d'écroulement.....</i>	<i>405</i>
9.4.3.1.2. <i>Implications archéologiques.....</i>	<i>408</i>
9.4.3.2. Reconstitution de la fermeture du porche d'entrée.....	408
CONCLUSIONS.....	412
CONCLUSIONS DE LA PARTIE III	413
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	415
BIBLIOGRAPHIE.....	425
ANNEXES	441
TABLE DES MATIÈRES.....	455
TABLE DES FIGURES.....	467
TABLE DES TABLEAUX.....	481

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 - Schéma des paramètres et des facteurs interagissant dans le processus de karstification et de l'évolution du système karstique (in, Nehme, 2013, modifié d'après Mangin A., 1975).	25
Figure 1.2 - Exemple de l'intérêt des modèles 3D dans la compréhension de la karstification. La figure illustre le rôle de cet outil dans l'identification de l'influence du contexte géologique dans l'établissement de la géométrie des structures karstiques à l'échelle du système. (exemple du Siebenhengste Cave System, in Filipponi, 2009)	30
Figure 2.1 - Illustration des différents supports de représentation et de visualisation d'un objet d'étude.	42
Figure 2.2 - Pierre Chevalier (à gauche) présente la maquette du réseau souterrain de la Dent de Crolles. Séance de travail dans la cour de la maison Delarue (Archives de l'École Française de Spéléologie) St-Pierre-de-Chartreuse (Isère) – 1952.	43
Figure 2.3 - Représentation 3D d'un système karstique via le logiciel de topographie spéléologique Toporobot. Exemple du système du Siebenhengste (in Filipponi, 2009) qui représente 159 km de conduits souterrains.	45
Figure 2.4 - Discrétisation spéléologique à maille métrique à décimétrique et visualisation 3D sur des gammes de logiciels dédiés à la spéléologie (ici Visual Topo). Procédure topographique classique en milieu souterrain. L'opération consiste à transformer l'axe du conduit en squelette 3D. Les informations de largeur et de hauteur assimilent de fait les sections des drains du karst à une suite de rectangles. La maille de cette opération de discrétisation oscille généralement entre 1 et 20 m ce qui est satisfaisant pour un travail à petite échelle (in Jaillet et al. 2011).	47
Figure 2.5 - Densité de fréquence des longueurs de visées entre chaque station topographique. Ce graphique synthétise l'ensemble des données spéléométriques disponibles sur le secteur du système de Foussoubie (Goule et évent). Noter les biais à 10 et 20 m du sans doute à l'usage fréquent d'un décimètre et d'un double décimètre, déroulé entièrement.	49
Figure 2.6 - Densité de fréquence des longueurs de visées entre chaque station topographique. Ce graphique synthétise l'ensemble des données spéléométriques disponibles sur le secteur de la grotte Chauvet.	49
Figure 2.7 - Visualisation 3D de réseaux karstiques. Cinq réseaux spéléologiques différents sont représentés. Ce mode de visualisation permet de mettre en relation simultanément différents objets karstiques dans un même environnement géographique.	51
Figure 2.8 - Organigramme de la méthodologie utilisée pour la construction du modèle géologique 3D.	54
Figure 2.9 - Comparaison de profils topographiques réalisés par différents maillages interpolés à partir des 3 MNT. Un effet de lissage existe sur le maillage B à proximité de rupture de pente. Les zones à la topographie peu accidentée sont moins affectées par cet effet de lissage.	55
Figure 2.10 - Distribution des écarts entre le profil de référence A (MNT A) et les profils B (MNT B) et C (MNT B+C). La distribution normale de ces écarts tend à se resserrer (histogramme B à droite) après l'intégration de points de contrainte issus de la digitalisation des courbes de niveaux à partir de la carte topographique géo-référencée.	55
Figure 2.11 - Mise en correspondance des informations géologiques (à gauche) et topographique (à droite). La bonne continuité entre les traits de parois ou les infrastructures routières sont de bons indices pour évaluer la qualité du géoréférencement d'une couche par rapport à une autre.	57
Figure 2.12 - Extrait de la carte géologique de Bourg-Saint-Andéol représenté en 2,5D. C'est la projection des polygones 2D des affleurements des terrains géologiques sur cette représentation qui permet de récupérer l'altimétrie de chaque sommet.	58
Figure 2.13 - Procédure d'intégration des coupes géologiques dans un modèleur 3D pour la constitution du modèle 3D complet du massif karstique.	59
Figure 2.14 - Schéma illustrant les résultats de l'interpolation d'un nuage de points (en rouge) en utilisant le krigeage (surface bleue) et la triangulation de Delaunay (surface jaune). La géométrie de la surface obtenue par krigeage s'apparente à la déformation d'une grille sur des points de contrôle. Les sommets de cette grille ne correspondent pas aux points du nuage et la modélisation de la surface s'étend au delà du périmètre du nuage de points. La géométrie de la surface obtenue par triangulation et plus anguleuse et correspond strictement à la géométrie du nuage de points. Les sommets des triangles composant le maillage peuvent (mais pas systématiquement) correspondre aux points du nuage.	60
Figure 2.15 - Modélisation par krigeage du toit de la surface géologique N4bU (Barrémien supérieur). Les isohypse sont exprimé en mètre.	61

Figure 2.16 - Vue 3D synthétique du système de Foussoubie dans son contexte topographique, géologique et géomorphologique. L'analyse morphologique 3D permet d'identifier le rôle des contacts géologiques sur l'organisation des conduits.	62
Figure 2.17 - Vue 3D de la grotte Chauvet et des grottes environnantes dans son compartiment géologique.	62
Figure 2.18 - Mise en œuvre des relevés lasergrammétrique sur le terrain. L'utilisation d'un Lidar longue portée ILRIS Optech est privilégiée dans un contexte où les objets à relever sont distants de plus 40 m ou dont la géométrie ne permet pas un accès direct. C'est le cas de l'escarpement calcaire surplombant la grotte Chauvet (photo du haut) ou du cône d'éboulis d'Ornac scannée ici depuis le haut du puits de l'entrée naturelle de l'aven d'Ornac (photo du bas) (clichés Benjamin Sadier, Stéphane Jaillet)	64
Figure 2.19 a et b - Mise en œuvre des relevés lasergrammétrique sur le terrain. L'utilisation ici d'un lidar courte portée à décalage de phase (ici Leica HDS 6000) est privilégié pour la mesure des drains et des formes de l'endokarst. En effet son fonctionnement en dôme à 360 degré facilite le relevé d'une section complète d'une galerie (clichés : Stéphane Jaillet)	66
Figure 2.20 - Schéma illustrant l'effet de masque produit par le blocage du faisceau laser par différents objets dans la scène de scan. Cet effet nécessite la multiplication des stations de mesures.	67
Figure 2.21 - Extrait du processus de consolidation des nuages de points. Chaque couleur représente un nuage de points différents. Celui qui apparaît en bleu représente la scène globale sur laquelle nous avons recalé l'ensemble des points de vue... ..	69
Figure 2.22 - Levés lasergrammétriques sur le terrain. On identifie le dispositif méthodologique employé pour effectuer une consolidation en utilisant des points d'appariement commun entre chaque station de scan. Les sphères constituent les points d'appuis. La station topographique (à droite) est utilisée pour l'orientation au nord. L'horizontal du plan XY peut être assigné soit au moyen d'un levé topographique par polygonation des points d'appuis, soit en utilisant la fonction de compensation horizontale du scanner (à gauche), si celle-ci est disponible. Les sphères (ici blanches) sont présentes dans la scène de scan. (Cliché Stéphane Jaillet).	69
Figure 2.23 - Illustration du filtrage de la végétation d'un nuage de point brut. Ce travail est indispensable à la constitution d'un maillage triangulé correct ici du sol au pied de la paroi.....	72
Figure 2.24 - Illustration du résultat du maillage utilisant l'algorithme de maillage de la triangulation de Delaunay 2D. La triangulation se réalise selon un axe de projection, généralement le z, et cette méthode s'avère totalement inadaptée pour restituer la géométrie d'objets fermés comme une grotte par exemple.	74
Figure 2.25 - Etapes de la construction de maillage dans le logiciel 3DReshaper en partant de nuages de points d'objets 3D (ici une section de cavité). On part du nuage de point pour construire un maillage grossier mais correct. Celui-ci est raffiné en reprenant le nuage de point. Le processus est réalisé par étape et contrôlé visuellement par l'opérateur.	75
Figure 2.26 - Amélioration du maillage par suppression des faces « non-manifold » (1), croisées (2), redondantes (3), allongées (4) et instables ou inversées (5) (in, Jaillet et al., 2011)	76
Figure 2.27 - Schéma du protocole expérimental de mesure mis en œuvre au laboratoire EDYTEM. Les sphères de référencement sont disposées de façon à ne pas créer d'ambiguïté pour l'algorithme de calcul des solutions topographiques. La stalagmite est d'abord mesurée depuis toutes les positions à l'état brut puis scannée une seconde fois après application d'une peinture opacifiante.	78
Figure 2.28 - Le profil en coupe et en plan fait apparaître que la déformation topographique n'est pas uniforme sur l'ensemble de la stalagmite. Cependant la comparaison des mesures de diamètre sur le modèle de calcite (en rouge) par rapport aux diamètres mesurés sur le modèle de référence peint (en bleu) montre que les proportions morphologiques perpendiculaires à l'axe du scanner sont conservées.	79
Figure 2.29 - Relation linéaire existant entre les mesures de diamètre effectuées à la fois sur le modèle 3D scanné sur calcite et sur le modèle 3D de référence scanné sur la stalagmite opaque. Le coefficient de corrélation linéaire passant par l'ensemble du semis de points est de 0,94 montrant que la géométrie générale du nuage est bien conservée.	79
Figure 2.30 - Comparaison de quatre sections horizontales de la partie sommitale de la stalagmite (vue en plan). L'écart de tous les profils par rapport au modèle de référence est d'environ de 3 cm. Il est constant quelque soit la distance d'acquisition du nuage.	80
Figure 2.31 - A gauche, photo prise en lumière ambiante (couleurs naturelles de la concrétion). Au centre, comparaison de deux profils topographiques : en rouge, celui correspondant à un relevé lasergrammétrique sur la calcite, en bleu un relevé lasergrammétrique sur le même objet mais recouvert d'une pellicule de peinture opacifiante et constituant la référence. A droite, une photographie prise dans le noir avec une source de lumière provenant de l'arrière la diffusion de lumière dans la stalagmite. L'opacité de la calcite mesurée joue un rôle important dans l'erreur de mesure. On identifie ici 3 seuils géométriques entre l'écartement du profil topographique mesuré (en rouge) par rapport au profil de référence (en bleu). Ces seuils semblent corrélés à l'opacité de la calcite plus qu'à sa couleur.	81

Figure 3.1 - <i>Projet d'architecte de l'Espace de restitution qui comprendra cinq bâtiments éclatés sur 8 hectares. © illustration agence Fabre et Speller - Atelier 3A.</i>	87
Figure 3.2. - <i>Le morphing numérique est un procédé permettant de déformer la structuration de la grotte et de réagencer les différentes salles tout en conservant la composition initiale. A noter qu'il était prévu de doubler la galerie des mégacéros et des lions pour permettre aux visiteurs de s'y attarder (Conseil général de l'Ardèche, 2001 a, p. 6; in Malgat et al., 2012).</i>	90
Figure 3.3 - <i>Procédé de restitution de la copie via l'identification et le réagencement de 82 écailles préalablement sélectionnées (d'après SMERGC, 2011a, p. 32). Les portions de la grotte, appelées « écailles » et sélectionnées pour être reproduites à l'échelle 1, sont réagencées dans la copie, tout en conservant l'ordre cohérent de succession des panneaux. On peut relever la morphologie très repliée du cheminement dans l'espace de l'ERGC par rapport au cheminement à l'intérieur de la cavité SMERGC/geom. Perazio©.</i>	94
Figure 3.5 - <i>Vue du modèle 3D de l'anamorphose en direction de la Salle du Crane (Station 8 de l'anamorphose). Chaque écaille correspond à une couleur différente et les surfaces de raccordement (coutures) apparaissent en gris foncé. Dans cette salle, la surface de couture est de faible importance du fait de la structure géomorphologique de ce secteur de la grotte (régularité géométrique des sols et des voûtes).</i>	95
Figure 3.4 - <i>Schématisation du processus de réorganisation et de découpage des écailles après leur translation et leur rotation dans l'espace anamorphosé. Le processus d'anamorphose commence par la sélection des écailles dans la grotte (A), suivie par une étape de déplacement et de rotation (B) de chacun des éléments visant à compacter l'espace originel. La dernière étape (C) consiste à découper les écailles afin d'éviter leurs chevauchements tout en créant une surface de raccord (en gris sur le schéma). Ce raccord a été baptisé les surfaces de couture ou « couture ».</i>	95
Figure 3.6 - <i>Capture d'écran du modèle 3D de l'enveloppe topographique de l'espace de restitution de la grotte Chauvet. On distingue les murs du bâtiment qui englobe ce projet architectural.</i>	96
Figure 3.7 - <i>Vue en plan du modèle 3D de l'anamorphose sur lequel la carte géomorphologique a été projetée.</i>	98
Figure 3.8 - <i>Extrait du modèle 3D de l'ERGC. Vue de la station 3 vers le panneau du pendant des points (objet 3.06). On distingue sur cette vue 4 écailles différentes raccordées par une surface de couture modélisée en 3D. La résolution du maillage (triangle de 3cm de coté) permet de distinguer des objets du paysage souterrain (soutirage, concrétion, etc.)</i>	99
Figure 3.9 - <i>Extrait du modèle 3D de L'ERGC. Vue de la station 3, avec et sans la passerelle qu'emprunteront les visiteurs, vers le panneau du pendant aux points. Chaque couleur représente un faciès différents. Des figurés ponctuels ont été représenté en présence de microformes particulières (impacts de gouttes sur l'argile) ou pour spécifier la présence d'écoulements permanents (goutte à goutte sur les spéléothèmes ou ruissellement) afin de prévoir les moyens techniques pour leur réalisation.</i>	100
Figure 3.10 - <i>Extrait du modèle 3D de L'ERGC (in Delannoy et al., 2013). Vue de la station 3, avec et sans la passerelle qu'emprunteront les visiteurs, vers le panneau du pendant aux points. Chaque portion du modèle segmentée par faciès est texturée d'un code couleur afin de faciliter sa lecture. Les panneaux ornés sont texturés avec des photographies afin d'augmenter le réalisme.</i>	100
Figure 3.11 - <i>Le travail consiste à mesurer sur le terrain la couleur avec un spectrophotomètre (entre 10 et 15 mesures) et à relever la valeur avec un code Munsell (Soil color charts). Ci-dessus, mesure sur calcite claire, dans la salle Hillaire - cliché Stéphane Jaillet).</i>	101
Figure 3.12 - <i>Echelle de valeur colorimétrique relevée par spectro-photomètre (code LAB) et avec le code Munsell. Les valeurs $L^*a^*b^*$, avec L^* la clarté, qui va de 0 (noir) à 100 (blanc) ; a^* la gamme de l'axe rouge (valeur positive) à vert (négative) en passant par le gris (0) et b^* la gamme de l'axe jaune (valeur positive) à bleu (négative) en passant par le gris (0). Le code Munsell, est composé de Munsell C (Hue, Value et Chroma).</i>	102
Figure 3.13 - <i>Comparaison des valeurs colorimétriques obtenues à chaque point d'un secteur par lecture du code Munsell (valeurs inscrite sous la photographie) et par mesure au spectrophotomètre (valeur du tableau). On voit après conversion des valeurs LAB et valeurs HVC que celles-ci convergent vers les mêmes résultats (extrait rapport Delannoy et al., 2011).</i>	102
Figure 3.14 - <i>Fiche restituant les informations colorimétriques pour chaque écaille. Chaque dominante chromatique a été délimitée sur l'écaille 3D de l'anamorphose. Son emprise a été redessiné sur la carte géomorphologique (en haut à gauche) Les points de mesure indique la où le spectrophotomètre et/ou le code Munsell a été apposé.</i>	103
Figure 4.1 - <i>Localisation des cavités décrites sur une représentation du relief du Bas Vivarais calcaire. Les courbes de niveaux ont une équidistance de 50 mètres. Les ronds blancs représentent des lieux dits, les étoiles jaunes localisent les entrées des cavités les plus importantes de ce secteur et dont certaines sont décrites et étudiées dans ce travail.</i>	114
Figure 4.2 - <i>Vue de méandre fossile de la Combe d'Arc (1) et du cirque de la Madeleine (2) dans les gorges de l'Ardèche (clichés : Stéphane Jaillet)</i>	115

- Figure 4.3** - Extrait de la carte géologique au 1/250000 (Rouire et al., 1980) et au 1/50000 (Pascal et al., 1989). L'ensemble des traits (noir et pointillé) représente les profils géologiques à partir desquels ont été modélisées les surfaces géologiques 3D. Les profils en pointillés correspondent aux profils géologiques présentés en figure 4.4 116
- Figure 4.4.** - des profils en figure 4.3) 118
- Figure 4.5** - Etagement des cavités dans les gorges de l'Ardèche. Le trait noir représente le profil topographique projeté du talweg de l'Ardèche avec une pente moyenne de 0,1%. Il apparaît que les cavités s'organisent sur le niveau de l'Ardèche stabilisé. 121
- Figure 4.6** - Localisation des surfaces d'aplanissement du Bas Vivarais calcaire. La surface d'aplanissement à 400 m NGF est reportée en rouge, celle située à la cote 250 m NGF est reportée en jaune. Les étoiles matérialisent la position des entrées des cavités les plus importantes. Les lignes en tiret jaune trace les voûtes synclinales et les lignes en croix tracent les voûtes anticlinales. 123
- Figure 4.7** - Le Saleyron et les gorges de l'Ardèche au droit du Pas de Mousse. Vue vers le sud-ouest depuis la route touristique des gorges. On voit la structure anticlinale des assises calcaires (pendage en rouge) compliquée par le jeu tectonique des failles des terminaisons septentrionales du fossé d'Alès (en jaune). Les surfaces de 400 et de 260 m sont identifiées. Les flèches bleues matérialisent l'hypothèse d'un paléo-écoulement de l'Ardèche qui contournait le Saleyron (cliché : Stéphane Jaillet ; in Jaillet et al. 2004). 124
- Figure 4.8** - Relevés géomorphologiques dans le secteur du Tiourre et du ruisseau de Pisse vieille 127
- Figure 4.9** - Photo illustrant le caractère déconnecté du vallon de Combe Longue par rapport au méandre de la Combe d'Arc. Le surcreusement entre 180 et 170 mètres est attribué à l'érosion consécutive à l'abaissement du niveau de base. Ce surcreusement est lui même entaillé d'un canyon témoignant des remises en eaux temporaires de ce vallon lors d'épisodes pluvieux exceptionnels. 128
- Figure 4.10** - Profil en long du cours d'eau non pérenne de la Planche (à l'aplomb du réseau de Foussoubie) en rive droite de l'Ardèche. La reconstruction du profil théorique d'équilibre de ce vallon permet d'identifier des paléo altitudes de niveau de base stable de l'Ardèche (d'après Gombert 1988, modifié). 129
- Figure 4.11** - Corrélation des modèles géodynamiques des gorges de l'Ardèche (Gombert, 1988) et de la vallée du Rhône (Clauzon, 1982) avec le modèle spéléogénique issu de l'étude géomorphologique de la grotte Chauvet (Delannoy et al. 2004). 137
- Figure 4.12** - Différence de fonctionnement d'un puits vadose (puits méandre) et d'un puits-cheminée (in Mocochain et al., 2006). 138
- Figure 4.13** - Corrélation du modèle d'évolution spéléogénique de Mocochain (2009) avec les modèles existant et le modèle géodynamique du Rhône (Clauzon, 1982, 1996. Les différents niveaux de stabilité du niveau de base dans le modèle Mocochain ont été définis à partir des altitudes des réseaux de Saint Marcel d'Ardèche (SMA) I et II, réseau de la grande boucle (GB) et le réseau supérieur (SMA supérieur) 139
- Figure 4.14** - Courbe d'évolution du niveau de base (modèle Mocochain en tiret noir) calibré par les datations d'enfouissement des sédiments échantillonnés dans chacun des étages karstiques. Les points rouges correspondent aux datations d'enfouissement assorties de leur barre d'erreur. Les colonnes grises et blanches correspondent aux périodes paléo-magnétiques normales et inverses. L'intersection des périodes paléo-magnétiques de chaque échantillon avec la barre d'erreur de son âge donne la possibilité de plusieurs périodes restreintes pour chaque échantillon. Par exemple l'échantillon de l'aven du Cadet a 4 périodes chronologiques possibles. L'image de droite correspond à la courbe d'évolution calibrée (en trait plein noir) et les âges retenus pour chaque échantillon (d'après Tassy et al. 2013). 141
- Figure 4.15** - Topographie et localisation des réseaux karstiques qui ont fait l'objet de recherches géomorphologiques 3D dans ce mémoire de recherche. 147
- Figure 5.1** - En amont du Carrefour du 14 juin, dans la Goule de Foussoubie, la galerie SCUCL est un tube d'environ 4 m de diamètre, incisé en trou de serrure. L'incision va grandissante à mesure que l'on progresse vers l'aval et le conduit atteint une hauteur de près de 8 m pour une largeur de 3 à 5 m environ. Toute cette zone est marquée par une dynamique d'incision et d'érosion régressive caractérisée par des morphologies de marmitage et d'abrasion des parois. (Photo S. Jaillet.) 153
- Figure 5.2** - Nappe de galets dans une galerie de la goule de Foussoubie (photographie : S. Jaillet) 154
- Figure 5.3** - Panel de morphologies paragénétiques présentes sur le terrain. Pendant de voûtes spectaculaires (A et C) et formes d'érosion à la topographie « molle » (D). Notez l'étagement des banquettes limites de remplissages (B). (Clichés A et C : S. Caillaud, cliché B : S. Jaillet, cliché D : J.M. Geneste) 157

Figure 5.4 - Représentation schématique en plan et en coupe du processus paragénétique et des hypothèses de l'évacuation des sédiments accumulés pendant le processus de creusement de la grotte. C'est la combinaison de l'aggradation et de l'évacuation qui génère les grands volumes karstiques aujourd'hui pénétrable (in Jaillot et al., 2007).	159
Figure 5.5 - Représentation schématique en coupe de l'organisation morphologique des cavités investiguées. Les galeries paragénétiques avec banquettes limites sont représentées en jaune, les galeries aux morphologies paragénétiques sont représentées en vert, les galeries présentant des morphologies syngénétiques sont représentées en bleu.	161
Figure 5.6 - Démantèlement des remplissages argileux par soutirage dans la grotte de Cayre cret (A, cliché S. Jaillot), l'aven d'Orgnac (B, cliché : S. Jaillot), et à l'aven double (C, cliché : M. Morvand)	162
Figure 5.7 - Sol plan dans la grotte de Cayre-crêt. La discordance angulaire entre la géométrie du sol et des banquettes limites de remplissages montre leur caractère diachrone, l'un scellant l'autre.	163
Figure 5.8 - Représentation schématique du fonctionnement hydrodynamique d'un drain karstique en milieu noyé. Dans un tube la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un conduit. Sur ce schéma le profil de vitesses ne tient pas compte des boucles de convection. Ce schéma de fonctionnement est construit à partir des hypothèses de Kempe (1975) basé la mécanique des fluides et d'observations en plongée (Jaillot et Lignier, 2010) dans la zone noyée du karst.	167
Figure 5.9 - Représentation simplifiée en plan et en coupe de la dynamique d'écoulement dans un drain karstique en contexte noyé.	167
Figure 5.10 - Le contrôle géométrique de ce modèle TIN (triangulated irregular network), pour vérifier sa conformité vis-à-vis du terrain, a été réalisé en calculant (1) l'écart type du nuage de point par rapport au modèle triangulé et (2) au moyen de profils topographiques si les triangles se situaient bien au milieu du nuage de points. Sur la carte des écarts du nuage de points, autant de points du nuage se situent de part et d'autre le plan du maillage. Le nuage de points est entaché d'un bruit gaussien.	169
Figure 5.11 - Localisation de la zone étudiée dans les Salles Rouges de l'aven d'Orgnac.	169
Figure 5.12 - Banquettes limites dans la grotte de Rochas-Midroï (photo : Cazou).	170
Figure 5.13 - Ajustement de plan sur le modèle 3D à l'aven d'Orgnac.	171
Figure 5.14 - Ajustement de plans et de cylindres à partir des banquettes limites de rive droite et de rive gauche dans les Salles Rouges de l'Aven d'Orgnac.	173
Figure 5.15 - Étagement de trois surfaces sédimentaires aggradantes reconstituées ici en 3D.	173
Figure 5.16 - Mesures de pentes (pendage du plan cf figure 5.13) de talus et de banquettes. La corrélation de ces valeurs révèlent un lien entre le profil des banquettes actuellement observables et les paléo dimensions des talus sédimentaires dont les pentes plongaient vers le centre de la galerie.	174
Figure 5.17 - Méthodologie de mesure des zones d'accumulation sédimentaires par mesure directe sur le modèle 3D (ici une paroi des Salles Rouges de l'Aven d'Orgnac).	174
Figure 5.18 - Corrélation entre l'élargissement du drain et la pente des banquettes limites de remplissages pour chacun des trois étages de banquettes identifiées.	175
Figure 5.19 - Reconstitution d'une séquence de dépôts à partir de la géométrie des formes pariétales de banquettes limites. On constate que la morphologie des sols actuels n'est pas conforme à la géométrie originelle ce qui interroge sur les processus d'évacuation des sédiments.	176
Figure 5.20 - Schéma illustrant la mise en place du drain endokarstique de l'aven d'Orgnac par aggradation progressive de la séquence sédimentaire synchrone d'une corrosion à la voûte.	177
Figure 5.21 - Schéma illustrant l'anisotropie spatiale des vitesses d'écoulements dans un drain de la zone noyé du karst. ..	177
Figure 5.22 - Ajustement 3D de banquettes limites sur le drain de Midroï. Noter la succession aggradante des banquettes et l'augmentation de la pente au cours de l'évolution ascendante. Noter en outre la déconnexion, en fin d'évolution du conduit principal, de la dernière surface de remplissage présente uniquement dans les deux autres branches du carrefour.	179
Figure 5.23 - Cartographie des bassins versants actuels du système karstique de la goule de Foussoubie et de l'aven d'Orgnac et de la grotte de la Dragonnière.	180
Figure 5.24 - Relation entre les débits d'écoulements dans les drains noyés du karst et la surface du bassin versant (d'après Lauritzen, 1989). Les valeurs en rouge sont représentées d'après les valeurs annoncées dans Lauritzen (1989). Le point vert représente les valeurs estimées dans ce travail.	182

- Figure 5.25** - Exemple d'évolution de galerie à pendants de voûte dans un contexte en régime noyé durant un temps long (Delannoy et al, 2004) ou dans un contexte épinoyé (Palmer, 2007 (modifié)) au rythme des mises en charges de la galeries ... 183
- Figure 5.26** - Carte des reliefs en ombrage de gris des plafonds de la grotte Chauvet, profils topographiques et vue 3D (figure 5.27) d'une portion de plafond dans la salle Hillaire. Notez la part importante des morphologies liées à des effondrements (plan) dans la salle des Bauges (figure 5.28) et la salle Brunel. 185
- Figure 5.27** - Vue 3D d'une portion de la voûte dans la salle Hillaire. On note le quadrillage des chenaux qui séparent chaque pendent de voûte. Ce point de vue est impossible dans la grotte car la distance entre le sol et la voûte ne permet pas de prendre le recul nécessaire à l'observation d'un ensemble de formes. 186
- Figure 5.28** - Plafond dans la salle des Bauges. A l'arrière plan (derrière le personnage), notez les morphologies de dissolution, synchrone au creusement de la grotte. Au premier plan, notez les plafonds plans, associés à la chute de certains bancs calcaire, dont les parties effondrées émergent du sol. Cliché S. Caillault. 187
- Figure 5.29** - Evolution des galeries depuis leur mise en place par creusement syngénétique vers un creusement paragénétique. 188
- Figure 5.30** - Les stalagmites translattées de la salle I d'Ornac II présentent un coude caractéristique durant leur croissance. C'est la mobilité du sol (ici en relation avec l'activité d'un soutirage karstique) qui explique la translation de l'objet alors que l'alimentation provenant du plafond reste fixe. Photo S. Jaillet. 191
- Figure 5.31** : Typologie des stalagmites identifiées dans la salle I et relation avec l'activité du soutirage endokarstique (in Hajri et al., 2009). 192
- Figure 5.32** - Identification des différentes phases de croissance d'une stalagmite sur section polie. Les niveaux argileux intercalés entre deux phases de croissance stalagmitique sont interprétés comme des niveaux de mise en charge des réseaux précédant chaque phase de soutirage. 193
- Figure 5.33** - Image de gauche : vue idéale d'une stalagmite translattée et des différentes mesures extraites automatiquement du traitement informatique réalisé (coordonnées X, Y, Z) du centre de l'ellipse de base, diamètres a et b de cette ellipse, azimut de l'axe a, hauteur E de la stalagmite, déplacement D entre base et sommet, azimut de ce déplacement, distance géodésique. Analyse de la croissance sur une des stalagmites extraites du modèle 3D. Image de droite : La stalagmite (ou plutôt son clone numérique) est tronçonnée selon un plan horizontal mobile. Les sections extraites permettent d'analyser la variation spatiale des centroïdes des ellipses successives. On identifie ici (en coupe développée et en plan) deux phases de translation marquée par les flèches orange. Elles témoignent de la mobilité du support de la stalagmite au cours du temps, le point d'alimentation restant fixe. 194
- Figure 5.34** - Résultats cartographiques des traitements réalisés sous système d'information géographique. à gauche, les orientations des déplacements des concrétions (de la base vers le sommet) sont comparées avec l'orientation du sol, selon huit classes directionnelles. Sur cette même carte, l'orientation de l'axe A de l'ellipse de base est représentée à titre indicatif. à droite, l'importance du déplacement, cette fois du sommet vers la base (le symbole est proportionnel à ce déplacement et correctement orienté) est comparé avec la carte des pentes (5 classes exprimées en degrés) (in Hajri et al., 2009) 195
- Figure 5.35** - Localisation des grands points de soutirage (pastille rouge) dans le réseau spéléologique de l'aven d'Ornac-Issirac. Noter que la plupart d'entre eux est à l'Est du réseau et se matérialisent par de vastes entonnoirs pouvant atteindre plusieurs décamètres en diamètre et une dizaine de mètres de profondeur. 197
- Figure 5.36** - Topographie des sols et sections associées de la salle 2 des réseaux d'Ornac-Issirac. Les lignes rouges délimitent les points de soutirage. Les lignes jaunes marquent l'aire d'influence du processus de soutirage 200
- Figure 5.37** - Topographie des sols de la grotte Chauvet et sections associées. Les lignes rouges délimitent les points de soutirage. Les lignes jaunes marquent l'aire d'influence du processus de soutirage. Les flèches bleues indiquent des directions de ruissellements (ou de paléo-réssuyage). 201
- Figure 5.38** - Soutirage dans la salle Hillaire de la grotte Chauvet. En bas à gauche, on reconnaît une rupture de pente très abrupte qui limite l'entonnoir principal du soutirage. Sur la droite, on identifie des banquettes limoneuses dont l'organisation subcirculaire autour du point de soutirage révèle l'influence étendue du soutirage. Sur les parois notez les marques grisâtres qui témoignent de l'altération du calcaire au contact des remplissages lorsque la cavité était entièrement comblée de sédiments. Ces marques grisâtres correspondent à des racines d'altération (Delannoy et al, 2008 ; photographie : Lionel Guichard)..... 202
- Figure 5.39** - Soutirage dans la salle du Fond de la grotte Chauvet. Au premier plan, les sols argilo-limoneux ont une pente comprise en 5 et 20°. Des petits talus sont présents mais sont très fortement perturbés et remaniés par les nombreuses bauges à ours. Au dernier plan, on voit le point de soutirage et il est possible d'identifier la rupture de pente au delà de laquelle le talus est à plus de 50°. Au plafond, notez l'alignement des pendants de voûte qui révèlent l'influence de la fracturation. Notez également la correspondance entre point de soutirage et les points hauts de la voûte (photographie : Lionel Guichard). 203

Figure 5.40 - Processus de soutirage dans les galeries paragénétique qui ont évolué dans un contexte noyé. Les soutirages latéraux laissent un relief résiduel au centre de la galerie.	204
Figure 5.41 A - Genèse (ici à la grotte Chauvet) des talus tournés vers le point de soutirage et dont l'organisation est subcirculaire. Une limite caractéristique de la dernière limite de remplissage est parfois préservée sur la paroi. Notez la persistance de quelques poches de sédiments entre les pendants de voûte.	205
Figure 5.41 B - Le ruissellement d'eau claire provoque un nivellement progressif des sols aboutissant à une topographie relativement plane (ici à la grotte Chauvet). Quelques banquettes sédimentaires subsistent sur la périphérie des salles. L'étude de la géométrie des corps sédimentaires sur une coupe mis au jour par un soutirage a permis d'en déduire ce processus d'aplanissement (Kervazo, 2003).	205
Figure 5.41 C - Nouvelle phase de soutirage tronquant les surfaces d'érosion et de dépôts précédemment mis en place par ravinement. Cette configuration est actuellement observée dans le soutirage de la salle Hillaire, à la grotte Chauvet.	206
Figure 5.42 - localisation géographique du réseau spéléologique des Fées. Topographie Spéléo-Club Aubenas.	208
Figure 5.43 - Coupe projetée du réseau Pradier sous la surface topographique. Les points bleus matérialisent les exurgences karstique qui fonctionnent lors d'épisode de crues. On voit bien qu'une grande majorité du réseau épi-phréatique se développe à une cote altitudinale proche de l'Ibie alors que les siphons représentent le niveau piézométrique commandé par l'Ardèche. ...	210
Figure 5.44 - Vue en coupe d'une portion de galerie au niveau des regards sur la nappe phréatique à l'amont du réseau spéléologique des Fées.	210
Figure 5.45 - Localisation du réseau de la Goule de Foussoubie. A gauche, l'aplat orangé correspond à la surface évoluant à 220 m NGF, l'aplat rouge à la surface proximale de la dépression de la Goule de Foussoubie	212
Figure 5.46 - Coupe synthétique du système karstique de Foussoubie, depuis son bassin versant jusqu'à l'Ardèche (in Jaillet et al., 2012). Les chiffres renvoient au texte	213
Figure 5.47 - Dans la partie aval du système de Foussoubie, d'anciennes générations de concrétions sont identifiées. Elles sont très largement affectées par les crues qui ont recoupé les édifices à l'emporte-pièce. Des repousses, elles-mêmes en partie affectées, scellent ces différentes surface d'érosion et montrent la complexité des alternances croissance / érosion dans le système. Photo S. Jaillet.	215
Figure 5.48 - La coulée stalagmitique de la base des puits, peu en amont du Siphon 0, est un édifice concrétionné qui a subi des phases de croissance séparées par d'intenses périodes d'érosion. Photo S. Jaillet	215
Figure 5.49 - Coupe de la coulée stalagmitique basculée dans la galerie SCUCL (ici se dédoublant localement en deux conduits) et position des échantillons prélevés et datés. Noter les alternances de nappes de galets et de coulées stalagmitiques sur le coté de la galerie. Les dates sont données non corrigées. (in Jaillet et al. 2012).....	216
Figure 5.50 - Coupes transversale et longitudinale de la coulée stalagmitique de la base des puits dans son contexte actuel avec variations des niveaux d'eau. La position des échantillons prélevés est indiquée. Noter les surfaces d'érosion qui séparent les phases de croissance. Les dates sont données non corrigées. (in Jaillet et al. 2012)	216
Figure 5.60 (figure 5.51 ???). - Reconstitution des grandes étapes spéléogénique du réseau de la Goule de Foussoubie	218
Figure 5.52 - Localisation des cavités affectées par un creusement paragénétisme dans le secteur amont des gorges de l'Ardèche. Les cavités du tunnel, des huguenots et de Cayre-Cret s'ouvre au niveau de la route des gorges aux environs de 95/100 m NGF. Toutes les autres cavités appartiennent à un ensemble spéléologique qui se développe autour de la cote 180/200 m NGF.	220
Figure 5.53 - Vue en coupe de la grotte des Huguenots. Les sols sablo limoneux sont quasiment plans et peu remaniés par les soutirages. Des apports sédimentaires existent par des fissures latérales proches des sols lors d'épisodes de crues de l'Ardèche et il est possible d'observer de goulottes de ravinement. Des dépôts d'argiles brunes sont en place sur la vire supérieure qui donne accès à des petites galeries aux morphologies phréatiques. La dernière rangée de banquettes limites est ornée de petits coups de gouge. Au-dessus de cette rangée de banquettes d'autres types de formes issues d'un régime noyé prennent place jusqu'au sommet des cheminées observables.	221
Figure 5.54 - Schéma illustrant les étapes de mise en place des grottes de Cayre-Crêt et des Huguenots.	222
Figure 5.55 - Pendant de voûte dans les salles hautes de l'aven d'Orgnac à environ 250 m NGF (Photo : S. Jaillet).....	223
Figure 5.56 - Coupe synthétique du réseau des « grands puits » (in Jaillet et al., 2007). Noter l'adéquation topographique entre les talus argileux et les morphologies de plafond. Noter en outre la stratification des argiles en accord avec la surface finale des talus argileux.	224

Figure 5.57 - Profil longitudinal simplifié de l'aven d'Ornac sur lequel sont reportés les limites altitudinales de la zone noyée et de la zone épinoyée du karst durant la période de creusement paragénétique.	226
Figure 5.58 - Localisation de la grotte de l'aven double (en jaune) et du paléo-karst de St Remèze (en rouge). Cet ensemble de très vieilles cavités se développe à environ 350/360 m NFG et l'importance du développement linéaire suppose un paléo-niveau de base vers cette cote altitudinale (Martini, 2005).	226
Figure 5.59 - Chenal de voûte et banquettes limites de remplissages à l'aven double (Cliché : D. Cailhol et M. Morvand). ...	228
Figure 5.60 - Profil longitudinal de l'aven double avec estimation de l'épaisseur du remplissage.	229
Figure 5.61 - Tronçon de galerie dans la grotte du Déroc.	230
Figure 5.62 - Galerie principale de la grotte du Déroc (basse-vallée de l'Ibie). La galerie principale de la grotte du Déroc est un bel exemple de paléo-drain karstique. Les morphologies de paroi et surtout de plafond (coupoles, pendants...) attestent d'une genèse en milieu noyé de ce conduit : il est l'expression d'un ancien drain transmissif d'une paléo-zone noyée dont le toit se situait au niveau, voire légèrement au dessus de 180-200 m. Il est intéressant de relever que tant les formes de plafond et de paroi que la relative planéité du sol sont très proches de la physionomie de la grotte Chauvet.	231
Figure 5.63 - Salle d'entrée du Chasserou. Bien que les formes originelles soient tronquées après des effondrements gravitaires (visible à gauche et à l'arrière plan), des pendants de voûtes subsistent (premier plan à droite). Le sol de cette salle se situe à la cote 220 m NFG.	232
Figure 5.64 - Pendant de voûte –galerie des mains positives – Grotte Chauvet. Ce pendant constitue un témoin d'une ancienne phase de creusement noyé de la galerie principale de Chauvet. Il est intéressant de noter que celui-ci a été creusé dans un ancien édifice stalagmitique dont il ne reste aujourd'hui que cette pendeloque	232
Figure 5.65 - Témoins de l'agencement en régime noyé de la galerie principale des Deux Aven où la galerie principale est creusée pour l'essentiel dans les calcaires urgoniens. Les morphologies caractéristiques d'un creusement en régime noyé recoupent des édifices stalagmitiques de grandes dimensions. Le dépôt de ces édifices est antérieur au fonctionnement en régime noyé de cette galerie. L'ensemble de ces témoins atteste d'une karstification ancienne du compartiment géologique de Chauvet	233
Figure 5.66 - Terrasse de galets de la grotte du Chasserou (basse-vallée de l'Ibie). Cette terrasse se situe vers la cote de 170 m NFG. Elle contient de nombreux galets d'origine allochtone (matériel cristallin, granite...) et plus précisément cèvenole. Ce matériel présent dans la grotte témoigne d'un apport fluvial important (taille des galets) à l'intérieur du compartiment karstique de la grotte Chauvet (Ibie/Ardèche).	234
Figure 5.67 - Partie profonde de la grotte de Louoi. Le bed-rock a été découvert après le décaissage total de la pile sédimentaire dont le niveau sommitale est encore visible (trait rouge horizontal le long de la paroi). Le remplissage était de faible puissance dans ce secteur de la cavité. Notez la concrétion corrodée en pendant de paroi à droite.	235
Figure 5.68 - Grotte de Louoi dans laquelle on identifie une rigole de surcreusement (premier plan à gauche) qui peut être rattachée à un fonctionnement épinoyé (ou vadose). Les pendants de voûte marquent un creusement paragénétique d'inondation.	236
Figure 5.69 - Plan de la grotte du Déroc.	238
Figure 5.70 - Profil topographique habillé de la grotte du Déroc dans le secteur de l'entrée centrale. Les lignes en pointillés matérialisent un probable élargissement de la galerie sous le remplissage. Cette hypothèse est basée sur les morphologies connues au sud de la coupe et sur l'observation des parois le long des sondages archéologiques réalisés contre les parois. On peut d'ailleurs noter que la découverte de la salle de la géode s'est faite consécutivement au décaissage du sol suite à un fouille archéologique mettant ainsi au jour un pendant précédemment enchâssé dans le remplissage et donnant l'illusion d'une paroi. Des sondages complémentaires dans les petites galeries au nord tendent à confirmer un évasement des parois au niveau des sols.	239
Figure 5.71 - Lames et fentes de dessiccation observables sur certaines lames. Les séquences observées dans la galerie supérieure de la grotte du Déroc montrent que celle-ci était le siège de mises en charge temporaires mais suffisamment longues pour laisser le temps à l'argile de se décanter avec des périodes assez longues entre deux mises en charge. (Clichés Jean Yves Bigot)	240
Figure 5.72 - Localisation altitudinale des concrétions affectées par des morphologies de corrosion dans la grotte Chauvet.	241
Figure 5.73 - Evolution spéléogénique des réseaux spéléologiques situés à 180/200 m NFG. Exemple de la grotte Chauvet et de la grotte du Déroc.	242

Figure 5.74 - Hypothèses d'évolution spéléogénique du secteur d'étude en relation avec la structuration du réseau de drainage superficiel.....	245
Figure 6.1 - Représentation en 3D de cavités dans leur compartiment géologique. On voit sur ce modèle que le développement de la grotte Chauvet sur un plan horizontal (matérialisé en rouge) n'est pas en accord avec la géométrie générale des couches géologiques, mais se raccorde bien avec d'autres cavités de la rive gauche de l'Ibie.	252
Figure 6.2 - Etapes de l'analyse 3D des conduits souterrains (d'après Filiponi, 2007, modifié). L'étape 1 consiste à représenter dans un seul modèle la topographie des réseaux spéléologiques et la structure géologique. L'étape 2 est la segmentation des conduits qui seront analysés. Ce découpage est effectué en fonction de la nature de chaque conduit. L'étape 3 consiste à projeter sur le modèle 3D la géométrie des drains. Cette projection se fait selon la normale des faces de la couche géologique modélisée. L'étape 4 consiste à mesurer sur l'orientation et la pente de chaque segment, la distance entre le réseau spéléologique et la couche géologique de référence.	254
Figure 6.3 - Détail et méthode de discrétisation pour chaque segment de la cavité permettant d'apprécier les choix géométriques de cette opération. Chaque sous-segment correspond à ensemble de visées avec une orientation homogène.	255
Figure 6.4 - Report des topographies de cavité sur la carte géologique (à droite) et sur les isohypses d'une couche géologique de référence (à gauche), ici le toit de la vire V3 (vert foncé sur la carte géologique). L'équidistance de courbes de niveaux est de 20 mètres. La segmentation du réseau de la goule de Foussoubie est matérialisée par des couleurs sur la carte des isohypses. Chaque couleur représente un tronçon de galerie assez homogène. Chaque tronçon est analysé en fonction de la structure géologique.	256
Figure 6.5 - L'exemple A illustre une bonne corrélation entre les données de pente de la galerie et du pendage apparent du plan géologique mesuré sur le modèle 3D lorsque la galerie se développe parallèlement à la structure géologique. L'exemple B illustre la non corrélation des valeurs mesurées lorsque le drain ne se développe pas sur le même plan que la structure géologique.	258
Figure 6.6 - Corrélation des mesures de la pente des galeries et du pendage du plan géologique de référence pour chaque tronçon de galerie. Notez la séparation des données en de FOU-S2 en 2 nuages distincts. Les données en rouge sont rapportées à l'influence de la fracturation.	259
Figure 6.7 - Corrélation des mesures de la pente des galeries et du pendage du plan géologique de référence pour le tronçon de galerie Fou-S5. Les données se répartissent en deux nuages distincts. Le premier (bleu) dont les mesures de pente et de pendage se corrélaient bien. Le second montre que le conduit est relativement plan alors que le pendage du plan géologique est bien marqué (entre 4 et 6°).	260
Figure 6.8 - Vue en plan du réseau spéléologique sur un canevas structural simplifiée (d'après carte géologique Bourg Saint Andéol, Pascal et al., 1989). Les rosaces de directions sont générés d'après les données spéléométriques et des relevés géologiques de terrain (Guérin, 1973 ; Pascal et al., 1989).	261
Figure 6.9 - Mesures de distances entre les drains du karst et la couche géologique de référence.....	262
Figure 6.10 - Modèle 3D de la goule de Foussoubie (in Jaillet et al. 2011). Vue en perspective du réseau de la goule de Foussoubie dans son contexte topographique et géologique. Les réseaux spéléologiques (en jaune) se développent parallèlement à la couche géologique de référence (vert).	263
Figure 6.11 - Influence de l'horizon d'inception et du niveau de base lors du processus de karstification. La genèse des drains endokarstiques se situe à l'intersection entre le niveau de base et l'horizon d'inception. Toute réorganisation du drainage se traduit alors par un glissement de ces conduits de drainage le long de cet horizon d'inception.....	265
Figure 6.12 - Comparaison de la distribution altimétrique des conduits spéléologiques à dominante horizontale entre les deux rives de l'Ardèche. L'axe des ordonnées représente l'altitude NGF des conduits. L'axe des abscisses représente le développement des conduits en mètres. La couleur représente le type de creusement (syngénétique en vert, paragénétique en régime noyé (rouge) ou creusement épinoyé (jaune- paragénéisme d'inondation).	268
Figure 6.13 - Coupe topographique du réseau de Saint Marcel d'Ardèche. Fond topographique : AVEN, SCSM, SGF, SG Cuges et individuels. Topographie Sourde de l'écluse et grotte du Bateau : Philippe Brunet et Jean Pierre Baudu. Dessin : Marc Faverjon.....	270
Figure 6.14 - Localisation du réseau karstique de l'aven de la combe Rajeau et contexte structural de la moyenne vallée de l'Ardèche (in Audra et al. 2001).	272
Figure 6.15 - Extrait du modèle 3D de l'interfluve Ardèche / Ibie. Seules les cavités contenant des conduits verticaux de type puits cheminées ont été reportés. La surface topographique n'est pas affichée pour une meilleure lecture. Plusieurs points de vues sont proposés.	275

- Figure 6.16** - Coupe topographique habillée dans la grotte du Chasserou. La couleur rose correspond aux formations carbonatées. 276
- Figure 6.17** - Panorama de relief endokarstique de la grotte du Déroc (jaune sur le modèle 3D) et du Chasserou (jaune pâle sur le modèle 3D) remise dans le contexte de la topographie 3D (cliché S. Jaillet et J.Y. Bigot). 277
- Figure 6.18** - Cartographie des principaux objets géomorphologiques du modelé karstique. Le report des cavités est indiqué en fonction de la nature de la cavité. 280
- Figure 6.19** - Etapes de mise en place du réseau de drainage aérien et souterrain en rive droite de l'Ardèche dans le secteur de la Goule de Foussoubie. ZN = zone noyée / ZEN = zone épinoyée. 283
- Figure 6.20** - Bloc diagramme 3D synthétisant les emboitements géomorphologiques en rive gauche de l'Ardèche. Les surfaces d'aplanissement sont représentées en rouge, les vallons emboîtés en vert. Les drains endokarstiques actifs sont représentés en bleu, les drains affectés par creusement paragénétique en jaune et rouge (structure verticale). Le plan bleu représente la surface piézométrique. 284
- Figure 6.21** - Schéma chronologique (relative) de la mise en place du relief karstique dans le secteur d'étude. L'enchaînement des étapes est déduit de l'emboîtement des structures de drainage de surface et de l'endokarst (chapitre 6). La neutralisation (N) de la karstification ou son fonctionnement syngénétique (S) ou paragénétique (P) des structures endokarstiques est déterminée en fonction des morphologies en présence (chapitre 5) ou du contexte paléogéographique associée (cas de la neutralisation). 286
- Figure 6.22** - Cadre géométrique des niveaux repères dans la vallée du Rhône au droit de la confluence Rhône/Ardèche. L'altitude NGF du niveau de base est reconstruite sans différencier la part isostatique et eustatique dans sa variation. 289
- Figure 6.23** - Répartition des échantillons datés (d'après Martini (points rouge), 2005, 2008 ; Tassy et al. (Points bleus), 2013) en fonction de leurs âges associée de leur incertitude et de leur altitude par rapport au tracé actuel de l'Ardèche. La courbe (en noir) de la densité de probabilité permet de discriminer deux périodes de dépôts (orange et bleue). Les points jaunes représentent les échantillons projetés sur l'axe chronologique et permet une meilleure appréhension de leur distribution chronologique. Le traitement a été réalisé avec le logiciel «density plotter» (Vermeesch, 2012) 291
- Figure 6.24** - Tracé présumé de l'Ardèche (flèche violette) et des paléo-structures de drainage endokarstique (flèche pointillée jaune) ainsi que de l'emprise spatiale de la surface d'aplanissement lors du fonctionnement en vallée aveugle et poljé du cours de l'Ardèche. Les étapes de capture endokarstiques et de la genèse de l'aplanissement sont illustrées sur le bloc diagramme 3D. 295
- Figure 6.25** - La mise en place de la surface d'aplanissement SA2 entraîne le recul des surfaces structurales et un morcellement de la surface SA1. L'abaissement de la surface SA2 est concomitante au cycle d'épandage et de dégagements des sédiments en lien avec le dysfonctionnement du réseau de drainage endokarstique. 296
- Figure 6.26** - Reconstitution du profil de l'Ardèche durant le cycle messino-pliocène depuis l'amont des gorges jusqu'à sa confluence avec le Rhône. Cette reconstitution prend en compte la géométrie et la chronologie des marqueurs sédimentaires datés dans l'endokarst et dans la vallée du Rhône. Durant cette période, et en accord avec les concepts potamologiques (Tricard, 1952 ; Derruau, 1969), le tracé de l'Ardèche devait adopter un profil convexe typique d'un contexte érosif. 297
- Figure 6.27** - Profil géologique orienté Est/Ouest intégrant les niveaux de karstification recensés dans les gorges de l'Ardèche. Ce profil met en évidence que la karstification des calcaires de l'Urgonien est contrainte par la présence d'une semelle et d'une couverture imperméable. C'est le dégagement progressif de la couverture du Crétacé supérieur qui a permis l'ouverture de plusieurs fenêtres hydrogéologiques. 301
- Figure 6.28** - Coupes Nord / Sud (à gauche) illustrant la situation paléogéographique du Miocène supérieur au Miocène inférieur depuis le plateau de Saint Remèze jusqu'au bois de Ronze en passant par les différents sites étudiés dans ce travail de recherche. La seconde coupe (à droite) est réalisée selon un axe Ouest / Est et représente la structure simplifiée de la topographie et de la géologie et permet de se rendre compte de l'importance du facteur géologique (couverture du Crétacé supérieur) contraignant la karstification des terrains calcaire 304
- Figure 6.29** - Vue en coupe des gorges de l'Ardèche durant la crise messinienne (5.9 Ma – 5.3 Ma). L'incision de la vallée de l'Ardèche est bloquée au profit de l'établissement successif de plusieurs drains dans le karst (numérotés de 1 à 4 sur le dessin) en lien avec le dégagement de la couverture Crétacé supérieur dans la zone de confluence entre l'Ardèche et le Rhône. 307

- Figure 6.30** - *Vue en coupe des gorges de l'Ardèche durant le Pliocène (5.3 Ma – 1.9 Ma). Les drains endokarstiques se situent en dessous de la cote altitudinal 130 m GF sont instantanément ennoyés. Entre 5.3 Ma et 4.5 Ma (période 1), seuls les conduits préexistants à proximité de ce nouveau niveau de base se réajustent par creusement paragénétique. La stabilité du niveau de base durant 600 ka permet aux écoulements de se structurer comme en témoigne les morphologies de banquettes limitées à ce niveau altitudinal. Les conduits à une altitude supérieure ont alors un fonctionnement épinoyé. Puis entre 4.5 et 1.9 Ma (période 2), le niveau de base remonte en lien avec l'aggradation sédimentaire dans la vallée du Rhône. Tous les conduits sont progressivement ennoyé et se creuse de façon paragénétique au gré de la succession de mise en charge précédant l'ennoyage total des drains. Leur colmatage total entraîne un sévère dysfonctionnement du drainage et permet à la deuxième surface d'aplanissement de ce mettre en place ainsi qu'aux écoulements de réemprunter de plus en plus souvent la vallée aérienne.* 310
- Figure 6.31** - *Vue en coupe des gorges de l'Ardèche durant le Quaternaire (1.9 Ma à l'actuel). La lente baisse du niveau de base et le colmatage total des drains endokarstiques permet au drainage de se structurer à la surface. Les gorges s'incisent et des réseaux secondaires d'écoulements se mettent en place. Les paléo drains endokarstiques sont parfois recoupé par le recul des versants. La surface d'aplanissement évolue parfois en un poljé qui devient très vite non fonctionnel à cause l'indigence des écoulements. L'incision des gorges entraîne l'augmentation du potentiel gravifique qui entraîne une nouvelle phase de karstification dont l'Ardèche constitue le niveau de base karstique. De nouveaux drains se structurent et conduisent peu à peu à l'abandon des structures secondaires de drainage présentes à la surface. Celles-ci sont temporairement réempruntées par des écoulements de crues dont les goulottes de surcreusement sont les témoins (cf. chapitre 4).* 314
- Figure I** - *Localisation des grottes ornées dans les Gorges d'Ardèche (in Monney, 2012).* 322
- Figure II** - *Chronologie des différentes cultures du Paléolithique supérieur et classification stylistique en fonction de la période culturelle (in Geneste et al., 2010). La numérotation des styles établis par Leroi-Ghouran illustre l'évolution croissante des techniques artistiques et de l'élaboration de l'art au cours du Temps. La grotte d'Altamira se situe à 24000 BP, la grotte de Lascaux à 17000 BP et la grotte Chauvet à 32000 BP mais ne correspond pas au premier stade de l'évolution établi dans l'analyse stylistique (Leroi-Gourhan, 1965).* 323
- Figure 7.1** - *Localisation de la grotte Chauvet.* 329
- Figure 7.2** - *Vue oblique de la combe d'Arc lit abandonné de l'Ardèche. Ce méandre fossile fonctionne « aujourd'hui » en trop plein à l'occasion de crues exceptionnelle d'ordre millénal (photo : conseil général de l'Ardèche). On aperçoit le pont d'Arc au centre du cliché.* 330
- Figure 7.3** - *L'arche naturelle du Pont d'Arc, stade avancé d'un recoupement de méandre par capture karstique. C'est aussi un objet très structurant du paysage environnant la grotte Chauvet.* 331
- Figure 7.4** - *Localisation de la grotte Chauvet dans l'escarpement calcaire de la Combe d'Arc. Le sentier d'accès suit la vire marneuse V3 au pendage de 15 ° environ.* 331
- Figure 7.5** - *Photo I (A, B, C, D) : Vues de conduits de la zone d'entrée. Cette mosaïque de photos présente les différents types de fermeture de la grotte Chauvet par le matériel issu des écroulements de la corniche urgonienne qui surplombait le porche préhistorique. On note sur l'ensemble de ces clichés le relèvement du sol en direction du plafond. La salle Morel (cf. fig. 5) présente une autre morphologie de fermeture (abaissement du plafond en direction du sol). Clichés S. Jaillet.* 332
- Figure 7.6** - *La Salle Morel. Bien que la salle Morel présente des témoins archéologiques et paléontologiques similaires à la grotte Chauvet (ponctuations rouges, ossements grosse faune paléolithique), la question reste posée des relations entre cette salle et le reste de la cavité. Seul un passage étroit ouvert par les inventeurs permet d'accéder à cette salle. Celle-ci se caractérise par une détente mécanique généralisée ici visible sur la droite de la photo (édifices stalagmitiques cassés en différents endroits). Cliché S. Jaillet* 333
- Figure 7.7** - *Coupe développée de la grotte Chauvet dans son contexte géographique. Cette coupe issue des relevés lasergrammétriques offre une bonne lecture d'ensemble de la grotte Chauvet. Cette cavité se caractérise par son profil sub-horizontale hormis à proximité du versant. On y relève une remontée nette du plancher suivie d'une redescende, expression du talus d'éboulis qui ferme l'entrée préhistorique de la grotte. On note également la diminution de la hauteur de la galerie liée à son « ennoisement » par la masse écroulée.* 334
- Figure 7.8** - *Coupoles et voûte d'équilibre des réseaux de la zone d'entrée. La réalisation de la voûte d'équilibre gomme les morphologies phréatiques initiales (coupoles de plafond). Cette dynamique progressive se traduit par la desquamation des parois et de la voûte et la production de clastes de petite dimension. Cliché J.-J. Delannoy.* 334
- Figure 7.9** - *Base de l'éboulis d'entrée. Cette photo permet de visualiser les éléments majeurs de la zone d'entrée de Chauvet. A droite du personnage, on peut relever la présence de gros blocs qui ne proviennent pas du plafond comme en témoignent les coupoles et la voûte d'équilibre. La masse rocheuse issue de l'écroulement de la corniche ennoie la galerie sur une certaine hauteur comme le souligne le contact de l'éboulis avec le pendant de voûte (en arrière-plan). L'éboulis de blocs est recouvert par des clastes de desquamation (1er plan à gauche) eux-mêmes scellés par un encroûtement stalagmitique holocène. Cliché S. Jaillet.* 335

- Figure 7.10** - Impact de chocs sur les pendants. La reconnaissance d'impacts de chocs sur des pendants de voûte (calcaire ou calcite) et sur d'anciens édifices stalagmitiques révèle l'énergie cinétique des blocs qui ont pénétré à l'intérieur de la cavité. Cette énergie peut être ici rapportée à la hauteur de chute de ces blocs (écroulement de la corniche). Cliché S. Jaillet. 336
- Figure 7.11** - Corniche calcaire au-dessus de la zone d'entrée de la grotte Chauvet. On relève au centre de la photo la niche d'écroulement. Celle-ci est limitée à gauche par une zone broyée longeant une faille senestre et à droite par le rocher d'Abraham. Ce « rocher » a été un des points de référence pour reconstituer la géographie de la corniche urgonienne avant les écroulements qui ont fermé l'entrée préhistorique de Chauvet. On relève également sur cette photo le pendage généralisé vers l'ouest (vers la gauche). L'acquisition 3D est faite avec un lidar terrestre Optech Ilris (position 5). Le référencement du modèle est fait par des sphères (1 - 4) elle-même positionnées par GPS différentiel. Cliché S. Jaillet. 336
- Figure 7.12** - Impacts et chocs lors de la chute des éléments rocheux depuis la niche d'arrachement. A partir d'un certain niveau de remplissage, plus aucun élément ne pénètre dans la cavité. 339
- Figure 7.13** - Le fluage du talus, à l'intérieur de la cavité, postérieurement à l'écroulement, engendre un décalage des stalagmites par rapport aux stalactites qui les ont alimentées (in Delannoy et al., 2010). 339
- Figure 7.14** - Stalagmite décalée de la salle d'entrée. Ce décalage de la pointe de la stalagmite par rapport à la stalactite qui l'alimentait témoigne du fluage, toujours actif du dépôt d'écroulement. Cliché J.-J. Delannoy. 340
- Figure 7.15** - La salle Morel. Coupe synthétique de la salle Morel et mise en évidence des phénomènes de détente mécanique et d'écrasement des piliers stalagmitiques (in Delannoy et al., 2010). 341
- Figure 7.16** - Concrétions extérieures. Dans le prolongement extérieur de la grotte Chauvet et au pied de l'éboulis externe, on peut observer des édifices stalagmitiques, aujourd'hui à l'air libre. Ces édifices sont les témoins d'une paléo-galerie de la grotte Chauvet qui a été décapitée par le recul du versant lié à l'encaissement de l'Ardèche. Ces témoins ont permis de caler altimétriquement la base de la galerie originelle de la grotte Chauvet. Cliché J.-J. Delannoy. 341
- Figure 7.17** - Anciens remplissages souterrains de la grotte Chauvet. Sur ce cliché, on relève une ancienne série sédimentaire qui s'est déposée dans le prolongement méridional de la grotte Chauvet (galerie décapitée). Trois ensembles caractérisent cette série de la base vers le sommet = des sables riches en quartz (grès, l0B) ; un conglomérat composé de galets calcaires, d'éléments stalagmitiques roulés et de matériel allochtone ; un épais plancher stalagmitique qui scelle les dépôts fluviaux. Ces dépôts plaqués contre la paroi calcaire permettent de reconstituer la topographie extérieure de la grotte Chauvet et ainsi fixer les seuils latéraux de l'ancien porche. Cliché J.-J. Delannoy. 342
- Figure 7.18** - Coupe transversale schématique de la galerie décapitée (partie méridionale du dépôt d'écroulement). Une séquence alluviale est scellée par un important massif stalagmitique. L'ensemble est mis au jour par le recul du versant au cours du Quaternaire puis est affecté par l'écroulement en masse (in, Delannoy et al., 2010). 342
- Figure 7.19** - Tabliers de blocs sur l'éboulis externe. Cette photo illustre la morphologie externe de l'éboulis responsable de la fermeture de la grotte. Il se caractérise en surface par un ensemble de dalles calcaires pluri-métriques ayant une pente généralisée d'une trentaine de degrés. La dalle sous le personnage constitue un des termes aval du cône d'éboulis ; elle repose directement sur les remplissages alluviaux gréseux (cf. figure 7.17B). Cliché S. Jaillet. 343
- Figure 7.20** - Schéma conceptuel de l'emboîtement des surfaces. Sur cette figure, ont été portées les différentes surfaces visibles dans les réseaux d'entrée et à l'extérieur. La surface 0 correspond à la galerie initiale (morphologies phréatiques et bedrock visible) ; la S1 correspond au plancher de référence dans la cavité (sol de la Salle des Bauges : 187 m NGF) ; la S2 illustre le sol du paléo-porche de la cavité et le tracé de la corniche urgonienne avant les phénomènes d'écroulement ; la S3 caractérise la morphologie consécutive de l'écroulement de l'écaille calcaire et de la fermeture de la cavité ; la S4 met en avant l'évolution du talus d'éboulis (fluage, éboulis de clastes) ainsi que les réajustements mécaniques au plafond des réseaux d'entrée ; la S5 correspond à la phase de soutirage récente et toujours active. 345
- Figure 8.1** - Géoréférencement des sphères au GPS différentiel. 351
- Figure 8.2** - Cette figure résume, de gauche à droite, les principales étapes de la modélisation 3D : nuages de points acquis par balayage laser ; maillage des points RTI (réseau de triangles irréguliers) représenté ici en mode filaire pour la niche d'arrachement et en mode lissé pour le rocher d'Abraham et enfin mappage de photos sur le modèle. 352
- Figure 8.4** - Typologie des principales configurations de rupture de parois menant à des chutes de pierre à des éboulements et écroulements (d'après Freyssines et Hantz, 2006). Les forces de cisaillement sont contraintes par le dispositif géostructural de l'escarpement. Le rocher d'Abraham correspond à l'exemple B2. 353
- Figure 8.3** - Identification de la cicatrice d'arrachement dans l'escarpement calcaire. 353
- Figure 8.4** - Typologie des principales configurations de rupture de parois menant à des chutes de pierre à des éboulements et écroulements (d'après Freyssines et Hantz, 2006). Les forces de cisaillement sont contraintes par le dispositif géostructural de l'escarpement. Le rocher d'Abraham correspond à l'exemple B2. 353

Figure 8.5 - Vue de face et de dessus de l'écaïlle. Sur le modèle numérique de terrain extrait des relevés laser grammétriques, ont été distinguées les différentes niches d'arrachement visibles au-dessus de l'ancienne entrée de la grotte. Une niche (rouge) correspond à la zone broyée le long de la faille bordière. Le matériel provenant des niches A, B et C est responsable de la fermeture de la cavité (éboulis interne et externe).	354
Figure 8.6 - Mesure des orientations des faces rocheuses sur les escarpements voisins de la grotte Chauvet. L'ancienne surface topographique de l'écaïlle écroulée a été modélisée en tenant compte des principales directions des parois à proximité directe de la niche d'arrachement.	356
Figure 8.7 - Hypothèses de reconstitution de la surface topographique de la masse rocheuse détachée de la paroi. L'hypothèse H1 minimise l'épaisseur de roche mais la direction générale de sa topographie est parallèle à l'orientation de la paroi sous jacente (aujourd'hui à l'affleurement) mais pas à celle du pilier d'Abraham. L'hypothèse H2 tient compte de l'orientation moyenne des parois déterminée statistiquement sur le modèle 3D. L'hypothèse H3 tient compte d'un décrochement prééminent par analogie à la position du rocher d'Abraham par rapport aux parois environnantes.	356
Figure 8.8 - Ecaïlle écroulée. Reconstitution numérique 3D de l'écaïlle calcaire responsable de la fermeture de la grotte préhistorique de Chauvet-Pont d'Arc.	357
Figure 8.9 - Lecture et quantification du fluage et du tassement du dépôt d'écroulement à partir de la numérisation 3D d'une stalagmite translattée.	361
Figure 8.10 - Hypothèses trajectographiques de la mise en place des éléments issus de l'écroulement.	362
Figure 8.11 - Carte des plafonds actuels.	364
Figure 8.12 - Carte des paleo-plafonds.	365
Figure 8.13 - Carte du zonage du versant pour la segmentation du toit de l'écroulis à l'extérieur et à l'intérieur de la cavité. Les altitudes données par les courbes de niveau sont en m NGF.	366
Figure 8.14 - Coupe synthétique des différents ensembles géomorphologiques et niveaux repères présent sur la zone d'étude. Les altitudes sont en m NGF.	367
Figure 8.15 - Modélisation du mur et du toit de l'écroulis dans sa configuration actuelle. Ici l'apex du mur de l'écroulis dans la zone d'entrée est de 189.5 m NGF.	368
Figure 8.16 - Le paléo-porche en 3D (en bas) et le paléo porche vu depuis le fond de la Combe d'Arc (en haut). Reconstitution 3D texturée de la paléo entrée de la grotte Chauvet-Pont d'Arc avant sa fermeture. Cette paléo-topographie a été reconstituée d'après les indices géomorphologiques et les repères topographiques visibles en surface et dans la cavité.	369
Figure 8.17 - Représentation 3D du volume de roche obstruant l'entrée naturelle de la grotte Chauvet.	369
Figure 8.18 - blocs sont représentés.	372
Figure 8.19 - L'item 1 représente le modèle 3D texturé de topographie actuelle de l'escarpement et de l'écroulis. L'item 2 fait ressortir en vert les plans de stratification et en rouge les plans majeurs de fracturation. L'item 3 représente la modélisation des zones de fragilité de la roche au niveau de l'écaïlle rocheuse qui s'est écroulée.	375
Figure 8.20 - Simulation des différentes étapes de l'écroulement. Dans le modèle actuellement développé, environ 70% des blocs stoppent leur course sur la plateforme de la paléo entrée. La propagation des 30 % restant se limite au versant et seul 10 % de la masse écroulée parvient au fond du talweg de la combe d'Arc.	376
Figure 9.1 (A, B) - Sondage à la base du tablier d'écroulis. Ce sondage, de taille limitée, se situe dans la grotte, au terme du dépôt d'écroulement. Il a permis de reconnaître un niveau d'occupation riche en charbon, à la cote 187,5 m. (d'après Delannoy et al., 2010) Clichés S. Jaillet.	383
Figure 9.2 - Schéma contextuel simplifié des éléments environnant l'escarpement calcaire surplombant la grotte Chauvet. ...	384
Figure 9.3 - Réactions en « cascade » de la production secondaire de rayons de particules cosmiques dans l'atmosphère à partir d'une particule primaire pénétrant dans l'atmosphère supérieure et en finissant par la production de nucléide cosmogénique dans la roche, (in Désilets et al., 2001). La partie gauche montre la composante électromagnétique, dominé par les électrons (e) et les rayons gamma ou de photons. Ces particules de faible masse ne contribuent pas à la production d'isotope cosmogénique). La partie droite montre la composante hadronique, dominé par les protons (P) et de neutrons (N), principalement responsable de la production des nucléides cosmogéniques terrestre. La partie du milieu montre le composant mésonique, avec les pions (p) qui se désintègrent en muons (μ) responsables aussi d'une partie de la production des nucléides cosmogéniques terrestre.	387

Figure 9.4 - Cette figure représente la modélisation théorique des taux de production annuel de ^{36}Cl en atomes $a-l$ $g-l$ en fonction de l'épaisseur de roche traversé par le flux cosmique (in Schimmelpfennig, 2009).	389
Figure 9.5 - Dipôle géomagnétique. Effet du géo magnétisme terrestre.	391
Figure 9.6 - Représentation des iso lignes de forces que le flux (en Gt^{-1}) cosmique doit dépassé pour traverser l'atmosphère.	392
Figure 9.7 - Illustration graphique de l'influence de l'écrantage topographique sur la production in situ d'isotopes cosmogéniques (in Dunne et al., 1999).	394
Figure 9.8 - Illustration des effets de l'érosion sur le calcul des âges d'exposition (in Schimmelpfennig, 2009))	394
Figure 9.9 - La position de chaque échantillon (point jaune : numérotation de gauche à droite) est reportée sur le modèle 3D triangulé à partir des nuages de points LiDAR. Le violet correspond à l'emprise spatiale du dépôt d'écroulement au sol, le marron au bedrock. Les traits continus rouges délimitent la niche d'arrachement globale et les traits pointillés jaunes délimitent chacune des niches emboîtées E1, E2 et E3. Le trait en pointillé vert marque la surface du plateau (d'après Sadier et al., 2012, modifiée).	397
Figure 9.10 - Vue générale de la paroi surplombant la grotte Chauvet lors des prélèvements d'échantillons de roche calcaire à la surface des différentes niches d'arrachements (avril 2011). Noter la taille des quatre personnages accrochés à la paroi (repères rouges). Photo L. Benedetti.	397
Figure 9.11 - Les échantillons sont prélevés, sur corde, à la disqueuse, sur les premiers centimètres de la surface qui sont les plus adaptés à la détermination des âges d'exposition aux rayons cosmiques. C'est en effet dans les premiers centimètres que la production d'isotopes cosmogéniques du ^{36}Cl par spallation du ^{40}Ca est la plus importante. Photos S. Jaillet.	398
Figure 9.12 - Schéma illustrant la position et la situation de chaque échantillon avant leur prélèvement.	399
Figure 9.13 - Digitalisation des lignes d'horizons et extraction des valeurs de pente et d'orientation nécessaires à l'ajustement du taux de production de l'isotope cosmogénique du ^{36}Cl sur le site d'étude. Le point rouge matérialise l'entrée de la grotte Chauvet.	402
Figure 9.14 - Synthèse géométrique et chronologique des événements qui ont affectés le porche d'entrée de la grotte Chauvet. Chaque surface ou élément de surface sur le porche, est daté en rapport avec l'événement qui l'a enfoui. Ainsi, l'âge de la surface marquant la transition entre les sédiments endokarstiques et le cône d'éboulis pré écroulement n'est pas connu. Mais le début de sa construction est postérieur à l'écroulement qui a mis au jour le rocher d'Abraham et il s'est construit progressivement jusqu'à la déstabilisation et la chute de la masse rocheuse correspondante à E1.....	407
Figure 9.15 - Courbe de densité de probabilités des âges d'exposition ^{36}Cl et des âges ^{14}C calibrés (Intcal09, Reimer et al., 2009) des fréquentations humaines et animales. On note la bonne concordance entre la fin de la période de fréquentation animale et les âges des derniers écroulements, E2 et E3. «A» représente l'événement qui a mis au jour la paroi du pilier d'Abraham. E1, E2 et E3 correspondent aux trois niches d'arrachement.	409
Figure 9.16 - Evolution géomorphologique du porche d'entrée de la grotte Chauvet. Les cotes altitudinales sont rattachées au système de nivellement Français (NGF). Les limites topographiques sont basées sur les relevés LiDAR.	411

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Statistiques des visées topographiques de l'ensemble des réseaux étudiés.	49
Tableau 3.1 - Tableau répertoriant les cinq classes de sols préalablement retenues. La catégorie « couture » représente les surfaces à réinvestir pour raccorder les parties réelles de la grotte à restituer. Pour chaque station, le calcul ne tient pas compte de la surface utile des passerelles de guidage au sein de l'ERG.	98
Tableau 5.1 - Résultats d'ajustements de plans et de cylindres réalisés sur 3 étages de banquettes limites.	172
Tableau 5.2 - Calcul de surface des sections mouillée correspondant au niveau de chaque banquette limite (à partir de l'exemple des Salles Rouges de l'Aven d'Orgnac).	178
Tableau 5.3 - Résultats d'analyse U/Th sur les concrétions de la salle I – Cerak.	192
Tableau 6.1 - Détails morpho-métriques de la segmentation des conduits du réseau spéléologique de la goule de Foussoubie (localisation des segments figure 6.4).	258
Tableau 6.2 - Synthèse des datations réalisées à partir de l'étude des remplissages détritiques présents dans les cavités des gorges de l'Ardèche. Le niveau altitudinale correspond à leur position par rapport au cours actuel de l'Ardèche.	290
Tableau 8.1 - Surface et volume de roche reconstitués pour chaque niche d'arrachement.	357
Tableau 9.1 - Synthèse des datations réalisées dans la première partie de la grotte Chauvet (âges 14C non calibrés).	382
Tableau 9.2 - Résultats des analyses physico chimiques sur les échantillons de roche (d'après Sadier et al., 2012). Les concentrations en ^{36}Cl et en Cl sont mesurées par spectrométrie de masse par accélérateur. Les concentrations en CaO sont mesurées par ICP-OES (Inductively coupled plasma by optical emission spectrometry). Sont aussi reportés la géométrie, le coefficient d'écrantage, l'épaisseur de l'échantillon, et l'épaisseur de roche qui recouvrait chaque échantillon avant sa mise à l'exposition directe aux rayonnements cosmiques. a : les incertitudes de mesure du CaO est inférieure à 2% ; b : L'héritage en ^{36}Cl est la somme de la contribution nucléogénique acquise avant l'écroulement additionnée à la contribution muogénique.	400
Tableau 9.3 - Ages d'exposition des échantillons prélevés sur les différentes niches d'arrachement et sur le rocher d'Abraham. Les lignes jaunes correspondent à la niche E1, les lignes orange à E2, les lignes bleues à E3 et les lignes jaune pâle au rocher d'Abraham.	405

TABLE DES ANNEXES

Annexe 3.1 - Tableau récapitulatif des objets qui seront reproduits dans l'espace de restitution de la grotte Chauvet.....	442
Annexe 5.1 - Sondage des salles rouges.	443
Annexe 6.1 - Extension maximale de la mer tortonienne (d'après Besson, 2005).	444
Annexe 6.2 - Chartre eustatique utilisée pour ce travail (d'après Haq et al., 1987 ; Hardendol et al., 1997).	445
Annexes 7.1 (jusqu'à la page 452) Article paru dans les Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2012.	446
Annexe 8.1 - Les résultats la tomographie électrique réalisée dans le méandre en contre bas de la zone d'écroulement responsable de la fermeture de la grotte Chauvet indiquent des résistivités comprises entre 50 et 1200 ohm.m. Une couche de faible résistivité (< 100 ohm.m) est observée sur environ 5 à 10 m d'épaisseur sur l'ensemble du profil. Cette couche semble correspondre à des terrains argilo-limoneux se déposant lors des débordements de l'Ardèche (Shejfer et al., 2003). Sous cette couche, les résistivités des terrains semblent homogènes (600 – 1000 ohm.m) entre les altitudes 88/70 m. Ces terrains relativement résistants pourrait correspondre au substratum calcaire. Dans la zone Nord du profil, les résistivités électriques ne semblent pas indiquer la présence d'imposants blocs d'écroulement. L'absence de sondage, rend toutefois l'interprétation délicate.	453