



HAL
open science

Paléogéographies et reconstitution géomorphologique 3D: application aux environnements de sites ornés

Kim Genuite

► **To cite this version:**

Kim Genuite. Paléogéographies et reconstitution géomorphologique 3D: application aux environnements de sites ornés. Planète et Univers [physics]. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT: . tel-03475028

HAL Id: tel-03475028

<https://theses.hal.science/tel-03475028v1>

Submitted on 10 Dec 2021

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Géographie**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Kim GENUITE

Thèse dirigée par **Jean-Jacques DELANNOY, PU, USMB**, et
codirigée par **Stéphane JAILLET, IR, CNRS**

préparée au sein du **Laboratoire EDYTEM (Environnement,
Dynamiques et Territoires de Montagne)**
dans l'**École Doctorale SISEO (Sciences et Ingénierie des
Systèmes de l'Environnement et des Organisations)**

Paléogéographies et reconstitution géomorphologique 3D Application aux environnements de sites ornés

Thèse soutenue publiquement le **13 décembre 2019**,
devant le jury composé de :

Marc CALVET

Professeur, Université de Perpignan Via Domitia (Rapporteur)

Diego GARATE

Professeur, Universidad de Cantabria, Espagne (Rapporteur)

Jean-Jacques BAHAIN

Professeur, Muséum National d'Histoire Naturelle

Laurent BRUXELLES

Chercheur INRAP, Chargé de recherche CNRS, laboratoire TRACES

Bruno DAVID

Professeur, Monash Indigenous Studies Centre, Australie

Jean-Michel GENESTE

Conservateur général honoraire du patrimoine, laboratoire PACEA

Geneviève PINCON

Directrice, Centre National de la Préhistoire, Ministère de la Culture

Valérie PLAGNES

Professeure, Sorbonne Université, laboratoire METIS

Jean-Jacques DELANNOY

Professeur, Université Savoie Mont Blanc, laboratoire EDYTEM

(Directeur)

Stéphane JAILLET

Ingénieur de Recherche, CNRS, laboratoire EDYTEM (Co-Directeur)



RÉSUMÉ

Ce travail de thèse a été financé par allocation de recherche de l'école doctorale SISEO (Sciences et Ingénierie des Systèmes de l'Environnement et des Organisations) de l'Université Savoie Mont Blanc.

Il a pour objet de présenter le cadre physique des sites archéologiques ornés par l'approche de la géomorphologie associée aux outils de topographie et d'imagerie 3D, dans l'objectif de reconstituer les formes et l'évolution de l'environnement physique des sites ornés avant, pendant et après les occupations humaines.

Ce travail a pour support l'étude de trois sites : le Roc-aux-sorciers (Vienne, France), les monolithes du site Borologa (Kimberley, Australie), et l'environnement paysager de la grotte Chauvet : le complexe du cirque d'Estre et de l'arche du Pont d'Arc (Ardèche, France). C'est notamment dans le cadre très riche des gorges de l'Ardèche et du Pont d'Arc qu'une méthodologie spécifique a été développée, qui se fonde sur la 3D comme outil de croisement des données issues de différents champs disciplinaires. Une approche multi méthodes a été construite sur ce site, dans l'objectif de reconstituer son histoire, celle du temps des formes et du temps des hommes.

La méthodologie mise en place sur les sites d'étude se fonde sur la topographie haute-résolution et son caractère non invasif (i). L'approche topographique offre la possibilité de construire une chronologie robuste et détaillée des événements, fondée sur l'emboîtement relatif des formes (ii). La chronologie relative sert alors de contrainte stratigraphique à l'élaboration d'une chronologie absolue, alimentée par des datations radiométriques (iii).

La première partie (chapitres 1 et 2) se veut méthodologique et développe les étapes de construction d'une cartographie 3D en contexte archéologique sur les sites du Roc-aux-Sorciers et des monolithes Borologa. Les questionnements géomorphologiques développés sur ces sites s'inscrivent dans des programmes de recherche archéologiques et des investigations déjà en place.

Le reste de ce travail (parties 2 et 3) porte sur la reconstitution des paléogéographies de l'environnement de la grotte Chauvet : le complexe du Cirque d'Estre – Pont d'Arc. La seconde partie (chapitres 3, 4 et 5), vise à construire une chronologie relative de l'évolution du méandre de la Combe d'Arc. La topographie 3D permet alors de mettre en relation des objets et des observations ponctuelles: des anciens niveaux de terrasses alluviales, des formations souterraines, et des informations tirées de la prospection du sous-sol.

La dernière partie (chapitres 6, 7 et 8) regroupe les résultats de deux campagnes de datation absolue, sur les concrétions de la grotte des Châtaigniers ainsi que sur les basses terrasses alluviales de l'Ardèche. Le recoupement de la Combe d'Arc fait l'objet d'une étude détaillée permettant de répondre à des questionnements interdisciplinaires (géomorphologie, archéologie), en lien avec l'évolution de l'environnement physique et des occupations humaines. L'élaboration d'une chronologie absolue permet enfin de réinterroger les reconstitutions 3D dans une perspective régionale et d'évaluer les dynamiques d'évolution du relief à l'échelle d'un bassin versant.

Mots clé : géomorphologie, reconstitution, analyse 3D, datation absolue, géophysique, géochimie, archéologie.

ABSTRACT

This work was funded by a state scholarship from the SISEO doctoral college (Sciences et Ingénierie des Systèmes de l'Environnement et des Organisations).

A methodology involving geomorphological analysis and 3D mapping tools was developed to reconstruct the physical context and the paleogeographic morphologies of archaeological sites before, during and after their human occupation.

This work was conducted on three sites: the Roc-aux-Sorciers (Vienne, France), Borolaga Rockshelters (Kimberley, Australia), and the physical context of the Chauvet cave: the Combe d'Arc cutoff meander and its monumental Pont d'Arc natural bridge (Ardèche, France).

The Combe d'Arc meander, the rich environment and the morphological evolution of the Ardèche canyon support an interdisciplinary study based on a multi-method approach which circles around high-fidelity 3D mapping and modelling.

The 3D geomorphological approach is described in the first part of this work (i). Topographical constraints allow the construction of a detailed and robust relative chronology based on stratigraphical relationships between the different morphologies (ii). Absolute datings can thus be added to such a model and be discussed regarding the 3D mapping and its stratigraphical organisation (iii).

In the first part, the methodological workflow for 3D mapping is applied to archaeological environments -First to the Roc-aux-Sorciers site (chapter 1), then to Borolaga Rockshelters (chapter 2). On both sites, geomorphological questionings are related to archaeological research programs.

The remaining parts of the work (parts II and III) focus on the paleo-landscape reconstruction of the Combe d'Arc cutoff meander. The second part (chapters 3, 4 and 5) aims at building a robust relative chronological framework of the Combe d'Arc meander evolution based on large scale geomorphological investigations on the River Ardèche alluvial banks and inside the karstic drains of the Ardèche canyon. The underground investigation of the abandoned meander is supplied by geophysical prospection.

Finally, the third part of our study (chapters 6, 7 and 8) accounts for the absolute datings of the Châtaigniers cave speleothems (inside the Combe d'Arc meander) and of the ancient alluvial banks of the River Ardèche. Hence the suggestion of a chronological timeline of the meander cutoff and the natural bridge genesis which is then discussed regarding human occupations and Late Quaternary dynamics on a regional scale.

Keywords : geomorphology, reconstruction, 3D analysis, absolute dating, geophysics, geochemistry, archeology.

REMERCIEMENTS

Alors que j'écris ces lignes, je prends conscience d'une chose importante : celle d'avoir eu de la chance. La chance d'avoir été accueilli au laboratoire EDYTEM. Plus qu'un lieu de travail, le laboratoire est devenu pour moi ainsi qu'à de très nombreux doctorants notre « base ». Un lieu où il fait bon travailler, avec des collègues d'autres disciplines, toujours curieux et bienveillants. Ces choses comptent beaucoup dans notre parcours de thésard et c'est une chance pour moi d'avoir été lancé dans la recherche scientifique par une structure et des collègues qui nous encouragent.

La chance de m'être bien amusé aussi. Au cours de ce travail de thèse, j'ai pu accomplir presque tout ce que j'avais souhaité et réaliser des projets dont je ne pouvais que rêver au départ : de la 3D, bien sûr, mais également des campagnes de géophysique, des datations, de l'XRF, et j'en passe... Toutes ces approches sont lourdes à mettre en œuvre et nécessitent des ressources matérielles et humaines considérables. J'ai eu la chance de trouver du soutien, de la générosité et de la bienveillance envers moi. Du début à la fin, cette thèse est donc le fruit d'un travail collectif.

Il est difficile d'être exhaustif tant j'ai reçu de l'aide tout au long de mon parcours. Néanmoins, j'espère ne pas oublier trop de monde à travers ces remerciements.

En premier lieux, je veux d'abord remercier Jean-Jacques BAHAIN, Laurent BRUXELLES, Marc CALVET, Bruno DAVID, Diego GARATE, Jean-Michel GENESTE, Geneviève PINÇON et Valérie PLAGNES d'avoir accepté d'examiner, juger et participer à mon jury de thèse.

Mes pensées vont maintenant vers mes directeurs, Jean-Jacques DELANNOY et Stéphane JAILLET qui me supportent et m'accompagnent depuis mon Master 1. Que d'heures passées ensemble, tous les trois, sur le terrain, en mission. Bientôt 6 ans que je suis votre padawan en géomorphologie. Les mots justes me manquent pour vous exprimer ma gratitude mais je vous remercie d'avoir cru en ce jeune étudiant sorti de littérature, et de continuer à le faire.

Je tiens à remercier André REVIL, ta rencontre lors d'une mission de Val-Thorens fut salutaire ! Tu m'as accompagné et formé dans ce projet de géophysique, avec enthousiasme et bienveillance. Cette aventure comptait beaucoup pour moi et te doit beaucoup.

Ce travail de thèse fait la part belle à la chronologie absolue, mais n'aurait pas pu voir le jour sans les chronogéniaux parisiens du LSCE et du MNHN : Edwige PONS-BRANCHU, Pierre VOINCHET et Jean-Jacques BAHAIN.

Edwige, tu as donné sans compter pour ma thèse pendant 3 ans pour me fournir des dates U/Th, parfois dans des concrétions « indatables », me demandant des nouveaux échantillons et poussant pour avoir des résultats suffisamment nombreux. Il y a eu un avant et un après les datations dans la grotte des Châtaigniers, je ne te remercierai jamais assez pour la générosité dont tu as fait preuve envers moi.

Jean-Jacques et Pierre, merci à vous deux d'avoir accepté de venir en Ardèche prélever pour les datations ESR, et de m'avoir accueilli, formé et accompagné lors de mon séjour à l'Institut de Paléontologie Humaine de Paris. Je m'y suis senti comme chez moi, l'aventure de l'azote liquide et de la datation du Pont d'Arc ont été un des plus beaux moments de cette thèse. Promis, je me règle les doigts quand vous voulez !

Je tiens à remercier Bruno DAVID, qui m'a accepté dans l'expédition australienne au Kimberley et a soutenu mes approches et mes choix, sur le terrain. Le modèle 3D australien est celui qui m'a donné les clés de l'approche intégrée pour ceux du Pont d'Arc et du Roc-aux-Sorciers. J'espère que nous collaborerons encore, en Australie et ailleurs.

Je remercie Geneviève PINCON pour son accompagnement sur le Roc-aux-Sorciers. J'ai toujours été très bien accueilli chez toi à Angles, y compris lorsque les voitures de doctorant tombent en panne et qu'il faut aller les chercher à 150 km du lieu de rendez-vous... Merci des conseils et de la confiance que tu m'as accordée pour mieux appréhender ce site, qui a été ma première aventure archéo.

Je remercie également Marceau GRESSE pour le temps passé à réaliser les inversions 3D des profils de géophysique, à m'apprendre les bases de l'ERT aussi. Tu as toujours pris du temps pour moi, même de l'autre côté du globe.

Je remercie Julien MONNEY et Didier CAILHOL, toujours intéressés par mon travail et prêts à fouiller leurs archives, relevés et mémoires pour m'aider dans mes recherches sur l'Ardèche.

Je remercie également mes deux « tontons 3D », Guillaume THIBAULT et Jean-François HULLO, qui m'ont pris sous leurs ailes topographiques avant et pendant ma thèse. Vous avez toujours été à l'écoute, disponibles pour m'aider et me conseiller. Nous avons formé une belle équipe !

Je souhaite adresser des remerciements particuliers à la team des docs : les « barbus » du labo, Pierre-Allain, Jacques et Johan, avec qui j'ai littéralement « fait ma thèse ». Une sacrée bande de bricoleurs, une team 3D/géophysique/géomorpho toujours prête à s'entraider et vider des bières. Nous en avons passé du temps tous les quatres, à bricoler sur les missions de terrain et à tésoriser les petites cuillères à café du labo, au grand dam de Gilles...

Aux autres compagnons, doctorants EDYTEM, tous dans le même bateau, explorant d'autres thèmes: Grégoire, Alice, Kevin, Claire, Céline, Maud et Anne. Ana, Xavi, William, Norrine, Lionel, Mathieu, Thérèse, Sophie-Anne, Manu, sans oublier Léna.

Merci beaucoup à toi, Jérôme POULENARD, grand déambulateur, tout comme moi. Je me suis senti accompagné pendant ces 3 ans, à courir partout dans les couloirs à la moindre idée, pour tenter de l'exprimer, et à constater que je n'étais pas le seul! Merci également de m'avoir initié, un après midi, à la géochimie, ou devrais-je dire: la chimie tout court.

J'aimerais également adresser un remerciement particulier à Dominique GASQUET, professeur de géologie au labo. Il n'est jamais facile de sortir de son champ de compétence, de la « case disciplinaire » dans laquelle le monde veut bien nous ranger. Mais c'est un regard plein d'humanité que tu as lancé à cet autre ardéchois (du mauvais côté de l'Ardèche puisqu'en domaine calcaire...), alors qu'il bricolait en géographie, en géomorphologie, en géologie.

Merci à, Anne-Lise DEVELLE pour le temps et l'énergie que tu m'a consacrée sur la concrétion CHAT02 et pour m'avoir initié aux merveilles de la fluorescence X, pour ton humour aussi, surtout quand les manips ne marchent pas!

Je remercie également Yves PERRETTE, pour les traitements et les conseils sur la fluo UV, j'aurai sans doute raconté une toute autre histoire sans vous deux!

Un grand merci à Hélène SALOMON pour les nombreuses discussions archéo-géomorpho, géo-truc, quelque chose. Merci également pour avoir accepté de m'initier à *Chronodel* et à ce monde un peu étrange de la statistique bayésienne.

Isabelle COUCHOUD, pour m'avoir aidé à dans des concrétions ardéchoises « toutes pourries ».

Emilie CHALMIN pour m'avoir initié aux RX. je n'ai pas poursuivi cette méthode faute de temps, mais c'est prometteur.

Fayçal SOUFI pour le temps que tu m'a consacré à scier, fraiser et découper les concrétions et les calcaires de la Combe d'Arc, toujours avec le sourire! Merci également aux autres membres de la « team archive » du labo EDYTEM pour m'avoir initié avec bienveillance (et surtout avec patience !) à ce chouette monde qu'est la géochimie.

Merci enfin à Nicolas JACOB, Erwan MESSAGER et Isabelle THERY pour leurs précieux conseils.

Merci à tous ceux qui ont bien voulu m'accompagner sur le terrain (en plus de la team des barbus, forcément présente !), à tirer les bobines de géophysique dans la Combe d'Arc ou à porter le scan 3D sur le plateau : Sire Mathieu BARRIL, Hervé LAIR, Manu MALET, Marco MARCER, William RAPUC, Ludovic RAVANEL et Stephen RIESGO-NIELSEN.

Merci à l'équipe des spéléo (Ardéchois ou pas) : Judicaël ARNAUD, Thierry MARCHAND, Christophe GAUCHON, Philippe MONTEIL, Gilbert PLATIER et Gabriel HEZ qui m'ont accompagné sous terre ou fourni des données topo, aidé à la topographie des Châtaigniers, indiqué les bons « spots à galets » dans les cavités ardéchoises, n'hésitant pas à partager vos connaissances, me filant un tuyau, une localisation de cavité... Je n'aurai pas pu réunir ces informations sans votre bonne volonté et votre disponibilité.

Merci à l'ensemble des membres du laboratoire EDYTEM : une équipe toujours intéressée, bienveillante, avec un bon mot et des encouragements : c'est un privilège d'avoir appris à vos côtés. Je souhaite également remercier les familles COULANGE et HELLY qui m'ont très gentiment autorisé à travailler sur leurs terrains dans la Combe d'Arc lors des campagnes de prospection géophysique.

Enfin, en dernier comme en premier lieu, merci à ma famille, Pat, Anne-Marie et Axel, aux amis également, qui m'ont soutenu et supporté pendant ces 3 ans de thèse. A Babette et Sylvie pour les relectures, à la famille LAIR qui m'a hébergé lorsque j'étais en mission à Paris, et aussi les copains : Benjamin, Thibault et Robin, Carmen, Jeanne, Paul, Etienne, Yann, Théo, Nad, et Maëva qui ont toujours fait de même.

Tu commences une thèse? Allons, viens balader.

***Aller sur le terrain n'est pas une perte de temps,
Et les découvertes viennent progressivement.***

***Cartographie, observe, ne perds donc pas courage,
Vingt fois sur le rouleau, rembobine le cable.
Documente sans cesse, essaye, fais des erreurs,
Et vas-y! C'est ta thèse, il faut bien commencer.***

SOMMAIRE

Résumé.....	3
<i>Abstract</i>	4
Remerciements.....	5
Sommaire.....	8
Introduction.....	13
PARTIE I : Géomorphologie 3D : étude multiscalaire d'un site archéologique dans son environnement physique.....	25
Chapitre 1 : Modéliser l'environnement autour d'un site archéologique: l'exemple du Roc-aux-sorciers (Vienne, France).....	27
Chapitre 2 : Penser l'espace topographique comme interface des phénomènes naturels et anthropiques - modélisation intégrée et approche géomorphologique 3D du site Borologa (Kimberley, Australie).....	49
PARTIE II : Géomorphologie 3D: construction d'un modèle relatif d'emboîtement des formes du méandre de la Combe d'Arc.....	71
Chapitre 3 : Reconstitution des paléomorphologies fluviales et karstiques par l'approche cartographique 3D - Application au site de la Combe d'Arc-Pont d'Arc (Ardèche, France).....	73
Chapitre 4 : Apports de l'étude des réseaux endokarstiques dans la compréhension de l'évolution du méandre de la Combe d'Arc.....	101
Chapitre 5 : Imagerie du sous-sol de la Combe d'Arc par tomographie de la résistivité électrique (ERT).121	
PARTIE III : Chronologie et 3D.....	145
Chapitre 6 : Les spéléothèmes de la grotte des Châtaigniers. Archives chronologiques et indicateurs de l'incision pléistocène de l'Ardèche.....	147
Chapitre 7 : Datations ESR sur quartz des terrasses alluviales + 15 m, + 30 m et + 45 m de l'Ardèche.	173
Chapitre 8 : Etude morphométrique et volumétrique des niveaux à + 15 m et + 30 m.....	197
Conclusions générales.....	221
Bibliographie.....	231
Table des figures.....	245
Annexes.....	259
Sigles et abréviations.....	267
Table des matières.....	269

**PALÉOGÉOGRAPHIES ET RECONSTITUTION GÉOMORPHOLOGIQUE 3D
APPLICATION AUX ENVIRONNEMENTS DE SITES ORNÉS**

INTRODUCTION.

Nombre de recherches traitant des dynamiques passées et actuelles des paysages s'inscrivent dans une approche résolument interdisciplinaire. Qu'elle soit abordée sous une entrée physique, environnementale ou anthropique, l'étude des paysages ne peut faire fi des autres composantes et processus qui interviennent dans leur fonctionnement et leur évolution. Systèmes complexes par excellence, les paysages ne peuvent être abordés que par la compréhension des interactions passées et actuelles entre leurs différentes composantes. C'est pourquoi, très tôt, leur étude a été abordée par une approche systémique renouvelée (Bertran, 2004). De fait, des avancées majeures ont pu se réaliser au sein de programmes ou d'équipes aux compétences multiples où chacun apporte sa lumière dans son domaine de compétences et ce autour du même objet de questionnement. Le croisement des données et les interactions entre les différentes disciplines offrent des possibilités de résultats démultipliés, bien plus larges que celles issues de la sectorisation des compétences (Darbellay et Paulsen, 2008). La géomorphologie fait partie des disciplines dont le croisement avec d'autres regards comme l'archéologie, la climatologie, les sciences de l'environnement et les sciences humaines, est vecteur de nombreuses perspectives scientifiques et de nouvelles clés d'interprétation (INRAP, 2009). C'est dans cette dynamique de recherche que s'inscrit ce travail doctoral. Si l'intérêt de la géomorphologie pour l'étude des sites préhistoriques a fait l'objet durant les années 1980 et 1990 de débats parfois animés, comme par exemple au sein du *Rapport préliminaire du Conseil national de la recherche archéologique* d'avril 1996, la discipline est l'un des moyens de compréhension de l'organisation des dépôts quaternaires, et par ce biais, de reconstitution de la genèse de l'environnement physique et du contexte dans lesquels s'inscrivent les occupations humaines, comme l'a pu l'être l'éclairage de l'étude géo-archéologique des grottes de Sterkfontein (Afrique du Sud) pour démêler la complexité stratigraphique entourant le squelette StW 573, dit « Little Foot » (Bruxelles et al., 2014 ; Granger et al., 2015). Les apports de la démarche géomorphologique et de l'ensemble des géosciences au sein des recherches archéologiques sont désormais pleinement intégrés dans les raisonnements paléogéographiques et archéologiques (INRAP, 2009).

L'analyse géomorphologique participe à la définition du contexte physique et des conditions environnementales contemporaines des occupations humaines passées (Bertran, 2004 ; Delannoy et al., 2004, 2018 ; Sadier et al., 2012). A une échelle plus large, celle de la grotte ou du site orné, une approche géomorphologique basée sur des acquisitions topographiques haute- résolution a été développée pour définir la géométrie et la morphologie des

sites archéologiques au moment des périodes de fréquentation, et pour préciser leurs évolutions ultérieures (Sadier et al., 2012). Cette approche a notamment été conduite dans la grotte Chauvet, pour mieux restituer l'architecture et l'environnement spatial des espaces souterrains au moment de leur ornementation (Thibault et al., *soumis*). Plus récemment, grâce au développement de l'approche intégrée des sites archéologiques, le croisement des données géomorphologiques et archéologiques a permis de mettre en évidence la part des actions humaines dans la facture des sites archéologiques : l'analyse géomorphologique à haute- résolution spatiale permet de discerner la part des processus naturels de celle des processus anthropiques et de restituer les gestes humains dans la transformation et l'aménagement des sites alors occupés (Delannoy et al., 2012 ; 2017, 2018 ; Jaillet et Monney, 2018 ; Monney et Jaillet, 2019). Cette approche anthropo-géomorphologique s'attache à préciser les différents facteurs d'origine anthropiques ou naturels, leur imbrication et leurs impacts sur les paysages au cours du temps. Les travaux réalisés sur la grotte Chauvet et sur des sites d'art rupestre Aborigènes de Terre d'Arnhem et du Kimberley (Delannoy et al., 2004 ; Delannoy, 2018) ont démontré l'efficacité de l'approche intégrée. Les dynamiques géomorphologiques, notamment côtières, fluviales ou montagneuses, sont susceptibles de détruire ou recomposer de nombreux éléments archéologiques. Elles peuvent également contribuer à leur conservation comme en Guyane sur le site de la route de Mana (Cornette, 1987) où le niveau archéologique est scellé par d'épais dépôts sédimentaires sableux, qui ont protégé le matériel archéologique des effets des intempéries et marqué également la fin de l'occupation humaine. A l'inverse, la compréhension du fonctionnement des sociétés humaines par la recherche archéologique renseigne sur leur mode d'occupation de l'espace, ainsi que leurs usages des ressources notamment environnementales. La compréhension des activités passées et de leur empreinte spatiale permet de mieux interpréter les données géomorphologiques (morphologies de creusement ou de dépôt) ainsi que les dynamiques passées, récentes et actuelles (temps de latence entre les modalités d'anthropisation et leurs effets dans la facture du relief et/ou des paysages. C'est encore plus le cas pour l'étude du relief et des paysages sur des temporalités récentes car il n'existe actuellement plus, ou presque plus, d'espaces non soumis à l'anthropisation. L'impact du remaniement des éléments naturels par l'homme génère également de nouvelles crises morphogéniques aboutissant à une recomposition multifactorielle des paysages. Ce type de recherche transdisciplinaire aujourd'hui plébiscité dans le monde scientifique, s'inscrit dans le champ des enquêtes paléo-environnementales qui ont contribué à la définition des relations milieu-homme-climat (Bravard et Presteau, 1997 ; Arnaud-Fassetta et Landuré, 1997 ; INRAP, 2009).

Méthodologie.

C'est notamment le cas de la géo-archéologie alluviale où l'évolution de la rivière constitue un des marqueurs pertinents (chronologique et spatial) pour l'étude des sites archéologiques. L'un des objectifs de la recherche géo-archéologique est justement de déterminer l'importance des contraintes naturelles à chaque étape de l'occupation d'un site. Le travail du géomorphologue sur de telles zones vise à caractériser les unités morphologiques et paysagères dans lesquelles s'inscrit un site puisque le potentiel archéologique de ce dernier est fonction des conditions morpho-dynamiques propres à chaque unité : terrasses, plateaux, versants (INRAP, 2009). La géomorphologie, tant dans la compréhension des morphologies et des matériaux au sol que dans la définition des dynamiques morphogéniques passées et actuelles, ne peut faire abstraction des facteurs anthropiques et de leurs impacts. Ce positionnement est valable tout autant dans les travaux actuels en lien avec le changement climatique que dans les recherches visant à restituer les paysages passés avec leur composante anthropique.

Notre travail s'inscrit dans cette philosophie de recherche en essayant de reconstruire les géographies qu'ont connues les populations passées, dans des temps préhistoriques (Paléolithique supérieur) et plus récents. Cette approche est essentielle, notamment sur des sites archéologiques majeurs du Paléolithique supérieur car sur de nombreux sites ornés comme la grotte Chauvet, grotte de Lascaux, Fond de Gaume, Baume Latrone, ou encore Nawarla Gabarnmang et Borologa en Australie, l'Homme semble s'être installé dans un environnement à la facture paysagère remarquable comme l'entrée ou la sortie de gorges pour Chauvet, Lascaux, Baume Latrone, Borologa ; ou encore des caractéristiques paysagères remarquables pour Chauvet (recoupement de méandre du Pont d'Arc), Cosquer (les Calanques), la grotte aux Points (rocher de la cathédrale), ou encore le Mas d'Azil. Aujourd'hui, la facture de ces paysages nous questionne. L'association site archéologique / paysage remarquable a-t-elle un sens au Paléolithique Supérieur ?

Il est difficile de répondre à cette question, de comprendre comment pensaient les sociétés du Paléolithique Supérieur. Il n'existe à ce jour aucune représentation pariétale de cette époque représentant de manière certaine un relief ou un paysage, aussi raisonner à partir des paysages actuels serait faire un actualisme à partir de notre propre culture et sensibilité d'êtres humains du 21^{ème} siècle. Un travail de reconstitution des reliefs et de leur évolution avant, pendant et après les occupations humaines est donc nécessaire pour déterminer l'importance de ces derniers au temps des fréquentations d'un site. A travers cette démarche de contextualisation, nous proposons une méthode pour aborder de manière intégrée non seulement le site en lui-même mais également son environnement physique extérieur.

Le travail de recherche proposé ici a pour objectif de reconstituer, à différentes échelles spatiales, l'environnement physique de trois sites archéologiques : depuis la morphologie interne du site, sa paléogéographie locale et si possible jusqu'aux dynamiques régionales.

Pour atteindre cet objectif, les champs des géosciences (géomorphologie, géochronologie, géophysique...), des sciences de l'environnement (géochimie) et des sciences archéologiques (sédimentologie) ont été mobilisés pour des approches multiméthodes (topographie 3D haute-résolution, datations absolues, tomographie ERT et sédimentologie XRF par exemple). Ces analyses croisées sont ici accompagnées par les outils de modélisation 3D pour tenter de préciser le cadre physique des fréquentations humaines passées.

L'enjeu de ce travail réside dans l'étude des évolutions morphologiques ayant eu lieu sur plusieurs sites ornés avant, pendant et après leur occupation jusqu'à aujourd'hui. Ces transformations, parfois en lien avec des évolutions biologiques, tectoniques et climatiques, ne peuvent être négligées pour contextualiser correctement les recherches menées sur les sites archéologiques. Les reliefs ont notamment pu se transformer sous l'impact des grands cycles climatiques du Quaternaire, générant des évolutions dans les sols, les pentes et les paysages. Raisonner à partir des paysages actuels signifierait alors négliger cette évolution qui est un facteur majeur de compréhension des études archéologiques.

Une approche systémique de l'environnement : considérer l'espace comme un objet complexe, multifactoriel et intégratif.

De très nombreux facteurs influencent l'évolution des morphologies au cours du temps ; ces derniers sont d'origine climatique, biologique, ainsi que sur des périodes plus récentes : anthropique.

L'approche géomorphologique se base sur les informations contenues dans les paysages actuels et doit prendre en compte l'ensemble des différents facteurs ayant une influence sur la facture paysagère. Ce raisonnement est donc nécessairement systémique car les morphologies étudiées sont le résultat d'une imbrication de processus qui ont fini par former les reliefs aujourd'hui sous nos yeux.

La reconstitution de l'environnement physique amène à réinterroger la notion de paysage et de morphologie. Que souhaite-on et que peut-on reconstituer ? La notion de paysage implique une composante topographique, mais également biologique (la végétation), et humaine (l'appropriation d'un espace, en se projetant dans ce dernier, physiquement ou par la pensée). L'approche géomorphologique permet de reconstituer l'évolution des morphologies du relief

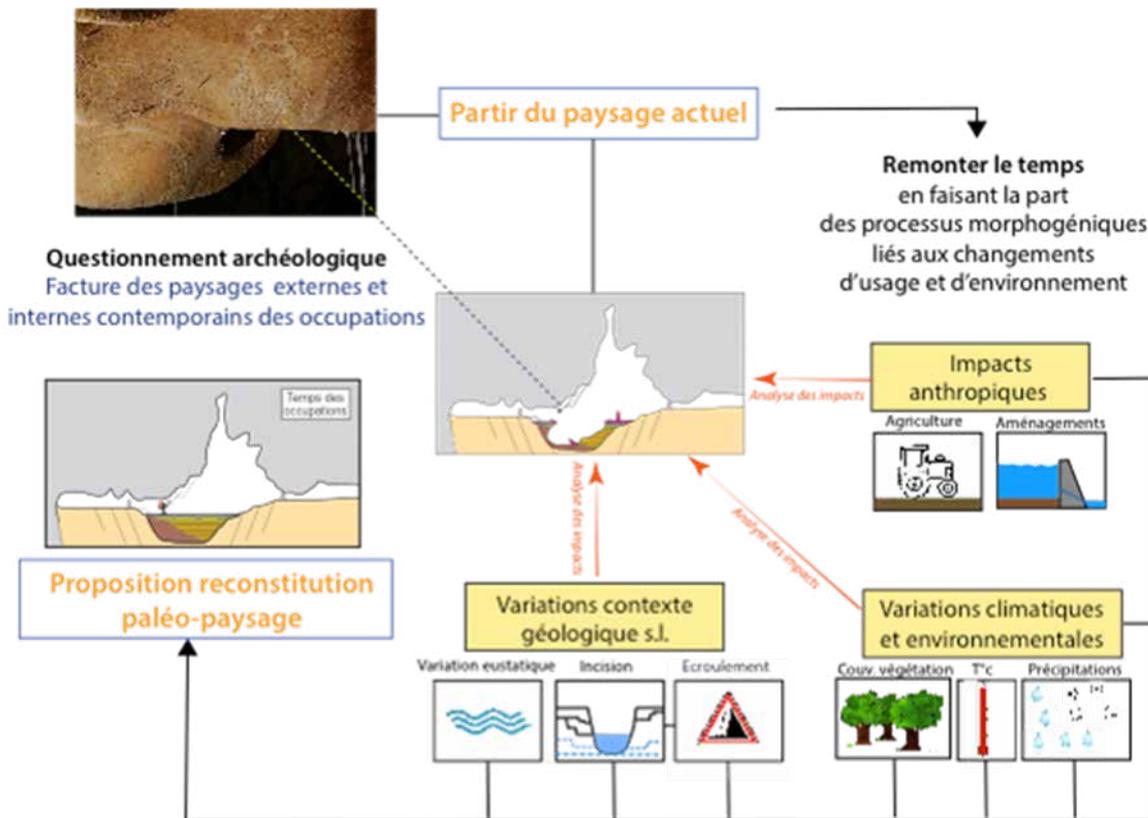


Figure 1 : L'approche géomorphologique permet de distinguer les différents facteurs impactant l'évolution des reliefs et des paysages, et ainsi proposer des reconstitutions de ces derniers. Schéma : Delannoy J-J, non publié.
The geomorphological approach allows to distinguish the impacting parameters and thus to reconstruct some stages of the landscape evolution.

au cours du temps (plateaux, vallées, mouvements de versant, fluctuations sédimentaires des rivières, etc...) mais ne peut pas retrouver l'emplacement exact des arbres par exemple (évolution biologique trop rapide à l'échelle de quelques milliers d'années) pour les replacer dans une reconstitution visuelle. Au sein de ce mémoire, nous emploierons donc préférentiellement le terme de paléogéographies pour décrire notre travail de reconstitution.

**La topographie haute - résolution :
 une démarche à l'interface d'autres champs disciplinaires.**

Le recours au modèle 3D topographique haute - résolution comme support d'analyse géomorphologique permet d'ancrer fortement l'étude géomorphologique dans une démarche intégrée. Le relief, par son histoire et les processus qu'il engendre est une des dimensions majeures de ce qu'on nomme aujourd'hui la zone critique. Lieu d'interactions entre

l'atmosphère, l'hydrosphère et les sols, cette pellicule complexe que l'on peut considérer comme la plus externe de la terre, est au cœur des interactions entre l'homme et son environnement. Cette zone est très impactée par la topographie qui représente physiquement l'interface géomorphologique de processus physiques et chimiques à grande échelle (échanges sol-air-eau, altération des roches, évolution des versants...) La topographie permet également d'intégrer d'autres paramètres plus globaux agissant à l'échelle du système-terre tel le climat. Ce constat est soutenu par l'utilisation de plus en plus généralisée dans d'autres disciplines comme la climatologie et la pédologie, de la topographie comme un paramètre de second ordre. Les récents développements technologiques des SIG et des acquisitions topographiques haute - résolution permettent de replacer la donnée topographique au centre de ces interactions et par cette entrée, de pouvoir interroger dans une approche intégrée les forçages climatiques et anthropiques, à l'échelle régionale d'un bassin versant comme de celle d'un site.

Le modèle 3D n'est alors plus seulement base de réflexion et de cartographie. Par l'intermédiaire de sa gestion dans le cadre des SIG (Systèmes d'Information géographique), il se trouve également en position d'interface pour interroger d'autres paramètres environnementaux à toutes les échelles.

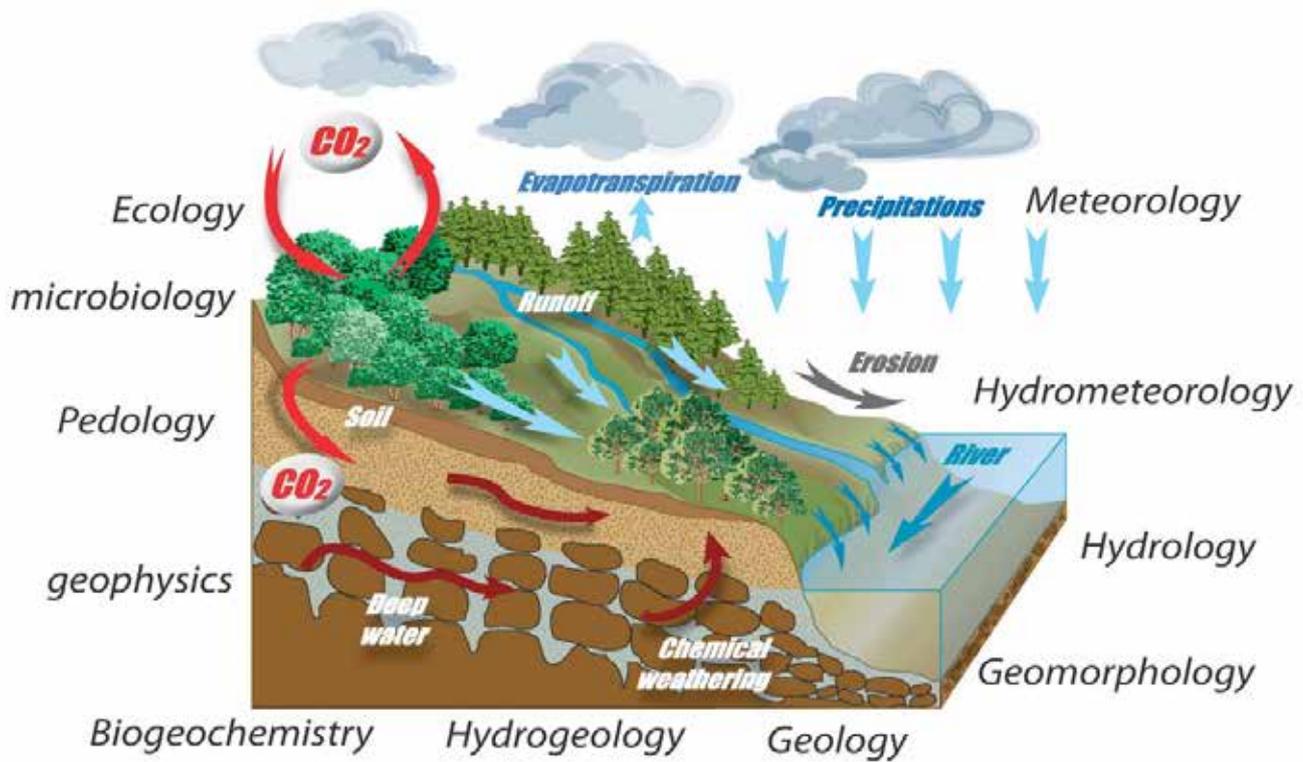


Figure 2: Modèle théorique des processus à l'œuvre au sein de la zone critique, et des approches concernées. La prise en compte des interactions du système terre dans une démarche intégrée place l'évolution du relief au centre de la compréhension de l'évolution des paysages, sur des temporalités courtes (anthropisation, occupation humaine) ainsi que pour des dynamiques à plus long terme (érosion des versants, sédimentation des rivières, variations climatiques régionales). Figure tirée du programme équipement d'excellence (EQUIPEX) CRITEX (2012). *Landscape studies require integrated and topographical based approaches to interpret the earth processes as part of a complex system of short-term interactions into which human beings are one of the main morphogenical factors, as well as long term trajectories into which climate and orogenesis are considered as the main drivers.* Image from : EQUIPEX CRITEX Project (2012).

La 3D comme outil intégratif participant au processus de la construction du savoir.

Dans l'objectif de reconstituer le plus finement possible le contexte physique contemporain des périodes d'occupations, les cartographies géomorphologiques seront donc constamment conduites à l'aide d'un support topographique 3D acquis par nos soins. Ce modèle 3D issu d'une acquisition ciblée sur le terrain constitue également un support d'interface de gestion et de représentation des résultats acquis par d'autres approches méthodologiques (géophysique, bathymétrie différentielle, datations absolues, géochimie et sédimentologie XRF).

La cartographie géomorphologique permet de discerner dans le relief actuel, les processus récents comme les formes héritées d'anciennes dynamiques morphogéniques. L'analyse de l'emboîtement géométrique des morphologies et des formations actuelles et anciennes permet de poser un cadre morphogénique mais également chronologique des événements et processus qui ont impacté la structure du relief étudié. Hormis les événements morphogéniques marquants, il est indéniable que plus on remonte le temps, moins la lecture morphologique

est aisée. Par ailleurs, celle-ci l'est d'autant moins que l'anthropisation est marquée ou que la couverture végétale est dense. D'autres supports d'information morphogénique peuvent être mobilisés pour répondre à cet écueil, notamment les informations enfouies par des formations sédimentaires postérieures qui peuvent être appréhendées par la prospection géophysique. Enfin, il est également possible de s'appuyer sur les réseaux souterrains et les archives naturelles (sédiments lacustres, spéléothèmes) pour reconstituer des informations topographiques ayant disparues en surface (Delannoy, 2018)

Scientificité de la reconstitution visuelle : le poids de l'image.

Au-delà de la reconstitution chronologique du cadre physique des sites archéologiques, l'un des intérêts de la 3D est de restituer ces instants sous forme de visuels. Ces derniers seront alors supports de réflexion pour les chercheurs. Le choix de l'approche visuelle pour la reconstitution n'est pas nouveau, et de nombreux travaux archéologiques y ont recours, sous forme d'esquisses ou de dessins par des

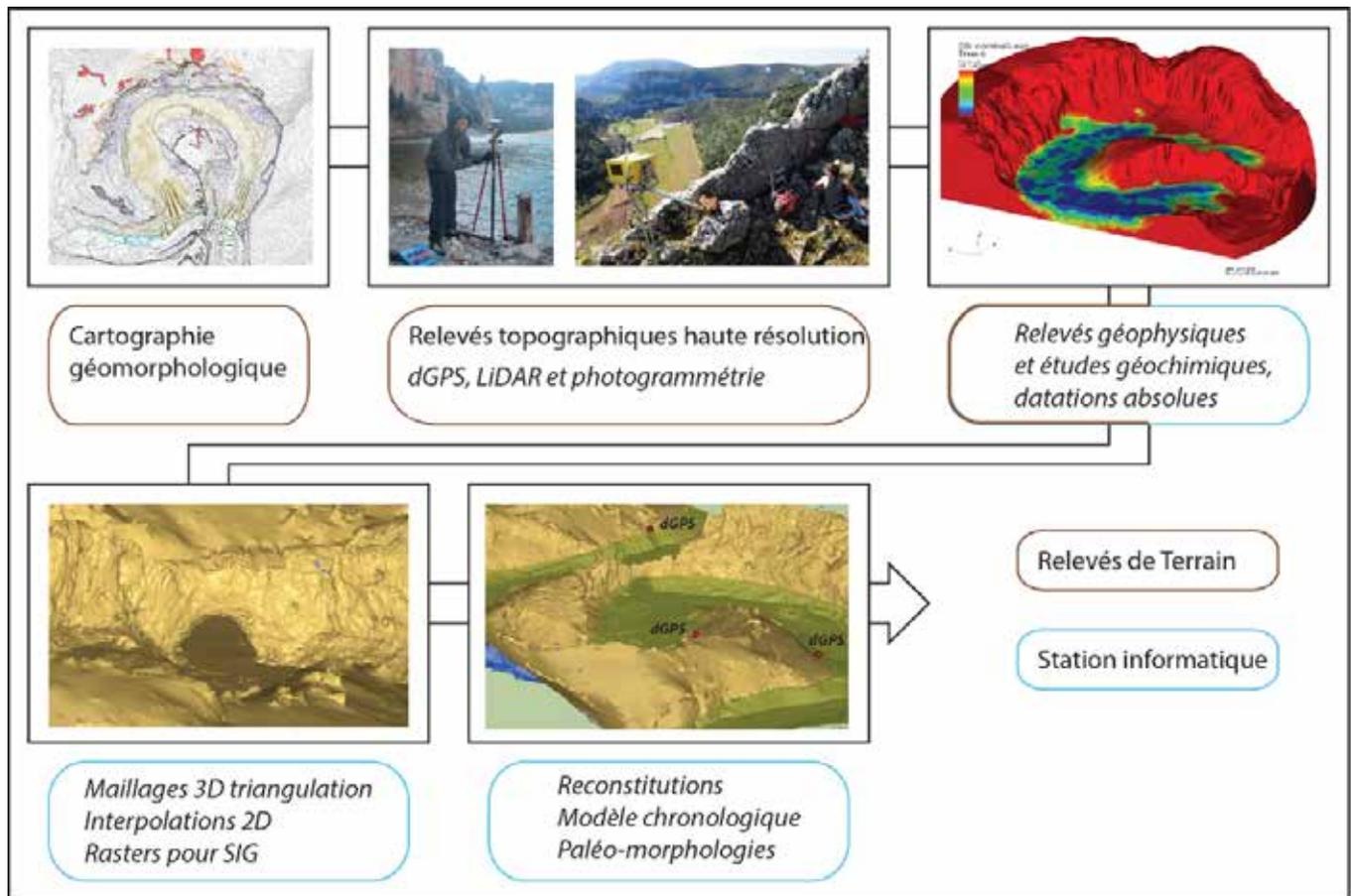


Figure 3 : Démarche méthodologique mise en place au cours de la thèse. Après une phase d'acquisition sur le terrain (données topographiques et caractérisation morphologique), ces informations sont rassemblées au sein d'un même modèle spatial qui permet leur confrontation et leur corrélation. *Methodological process: all the acquired data are converted into spatial coordinates that are spatially linked together on the same 3D model.*

artistes, notamment pour la restitution au grand public dans les musées (Cayla et al., 2012). En revanche, l'approche 3D met ces outils de visualisation à portée du scientifique, qui devient alors lui-même acteur de cette reconstitution) en étant capable de produire une image d'un relief et de la modifier.

Les potentialités de reconstitution qu'offre la 3D doivent être soumises au regard scientifique avant toute diffusion, notamment à cause de la forte prégnance du visuel sur toute autre forme de discours. Pour Baudrillard (1985), la simulation précède le réel, ce qui signifie que l'image que l'on propose comme reconstitution frappe d'abord notre sensibilité avant d'être analysée par notre sens logique, et que dans le cas d'une imitation réaliste, la reconstitution se substitue au réel et la remplace. Dans l'introduction à la Critique de la Raison Pure (1781), Kant attache le visuel au monde du sensible, entité qui précède les constructions de la raison. L'instantanéité du visuel serait ainsi source de danger pour le scientifique qui cherche à poser sur le monde un regard rationnel, car le visuel échapperait plus facilement à une procédure de rationalisation à cause de son caractère sensible.

Or, un acte de reconstitution ou de représentation est un acte pensé, soutenu par une philosophie ou une idée : « Le territoire ne précède plus la carte ni ne lui survit. C'est désormais la carte qui précède le territoire » (Baudrillard, 1985).

Ce constat présente alors quelques dangers pour le scientifique, qui détient une part de responsabilité dans ce qu'il produit vis-à-vis du lecteur/utilisateur de la carte.

L'illustration de la reconstitution de l'ouverture du porche de la grotte Chauvet anté-écoulement (Sadier, 2013) en est un bon exemple. Cette image a circulé au-delà des cercles scientifiques sans l'accompagnement écrit nécessaire à sa lecture. Elle a suscité beaucoup d'intérêt, d'émotions et de contestations. De cette expérience, il ressort l'importance capitale d'évaluer constamment l'incertitude de ses recherches, mais également de trouver des moyens pour les représenter en 3D, au sein même de la reconstitution visuelle (Jaillet et al., 2014) ; (Jaillet et al., 2017).

Ce questionnement est à l'origine même de la représentation des données en recherche et l'intégration visuelle des incertitudes est aujourd'hui entièrement acceptée par l'ensemble

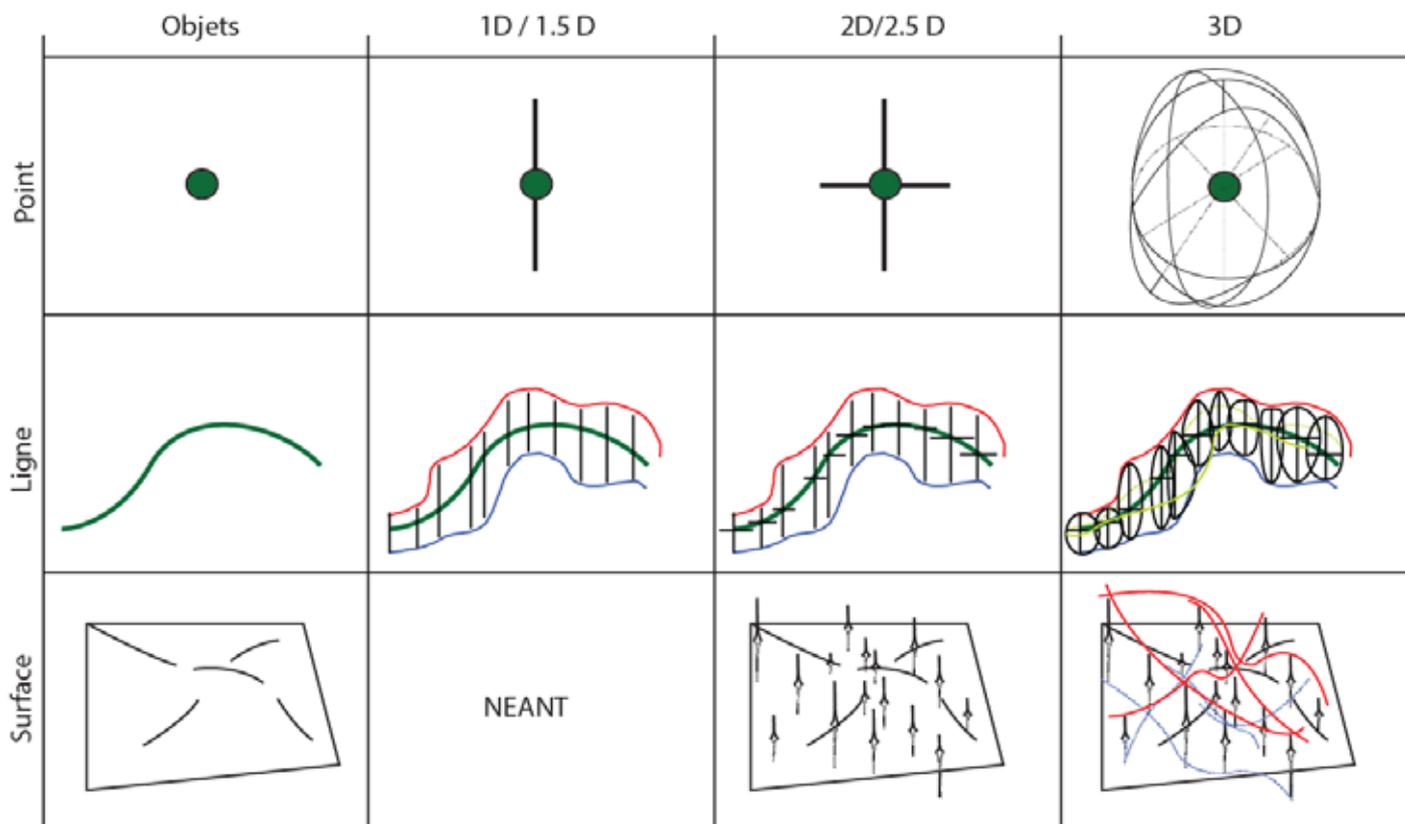


Figure 4 : Représentation 1.5D, 2D, 2.5D, et 3D des incertitudes en science. Cette figure, loin d'être exhaustive, montre que la multiplication des dimensions est complexe à représenter, et les incertitudes associées également. Plus on ajoute de dimensions, plus il y a d'informations, moins la représentation des incertitudes est lisible. *Uncertainty representations in 1.5,2,2.5 and 3 dimensions in science. Those representations are far from being complete but they show that the more dimensions and uncertainty data, the more difficult it is to make uncertainties on graphics readable.*

des communautés scientifiques, notamment en ce qui concerne les objets 1D /1.5D (courbe sur un graphique) à l'aide de barres d'erreur, suivant l'axe des abscisses et des ordonnées. La représentation visuelle de l'incertitude en 2.5D et 3D est néanmoins plus problématique : l'ajout de la 3ème dimension, si elle ne pose pas de problème ponctuellement, et très complexe à visualiser pour une surface où quasiment chaque point de l'espace XY possède également une incertitude Z, dont la représentation empêche la visualisation même du résultat.

Approche intégrée de trois sites ornés.

Dans le cadre de ce travail, trois sites archéologiques ont été investigués par l'approche géomorphologique 3D : le site du Roc-aux-Sorciers (Vienne- France), le site Borologa (Kimberley - Australie) et enfin, le complexe du Cirque d'Estre avec le Pont d'Arc : écrin paysager de la grotte Chauvet (Ardèche-France).

Malgré leurs différences (questionnements scientifiques, contexte environnemental, cadre temporel...), ces objets ont tous en commun d'être : (i) des sites ornés majeurs (abri sous roche ou grotte) localisés dans une vallée encaissée marquée par un parcours sinueux ; (ii) ils se développent à l'aplomb

d'un escarpement rocheux soumis aux effets combinés des processus gravitaires (écroulements) et de sapement des versants ; (iii) l'apport de la géomorphologie permettra de fixer le cadre physique lors des phases d'occupation fixées par les recherches archéologiques. Pour chaque cas, le méandre signe l'entrée ou la sortie de l'encaissement de la rivière dans un canyon

Dans chaque cas, la cartographie géomorphologique et la modélisation 3D constituent des outils et des supports fédérateurs pour l'acquisition des connaissances, l'agrégation des données issues des autres champs disciplinaires et pour la proposition de restitution morphologique à différentes échelles de temps. C'est au terme de cette itération méthodologique qu'une reconstitution visuelle des reliefs avant, pendant ou après les fréquentations humaines pourra être proposée, à des échelles temporelles et spatiales très différentes selon le site étudié : de quelques milliers d'années à l'échelle d'un versant pour le site du Roc-aux- Sorciers, à plusieurs centaines de milliers d'années à l'échelle de tout un bassin versant pour la grotte Chauvet et les gorges de l'Ardèche.



Figure 5 : Sites d'étude abordés : Chauvet- Pont d'Arc (Ardèche) ; Roc- aux- Sorciers (Vienne) ; monolithes de Borolaga (Australie).
The three studied sites: The Pont d'Arc shortcut (Chauvet cave, France), the Roc- aux- Sorciers site (Vienne, France), and the Borolaga monoliths (Kimberley, Australia).

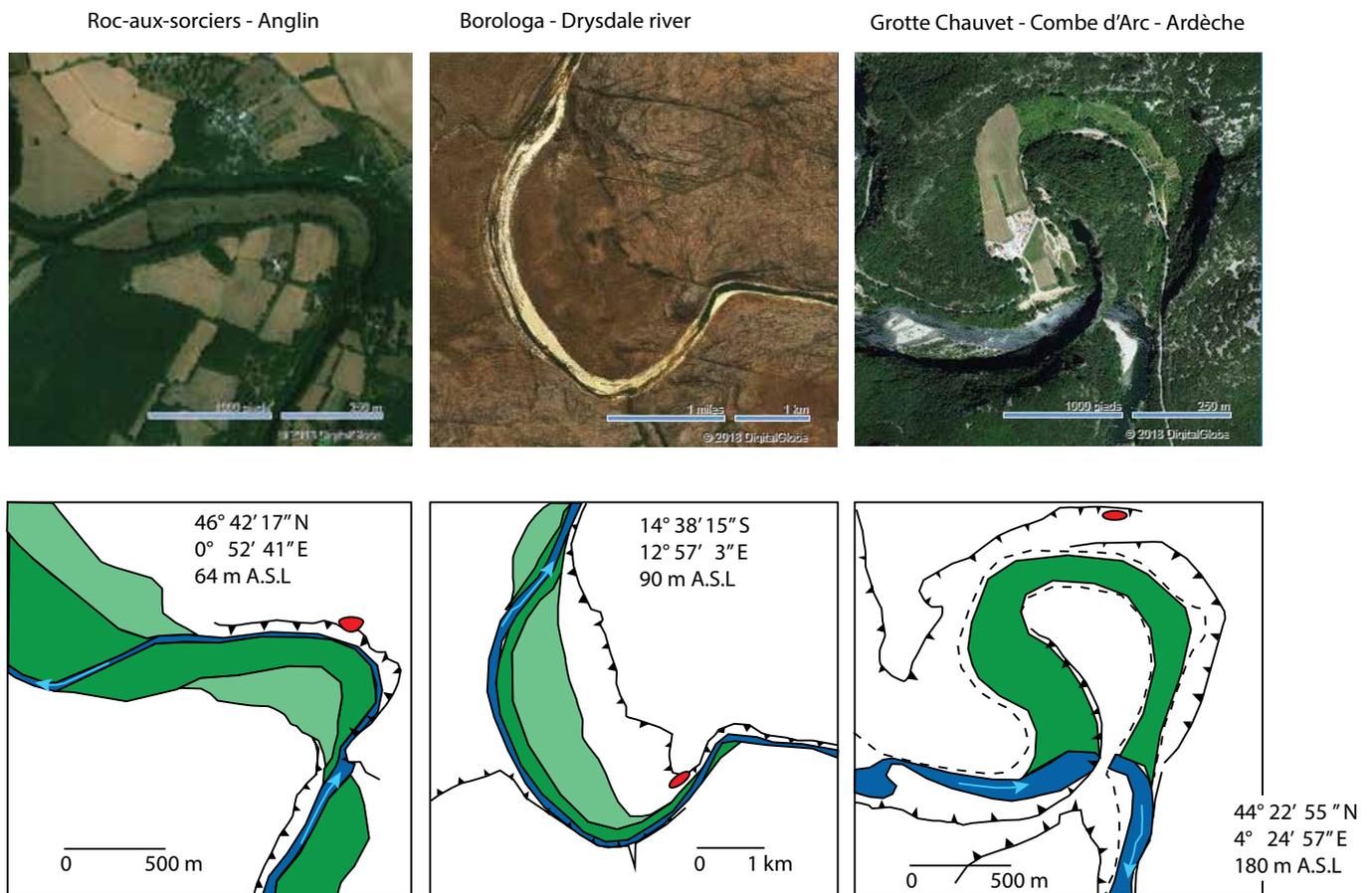


Figure 6 : Présentation du contexte géographique et géomorphologique des trois sites d'étude. Ils sont tous localisés dans une vallée encaissée méandri-forme, soit à l'entrée ou à la sortie d'un méandre.
Topography of the three studied sites. Each of them is located into an ingrown meander, at the entrance or at the end of it.

Le Roc –aux- Sorciers (Anglin, Vienne).

Le site du Roc- aux- Sorciers, localisé en France, dans la région Nouvelle-Aquitaine, se présente sous la forme d'un abri-sous-roche dans une concavité de méandre. Il a révélé des bas-reliefs sculptés dans le calcaire Oxfordien lors de sa découverte en 1927. Ces sculptures sont attribuées au Magdalénien par datation des niveaux archéologiques sous-jacents (à partir de

18 ka cal. BP environ). Une partie de l'abri –sous-roche s'est effondré et a emporté avec lui des zones sculptées, encore visibles sur les blocs effondrés. Le site du Roc- aux- Sorciers a été investigué par l'intermédiaire de fouilles archéologiques (de Saint Mathurin, 1984), d'études sédimentologiques (Bozet et Miskovsky, 2010) et de relevés pariétaux (Pinçon, 1993). Ces derniers ont généré de nombreuses interrogations vis-à-vis des modalités d'occupation de

cet abri-sous-roche. Ce site, actuellement fermé au public, est protégé par des mesures de conservation pour éviter la dégradation des sculptures. L'étude géomorphologique au moyen d'une topographie haute-résolution non-invasive (Laser Scanner 3D LiDAR), avait pour objectif de contextualiser et rediscuter les résultats des anciennes fouilles en tenant compte des dynamiques morphogéniques. L'étude du contexte morphologique du site (abris-sous-roche en pied de parois, effondrement), avait pour objectif de mieux contraindre certaines phases d'occupation, notamment au regard du remplissage sédimentaire du site et de l'effondrement des parois rocheuses.

La reconstitution issue de cette étude est une combinaison de l'approche géomorphologique avec les résultats des fouilles archéologiques antérieures (figure 7). Au-delà d'une simple image, elle transcrit des étapes, des modèles théoriques et un modèle physique sur lequel sont venus se greffer des regards géomorphologiques, archéologiques et sédimentologiques.

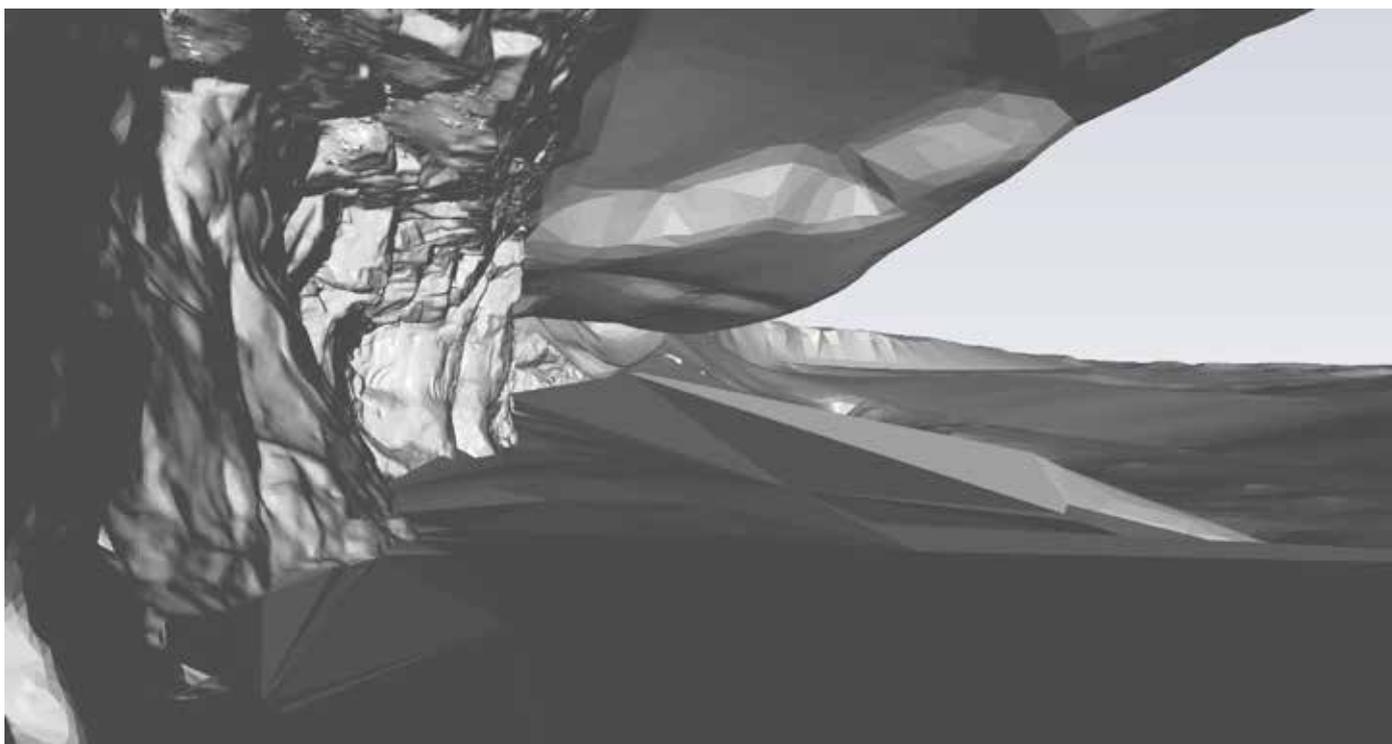


Figure 7 : Reconstitution 3D des paléo-reliefs du Roc-aux-Sorciers au temps des occupations humaines (avant l'effondrement). L'approche géomorphologique 3D, en convoquant les résultats des recherches précédentes, a permis de proposer une reconstitution de la géométrie des sols archéologiques enfouis ainsi qu'un abri-sous-roche beaucoup plus en porte-à-faux (plusieurs mètres) qu'il ne l'est actuellement. *Paleo-landscape reconstitution of the Roc-aux-Sorciers geometry during the pre-rockfall human occupancy. The geometry reconstitution was conducted by a joint geomorphological and LiDAR mapping approach which also reused former scientific works, both sedimentological and archaeological to establish a chronological model as well as a physical one.*

Site Borologa (Drysdale River, Kimberley, Australie).

Le site Borologa, localisé en Australie, a été étudié dans le cadre du programme ARC Kimberley Vision (dirigé par P. Verth). Localisé à la sortie du plateau du Kimberley le long de la Drysdale River, il se matérialise sous forme de grands monolithes de quartzite qui ont été ornés par les communautés passées. L'approche géomorphologique 3D a été conduite en même temps que les fouilles du site Borologa (David et al., 2019) par l'intermédiaire d'un relevé LiDAR haute résolution du site orné (fouilles archéologiques, monolithes) ainsi que de son environnement direct (versant de la Drysdale River) en tentant d'intégrer directement

les problématiques posées par les scientifiques sur le site (fouilles archéologiques, occupation et datation des peintures, anthro-géomorphologie des blocs déplacés par les communautés passées) au sein d'un modèle 3D unique également utilisable pour une approche géomorphologique. Au-delà des cartes topographiques destinées à l'approche anthro-géomorphologique et archéologique (David et al., 2019), nous nous sommes attachés à étudier l'évolution spatiale des monolithes, leur provenance et les déstabilisations mécaniques auxquels ils sont soumis par une approche en géomorphologie dynamique (figure 8). Dans cette optique, nous avons rétro-modélisé le versant et retrouvé les attaches d'origine de certains blocs à l'escarpement.

La reconstitution des grandes phases d'évolution de l'escarpement est l'aboutissement d'une approche géomorphologique conjointement discutée avec les archéologues et les anthropo-géomorphologues. La publication de l'étude archéologique par David et al. (2019) a bénéficié d'un apport cartographique lié à la constitution du modèle 3D. Les propositions de reconstitution de l'évolution du versant ont permis de caler les travaux archéologiques dans une temporalité plus longue, plaçant les études sur les occupations passées, dans un cadre morphogénique plus large : celui du versant et de la rivière.

Chauvet- Pont d'Arc (Ardèche, France).

Localisée en France dans la partie amont des gorges de l'Ardèche, la grotte Chauvet est une des plus vieilles grottes ornées actuellement connues. Les plus vieilles occurrences de son art pariétal ont été datées à environ 37 000 cal. BP (Quilès et al., 2016) et sont dans un état de conservation exceptionnel (Quilès et al., 2016). Les 20 ans de recherche menées dans la cavité ont permis de croiser les regards disciplinaires : l'approche géomorphologique qui a permis de dresser une cartographie complète des sols de la cavité, a mis en avant les dynamiques de remaniement des sols archéologiques par les procédés de soutirage du grand effondrement, ou

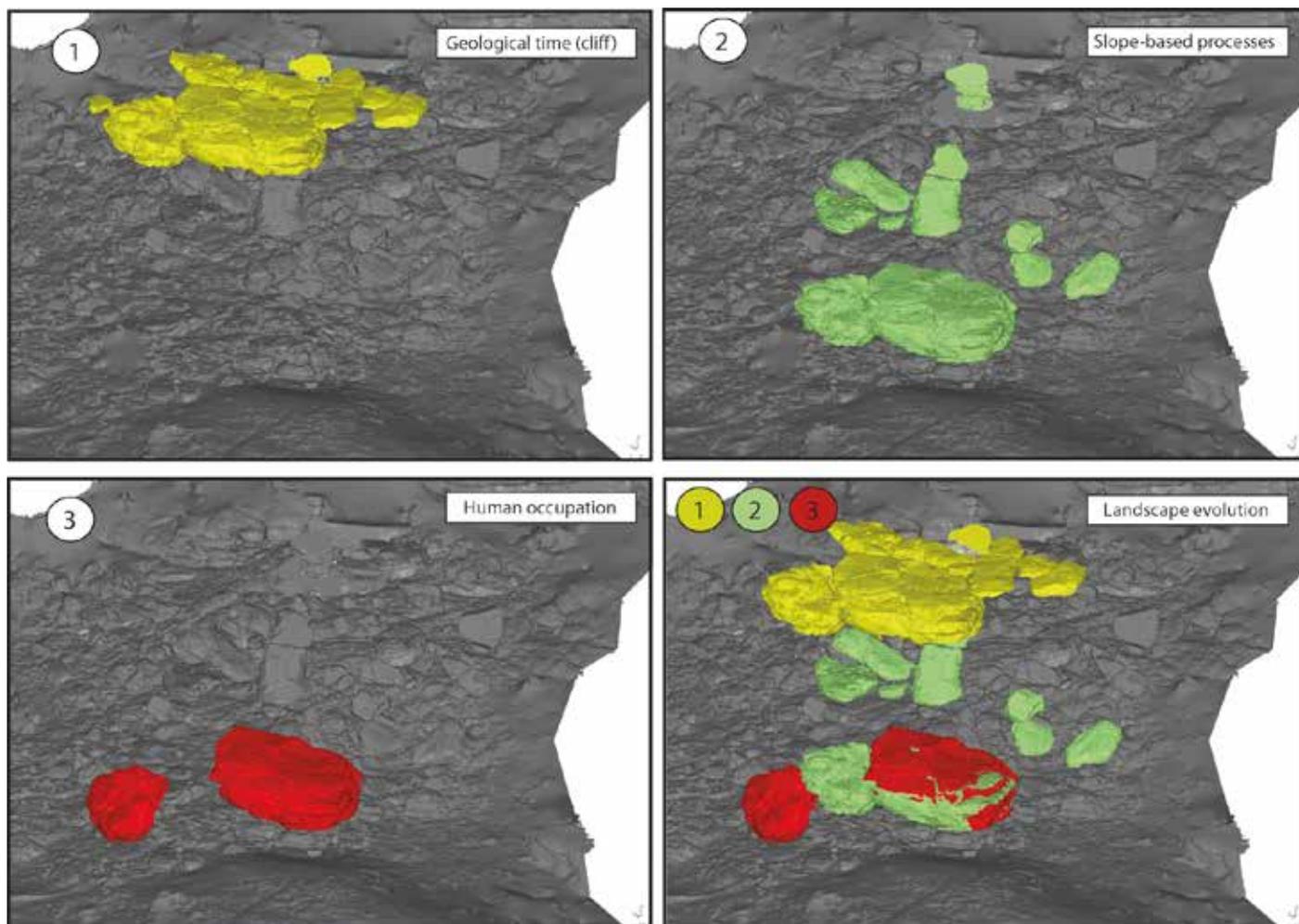


Figure 8 : Evolution du versant Borologa et déplacement de monolithes au cours du temps. Trois grandes phases ont pu être distinguées par la rétro-modélisation 3D des blocs de quartzite. Ce travail a mené à une formalisation des processus géomorphologiques à l'œuvre sur un versant de quartzite. Ces reconstitutions amènent à recontractualiser les fréquentations passées dans un cadre d'évolution ayant des temporalités beaucoup plus longues : l'évolution du versant. *Borologa site study with 3D geomorphology and geological characterization provided new insight on slope-based landscape evolution in a quartzite environment, particularly for the painted rockshelters. That retro-modeling work also provided a long-term context for Aboriginal occupation around the rockshelters.*

encore de fluage pour la « rivière d'os » (Delannoy et Geneste (dir), Atlas Chauvet, à paraître). Un autre exemple éloquent reste celui de la datation de l'effondrement du porche d'entrée de la cavité par isotopes cosmogéniques ^{36}Cl , où Sadier et al. (2012) ont confirmé l'ancienneté des âges radiocarbone utilisés pour dater l'occupation humaine et l'art pariétal. Si la grotte Chauvet fait figure d'exemple en matière d'interdisciplinarité, la contextualisation géomorphologique est malgré tout restée essentiellement confinée à la grotte, de même que les recherches et questionnements archéologiques en lien avec la cavité.

Au sortir de la grotte, on constate que cette dernière s'inscrit dans un paysage très particulier, loin d'être anodin (Monney, 2012). La grotte est située dans les escarpements calcaires de la Combe d'Arc, premier méandre du canyon qui possède également la particularité d'être recoupé au centre de son pédoncule par la rivière. Ce recoupement se manifeste aujourd'hui sous la forme d'une arche calcaire d'environ 30 mètres de commandement au niveau de la voûte : le Pont d'Arc.

Cet exemple est éloquent. Par sa dimension paysagère, le site du Pont d'Arc est aujourd'hui un « hotspot » touristique, et la présence de nombreuses grottes ornées près de l'entrée du canyon a soulevé des interrogations parmi les scientifiques sur le lien potentiel qui pouvait exister entre la présence/ou non d'un site orné et la facture des reliefs et paysages

dans lesquels il s'inscrivait (Monney, 2012). Notre travail s'est principalement axé sur l'environnement extérieur de la cavité, en essayant de reconstituer l'évolution du méandre recoupé au moyen d'une approche multi-méthode basée sur une investigation du relief (géomorphologie 3D et géophysique), couplée à un cadrage chronologique (archives sédimentaires et datations absolues). Le site Chauvet Pont d'Arc a mobilisé l'essentiel du temps de recherche et débouche sur la datation du stade final du recoupement. L'évolution du relief peut alors être discutée non plus en tant que telle, mais aussi du point de vue des occupants de la grotte Chauvet.

Ces 3 exemples de reconstitutions sont l'aboutissement visuel de l'étude des 3 sites ornés sous l'approche géomorphologique couplée aux outils cartographiques 3D. Cette approche a permis de (re)créer des liens spatiaux entre les différents objets investigués. En facilitant la mise en relation des différents résultats au sein d'un même modèle de réflexion, il est alors possible de mieux contraindre la construction du modèle chronologique relatif, qui permet alors d'apporter des informations pertinentes pour discuter de résultats de datations absolues (Sadier et al., 2012 ; Bruxelles et al., 2014 ; Granger et al., 2015). En replaçant des informations ponctuelles dans leur contexte spatial, l'approche géomorphologique 3D permet également d'intégrer plus facilement des résultats issus de recherches précédentes (notamment des datations), qui peuvent être rediscutés à la lumière des contraintes d'emboîtement.

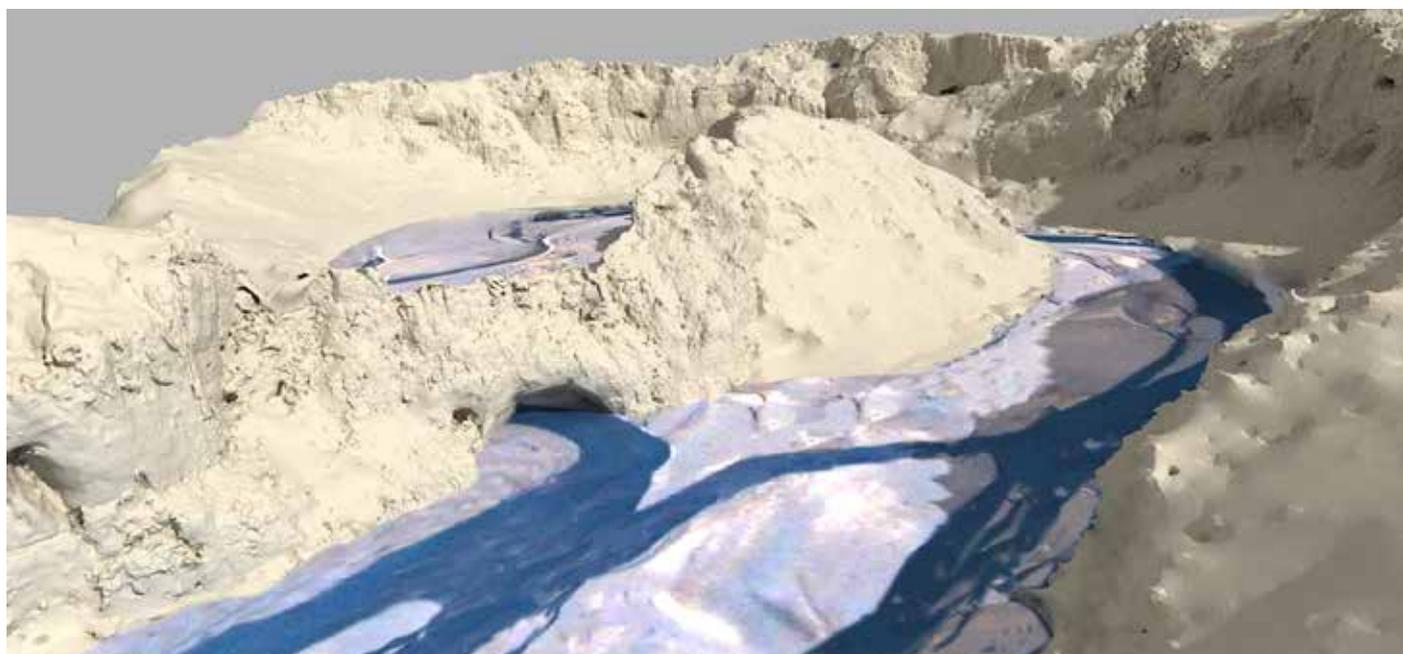


Figure 9 : Reconstitution des paléo-morphologies fluviales lors du stade final du recoupement du méandre de la Combe d'Arc, désormais abandonné. La reconstitution des morphologies disparues ou enfouies au moyen d'investigations géophysiques et topographiques haute-résolution a débouché sur un cadrage précis de l'évolution du méandre, ayant permis de dater avec précision le stade final du recoupement. *Paleo-landscape reconstitution of the Combe d'Arc meander, before the shortcut. The modeling of former meander morphologies using high- resolution topography and geophysical investigations provided good relative constraints that led to the dating of the meander shortcut final stage.*

Plan de thèse.

Inventaire des outils et des méthodes employées.

Dans le cas d'une étude intégrée de l'évolution du relief, le recours à la modélisation 3D permet également de fédérer différentes approches techniques utilisées pour répondre aux questionnements géoscientifiques. Il offre un support, de réflexion, de construction, mais également d'interaction des différents résultats au sein d'un même espace. Ces derniers sont alors analysés ensemble. En ce sens, les outils 3D favorisent l'approche intégrée nécessaire à bien des recherches sur des systèmes complexes.

Dans cette perspective, différentes méthodes ont été employées sur les sites étudiés, notamment sur le site Chauvet Pont d'Arc.

Afin de mieux comprendre les dynamiques des rivières et des versants dans lesquels s'inscrivent les sites d'étude, des prospections de terrain ont systématiquement été renforcées par une acquisition topographique LiDAR haute-résolution (Jaillet et al., 2017) débouchant sur une cartographie géomorphologique (Tricart, 1972 ; Joly, 1974) des sites et de leurs environs.

Une partie des informations géomorphologiques étant stockée dans les sédiments, l'investigation des cavités et des sous-sols par le recours aux méthodes de topographie spéléologique et de prospections géophysiques (tomographie de la résistivité électrique - ERT) a permis d'imager les sous-sols du méandre abandonné de la Combe d'Arc.

L'étude d'archives environnementales, révélatrices des conditions environnementales et climatiques antérieures, a également pu être réalisée par l'intermédiaire d'analyses géochimiques d'XRF et de fluorescence sur des sédiments (dépôts fluviaux et concrétions).

Enfin, les hypothèses que nous avons formulées suite à la construction des modèles d'évolution relatifs ont été confrontées aux datations absolues effectuées sur des sédiments (ESR) et sur des concrétions (U/Th).

Ces résultats ont ensuite été comparés avec des séquences environnementales et climatiques connues (palynologie, concrétions et carottes de glace) pour mieux contextualiser les résultats et les replacer dans une approche plus régionale.

Chaque méthode employée sera abordée en détail au cours de cette recherche (figure 10).

Organisation.

Ce travail s'organise en huit chapitres qui traitent du travail de reconstitution par l'approche géomorphologique 3D sur les 3 sites d'étude. Tous sont organisés autour d'une dialectique problématique / méthodologie. La première partie pose les bases techniques de l'approche cartographique 3D sur les sites ornés. Elle se compose des deux premiers chapitres qui sont consacrés au site du Roc-aux-Sorciers (Vienne, France) et aux monolithes du site Borologa (Kimberley, Australie).

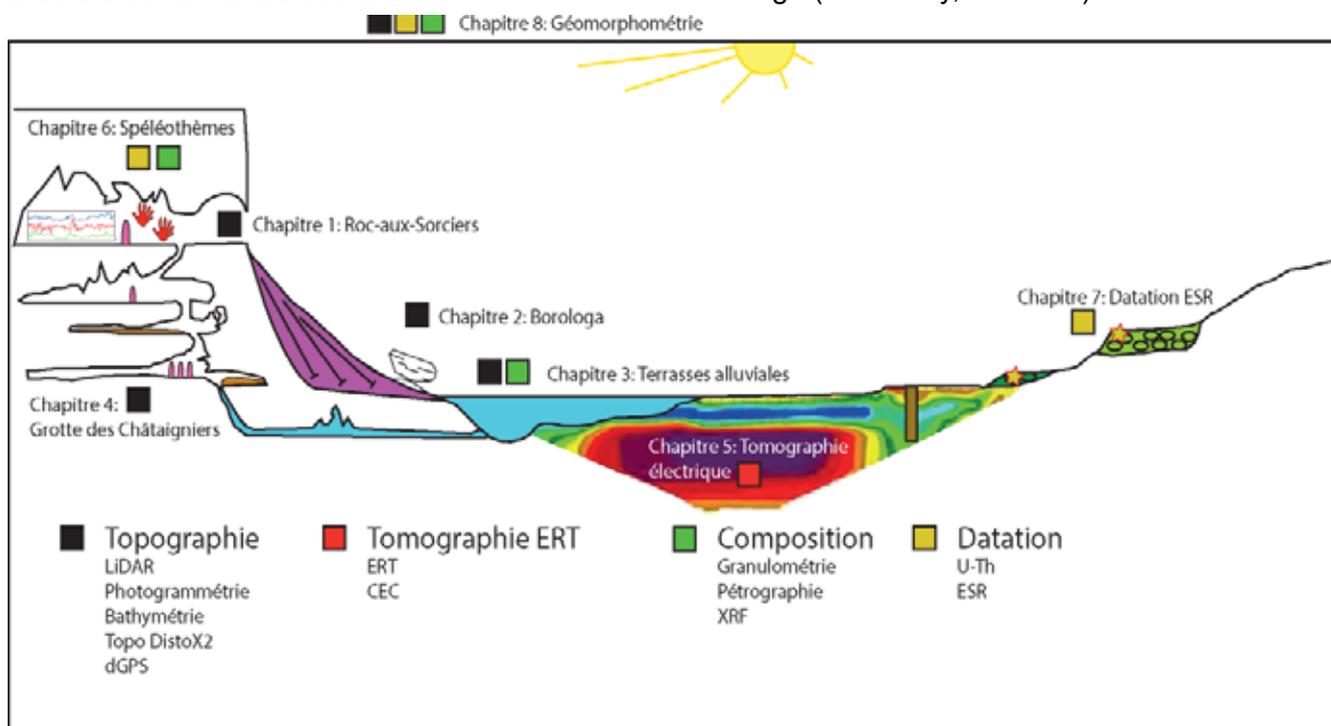


Figure 10: Mobilisation des méthodes et outils employés sur chaque site étudié. L'élargissement des questionnements et des zones de recherche implique des processus de plus en plus complexes et la multiplication des différentes approches. Chaque étape méthodologique reste réalisée sous le contrôle d'une construction géométrique. *The widenings of the research fields require different kinds of tools and approaches. But in the end the results are all ruled by the topographical construction.*

Le premier site investigué met en avant l'intérêt de la 3D associée à la géomorphologie comme outil permettant une prise de recul sur un site aux travaux archéologiques déjà entamés, pour les réinterroger, les remettre en question, ou enrichir les connaissances sur le site par une nouvelle approche des phénomènes à l'œuvre sur les lieux.

Le second chapitre aborde l'étude du versant du site archéologique Borologa dans une démarche géomorphologique intégrée, tant au niveau des questionnements archéologiques, des échelles de travail, que de l'inclusion de résultats et de réflexions issus de différentes méthodes au sein d'un même outil spatial.

Les parties suivantes (2 et 3) déclinent ensuite ces protocoles d'application de la géomorphologie 3D sur le site Chauvet-Pont d'Arc.

Six chapitres (de 3 à 8) illustrent différents questionnements et approches méthodologiques sur le même site d'étude. La partie 2 aborde les relations d'emboîtement spatiales des morphologies du méandre de la Combe d'Arc par l'intermédiaire de la cartographie géomorphologique 3D du système fluvial de l'Ardèche (chapitre 3) ainsi qu'une étude géomorphologique de la principale cavité de basse altitude du méandre : la grotte des Châtaigniers (chapitre 4). Enfin la prospection géophysique clôture la partie 2 avec l'analyse des structures du sous-sol du méandre abandonné (chapitre 5). La fusion de ces approches permet d'établir un modèle d'emboîtement relatif des formes.

Dans une troisième partie, ces résultats sont discutés dans une temporalité absolue à la suite de deux campagnes de datations qui permettent finalement de replacer le recoupement de méandre et la genèse de l'arche dans une chronologie absolue : Le chapitre 6 se base sur l'étude des concrétions de la grotte des Châtaigniers avec la méthode U/Th, tandis que le chapitre 7 traite des résultats obtenus sur les terrasses alluviales de l'Ardèche avec la datation ESR sur quartz (chapitre 7). Enfin, le dernier chapitre (8) constitue une ouverture sur l'utilisation des reconstitutions 3D une fois qu'elles sont contraintes dans une chronologie absolue. Les reconstitutions 3D issues de ces travaux sont analysées et comparées entre elles, ainsi qu'au regard des évolutions climatiques régionales.

PARTIE I

GEOMORPHOLOGIE 3D

ETUDE MULTISCALEAIRE D'UN SITE ARCHEOLOGIQUE DANS SON ENVIRONNEMENT PHYSIQUE.

La première partie de ce travail de thèse a vocation méthodologique. L'exposition des protocoles d'acquisition topographique sur le terrain, des procédés d'assemblage et de construction des modèles débouche sur des représentations 3D des objets investis de questionnements scientifiques.

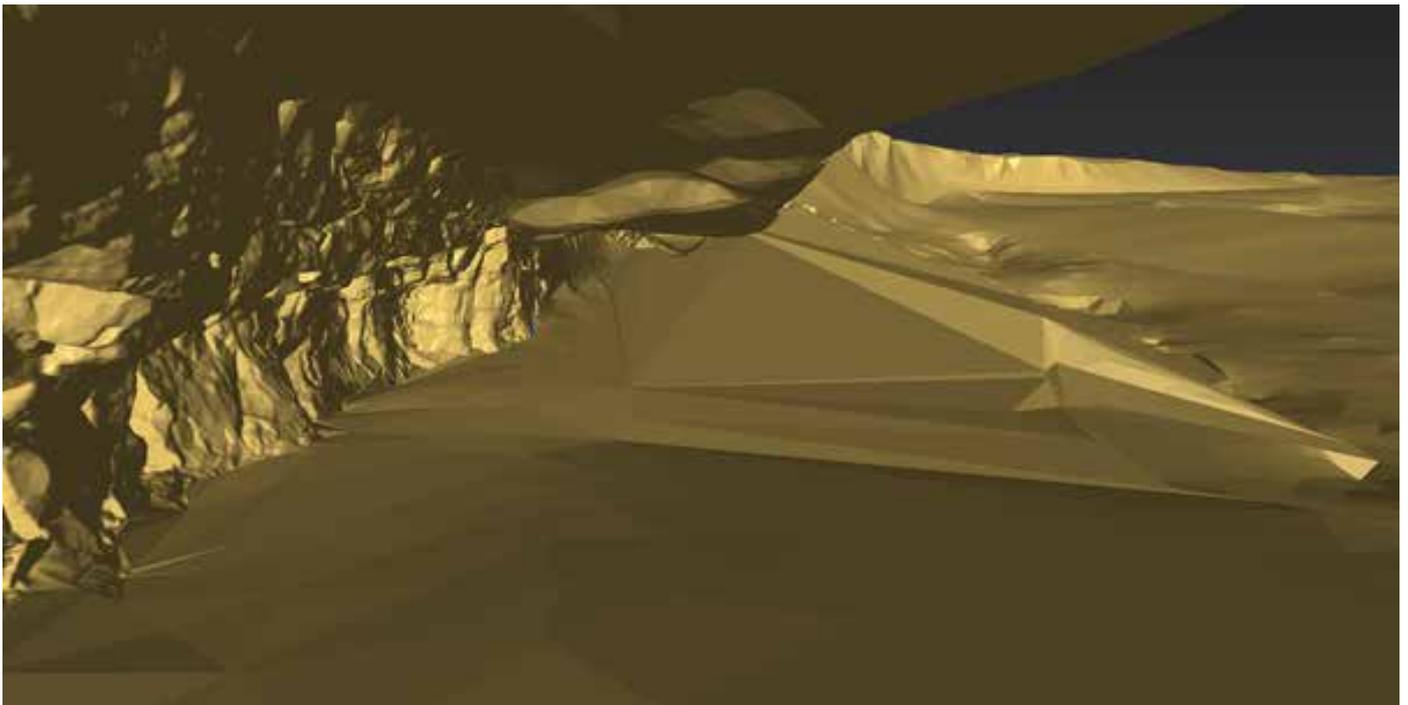


Figure 11 : Modèle 3D du site du Roc-aux-Sorciers, Anglin, France. Une vue possible sur la topographie en amont de la vallée de l'Anglin à partir de la reconstitution théorique du niveau d'occupation Magdalénien moyen du site. Les travaux de reconstitution proposés au cours de ce travail de thèse sont basés sur des acquisitions 3D des sites archéologiques et de leur environnement physique direct. L'approche géomorphologique a été pensée dès le départ avec les travaux archéologiques pour concevoir un modèle 3D intégré, répondant à plusieurs questionnements disciplinaires. *3D model of the Roc-aux-Sorciers site (Anglin, France). This picture depicts a possible “topographical view” of the Anglin valley from the archeological site, during the Mid Magdalenien occupancy. Those theoretical reconstructions presented in this work are based on 3D topography acquisition of the site direct physical environment, in which other data such as previous archeological works are merged and interrogated in order to shape a coherent paleo-landscape proposal.*

CHAPITRE 1

MODELISER L'ENVIRONNEMENT AUTOUR D'UN SITE ARCHEOLOGIQUE : L'EXEMPLE DU ROC-AUX-SORCIERS.

Ce premier chapitre, à vocation méthodologique, ouvre le mémoire de thèse par l'exemple des travaux réalisés au Roc-aux-Sorciers (vallée de l'Anglin – Vienne). L'étude de ce site expose la mise en place du protocole d'investigation géomorphologique par l'acquisition et le traitement de données topographiques 3D.

1. Le Roc-aux-Sorciers : un site anciennement fouillé, re-questionné par la 3D.

Le Roc-aux-Sorciers est un site archéologique situé dans le département de la Vienne, au nord du plateau granitique de La Marche dans le Massif Central. C'est un site de premier ordre par la qualité et la monumentalité des sculptures pariétales qui ornent sur près de 50 m de longueur, la base d'un abri-sous-roche en rive droite de l'Anglin. Situé à une dizaine de mètres en contre-haut du cours actuel de la rivière, il comprend aujourd'hui deux ensembles distincts liés aux étapes de fouilles successives ayant dégagé la Cave Taillebourg et l'Abri Bourdois (Pinçon, 2009).

Le site est situé en rive droite de la rivière Anglin juste avant sa confluence avec la Gartempe (figure 12). Le dernier tronçon de la vallée de l'Anglin est marqué par une succession de méandres encaissés. C'est dans la concavité du dernier méandre que se situe le site. Il est actuellement perché à environ 7 mètres au-dessus du niveau de la rivière. Il se caractérise par une morphologie en abri-sous-roche à la base d'un escarpement rocheux d'une vingtaine de mètres de commandement. L'environnement géologique correspond aux calcaires de l'Oxfordien (Jurassique).

Le site du Roc-aux-Sorciers est unique par l'ampleur et la qualité de son art pariétal sculpté, gravé et peint. Il est associé à une occupation humaine comprise entre 18 000 et 16 000 ans cal. BP (Bozet et Miskovsky, 2010). La richesse des données archéologiques issues des fouilles en fait, par ailleurs une référence pour le Magdalénien moyen. Il constitue un des sites régionaux exceptionnels rapportés à cette période (Airvaux et al., 2001). Ce dernier été découvert à la suite de fouilles archéologiques qui ont permis de dégager un abri sous roche contenant des bas-reliefs sculptés en pied de paroi et jusqu'alors enfouis sous des sédiments. Découvert en 1927 par Lucien Rousseau (Rousseau, 1933), le Roc-aux-Sorciers a, dans un premier temps, fait l'objet de fouilles qui ont attesté l'existence des fréquentations magdaléniennes. En 1948, Suzanne de Saint-Mathurin et Dorothy Garrod contextualisent cette occupation dans son environnement archéologique pariétal en découvrant les sculptures. La portée de ces travaux a conduit à proposer le site à l'inscription au titre des Monuments historiques, laquelle a été obtenue en 1955. Après le décès de Suzanne de Saint Mathurin, de nouvelles recherches approfondies sont menées par G. Pinçon et son équipe dans le cadre d'opérations programmées (RAR : relevés d'art rupestre) du Ministère de la Culture et de la Communication et ce, dès 1991.

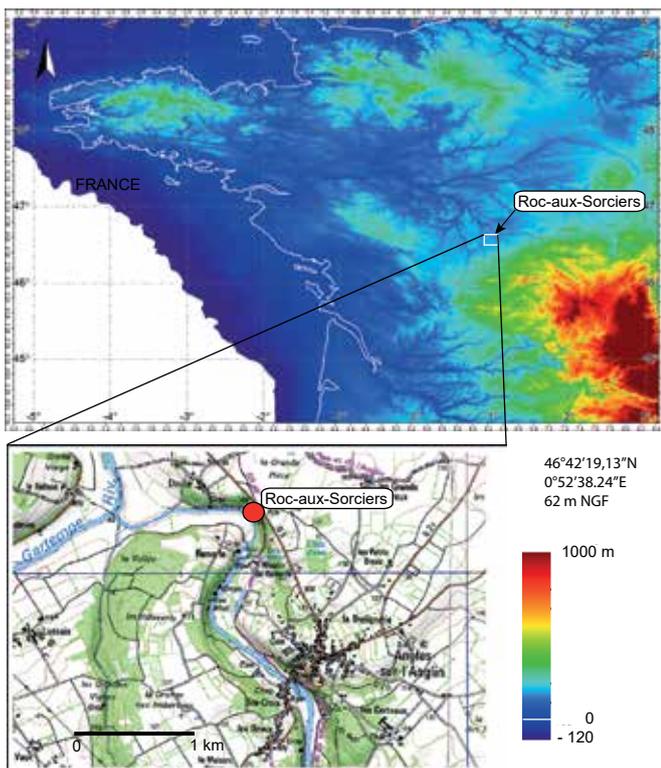


Figure 12 : Localisation du site du Roc-aux-Sorciers. L'abri -sous- roche est localisé dans le dernier coude de l'Anglin, qui conflue avec la Gartempe plus au nord. *Location map of the Roc-aux-Sorciers site, which is located in the last meander concavity of the Anglin river. The Anglin river flows into the Gartempe river, 1 km away from the Roc-aux-Sorciers site.*

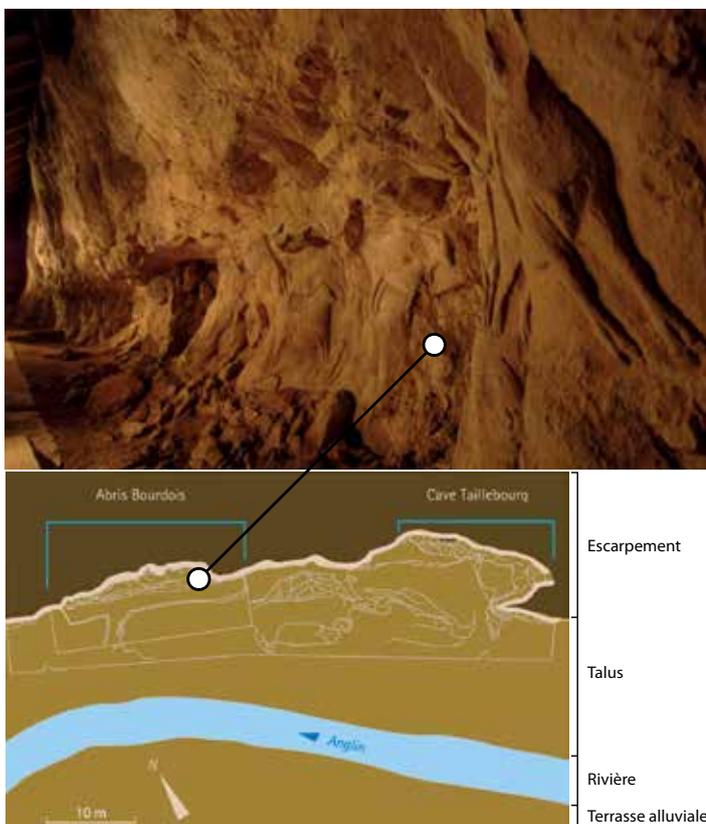


Figure 13 : La frise sculptée du Roc-aux-Sorciers : une œuvre de sculpture magdalénienne unique. Ces sculptures sont dans la partie aval du site archéologique, dans l'Abri Bourdois et distinguent ce site des autres par l'unicité de telles œuvres d'art : sculptures marquant profondément la pierre et d'une grande finesse. Ces dernières ont été très bien conservées, longtemps enfouies et protégées par les sédiments. (Photo : Ph. Plailly) Topographie : Ph. Conte, Gulliver ; Centre d'interprétation du Roc-aux-Sorciers. *The Roc-aux-Sorciers parietal sculptures made by the Magdalenian people. Those sculptures, discovered at the downstream part of the site, have been very well preserved because they were buried into sediments that protected them. (Photograph : Ph. Plailly. Topographie: Ph. Conte, Gulliver; Centre d'interprétation du Roc-aux-Sorciers).*

1.1 Contexte de recherche.

Ce lieu d'exception a fait prioritairement l'objet de recherches sur les sculptures pariétales. Les données archéologiques issues des fouilles ont permis de contextualiser le site dans son environnement physique et culturel sur la base des analyses palynologiques et sédimentologiques du remplissage ayant progressivement comblé l'abri-sous-roche (de Saint Mathurin, 1984 ; Pinçon, 1993 ; Fuentes, 2009 ; Bourdier, 2012). Néanmoins, une étude géomorphologique restait à mener pour définir les dynamiques de mise en place initiale du

site et de son évolution postérieure (comme par exemple l'écroulement de pans d'escarpement, remplissage clastique). Notre travail s'inscrit dans cette perspective avec l'objectif de définir la part des actions anthropiques et celle des processus naturels qui ont façonné l'abri-sous-roche du Roc-aux-Sorciers. Notre démarche se base également sur les observations déjà réalisées par l'équipe de recherche archéologique. Cette étape de contextualisation géomorphologique approfondie apparaît nécessaire avant une éventuelle reprise des fouilles sur le site car elle permettra de contextualiser d'éventuels prélèvements, tout en fournissant un état initial topographique pour la conservation.

Lors de la découverte du site en 1927 par Lucien Rousseau, l'abri- sous- roche dans lequel s'inscrit le

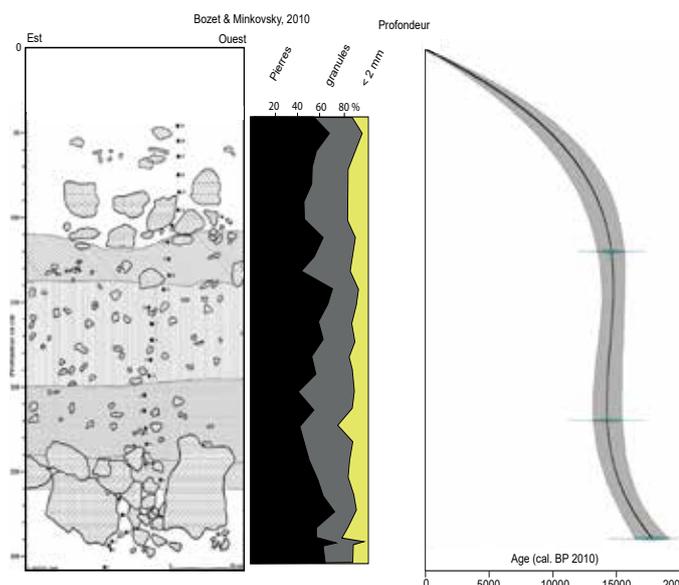


Figure 14 : Etude sédimentaire réalisée dans les remplissages de l'Abri Bourdois. (Bozet et Miskovsky ,2010). La composition de ce dernier montre des blocs pluridécimétriques à la base de la coupe (-230/- 310 cm), recouverts jusqu'au sommet par des groizes de gélifraction. Modèle d'âge recompilé avec clam 2.2 (Blaauw, 2010). Etant donné l'ancienneté des datations radiocarbones (Vogel et Waterbolck,1963) et les cassures apparaissant dans le modèle d'âge, la chronologie nécessiterait une nouvelle campagne de datations ^{14}C avec les nouvelles méthodes MC-ICPMS ; ce qui est également suggéré par Bourdier et al. (2017). *Sedimentary study of the Abri Bourdois deposits (Bozet et Miskovsky, 2010). The study shows the bottom decimetric blocks. Age-model built using clam package 2.2 (Blaauw, 2010). Considering the ancient radiocarbon dating method (Vogel et Waterbolck, 1963), the results are to be considered with caution.*

site archéologique n'était pour ainsi dire pas visible. Il était quasi-totalement rempli par des formations sédimentaires post-occupations. La pile sédimentaire montait jusqu'au plafond de l'abri dans la partie aval, et seul un petit espace permettait d'accéder au site (cf. figure 13). Plusieurs mètres de sédiments comblaient alors le Roc-aux-Sorciers ; le sommet du site n'était pas toujours visible. À la suite des fouilles archéologiques, le site est scindé en deux ensembles distincts : « Cave Taillebourg » en amont et « l'Abri Bourdois » en aval (figure 13). La morphologie de la « Cave Taillebourg » fait penser à une ancienne cavité au pied de l'escarpement rocheux. Elle présente des traces de ruissellement de surface issus de l'escarpement rocheux (Lorenz et Gely, 2010), ainsi que des marques de gélifraction. L'« Abri Bourdois » se présente en un long encorbellement de pied de paroi (Guillien et de Saint Mathurin, 1976).

Plusieurs études se sont succédées sur le site du Roc-aux-Sorciers, principalement au niveau de la frise sculptée de l'Abri Bourdois (Bourdier, 2010). L'acquisition de modèles 3D sur différents sites a permis de comparer les sculptures et gravures pariétales présentes dans différents contextes espacés de centaines de kilomètres. Cette analyse a dégagé des tendances culturelles à l'échelle régionale (Pinçon, 2008 ; Bourdier, 2010). Les fouilles archéologiques ont également fait l'objet de campagnes de datation radiocarbone ayant donné des âges entre 16 000 et 18 000 ans cal. BP (Bozet et Miskovsky, 2010). Bien que cette dernière étude n'offre pas une chronologie haute résolution, les résultats ancrent résolument l'occupation humaine dans le Magdalénien moyen, ce qui constituera également un argumentaire pour la reconstitution des événements morphologiques ayant pu avoir lieu sur le site avant, pendant et après les occupations humaines.

Ce remplissage sédimentaire est celui qui recouvrait les sculptures avant les fouilles archéologiques. Il fait donc partie des éléments à contextualiser en le mettant en lien avec les séquences d'occupation et l'environnement autour du site. Par son emplacement en pied de paroi et dans la concavité de méandre, ce site a été soumis à de nombreux processus morphogéniques dont il reste à définir la part respective et à préciser la chronologie. Pour répondre à ces interrogations, une analyse géomorphologique *via* un relevé cartographique 3D à haute résolution du site a été réalisée à l'aide du MNT 5m de la BDAlti RGE de l'IGN.

Cette acquisition topographique 3D n'est pas la première sur le site du Roc-aux-Sorciers. Un premier relevé a été initié en 1999 sur la frise sculptée de la Cave Taillebourg et enrichi par la suite pour travailler plus spécifiquement sur l'ornementation pariétale. Le relevé réalisé dans le cadre de notre recherche doctorale vise un autre objectif : celui de travailler à l'échelle de l'ensemble du site dans son contexte géographique (escarpement rocheux, versant et terrasses alluviales de l'Anglin). Une nouvelle acquisition par LiDAR terrestre a été menée en 2018 : c'est sur ce modèle que sera étudié l'environnement

morphologique du site orné et l'analyse de l'emboîtement des dépôts et des morphologies d'écroulement et des formations alluviales.

L'étude géomorphologique réalisée sur ce site s'inscrit dans la lignée de celles menées sur la grotte Chauvet (Delannoy, 2018), du Pont d'Arc (Génuite et al., 2018), de la grotte aux Points (Monney, 2018) et sur les sites d'art rupestre aborigènes de Terre d'Arnhem et du Kimberley en Australie (David et al., 2017 ; Delannoy et al., 2017 ; David et al., 2019), visant à intégrer l'espace extérieur du site comme partie intégrante de ce dernier. Dans le cadre de ce travail, nous proposons d'étudier le Roc-aux-Sorciers par une approche géomorphologique centrée sur l'utilisation de la topographie 3D. L'objectif est ici d'étudier le site dans son ensemble (abri- sous-roche, escarpements, talus, rivière), afin de donner un contexte spatial plus large aux travaux archéologiques engagés, pour éventuellement les mettre en lien à travers l'utilisation des outils topographiques haute résolution. L'acquisition topographique réalisée en 2018 et son traitement 3D a permis d'obtenir un visuel du site dans sa globalité, ce qui n'était jusqu'alors pas possible à cause de l'importante végétation et des infrastructures de protection. Ces dernières créent un réel écran qui a pour effet d'isoler le site de son environnement (escarpement et rivière). Le relevé topographique 3D haute résolution a donc été réalisé sur le site archéologique en combinant des acquisitions à l'intérieur des enceintes de protection, et à l'extérieur de ces dernières ; ceci pour pouvoir disposer du meilleur visuel possible de la morphologie du site. Il est important de signaler que la topographie actuelle scannée est celle de la fin des fouilles archéologiques qui ont dégagé le pied de l'escarpement.

L'étude géomorphologique du site passe néanmoins par une première phase d'observations sur le terrain, notamment de l'environnement direct du site archéologique. Les prospections réalisées sur le terrain ont notamment porté sur la caractérisation géométrique des terrasses alluviales, afin de mieux contraindre l'étude préalable menée par Huguet et Giret en 2013. Les informations susceptibles d'être retirées de l'analyse des terrasses sont cependant à manipuler avec précaution tant leur remaniement anthropique semble important. L'homme a en effet donné une vocation agricole à ces grands replats fluviaux. Les travaux précédents ont néanmoins distingué plusieurs niveaux de terrasses alluviales (Alimen, 1950) dont la cartographie géomorphologique ci-dessous est la synthèse, améliorée par une nouvelle prospection de terrain.

Une basse terrasse Fy, située environ à + 3 m au-dessus de la rivière (environ 65-68 m NGF), une moyenne terrasse Fx terrasse à environ + 6 m (68-70 m NGF), une terrasse Fw à + 11 m (73-75 m NGF) et enfin une haute terrasse Fv à environ + 24 m (86-90 m NGF) (Huguet et Giret, 2013). Les basses terrasses Fy sont composées de galets siliceux et de sables peu usés (32% émoussés luisants, 68% non usés. 50% colorés en brun). La moyenne terrasse Fx possède une composition de 20% d'émoussés

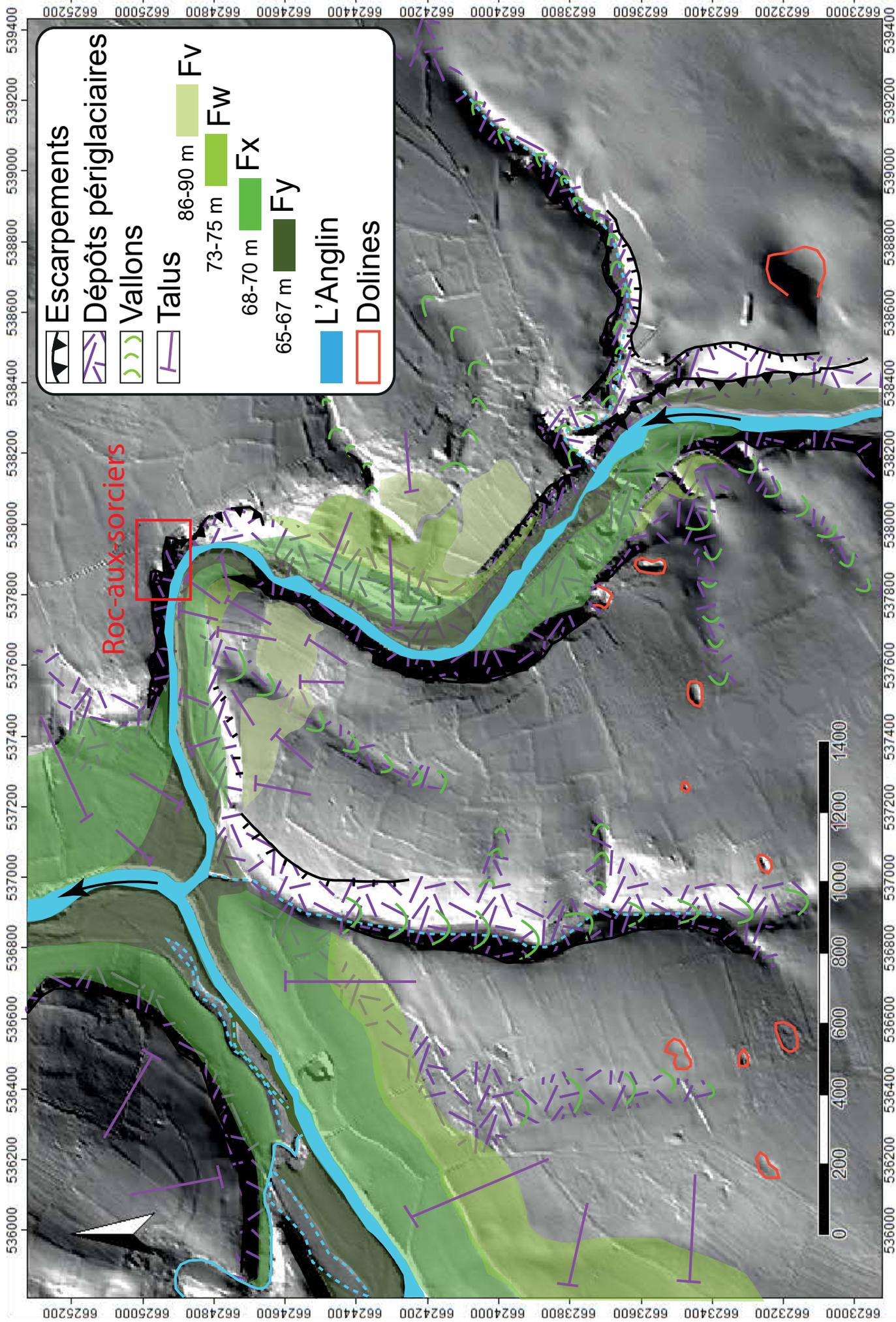


Figure 15 : Cartographie géomorphologique des terrasses alluviales autour de la confluence Anglin-Gartempe. Malgré l'étagement peu marqué des terrasses et leur empreinte discrète dans le paysage, la topographie haute résolution permet tout de même de distinguer différentes générations de dépôt. Isohypses : MNT5m RGEAlti IGN. *Geomorphological map of the Anglin-Gartempe confluence. Despite the discrete alluvial bank morphologies, the lidar-based topography allows for a correct delineation of the deposits Isohypses : MNT5m RGEAlti IGN.*

luisants, ainsi que des quartz roulés et peu émoussés. La composition de la terrasse Fv est très proche de celle de la moyenne terrasse Fx : du Quartz peu émoussé mais altéré, des sables grossiers. (Grains non usés à 87% à la ferme Remerle). Ce niveau de terrasse est assez ancien et présente donc des remaniements de terrasses plus anciennes encore. (Epanagements des plateaux). (Huguet et Giret, 2013).

Les terrasses Fy, Fx, Fw et Fv se retrouvent sur des cours d'eau semblables dans la région comme la Creuse, ou encore la Vienne (Macaire, 1986). Dans le cas de ce dernier cours d'eau, les terrasses Fy sont datées de l'Holocène et ont été élaborées sous un seul type d'environnement bioclimatique (sols monophasés) (Campy et Macaire, 2003). Quant aux terrasses supérieures Fx, Fw et Fv, elles sont plus anciennes, datées du Pléistocène, et sont polyphasées, remaniées au cours du temps par les évolutions des facteurs climatiques, fluviaux et anthropiques (présence de glacis caractéristiques du remaniement du versant qui tend à se régulariser).

Le site archéologique en lui-même est situé sous un escarpement d'une vingtaine de mètres. De très gros blocs calcaires (plurimétriques) sont visibles au sein du talus localisé entre la rivière actuelle et le site archéologique. L'importance de ces blocs témoigne d'une dynamique d'effondrement des parois rocheuses, repérée notamment lors de l'étude sédimentologique du remplissage de l'Abri Bourdois (Bozet et Miskovsky, 2010). Des dynamiques gravitaires sont donc à l'œuvre sur ce site ; la formation du talus d'éboulis et les gros blocs bien visibles en sont l'expression visuelle la plus marquante.

Les prospections de terrain et un MNT 5 m de l'IGN sont suffisants pour se faire une idée générale des facteurs contribuant à la morphogénèse du cours de l'Anglin. Ces outils sont néanmoins plus complexes à mettre en œuvre dès lors qu'on s'intéresse aux morphologies à l'échelle du site du fait de la petite taille de ce dernier (50 x 100 m environ), mais également du fait de l'abondant couvert végétal et des barrières de protection qui empêchent d'avoir la vision d'ensemble du site nécessaire à l'analyse géomorphologique ; d'où la construction du modèle 3D topographique.

2. Acquérir et construire le modèle 3D.

Pour chacun des sites archéologiques étudiés, une méthodologie d'acquisition spécifique des données a été pensée en fonction des spécificités du terrain et de questionnements scientifiques.

Nous commençons par le site du Roc-aux-Sorciers car il permet de poser avec acuité la méthode générale d'acquisition et de construction d'un modèle 3D, dont le premier objectif est ici d'acquérir un support visuel numérique permettant d'asseoir un raisonnement géomorphologique. En effet, dans les conditions naturelles actuelles, la végétation abondante et les enceintes de protection empêchent de disposer d'une vue d'ensemble du site et de croiser les informations entre le haut de l'escarpement, sa base et le bas du versant. Or, ces points de référence sont essentiels à la compréhension de la géométrie du site et de sa morphogénèse.

Sont présentées ici les différentes étapes mises en place pour l'étude du site archéologique.

2.1 Acquisition du nuage de points.

La construction du modèle topographique haute résolution du site du Roc-aux-Sorciers repose sur une acquisition par lasergrammétrie terrestre (LIDAR) à l'aide d'un scanner 360 ° courte portée FaroFocus 3D.

L'acquisition a été réalisée sur deux jours (Juillet 2018) après des campagnes précédentes d'appréhension du site et a nécessité 140 scènes de scan pour couvrir l'environnement autour et au sein du site (escarpement rocheux, versant, talweg actuel, l'Anglin). Etant donné qu'une partie des sites est occultée par des infrastructures de protection, la méthode de construction (« consolidation ») par les sphères a été adoptée pour assembler toutes les scènes de scan au sein d'un même nuage de points.

L'utilisation de sphères comme méthode de consolidation présente plusieurs avantages : en premier lieu, leur morphologie leur permet d'être plus aisément acquise par le scanner que les traditionnelles cibles à damier 2D. Par ailleurs, leur morphologie inchangée quel que soit le point de vue scanner, permet de tourner autour en étant certain de capturer la même information géométrique. Le centre virtuel de la sphère, calculé par ajustement mathématique, est un point de repère souvent plus robuste que ceux fournis par les cibles 2D (Grussenmeyer et Landes, 2011).

L'autre avantage majeur de la consolidation par les sphères pour l'acquisition de la topographie du Roc-aux-Sorciers était de pouvoir aisément associer, dans un même référentiel, les scènes intérieures (au sein des enceintes de protection du site) avec l'extérieur (escarpements, talus, rivière). L'absence totale de lien morphologique entre l'intérieur et l'extérieur (couverture totale des enceintes de

protection, aucune zone de recouvrement possible entre les scans) rendait inutilisables les méthodes de consolidation dérivées de la méthode « *Best Fit* » (Besl et McKay, 1992 ; Grussenmeyer et Landes, 2011).

A) Le placement des cibles sur le terrain.

Quel que soit le type de cible utilisé, c'est avant tout le travail sur le terrain (placement des cibles au sol, résolution du scanner, placement des stations de scan notamment.) qui est déterminant pour espérer une grande qualité de l'assemblage final (Jaillet et al., 2014). Les cibles sphériques qui offrent une grande latitude d'utilisation sont celles qui ont été choisies ici. Elles doivent préférentiellement être positionnées sur les zones saillantes de l'espace, afin d'être visibles par le plus grand nombre de stations de scan possible. Dans l'idéal, les sphères doivent être disposées en trio afin d'optimiser la consolidation ultérieure. Deux cibles peuvent néanmoins suffire si les informations d'assiette et d'azimut sont enregistrées dans les scènes de scan.

Une certaine irrégularité dans le positionnement des cibles permet de faire varier les formes des trios de

sphères, ce qui aide également à la consolidation et évite les confusions de positionnement. Cette étape est décisive car en milieu naturel, il est rare de pouvoir facilement profiter des contraintes géométriques du paysage, contrairement aux mesures en bâtiment où la géométrie des objets (plans, faces, angles à 90%) offre des supports de contrôle facilitant la consolidation des différentes scènes de scan.

Les cibles doivent être préalablement placées au sein de l'environnement à scanner, afin d'être prises en compte par ce dernier. Leur présence servira alors de points de repères permettant l'assemblage des différentes scènes de scan par triangulation entre les repères. Il faut donc en placer suffisamment entre deux stations de scan (au minimum trois cibles communes ou deux cibles plus les informations d'orientation données par le scanner), dans les zones scannées communes à deux scènes de scan. Les cibles servent alors de points communs pour assembler les scènes entre elles.

Pour le site du Roc-aux-Sorciers, la jonction entre les scènes intérieures et les scènes extérieures a été assurée par des sphères communes localisées aux passages étroits (portes).

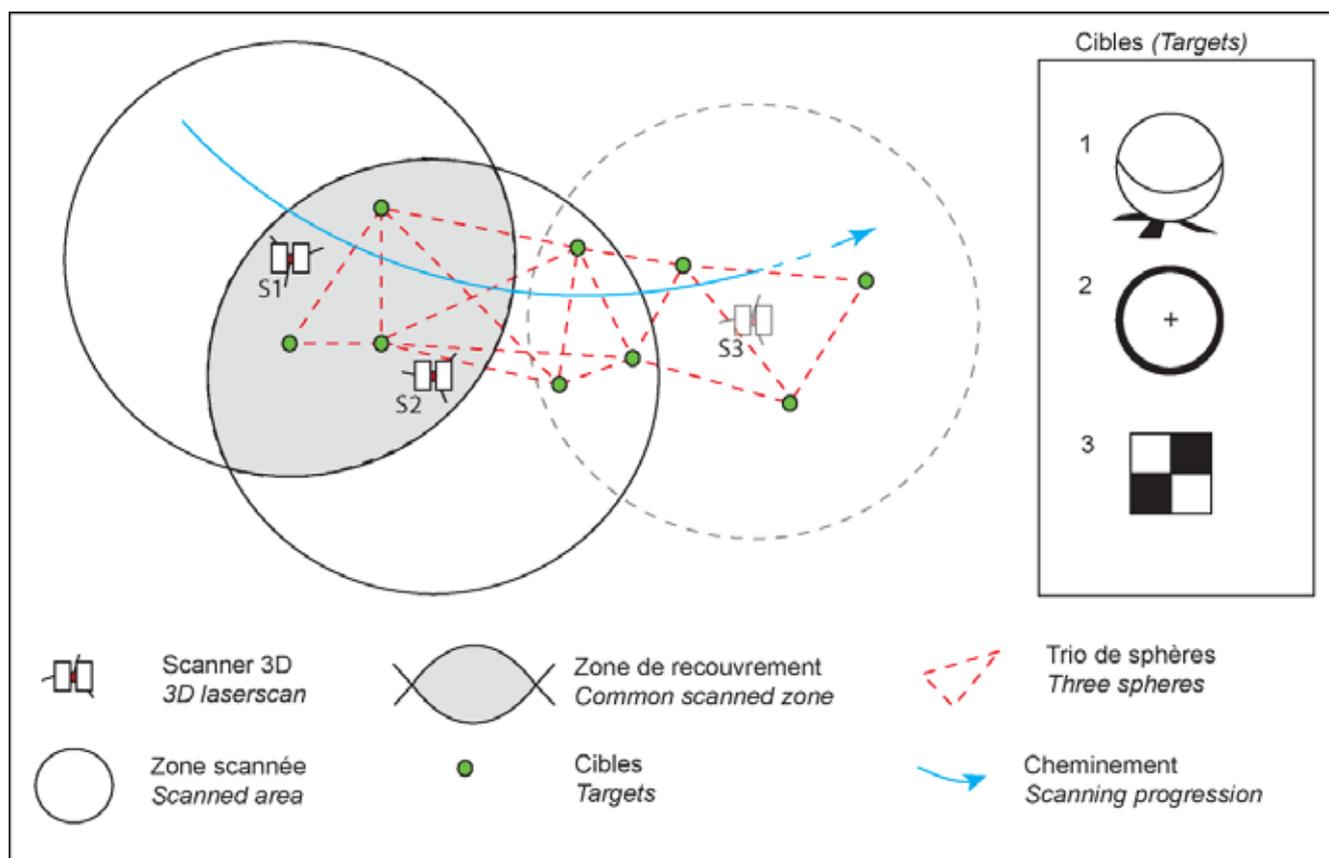


Figure 16 : Placement des cibles sphériques sur le terrain. Le positionnement de ces repères, bien visibles dans le paysage, doit constamment être pris en compte par l'opérateur car la qualité de la consolidation est grandement dépendante du positionnement des cibles sur le terrain. L'opérateur doit ainsi évaluer les zones de recouvrement des scans pour y positionner au moins 3 cibles en vue de la prochaine station de scan. 1. Sphère, 2. Disque, 3. Damier. *3D spherical targets positioned on the field. The target position must be widely visible in the landscape and always taken into account by the scanner operator because the consolidation step highly depends on the fieldwork quality. The operator must work out a common scanned area where at least three targets will be positioned in order to be visible from the next scan station. 1. Sphere, 2. Disk, 3. Checkerboard.*

2.2 Consolidation.

La consolidation par les cibles est réalisée par traitement informatique. L'ordinateur peut détecter des cibles automatiquement mais bien souvent, le traitement idéal reste semi-automatique : l'opérateur passe chaque scène de scan en revue et sélectionne lui-même les cibles. Il s'assure ainsi que celles sur lesquelles la consolidation va s'effectuer, correspondent effectivement à celles qu'il a placées sur le terrain. Dans cet état d'esprit, il semble préférable que le travail d'assemblage des scènes soit effectué par l'opérateur qui a réalisé les acquisitions sur le terrain. Dans le cas des sphères, l'objet n'est pas entièrement scanné, seule la face visible de la sphère est acquise mais cette surface est suffisante pour en déduire le centre de la cible grâce à un ajustement par les moindres carrés du rayon de courbure formé par les points de scan qui la représentent. (Milieu du damier carré et/ou centre de la sphère scannée).

Parfois, les cibles placées sur le terrain ne suffisent pas et l'assemblage échoue en partie. Plusieurs zones peuvent néanmoins avoir été correctement assemblées. On appelle ces dernières des « clusters ». Il faut alors terminer l'assemblage au moyen d'un alignement point à point entre les clusters, en rajoutant manuellement des points de connexion entre deux ensembles pour les joindre en un seul modèle.

Cette étape permet d'assembler les scènes en un seul modèle spatialement continu, mais elle présente plus d'incertitude que la consolidation par les sphères (Grussenmeyer et Landes, 2011) : en effet, un point sur une scène ne correspond pratiquement jamais à un autre point sur une autre scène.

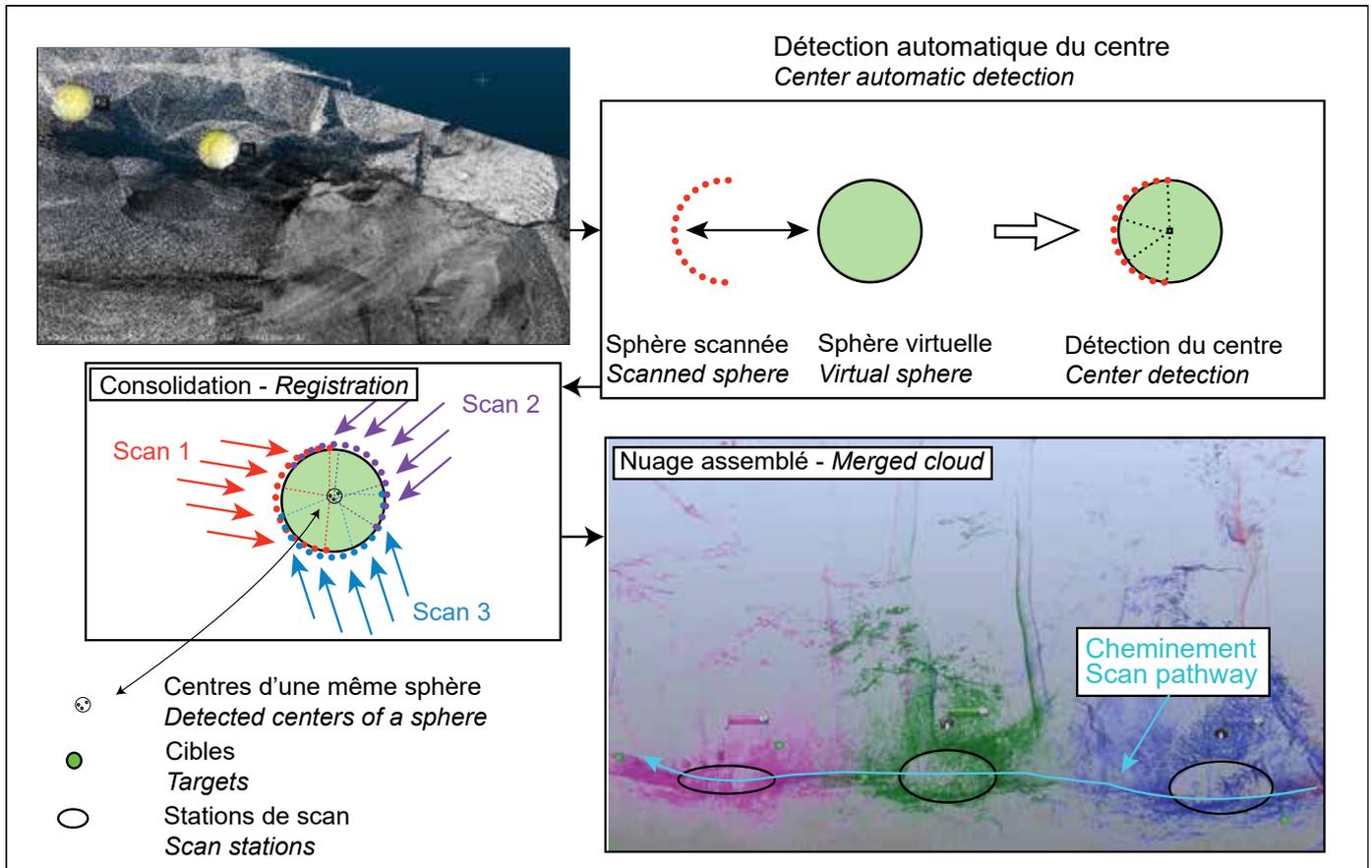


Figure 17 : Consolidation par les cibles de plusieurs scènes de scan. Les nuages de points sont ainsi repositionnés par les sphères posées sur le terrain. On note la présence au sol de cercles, zones moins densément scannées car sous le scanner lui-même.

Target registration of multiple scan scenes. The point clouds are here registered with spherical targets that were positioned on the field. The entire area is finally revealed. The circles on the ground are due to the position of the scan which is not able to scan below itself.

Lorsque l'opération se déroule bien, les cibles permettent l'assemblage des scènes de scan en un seul grand nuage de points 3D. A la fin de cette étape, il est alors nécessaire d'en contrôler la qualité par différents moyens comme la tension des cibles et le contrôle visuel de l'assemblage.

B) Le contrôle visuel.

Il arrive parfois que le processus d'assemblage donne un résultat, que les erreurs de tension de cible soient faibles, mais que plusieurs nuages soient assemblés au mauvais endroit. Dans la plupart des cas, cette erreur est due à une triangulation entre 3 cibles trop similaires à d'autres situées plus loin (taille et forme du trio de sphère virtuel). Un contrôle visuel reste donc toujours nécessaire pour valider l'opération afin de vérifier que la morphologie finale proposée par les logiciels correspond bien à l'environnement scanné. Les aberrations de recalage sont souvent bien visibles, mais parfois, le numéro des scènes de scan peut permettre de détecter des incohérences (par exemple : numéros qui ne se suivent pas ou ne s'incrémentent pas).

A) La tension de cibles.

La tension de cibles est un indicateur pertinent pour juger de la qualité de la consolidation des scènes de scan. Elle est calculée sur la base de l'écart entre les centres de cible sélectionné avant la consolidation, et l'écart avec ces points suite à l'opération. A l'échelle de toute la consolidation, elle représente l'erreur moyenne quadratique (EMQ ou RMSE pour root mean squared error) des écarts de toutes les cibles utilisées.

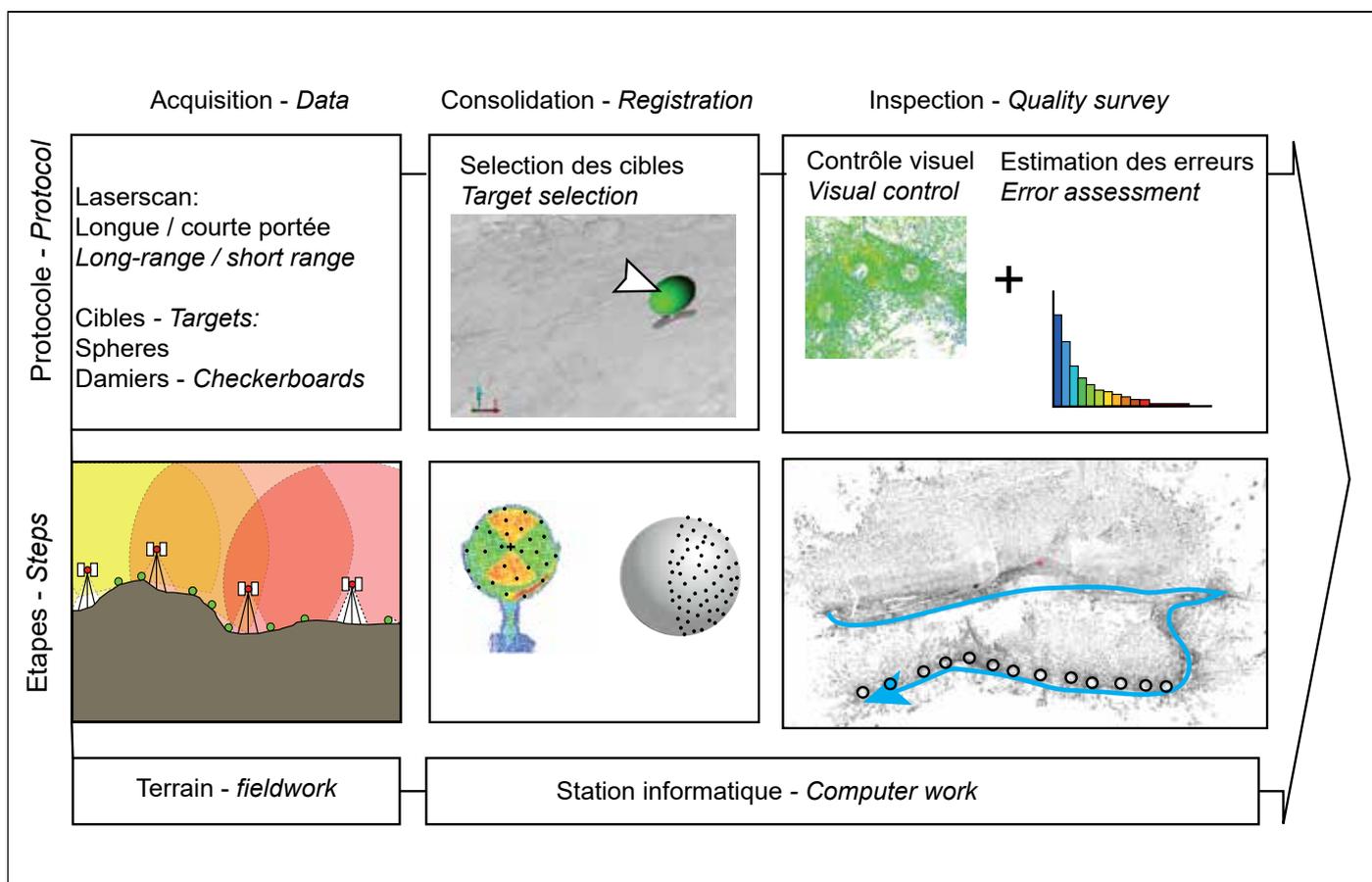


Figure 18 : De l'acquisition à la consolidation. Le travail de l'opérateur commence dès la phase « terrain ». Il est préférable que l'opérateur de la consolidation soit également celui qui scanne et place les cibles sur le terrain. La phase de consolidation sur station informatique est composée d'une sélection semi-automatique des cibles, puis d'un alignement numérique des nuages en fonction de ces dernières. A toutes les étapes de traitement de la donnée, un contrôle visuel reste de toute façon nécessaire.

From fieldwork acquisition to complete point cloud. Considering the importance of targets positioning, the operator work should start on the field. The registration stage is made on computer by manually selecting the targets, and finally registering all the point clouds thanks to the target selection. All the consolidation phases should be carefully checked by a visual inspection of the point clouds, before and after registration.

2.3 Elimination de la végétation sur le modèle (traitement manuel et numérique).

L'acquisition topographique par LiDAR terrestre capture l'environnement immédiat du scanner, sol, artefacts et végétation. Dans le cas d'une analyse géomorphologique seules la couche du sol et des parois rocheuses nous intéressent. Une étape de traitement des nuages bruts assemblés est donc nécessaire. Un travail de séparation numérique des points représentant la végétation de ceux du sol a donc été mené. Il existe plusieurs manières de traiter le nuage de points. Par filtrage numérique par l'application d'une grille « sous » le nuage, comme proposé par Zhang et al. (2016), ou en classifiant le nuage en fonction de sa couleur (logiciel *CloudCompare*, (Girardeau, 2018)), ou encore en fonction de certaines morphologies récurrentes avec une classification multiscalaire par passage de sphères. Sur certains logiciels comme *CANUPO*, il est également possible de filtrer un nuage de point à partir d'une première classification manuelle effectuée sur des zones test prédéfinies sur le nuage (Brodu et Lague, 2012). Les nuages issus des LiDAR aéroportés à retour d'onde complète (ROC) peuvent également bénéficier d'une classification par onde (plusieurs ondes de retour pour un même

pulse laser) comme le propose l'application *ALDPAT* (Zhang et Cui, 2007). Les MNT raster bénéficient également d'algorithmes de filtrages, notamment en fonction de la pente moyenne du MNT (Vosselman, 2000). Bien que cette méthode donne des résultats honorables, notamment sur les jeux de données issus d'acquisition par LiDAR aéroporté (Berthet, 2016), les enjeux de reconstitution et de fouilles archéologiques nécessitent des livrables à très haute résolution et avec le moins d'erreur possible sur les morphologies des sols. Dans ce cas, un nettoyage manuel du nuage de point (en tronçonnant virtuellement le nuage) permet d'avoir un contrôle visuel direct sur la distinction sol-végétation.

2.4 Maillage.

Le nuage de points traité, il ne reste plus que la couche du sol et des parois, qui peut alors être maillée pour obtenir une information surfacique. Une fois de plus, différentes options sont mobilisables comme la rasterisation 2.5D (Pineda, 1988) ou la triangulation Delaunay 3D (Delaunay, 1934).

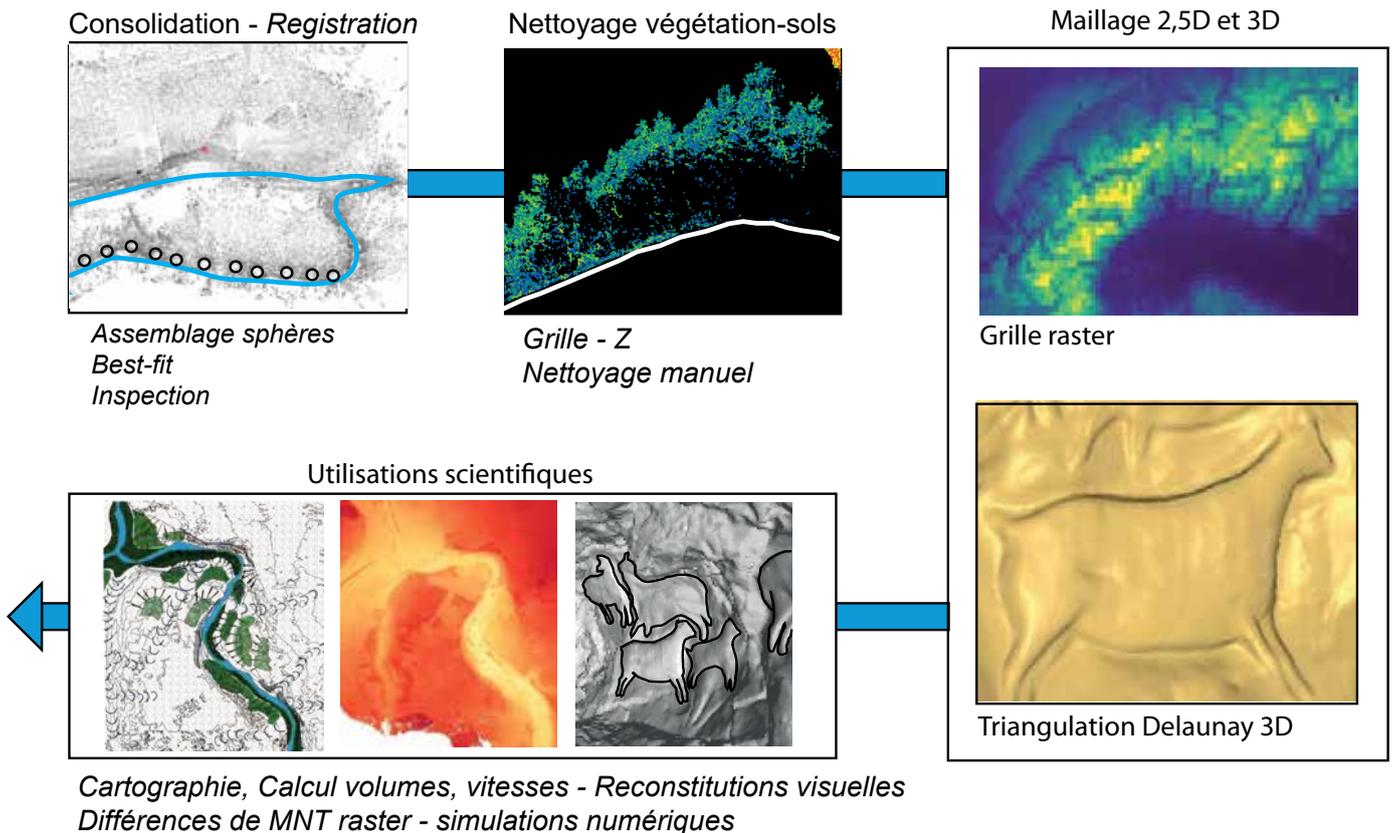


Figure 19 : De la consolidation à l'utilisation des données topographiques. Les nuages de points issus du scanner sont assemblés en un seul jeu de données, qui est ensuite traité et classifié (différenciation sol-végétation) avant d'être maillé, en raster ou en triangulation Delaunay 3D. Ces différentes sorties du nuage de points permettent de conduire de nouvelles analyses géomorphométriques (calculs de volumes, pentes, par exemple).

From point cloud registration to topographical data use. Points clouds that come from the scanner are merged into one big cloud that is then classified into categories (soils, vegetation). They are meshed through 2.5D raster or 3D Delaunay triangulation. Those different kinds of surface meshing methods lead to new analyses of the scanned environment (for example: volumes, slopes, surfaces).

Dans le cadre d'une cartographie des sols, une rasterisation 2,5D permettra d'obtenir un modèle numérique d'élévation, support idéal pour une cartographie des reliefs sous Système d'Information Géographique (SIG). Dans le cas d'une morphologie réellement en 3D (plusieurs points possibles pour une même donnée en XZ), un maillage 3D par triangulation de Delaunay est plus adapté (Sadier, 2013). Le choix du type de maillage dérive avant tout de l'échelle cartographique choisie pour représenter les objets : un élément physique possède avant tout une enveloppe en 3 dimensions, mais une représentation en 2,5D est parfois suffisante, notamment dans le cas d'une carte des sols.

En ce qui concerne les différents sites d'étude abordés au sein de ce travail, les deux options d'interpolation sont systématiquement choisies. Le choix de l'une ou de l'autre est conduit par la diversité des questionnements scientifiques. Pour le Roc-aux-Sorciers, les morphologies d'abris-sous-roche ont nécessité un maillage en Delaunay 3D, les sols ont été également rasterisés à 1 cm pour renseigner le SIG du Roc-aux-Sorciers, dans l'objectif d'établir une base de données localisée concernant des objets issus des précédentes fouilles archéologiques.

3. Exploitation des données topographiques.

3.1 Visualisation du site.

Les perspectives de navigation offertes par la 3D permettent d'aborder un site sous des angles et des points de vue impossibles sur le terrain (vue aérienne, vue axonométrique), à des échelles différentes, voire même à partir de points de vue inexistant (vue depuis l'intérieur, depuis l'encaissant rocheux). Par exemple, la visualisation 3D des réseaux karstiques est généralement effectuée depuis un point de vue extérieur des réseaux. Ces derniers sont alors représentés en volumes, alors qu'ils représentent des vides dans la réalité. Cette visualisation dite par « le regard de dieu » (Jaillet et al., 2014) permet aussi de réinterroger l'objet géographique et sa perception selon différents modes de représentation.

Dans le cas du Roc - aux-Sorciers, les contraintes visuelles liées à la végétation et aux infrastructures de protection ont été enlevées du modèle et seule la couche représentant les sols et l'escarpement rocheux a été prise en compte. Une fois les morphologies de sol visibles, on peut par exemple clairement identifier les morphologies d'effondrement et le tablier d'éboulis recouvrant le site. Une cartographie des formes devient alors possible.

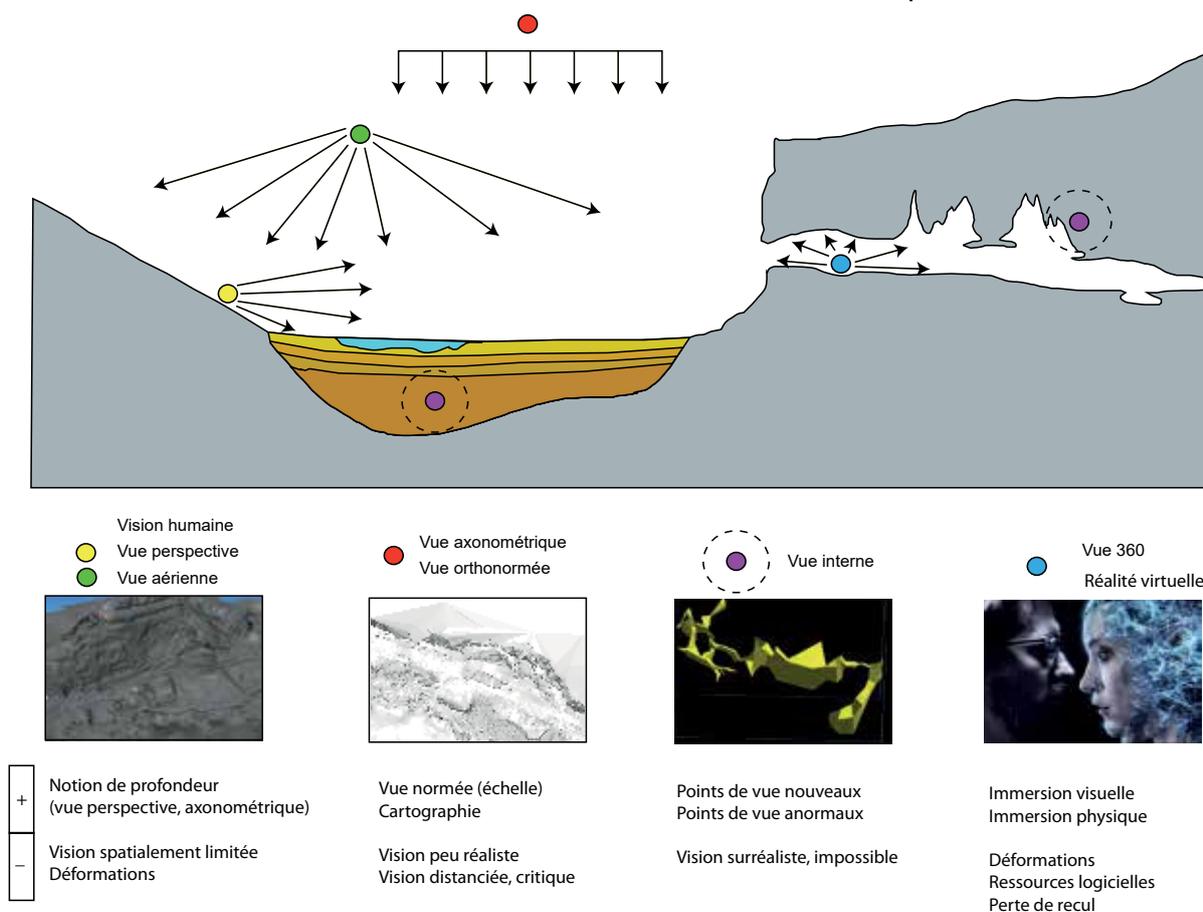


Figure 20 : Différentes manières de visualiser une information par l'intermédiaire de l'imagerie 3D. Au-delà des modes de visualisation « classiques » (vision perspective, orthonormée), d'autres points de vue (vue interne) et d'autres manières de voir et percevoir son environnement (vue 360, réalité virtuelle) sont possibles. *There are different possible ways to visualize a data in 3D, from the classic perspective and axonometric views to the 360° and VR views allowed by the growing computer technologies.*

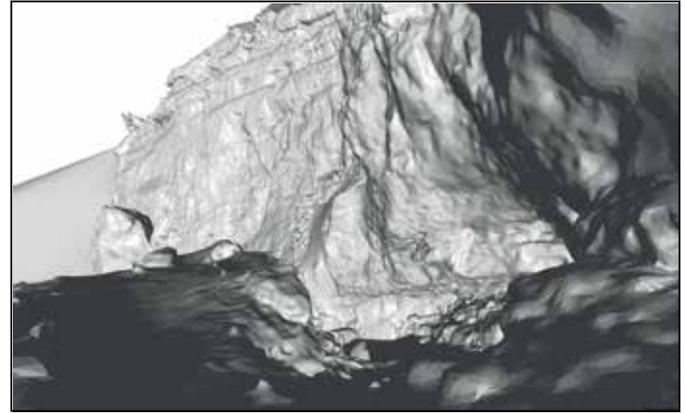
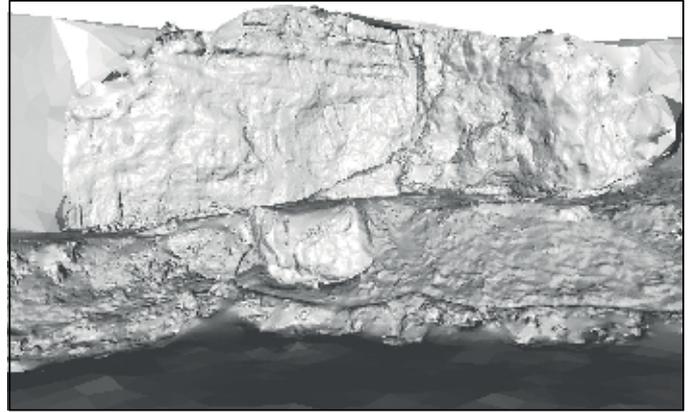
Le site face à la rivière



Enceinte du site archéologique



Végétation, infrastructures, point de vue terrestre



Sol, parois rocheuses, point de vue choisi

Figure 21 : Amélioration visuelle du site par l'utilisation du modèle 3D. Les sols sont visibles, notamment les talus qui bordent la rivière, juste en aval du site. De gros blocs affleurent également dans le talus. L'élimination de la végétation permet de visualiser le site dans son contexte morphologique et topographique.

3D model allows a better visual survey quality: Soils are visible and big blocks too. The site protections have also been virtually removed. The Roc aux Sorciers site is thus visible in its morphological and topographical context.

3.2 Cartographie géomorphologique du Roc-aux-Sorciers.

En faisant ressortir la morphologie d'objets auparavant cachés par la végétation, la modélisation 3D rend possible le positionnement et la mesure des objets naturels. On peut alors identifier et quantifier les différents phénomènes à l'œuvre sur le site étudié en fonction de critères morphométriques ainsi qu'à partir d'une analyse géomorphologique du terrain.

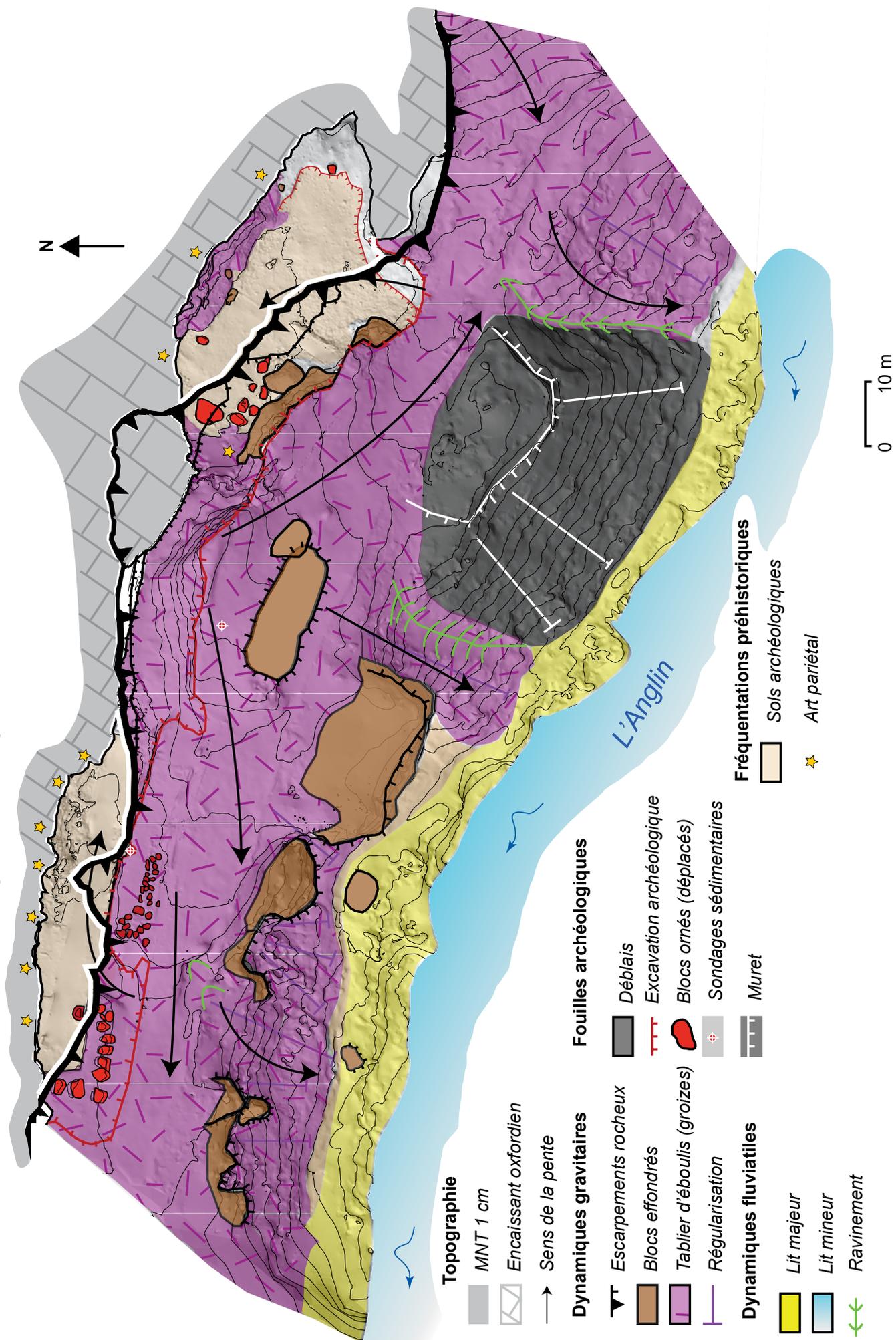
En se basant sur la topographie des sols, une cartographie géomorphologique du site a été réalisée. Le modèle 3D des sols a été rastérisé à 1x1 cm pour obtenir un modèle numérique d'élévation (MNT 2,5D). Le produit (format image Tiff) a ensuite été traité sous SIG (Système d'Information Géographique) afin de produire un fond de carte avec les altitudes (isohypses), les ombrages, les éléments nécessaires à l'identification des formes et des processus à l'œuvre sur le site.

En décrivant les morphologies du haut vers le bas, la cartographie géomorphologique met tout d'abord en évidence le relief subvertical de l'escarpement rocheux, majoritairement organisé selon un plan

Est-Ouest dans sa partie aval. Ce dernier devient plus complexe dans la partie amont avec un relief moins net faisant penser à des zones broyées. Au niveau du sol, le développement des morphologies en abri-sous-roche des deux zones fouillées, est visible directement sous les escarpements rocheux. On remarque également l'importance du talus de gélifraacts situé entre l'escarpement rocheux et la rivière.

Hormis les zones de fouille où il a été décaissé, ce dernier est visible sur l'ensemble du site, entre les parois rocheuses et la rivière, formant un talus en pente, avec tout de même un replat notable à l'extérieur de ce qui est aujourd'hui l'Abri Bourdois. Enfin, au niveau de la rivière, bien que la grande quantité de végétation ait occulté (même lors de l'acquisition par lasergrammétrie) une partie des morphologies, on observe un replat à environ + 1 m / + 1.5 m par rapport à la rivière. Les observations des bordures de l'Anglin montrent que ce replat est une banquette rocheuse, aujourd'hui recouverte par du sol.

Carte géomorphologique du Roc-aux-sorciers



Plusieurs éléments corroborent les observations sédimentologiques de Bozet et Miskovsky (2010) à l'échelle de l'ensemble du site. Le tablier d'éboulis semble majoritairement composé de groizes vraisemblablement issues de la gélifraction du versant. Des brèches sont par ailleurs encore en place dans la Cave Taillebourg. Ces dernières, comme le tablier d'éboulis, sont composées de groizes et scellent directement les parois rocheuses de la cavité. Le tablier d'éboulis est également composé de gros blocs plurimétriques, parfois posés sur le talus de gélifractions (Rocher du Sorcier, entre les deux zones de fouille), et parfois au sein même de ce dernier : des gros blocs sont alignés le long de la rivière, en parallèle à l'écoulement de cette dernière, environ 2 m au-dessus du niveau de l'eau.

Le tablier d'éboulis se trouve entre eux et les parois, et n'atteint la rivière qu'aux endroits où les gros blocs sont absents. Des gros blocs sont également visibles au sein des fouilles archéologiques : dans l'Abri Bourdois par l'intermédiaire de la coupe sédimentologique (Bozet et Miskovsky, 2010), et dans la Cave Taillebourg avec des blocs plurimétriques sur toute la hauteur des fouilles. Les observations faites en aval du site, entre les gros blocs et la rivière, montrent également que ces derniers semblent surélevés (quelques cm à plusieurs dizaines de cm) par rapport au sol sur lesquels ils sont posés. L'importance de ces gros blocs, tant ceux visibles à l'extérieur que ceux révélés lors des fouilles archéologiques, témoigne de la dynamique d'effondrement ayant eu lieu sur le site du Roc-aux-Sorciers.

Tant dans les zones de fouilles qu'à l'extérieur du site, ces blocs semblent posés sur un niveau subhorizontal, ce qui soulève la question de savoir si la chute de ces derniers a pu être synchrone dans le temps (un seul grand événement). La présence de niveaux d'occupation Magdalénien juste sous ces gros blocs dans les deux zones de fouille pousse à prendre en compte ce phénomène d'effondrement, tant dans la morphogénèse du site que pour son impact sur les fréquentations de ce dernier.

Figure 22 : Cartographie géomorphologique du site du Roc - aux - Sorciers. Le site est clairement dominé par les processus périglaciaires (tabliers d'éboulis formés de gélifractions grossiers (groise) et une dynamique d'effondrement (blocs de gros volume retrouvés lors des coupes archéologiques). Les fouilles archéologiques sont également représentées (ligne rouge). Elles ont permis de dégager le site de sa gangue sédimentaire, composée en majorité de clastes issus du versant. *Geomorphological mapping of the Roc-aux-Sorciers site. Periglacial slope processes are clearly dominant. The big blocks are also pieces of evidence of slope evolution but maybe on shorter time span. Archaeological investigations are also represented (red dashed lines) and provided. They have allowed to clear the sculpted rock walls which have been fossilized by clastic sediments.*

Le modèle 3D permet également d'identifier les morphologies à travers des coupes topographiques de l'escarpement, des abris-sous-roche et des dépôts.

Les profils effectués le long du site mettent en évidence le pendage de l'éboulis, notamment dans la partie amont du site. Cette dernière atteint son maximum entre les deux principales zones de fouilles, tout juste à l'aval de la Cave Taillebourg (figure 23). Bien qu'une partie des sédiments ait été décaissée lors des fouilles, la pente la plus prononcée de ce qui reste aujourd'hui du tablier d'éboulis semble se raccorder au niveau de l'angle formé par l'escarpement.

Au niveau de l'Abri Bourdois et de la Cave Taillebourg, des coupes topographiques ont été effectuées en passant par le sol archéologique. Les fouilles ont en effet dégagé le niveau d'occupation le plus ancien du Magdalénien moyen (Bourdier, 2010), qui représente aujourd'hui le niveau topographique du sol de l'Abri Bourdois et de la Cave Taillebourg.

A l'intérieur des zones de fouilles, ces coupes topographiques (1 et 3) font prendre conscience de la quantité de sédiments (plusieurs mètres) accumulés par-dessus ce niveau d'occupation. A l'extérieur des zones de fouilles, aux endroits où les blocs affleurent, il est possible de réfléchir à l'ancien niveau représentant les morphologies pré-effondrement (et également contemporain de l'occupation du Magdalénien moyen). Ce niveau n'est évidemment pas visible car caché sous les sédiments. Néanmoins, en admettant l'hypothèse d'une correspondance chronologique entre les blocs proches de la rivière et ceux retrouvés dans les fouilles, le soubassement de ces gros blocs pourrait représenter cet ancien niveau d'occupation.

3.3 Reconstitution des paléosurfaces disparues et apport de la 3D dans la compréhension de ces dernières.

Le modèle 3D est issu de la topographie actuelle, post-fouilles archéologiques. Il englobe les escarpements rocheux, les abris-sous-roche jusqu'aux niveaux archéologiques (plancher des fouilles), les gros blocs, le tablier d'éboulis et se termine au niveau de la rivière. Les morphologies scannées sont donc celles du paysage actuel, comprenant les blocs et le tablier d'éboulis qui a progressivement comblé les abris-sous-roche, ainsi que la géométrie issue des fouilles archéologiques. En rassemblant les données géomorphologiques (logiques d'effondrement des blocs) et les données archéologiques (séquences d'occupation, coupes sédimentologiques...) au sein du même modèle topographique 3D, une reconstitution de certaines morphologies clés a été tentée.

Des témoins d'anciennes morphologies sont visibles sur le modèle 3D (niveau d'occupation, sols archéologiques, bords du tablier d'éboulis...). Il est alors possible de reconstituer certaines morphologies

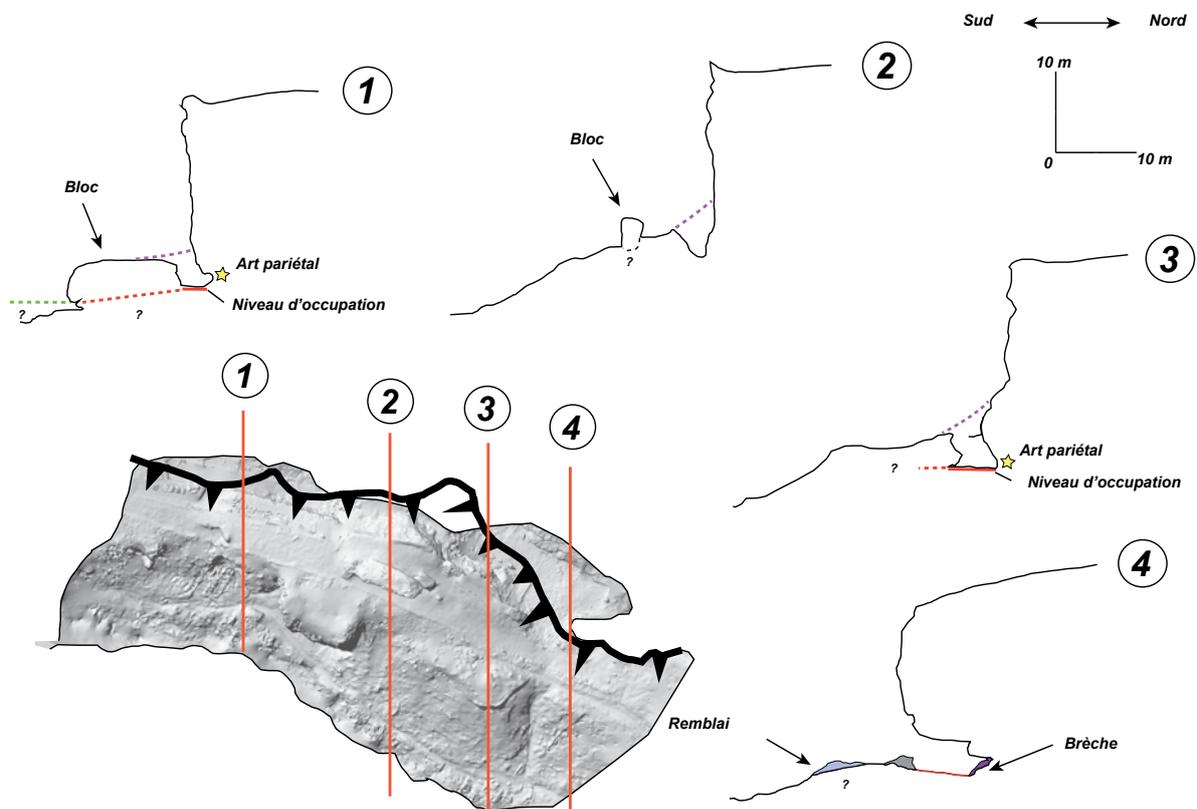


Figure 23 : Coupes simplifiées du site du Roc-aux-Sorciers avec localisation des fouilles et de l'art pariétal : les excavations archéologiques ont entaillé l'ancienne surface correspondant au tablier d'éboulis. *Roc-aux-Sorciers topographical cross sections made using the 3D model. The archeological excavations have modified the former surface that was shaped by slope processes and rock slope failures.*

disparues par l'intermédiaire de la modélisation 3D. Le sommet de l'éboulis est parfois encore visible sur les parois sous la forme d'un liseré plus foncé. Cette observation est confirmée par l'étude des archives photographiques prises avant et pendant les fouilles, qui montrent parfois le niveau du tablier d'éboulis avant les fouilles. Le niveau pré-fouilles, identifié sur les photographies, a été tracé sur le modèle 3D (figure 24).

C'est l'inverse pour les niveaux d'occupation : ces derniers ont été progressivement dégagés par les opérations de fouilles (Rousseau, 1933 ; de Saint Mathurin, 1984), révélant les niveaux d'occupation Magdaléniens qui apparaissent donc cette fois sur le modèle 3D. C'est le cas notamment du plancher actuel des fouilles et du sondage archéologique qui a servi de support à la datation des phases de fréquentation (Vogel et Waterbolk, 1963) et à une analyse sédimentologique et paléo-environnementale (Guillien et de Saint Mathurin, 1976 ; Bozet et Miskovsky, 2010).

Les morphologies du tablier d'éboulis peuvent être reconstruites sur le modèle 3D en utilisant les coupes topographiques et en projetant les photographies anciennes sur le modèle 3D, par la technique du *monoplotting* (Radwan et Makarovic, 1980), (Wiesmann et al., 2012). Cette technique consiste à draper des photographies sur un modèle 3D pour en extraire une information colorimétrique ou géométrique. Il est ainsi possible de replacer ces niveaux sur le modèle 3D par la méthode du

monoplotting pour les digitaliser, et ainsi recréer la géométrie de surfaces aujourd'hui disparues (Berthet, 2016 ; Genuite et al., 2018a).

La morphologie reconstituée du tablier d'éboulis (figure 25) fait ainsi ressortir une topographie en cône. Le sommet se raccorde au niveau de la concavité de l'escarpement. Les morphologies des parois rocheuses attestent ainsi d'une alimentation en gélifractions : L'escarpement calcaire orienté plein sud présente visiblement des baumes de gélifraction qui s'établissent sur au moins deux bancs potentiellement plus sensibles aux alternances gel/dégel, notamment sur la partie haute de l'escarpement surplombant l'Abri Bourdois (frise sculptée). C'est également sous ce plan d'escarpement que se trouve la majorité des gros blocs. L'escarpement calcaire surplombant la Cave Taillebourg est quant à lui très différent en termes de lithologie et de morphologie : le calcaire présente un relief beaucoup plus hétérogène que l'escarpement orienté plein sud ; l'encaissant semble également beaucoup plus altéré et moins compact. Cette partie de l'escarpement n'est pas découpée selon les plans de fracturation Est-Ouest, comme c'est le cas pour l'escarpement en surplomb de l'Abri Bourdois. La partie amont de l'escarpement semble donc être le résultat d'autres contraintes. Sans pouvoir déterminer avec plus de précision l'origine de ces gros blocs effondrés, il semble que les morphologies d'effondrement dominant plus largement sous la partie plein Sud, ce qui laisse supposer que les gros blocs proviennent de l'escarpement orienté Sud-Ouest (figure 26).

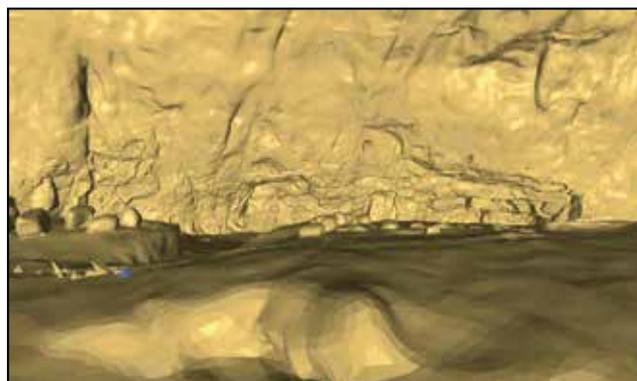
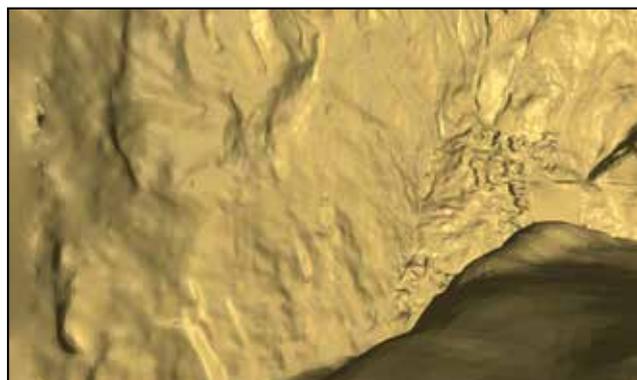


Figure (topographies du site avant et pendant les fouilles) pour reconstituer l'ancien niveau du tablier d'éboulis sur le modèle maillé 3D. Photographies : Fond Saint-Mathurin (1950), archives MAN.

Historical archives (photographs taken during the beginning of the archeological excavations) were used in order to identify and reconstruct the former surface on the 3D model. Photographs: Saint-Mathurin collection (1950), MAN archives.

Une cartographie des pentes de l'escarpement a été réalisée à partir d'un point de vue orienté sur un plan de projection Sud-Nord, afin de mettre en évidence les morphologies des parois (figure 26).

Plusieurs marqueurs topographiques sont reconnaissables, notamment les baumes de gélifraction formant des gouttières subhorizontales tout le long de la face sud de l'escarpement. Une légère dépression peut également être identifiée au centre de la face sud, mais cette dernière reste trop faiblement marquée pour attester de la présence d'une niche d'arrachement.

3.4 Reconstitution de la surface théorique d'occupation au Magdalénien moyen par interpolation.

Le niveau d'occupation théorique au Magdalénien moyen a été identifié lors des fouilles archéologiques dans les deux abris-sous-roche. La topographie des zones fouillées ainsi que celle de l'environnement extérieur rend possible des corrélations altitudinales, tant au niveau des deux zones de fouilles qu'avec la base des gros blocs visibles à l'extérieur du site, proches de la rivière. Toute la zone comprenant les remplissages issus du talus d'éboulis a donc été supprimée du modèle 3D, ne laissant que les sols archéologiques et les parois de l'escarpement rocheux ainsi que celles des abris-sous-roche. Une bande de sol située à l'altitude du contact du soubassement des gros blocs a également été conservée, servant ainsi de contrainte « basse altitude » pour l'interpolation du niveau d'occupation. Avant de construire le niveau théorique d'occupation, des jonctions entre ces différents éléments (sols archéologiques, soubassement des blocs...) ont été réalisées en recréant des ponts virtuels sur informatique.

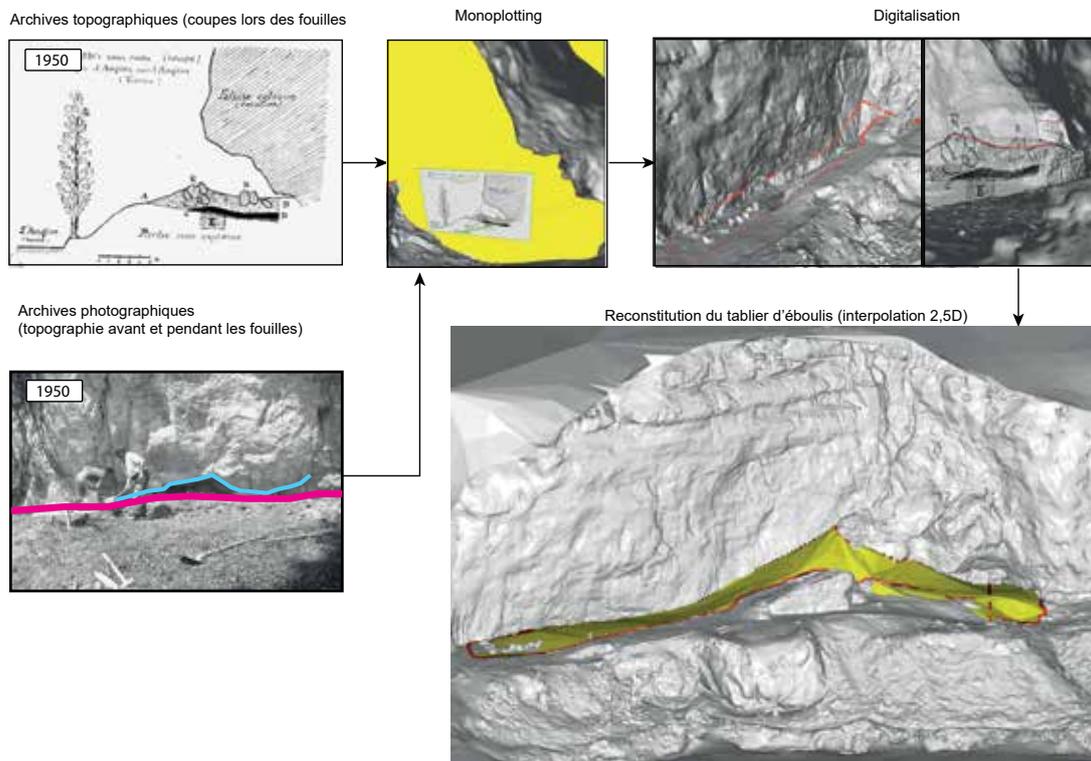


Figure 25 : Interpolation de la surface d'occupation magdalénienne pré-effondrement. Méthodologie de reconstruction d'une paléo-topographie à partir d'informations ponctuelles sur cette dernière. *Pre- rock slope failure surface interpolation (corresponding to the lower Magdalenian occupation stage). Landscape reconstruction using punctual information collected on the site.*

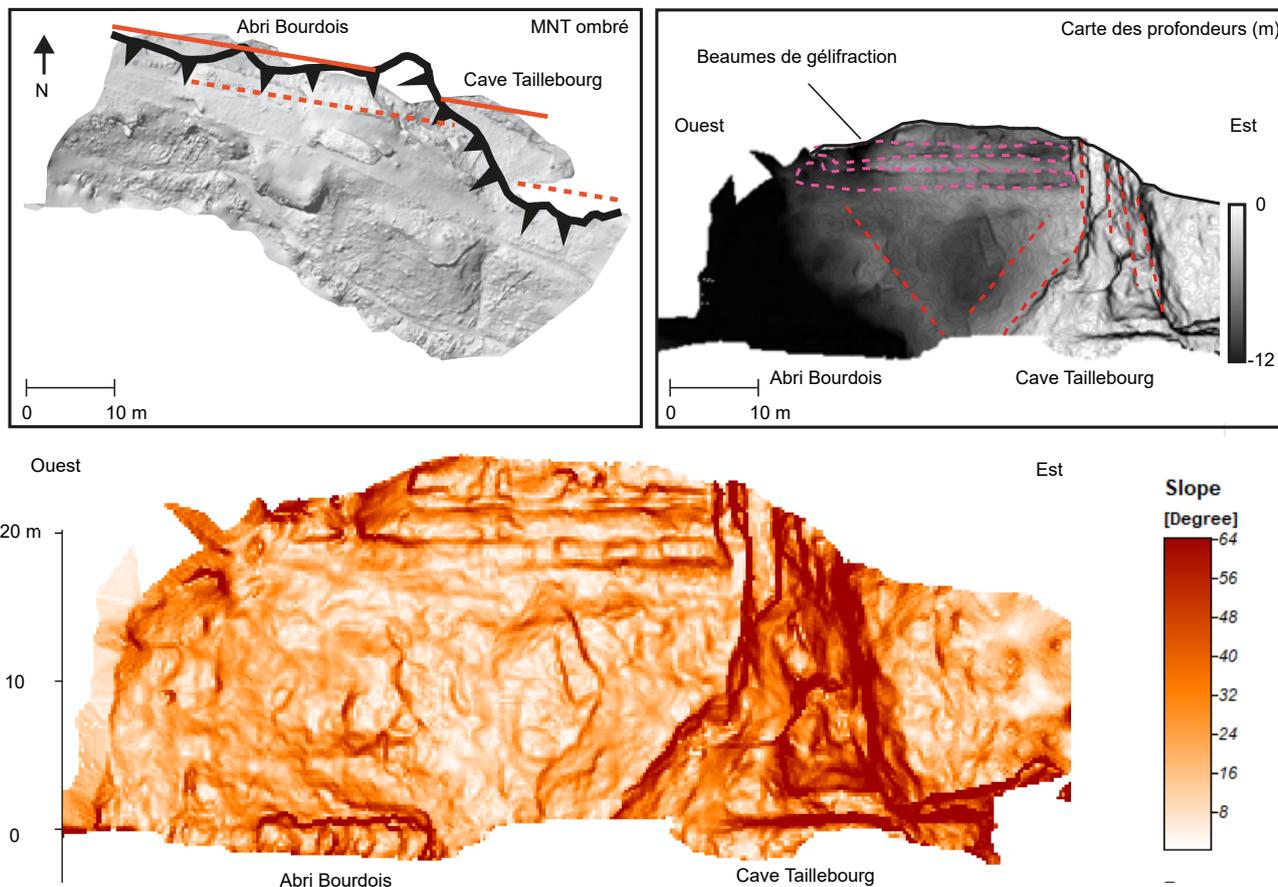


Figure 26 : Fracturation et topographie des parois surplombant le site orné du Roc-aux-Sorciers. Carte de la profondeur et carte des pentes calculées par rapport au point de vue choisi). Fracturation en rouge. *Topography and fracturation of the rock walls above the Roc-aux-Sorciers site. Slope map and depth map have been calculated according to a chosen manual angle (facing the cliff). The red line stands for the fracturation line.*

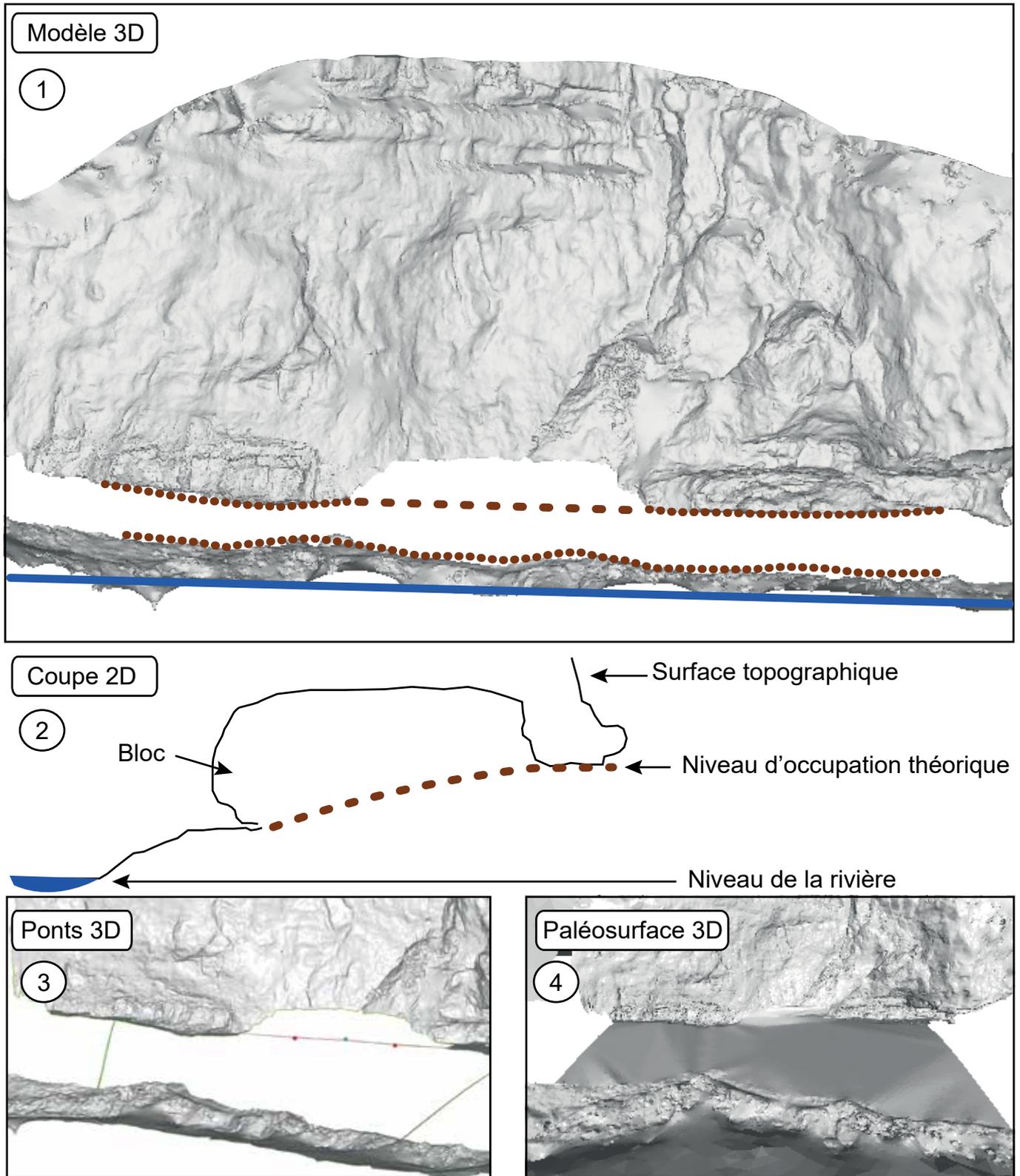
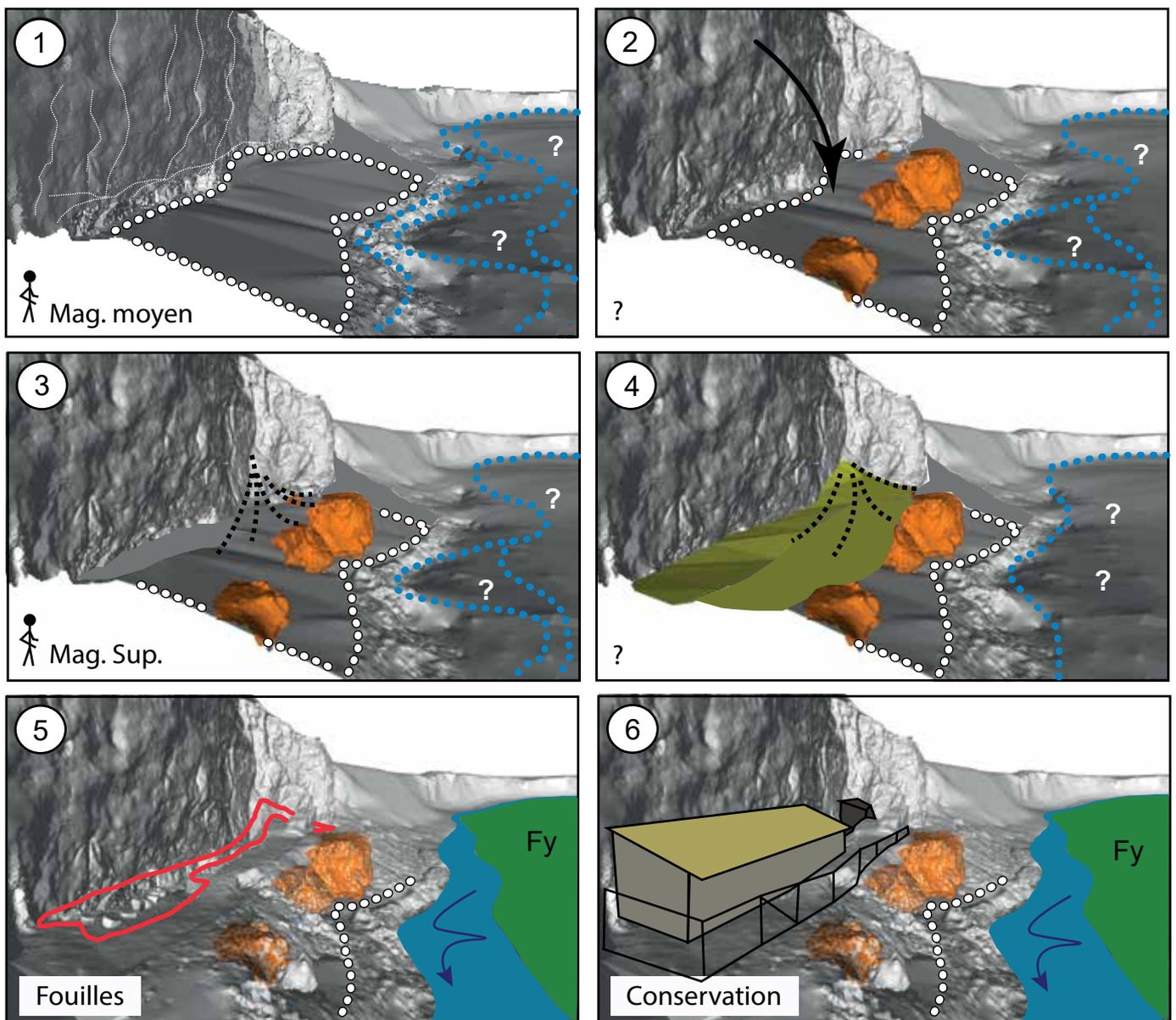


Figure 27 : Monoplotting des niveaux pré-fouilles digitalisés à l'aide de documents historiques. Les niveaux du tablier d'éboulis sont digitalisés sur le modèle à l'aide de polygones 3D ou de points. Ces derniers sont ensuite maillés en 2,5D (interpolation par triangulation linéaire Delaunay 3D, ici en jaune). La morphologie de l'éboulis est alors reconstituée et peut être interprétée. *Reconstruction of the site morphologies as they were before the excavations. The monoplotting method was used by draping old photographs onto the 3D model. When the former limits are identified, they are digitalized, and the former surface is reshaped using linear Delaunay 3D triangulation interpolation method.*

Ces derniers sont générés par spline interpolation (courbes de Bézier) entre deux points et tentent de restituer au mieux la surface par une équation de type polynomiale. Cette méthode n'est cependant valide que si les triangles à relier sont correctement orientés (de préférence : l'un vers l'autre) afin d'obtenir une interpolation la plus linéaire possible.

La reconstitution de la paléo-surface syn-occupation montre une topographie beaucoup plus ouverte sur l'extérieur, sans masque visuel cachant (comme c'est le cas aujourd'hui), une partie des bas-reliefs. Dans le cadre de cette reconstitution, ces derniers seraient topographiquement visibles depuis la rive d'en face, ce qui conforte les résultats de l'étude de perception visuelle des œuvres dans leur environnement topographique menée par Bourdier et al. (2017).



-  Paléo-relief magdalénien moyen
-  Blocs effondrés
-  Tablier d'éboulis
-  Infrastructures de protection

-  Niveau de l'Anglin
-  Fy Terrasse alluviale
-  Zone d'excavation archéologique

4. Discussions.

4.1 reconstitution de l'évolution du relief par phases.

Les différentes étapes de cette modélisation qui utilise à la fois l'approche géomorphologique et les travaux archéologiques au sein d'un même modèle topographique peuvent être utilisées pour recréer une chrono-séquence visuelle d'évolution topographique du site du Roc-aux-Sorciers. A partir des reconstructions visuelles 3D, une tentative de reconstitution diachronique a été tentée pour les différentes phases morphogéniques identifiées sur ce site. Ces phases sont parfois corrélées à des occupations humaines, ou correspondent simplement à un événement géomorphologique. Il est possible de proposer une hypothèse de reconstitution pour certains événements et de remonter jusqu'aux caractéristiques topographiques et paysagères actuelles du site.

Les reconstitutions visuelles interrogent sur les dynamiques ayant pu être à l'œuvre sur le site, notamment parce que ce dernier est conservé sous des apports de versants (groizes et gros blocs). Une concavité de méandre est pourtant généralement peu propice à la conservation des sédiments. En effet, à cet endroit, l'eau possède la plus grande vitesse et donc la plus grande compétence comparée à la rive convexe, située en face, où se déposent les sédiments (formation de terrasses alluviales). La taille imposante (plurimétrique) des blocs effondrés situés en aval (figure 28) et à la base du site archéologique (Bozet et Miskovsky, 2010) est finalement peut-être la cause de la conservation de ces sédiments clastiques. La chute des blocs depuis l'escarpement rocheux aurait potentiellement créé un espace propice au stockage sédimentaire (replat ou creux). Le volume des blocs étant vraisemblablement trop important pour être déplacé par l'Anglin, l'éboulis aurait continué à s'accumuler dans cette enceinte naturelle. On observe d'ailleurs en contrebas du site archéologique, près de la rivière, que les blocs plurimétriques semblent être partiellement déchaussés, ce qui pourrait être rapporté à l'action de la rivière qui, au lieu de déplacer les blocs, a simplement sapé la base de ces derniers.

4.2 Mise en place d'une chronologie relative des occupations et de la morphogénèse du site.

L'analyse des morphologies par l'étude du modèle 3D permet de reconstituer une chronologie relative des événements à l'échelle du site et de l'escarpement, que l'on peut tenter de mettre en cohérence avec l'analyse stratigraphique de (de Saint Mathurin, 1984) et celle de Bozet et Miskovsky en 2010, en reprenant l'organisation de la figure 28.

PHASE 0 : Incision de l'Anglin et karstification. Mise en place des morphologies d'abri- sous- roche. Nous n'investiguons pas ici cette temporalité, mais

PHASE 1 : Une première phase d'occupation datée entre 16 et 18 ka cal. BP au Magdalénien moyen a pu être identifiée à la base des fouilles actuelles. C'est vraisemblablement à ce niveau que les sculpteurs du Roc- aux-Sorciers ont réalisé une grande partie des bas-reliefs de l'Abri Bourdois (Bourdier, 2010).

PHASE 2 : Une phase d'effondrement survient après cette première période d'occupation. La majorité des grands blocs plurimétriques visibles à l'extérieur du site semblent associés à cette phase d'effondrement, dont on retrouve des blocs au sein du remplissage sédimentaire de l'Abri Bourdois (Bozet et Miskovsky, 2010). L'emploi de la méthode de datation par les nucléides cosmogéniques du ³⁶Cl (Dunne et al., 1999) permettrait de contraindre l'âge des effondrements en prélevant des échantillons directement dans les niches d'arrachement surplombant le site et en les comparant aux blocs enfouis.

PHASE 3 : Des preuves d'une nouvelle occupation humaine ont été retrouvées plus haut dans la stratigraphie du sondage et datées du Magdalénien supérieur. Cette phase d'occupation s'intercale au sein d'un remplissage de groizes, caractéristique d'apports d'éboulis liés aux processus de gélifraction affectant ici l'escarpement sus-jacent. Les baumes de gélifraction visibles sur ce dernier, en surplomb du site, sont cohérentes avec les observations stratigraphiques et géomorphologiques.

PHASE 4 : Les occupations semblent néanmoins avoir continué malgré les apports cryosclastiques. Certaines strates d'occupation rapportées au Magdalénien supérieur sont nettement plus hautes que le niveau magdalénien moyen, recouvrant même une grande partie des sculptures pour le niveau

Figure 28 : Reconstitution en plusieurs phases de la morphogénèse du Roc-aux-Sorciers actuel. La reconstitution tente ici de mêler les résultats des reconstitutions 3D (modèle triangulé en arrière-plan), avec des éléments de dessin, en traits pleins ou en pointillés, pour représenter les différents niveaux d'incertitude (notamment en rapport à la rivière). 1. Surface d'occupation Magdalénien moyen, 2. Effondrement rocheux, 3. Formation d'un tablier d'éboulis, 4. Découverte du site par les archéologique et mise en place d'un chantier de fouilles, 5. Mise en place d'infrastructures de conservation et de protection (site actuel). *Landscape reconstruction of the Roc-aux-Sorciers morphological evolution, from Middle- Magdalenian occupation to its current state of protection. 1. Middle - Magdalenian proposed paleo-topography, 2. Rockfall, 3. Scree slope, 4. Archeological diggings, 5. Protection and preservation of the rock art.*

autour de 14 ka cal. BP (Bozet et Miskovsky, 2010)

La reconstruction 3D des morphologies du tablier d'éboulis pré-fouilles grâce au monoplottage de photographies anciennes fait également apparaître une zone de replat correspondant au comblement de l'Abri Bourdois. Bien que la faible quantité de documents invite à la réserve, cette morphologie de replat ne semble pas liée à un processus naturel, (absence de la pente qui caractériserait le processus de versant et absence de sédiments fins caractérisant des apports fluviaux subhorizontaux). Pourrait-elle donc exprimer un ancien aménagement anthropique ? Il est difficile d'attribuer un âge à l'agencement de ce replat quel que soit son origine : est-il hérité des occupations magdaléniennes ou est-ce un aménagement historique, beaucoup plus récent ? Trop peu d'informations sont actuellement en notre possession pour formuler une hypothèse. Une nouvelle campagne de datation ¹⁴C avec des échantillons plus nombreux et par les nouvelles méthodes AMS pourrait vraisemblablement apporter de nouveaux éclairages sur la séquence d'occupation, et du même coup aider à mieux

contraindre la morphogénèse et les modalités d'occupation Magdalénien supérieur du site.

PHASE 5 : Le site, entièrement enfoui sous le tablier de groizes, est découvert en 1927 par Lucien Rousseau (Rousseau, 1933) et les fouilles archéologiques se mettent en place, révélant les bas-reliefs sculptés.

PHASE 6 : Suite à l'inscription du site aux Monuments Historiques, des opérations de conservation archéologique prennent le relais, recouvrant le site d'infrastructures de protection, qui le rendent aujourd'hui « invisible ».

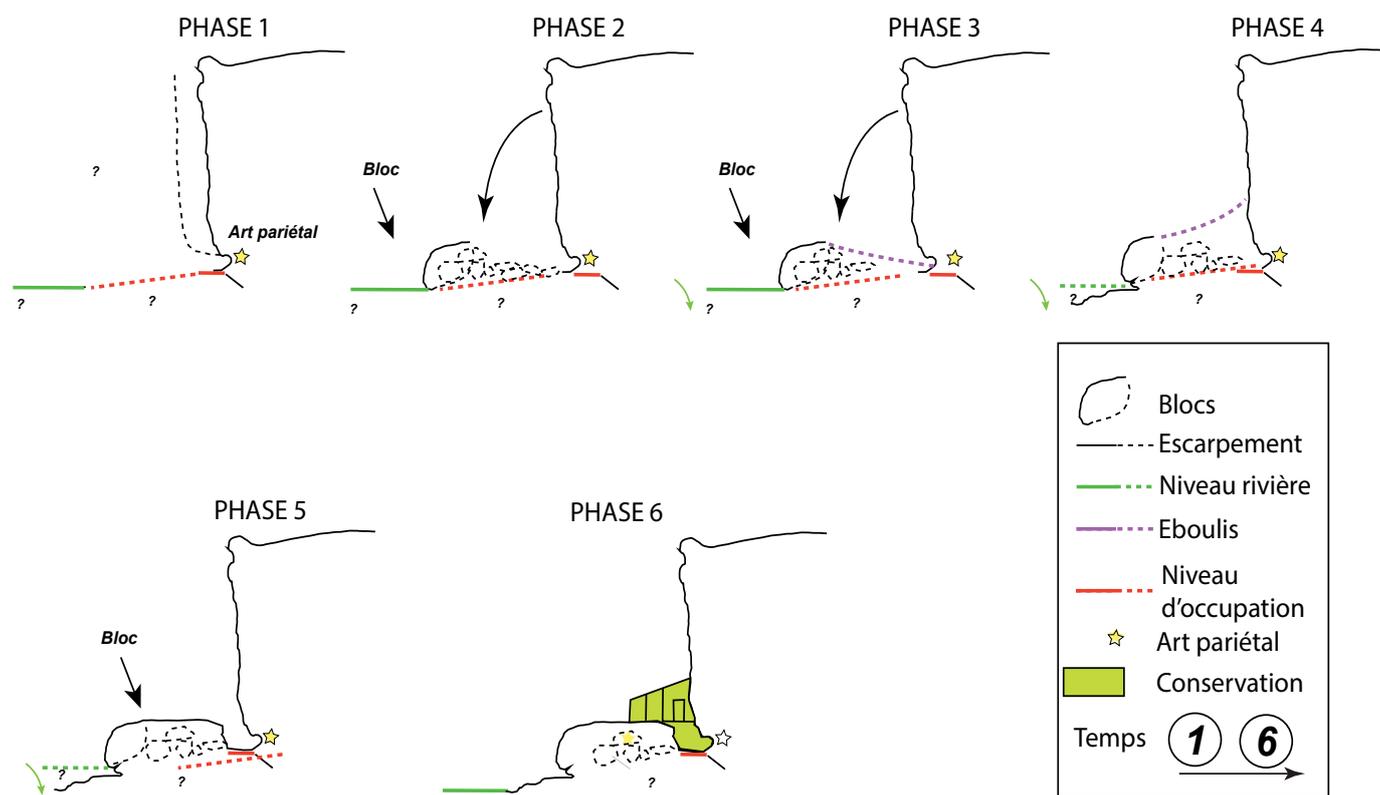


Figure 29 : Proposition d'interprétation des différentes phases de morphogénèse et de fréquentation du site du Roc-aux-Sorciers (abri Bourdois) à partir du modèle 3D et de l'étude sédimentologique. La combinaison des regards au sein du modèle 3D permet de proposer une hypothèse d'évolution chronologique des morphologies du site, en tenant compte des informations géomorphologiques (les clastes et leur provenance, les blocs effondrés) ainsi que de l'étude stratigraphique et archéologique. *Hypothesis on the different steps of the lower site morphogenesis and its occupancy by Magdalenian people, with the help of the 3D model and sedimentological studies. Approaches can be combined inside the 3D model which is used as a tool to build a relative chronological model of the site evolution combining geomorphological data (clast origins and dynamics, fallen rocks) with stratigraphical and archaeological work.*

5. Conclusions.

Le couplage entre méthodologie 3D et approche géomorphologique démontre son efficacité pour reconstituer des phases d'évolution du relief du Roc-aux-Sorciers. L'approche géomorphologique a permis de reconstruire certaines morphologies syn-occupation magdalénienne, et de restituer des informations visuelles permettant de réfléchir à la mise en place initiale des sédiments sur le site. Au-delà d'un outil permettant une visualisation plus aisée du site, le modèle 3D haute résolution est fédérateur car il crée du lien, entre les résultats de la cartographie géomorphologique et les données issues des fouilles archéologiques (notamment les photographies des fouilles, des coupes topographiques et l'analyse sédimentologique du remplissage de l'Abri Bourdois), permettant ainsi de proposer une reconstitution de la surface pré-écroulement, ainsi que la morphologie complète du tablier de gélifractions. La construction du modèle 3D a été pensée comme document à la fois spatial et intégratif. Il permet de repositionner les anciens travaux topographiques ; mais il s'adresse également à d'autres chercheurs, par l'intermédiaire des MNT raster qui représentent les sols actuels. La combinaison de ces données au sein d'un même modèle a permis d'obtenir de nouvelles informations. Ce faisant, il participe pleinement au processus de construction du savoir. Le modèle 3D apporte bien sûr des connaissances sur les morphologies mais il permet surtout le croisement des regards de chercheurs issus de différentes disciplines (géomorphologie, archéologie, sédimentologie, documentation des fouilles...). Le modèle permet alors de distinguer plus facilement les corrélations et interactions éventuelles entre les données issues de différents axes de recherche. Penser les objets non plus seulement pour eux-mêmes mais également dans leur contexte spatial permet de les intégrer dans une réflexion plus globale où les objets investigués et les diverses approches se renseignent mutuellement.

Photographies du Roc-aux-Sorciers



Photo 1 : Les escarpements du Roc-à-midi et les falaises de Douce, abritant le Roc-aux-Sorciers. Crédits : Ph. Plailly.



Photo 2 : Enceinte de protection du Roc-aux-Sorciers. Crédits : Jaillet, 2015.

CHAPITRE 2 : PENSER L'ESPACE TOPOGRAPHIQUE COMME INTERFACE DES PHENOMENES NATURELS ET ANTHROPIQUES : MODELISATION INTEGREE ET APPROCHE GEOMORPHOLOGIQUE 3D DU SITE BOROLOGA (KIMBERLEY, AUSTRALIE).

Conduite dans le cadre du projet ARC « Kimberley Vision », dirigé par Peter Verth (Western Australia University) soutenu par la *Kimberley Rock Art Foundation*, la campagne de terrain 2017 avait pour objectif : l'étude du site de Borologa sous la direction de B. David et de J.J. Delannoy. Comme de nombreux sites du Kimberley et en Terre d'Arnhem, ce site orné s'inscrit dans un paysage de monolithes agencés dans des quartzites (Delannoy et al., 2017 ; David et al., 2017). Le secteur étudié correspond à de vastes plateaux étagés incisés en gorges par les cours d'eau. Compte-tenu du climat tropical semi-aride à saison humide de type mousson, les cours d'eau présentent de très fortes variations de débit dont il est difficile de cerner les ampleurs lors des campagnes de terrain de juin-juillet (saison sèche). Des recherches antérieures avaient été préalablement menées sur le site Borologa avant l'étude géomorphologique 3D : elles concernaient des premières fouilles archéologiques (B. David, P. Veth), les premiers relevés archéo-géomorphologiques (J.J. Delannoy) et des travaux plus centrés sur les mouvements gravitaires des monolithes et leur calage chronologique par la méthode cosmogénique $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ (Cazes et al., 2016) ; ce dernier aspect ayant été mené dans le cadre du projet ARC « Kimberley dating ».

Introduction – contextualisation.

L'intérêt du couplage de l'approche géomorphologique et de la visualisation 3D a été mise en avant dans la définition de l'architecture du site du Roc-aux-sorciers durant et après ses phases de fréquentation paléolithique. La mise en place d'une topographie haute résolution, en plus de répondre directement à des problématiques géomorphologiques en facilitant l'identification de certaines formes, peut également apporter des informations spatiales nécessaires à d'autres types de questionnements issus des champs de l'environnement ou de l'archéologie. L'étude du site australien Borologa (Kimberley, Drysdale River) a été conduite dans cet esprit en intégrant les résultats issus à la fois des recherches archéologiques et géomorphologiques dans le but d'appréhender le contexte géographique et morphogénique de ce site.

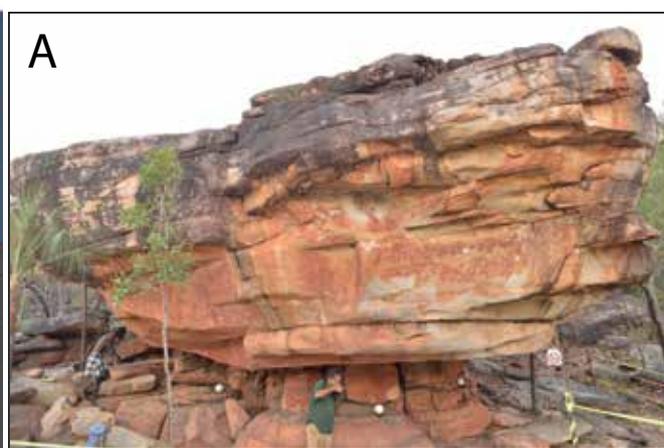


Figure 30 : Situés au Nord-Ouest de l'Australie, les plateaux du Kimberley possèdent des vestiges d'occupations passées parmi les plus anciens, remontant à plus de 55 ka (Verth, 2017). Le site Borologa, se situe à la sortie des gorges de la Drysdale River. Les monolithes de quartzite (A) ont servi de support aux représentations des Wanjina (B). Figure reprise de : David et al. (2019). *The Kimberley area is located on the north-west area of the Australian continent. The Drysdale River cuts off the Kimberley plateau and ends up in the Indian Ocean. Borologa site is located at the end of the Drysdale River canyon. Wanjina paintings (B) are located under quartzite monoliths (A). (From David et al., 2019).*



L'art pariétal Aborigène est encore très bien préservé grâce aux caractéristiques géologiques des quartzites du Kimberley qui sont d'une grande dureté, et à leurs caractéristiques morphologiques qui permettent la conservation des ornements par les nombreux abris (monolithes, porches...) les protégeant de l'altération météorique. L'art pariétal est souvent associé à des environnements paysagers présentant des particularités (Monney, 2012) tels que les méandres de rivière, ou encore, dans le cas du site Borologa, des monolithes géants qui marquent le relief. Ce constat peut être fait dans d'autres sites autour du monde (Pont d'Arc avec la grotte Chauvet, escarpements à Nawarla Gabarnmang (Delannoy et al., 2017)). Il interroge sur les motifs d'occupation d'un site plutôt qu'un autre, d'où la nécessité d'une approche intégrée des sites archéologiques, non plus seulement à l'échelle de la fouille archéologique et des temporalités d'occupation, mais également à celle des alentours sur une échelle temporelle qui est celle de l'évolution du relief.

Le contexte physique (géologique et géomorphologique) du plateau du Kimberley engendre une évolution relativement lente du relief : les phénomènes d'incision des rivières et les mouvements de versant s'étalent sur des temporalités longues (plusieurs centaines de milliers d'années à plusieurs millions d'années), et conservent donc très bien les traces de ces lentes évolutions (Caze, 2016). Ces conditions particulières offrent des opportunités d'étude géomorphologiques en vue de reconstruire l'évolution du relief, et de pouvoir séparer la composante humaine (David et al., 2013 ; Delannoy et al., 2017 ; David et al., 2019) de celle héritée des facteurs naturels, notamment par le biais de levés topographiques 3D haute résolution.

Le site Borologa se situe à la sortie du dernier méandre encaissé de la *Drysdale River*, qui sort ensuite définitivement du plateau du Kimberley pour continuer vers l'Océan Indien. Le site se compose de 3 monolithes ornés (Borologa 1, 2 et 3) dont le principal (Borologa 1) fait plus de 7 m de hauteur. Ils se situent à la base d'un escarpement rocheux de quartzite, dans la partie concave du méandre de la *Drysdale River*.

Bien que la communauté aborigène Balangarra ait re-identifié ce site dans les années 1980 – 1990, il était déjà connu par les touristes du *Drysdale River National Park* sous le nom de « *Wanjina Rock* », les monolithes des *Wanjina* (Welsh, 2015). En plus de ces trois monolithes, d'autres sont présents sur l'ensemble du versant dominant la *Drysdale River*. Ils sont composés de quartzite caractérisé par des bancs réguliers décimétriques. Ils reposent tous sur un niveau subhorizontal de bedrock tenant lieu de piédestal. Les bancs de bedrock les plus bas sont enfouis sous un dépôt sableux, d'origine fluviale et éolienne (David et al., 2019). Un niveau fluviale aujourd'hui perché à environ 7 mètres au-dessus du niveau des hautes eaux de la *Drysdale River* a été identifié lors des précédentes missions.

Ces sites ont été fréquentés par les communautés aborigènes comme en témoignent à la fois les nombreuses représentations pariétales et les vestiges lithiques trouvés en fouilles (David et al., 2019). La prégnance visuelle de ces morphologies le long de la rivière questionne leur modalité de fréquentation : les monolithes étaient-ils dans la même position qu'aujourd'hui au début des fréquentations ? Quelle peut être l'origine de telles structures ?

Une approche géomorphologique couplée à une instrumentation 3D a donc été conduite en même temps que les fouilles du site Borologa (David et al., 2019) par l'intermédiaire d'un relevé LiDAR haute résolution du site orné (fouilles archéologiques, monolithes) ainsi que de son environnement direct (versant de la *Drysdale River*) pour mieux cadrer l'évolution du versant Borologa de la *Drysdale River*, afin de placer dans un cadre spatio-temporel d'évolution longue durée les travaux en cours sur les fréquentations Aborigènes du site Borologa (archéologie et anthropo-géomorphologie). Dans cet objectif, le travail d'acquisition topographique a été effectué en tentant de répondre à plusieurs attentes scientifiques : celles de l'archéologue (fouilles et excavations), du géomorphologue (rivière et versant Borologa) et enfin celle de l'anthropo-géomorphologue (monolithes et blocs déplacés).

1. Un site mobilisant de nombreux enjeux de recherche, à différentes échelles d'investigation.

Nous nous sommes attachés à étudier l'évolution spatiale des monolithes, leur provenance et les déstabilisations mécaniques auxquels ils ont potentiellement été soumis au cours du temps au moyen d'une approche de géomorphologie dynamique basée sur la rétro-modélisation 3D du versant. Cette approche vise à retrouver les attaches d'origine de certains blocs à l'escarpement. L'intervention de la topographie 3D était aussi pertinente en regard d'autres questionnements scientifiques mis en œuvre sur le site Borologa. Dans ce but, plusieurs protocoles méthodologiques ont été utilisés pour réaliser le

modèle topographique. La grande adaptabilité et la facilité de déploiement du scanner 3D combinés à des relevés photogrammétriques occasionnels ont permis d'adapter les protocoles d'acquisition en fonction des enjeux scientifiques (archéologie et anthropogéomorphologie), tout en restant dans l'objectif de générer un unique modèle surfacique. Le but a donc été ici de mêler des relevés à deux échelles : (i) à très haute résolution, notamment pour répondre aux questionnements archéologiques et anthropogéomorphologiques sur le site orné et l'excavation à Borologa 1, et (ii) à résolution plus basse, portant sur l'escarpement rocheux et sur l'ensemble du versant où se situe le site étudié, en rive droite de la Drysdale River à la sortie de son dernier méandre encaissé. L'étude de ce site a donc été réalisée avec une grande variabilité d'échelles temporelles et spatiales (du temps de l'érosion au temps des Hommes, du bassin versant à l'excavation archéologique) afin de répondre au mieux aux questionnements sur les occupations passées.

1.1 Prospections archéologiques.

Les recherches archéologiques qui avaient déjà débuté en 2016 se sont poursuivies en juin/juillet 2017. Lors de la mission de 2017, un suivi régulier au LiDAR terrestre a été réalisé sur le site des fouilles en tenant compte des différentes phases de leur avancement, ainsi que sur certains objets remarquables retrouvés dans l'excavation. L'acquisition 3D avait pour objet de préciser la géométrie des horizons stratigraphiques et des objets présents (blocs, meule, gouttes de peintures) afin de les croiser avec la morphologie du site et l'emplacement des panneaux ornés.

Les scans réguliers ont été assemblés par le biais de la méthode de la consolidation par les cibles au moyen de 3 sphères positionnées à proximité de l'excavation et laissées en place pendant toute la durée de la mission.

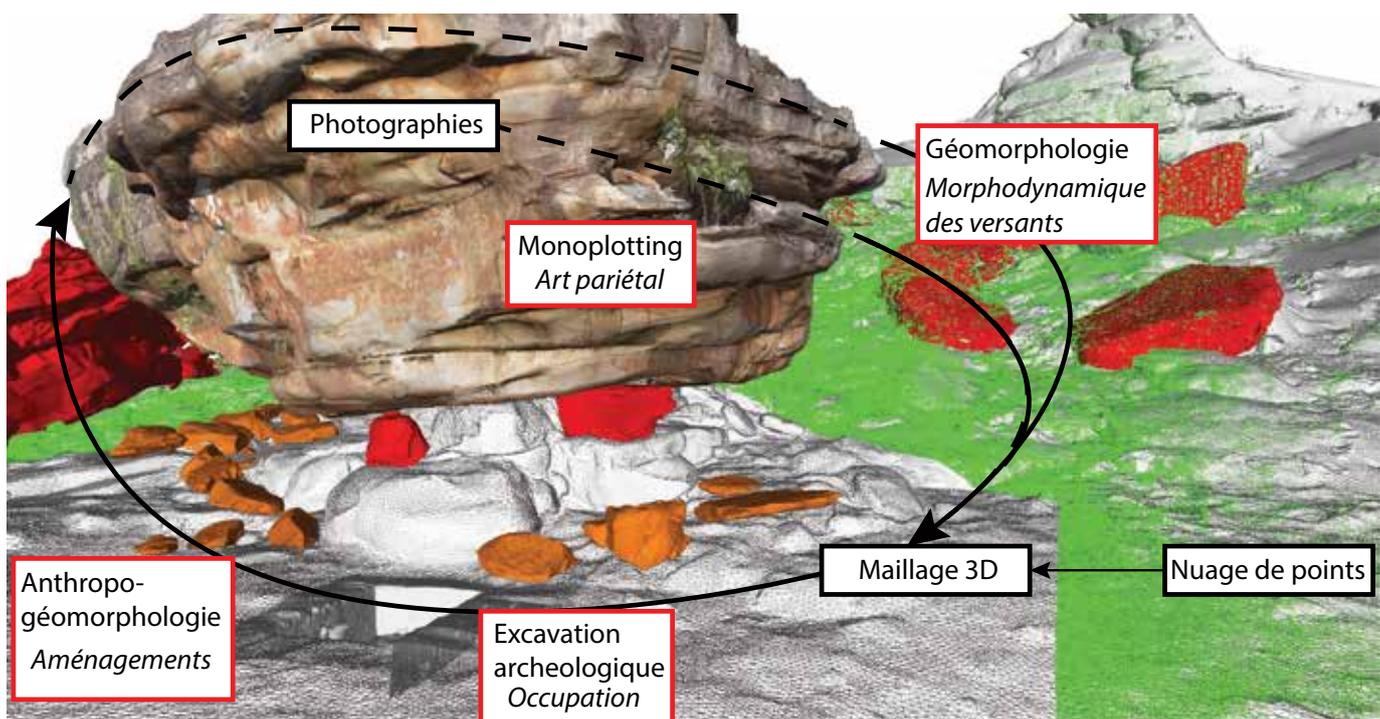


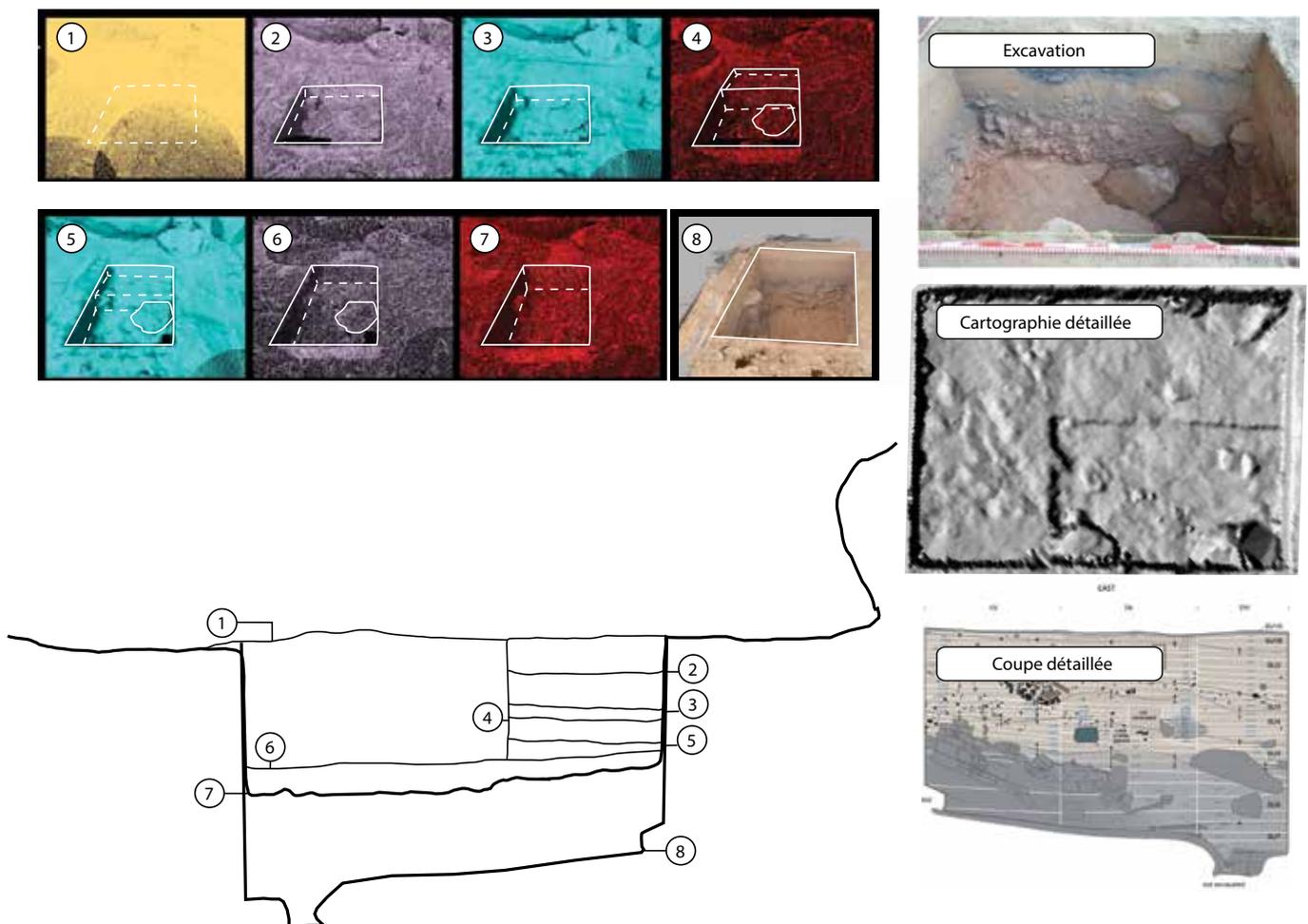
Figure 31 : L'acquisition topographique haute résolution a été réalisée en fonction des attentes scientifiques autour du site Borologa et a mobilisé plusieurs protocoles méthodologiques. L'utilisation du LiDAR à décalage de phase sur l'ensemble du site a permis d'alterner des acquisitions à haute résolution pour les zones ornées avec des passages à plus basse résolution pour une couverture générale plus étendue à l'échelle du versant. D'autres méthodes d'acquisition des données (photogrammétrie, photos) ont ponctuellement été utilisées au cours de l'acquisition. Noir : données ; rouge : travaux sur la donnée. *One unique model was designed for multiple applications. The 3D LiDAR survey was used for different scientific purposes which implied the use of multiple mapping methods, mixing high- and low-resolution LiDAR scan stations with photogrammetry and photographs monoplotting. Black : data ; red : data processing.*

1.2 Cartographie

anthropo-géomorphologique.

Une étude anthropo-géomorphologique, également commencée lors de la campagne 2016, a pris appui sur le déploiement du LiDAR terrestre de 2017 pour compléter la première cartographie anthropo-géomorphologique des monolithes (David et al., 2019). Cette approche visait à caractériser des hypothèses d'aménagements anthropiques de positionnement des blocs par une cartographie géomorphologique haute résolution accompagnée d'une reconstitution virtuelle 3D de l'environnement afin de repositionner des blocs à leur point d'ancrage d'origine (Delannoy et al., soumis).

Figure 32 : Scan régulier de l'excavation pour documenter sa progression. Le recalage par rapport à des cibles fixes au cours de la mission a permis leur consolidation automatique, permettant ainsi d'obtenir une vision précise de l'évolution de l'excavation ainsi que de la topographie des surfaces excavées. L'étape finale de l'excavation a également été levée par photogrammétrie afin d'obtenir un levé en couleur, puis recalé par rapport au levé LiDAR. Coupe détaillée d'après : David et al. (2019) *Daily scans of the pit were made to document its progression. Spherical targets were placed next to the pit along the whole mission in order to ease the scan scenes registration. The final 3D document can be used for precise cross sections of the scanned excavation floors and to place data in their environment. Excavation pit's final stage was also mapped using the photogrammetry method in order to have coloured data. Geomorphological cross section from: David et al. (2019).*



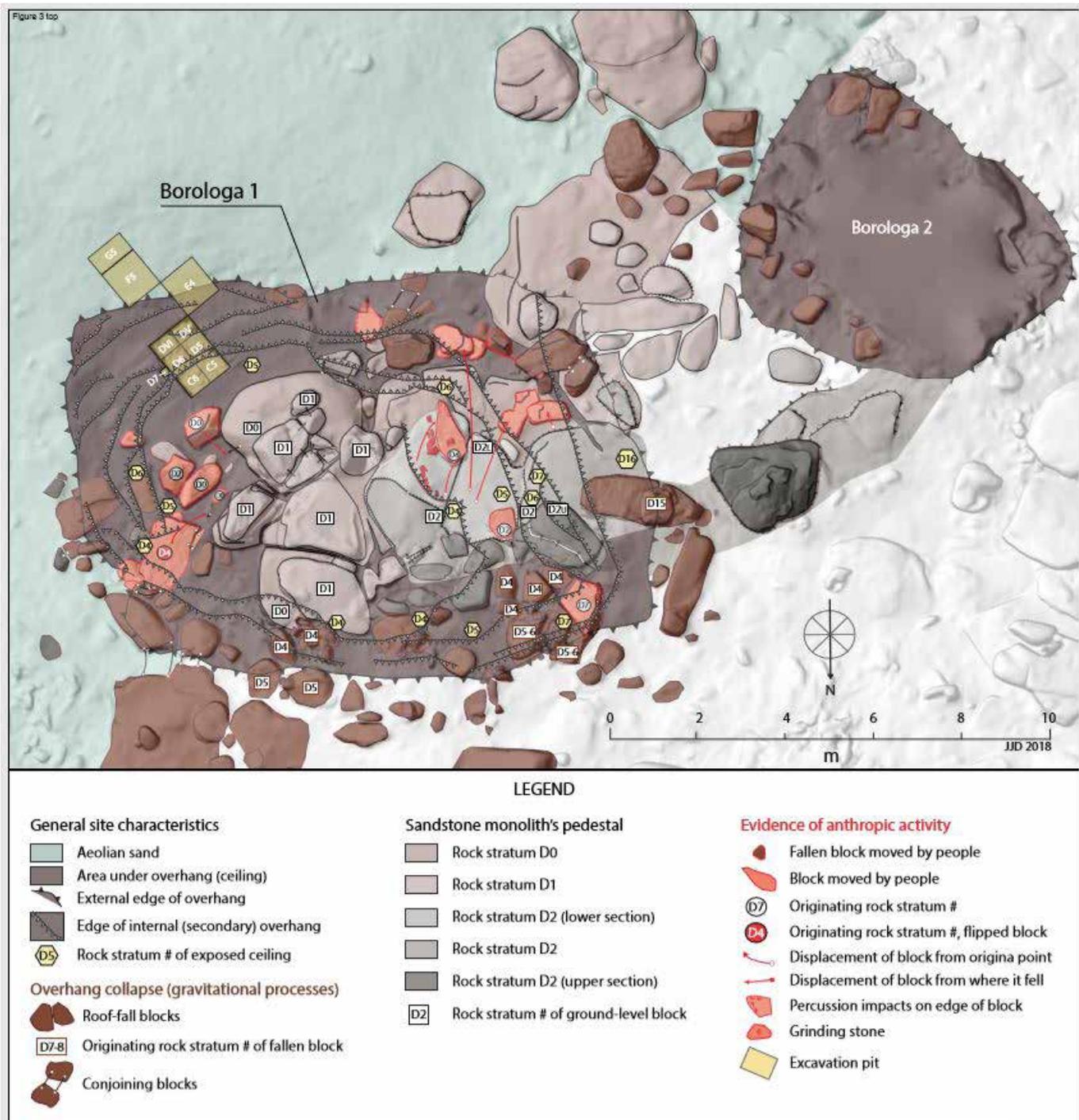


Figure 33 : La cartographie anthropo-géomorphologique du monolithe Borologa 1 (DAO : Delannoy J-J, in : David et al., 2019) se base sur le placement des blocs sur le terrain et l'étude de leurs ancrages potentiels pour déterminer l'origine de leur mouvement : anthropique ou naturel. L'acquisition LiDAR convertie en MNT ombré offre un support cartographique pertinent pour identifier l'origine des blocs. Le couplage de cette approche au modèle 3D permettra d'aller plus loin et de proposer des protocoles de validation géométrique des zones d'ancrage au moyen de la topographie haute résolution. *Anthropo-geomorphological map of the Borologa 1 monolith (from David et al., 2019) serves as a key tool to discriminate naturally moved blocks from others moved by people. The map provides new insight of the landscape evolution during Aboriginal occupancy. The LiDAR survey which was converted into a hillshade map in order to serve as a cartographic base is only a part of a wider work that uses 3D modeling as a validation tool to assess the original block positions.*

2. Etude géomorphologique du versant du site Borologa.

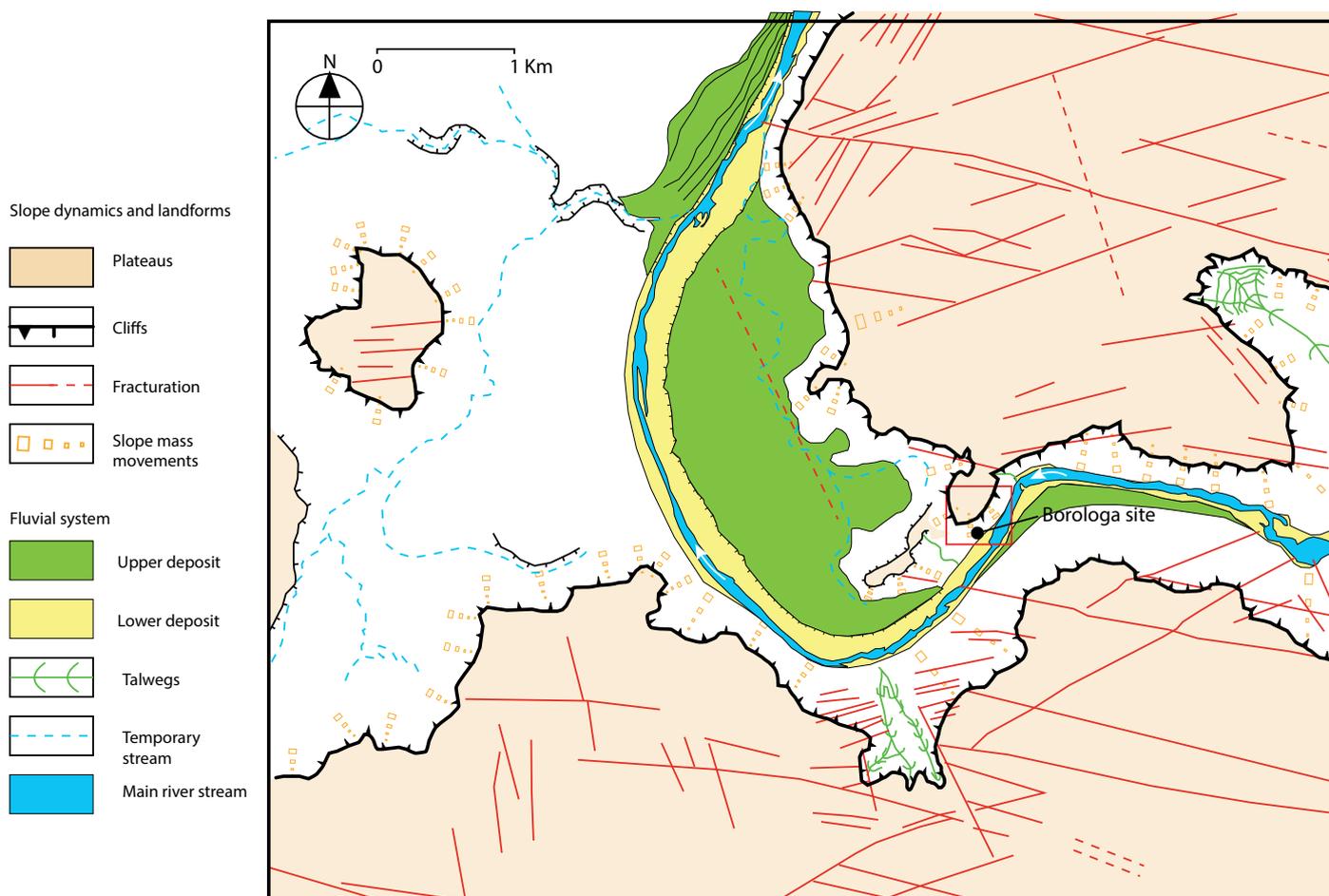
L'étude de la morphodynamique des versants de quartzite du site Borologa a été menée par l'intermédiaire du lever LiDAR. Elle repose sur la rétro-modélisation 3D des blocs et des monolithes ornés, afin de comprendre leur provenance et la manière dont le versant a évolué au cours du temps. En essayant de répondre à la question de l'origine des monolithes, cette étude permet de relier les différentes approches appliquées sur le site Borologa ; à l'échelle des processus de versant et sur des temporalités longues (Cazes, 2016) comme à celle du site orné et des hommes. L'objectif final reste l'analyse des périodes de fréquentation du site par les communautés humaines au cours du temps.

Pour appréhender les dynamiques à l'œuvre sur le site Borologa, et particulièrement sur les monolithes, une cartographie géomorphologique a d'abord été réalisée à l'échelle du versant.

2.1 Cartographie du dernier méandre de la Drysdale river.

La très faible densité de végétation dans le Kimberley permet une première observation du site en couplant les photographies aériennes avec les données topographiques du SRTM (MNT 90m) sous logiciel SIG. En plus de mettre à jour les grandes directions de fracturation, la mobilisation des photographies aériennes permet d'étudier le site à petite échelle, pour l'aborder dans son contexte physique.

Figure 34 : Cartographie géomorphologique du dernier méandre de la Drysdale River qui sort du plateau du Kimberley. Le site est localisé au débouché des gorges, au contact entre les reliefs en plateaux étagés et la plaine occidentale qu'emprunte la Drysdale River jusqu'à son embouchure dans l'Océan Indien. Topographie : SRTM 90 m. *Geomorphological map of the last ingrown meander of the Drysdale River that flows out of the Kimberley plateau. Borologa site is located at the end of the canyon, between Kimberley plateaux and the beginning of the western plains. Topography: SRTM 90 m.*



Ce premier travail cartographique révèle des directions de fracturation bien marquées dans le paysage, formant une organisation géométrique ENE/OSO et ESE/ONO visibles sur photographie aérienne. Cette échelle d'analyse permet également de mettre en évidence le passage d'une morphologie en gorges à celle d'une plaine alluviale, bien marquée par l'organisation des dépôts fluviaux déposés latéralement juste en aval du site. La localisation fait sens, car la sortie de la vallée encaissée de la Drysdale River est un des premiers points de passage entre la plaine et le plateau (figure 34). Juste en amont du site Borologa, la rivière forme un coude avec un angle prononcé.

2.2 Le rebord du plateau et son escarpement rocheux surplombant le site Borologa.

L'étude du coude du méandre à une échelle plus fine, toujours par l'intermédiaire des photographies aériennes, permet d'établir une première approche visuelle du site Borologa ainsi que des dynamiques à l'œuvre sur les versants. Des mesures d'érosion ont été effectuées par la méthode des datations

cosmogéniques $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ (Cazes, 2016) dans le cadre du programme « Kimberley rock art dating project » dirigé par Andrew Gleadow (University of Tasmania). Certains échantillons ont été prélevés sur l'escarpement sommital du plateau qui domine le site Borologa, ainsi que sur des monolithes détachés de cet escarpement. Cette étude a permis d'aborder dans l'espace et le temps, les processus de basculement des monolithes de versant quartzitique.

Les datations effectuées sur un monolithe en surplomb du site Borologa (plusieurs dizaines de mètres au-dessus) ont permis de caler dans le temps des dynamiques de glissement et de fracturation mécanique d'un important monolithe. Les âges obtenus pour le détachement du bloc du plateau sont d'environ 130 Ka, et de 90 Ka pour sa fracturation en deux parties distinctes. Ces dates permettent d'inscrire certains mouvements du versant de la Drysdale River dans des occurrences pléistocènes et laissent supposer des morphogénèses de versant sur des temporalités longues par rapport aux occupations humaines.

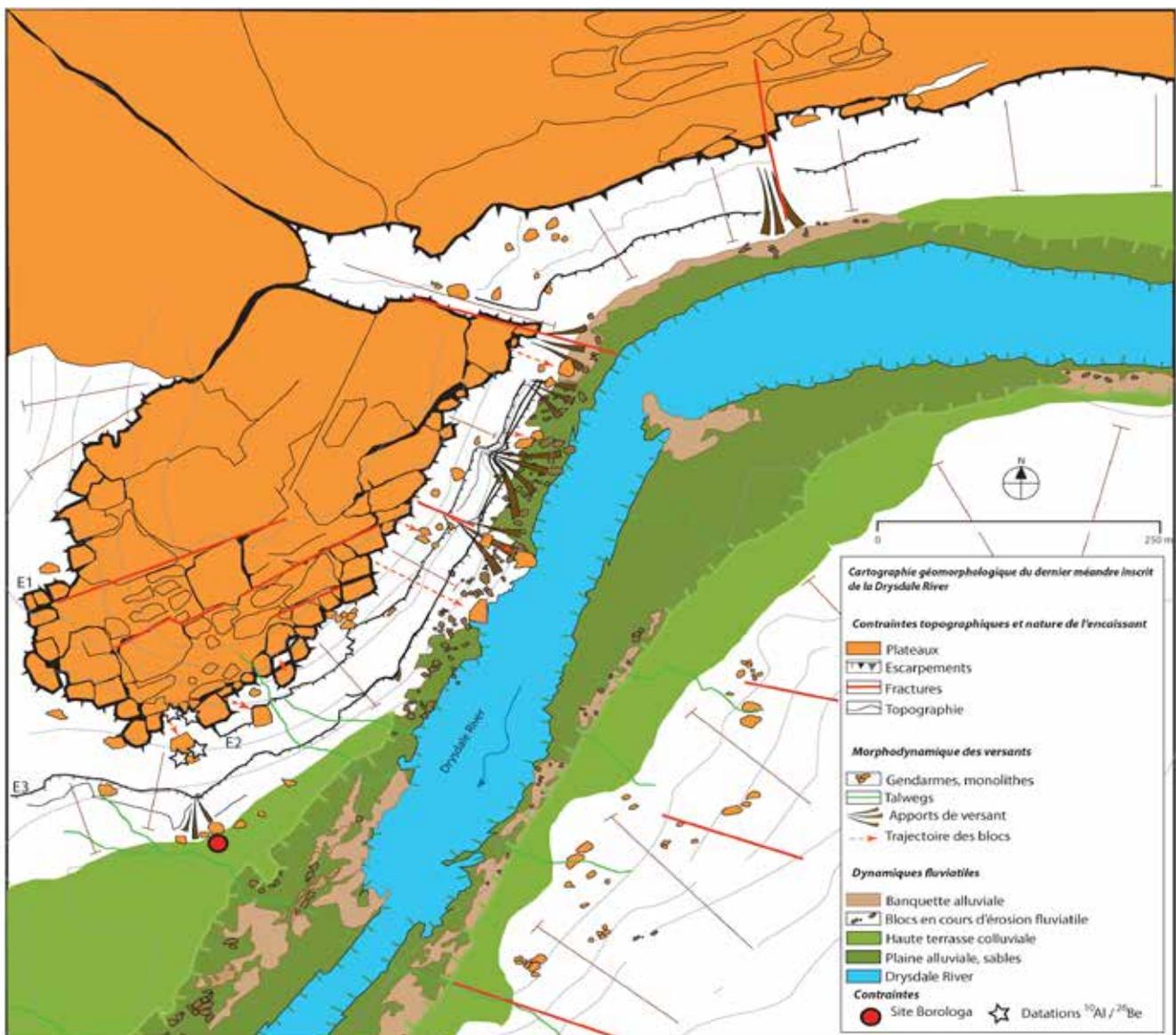


Figure 35 : Cartographie géomorphologique du versant du site Borologa (rive droite de la Drysdale River). La localisation du site, à l'interface entre les dynamiques de versant et la morphogénèse fluviale, met en avant cette double influence, à la fois du plateau (dynamique gravitaire) et de la rivière (dynamique fluviale). Le travail mené par Gaël Cazes et co-auteurs (2016) a permis de corrélérer les rapport $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ avec le degré de pente des escarpements rocheux pour des échantillons de quartzite du Kimberley, contraignant les évolutions des monolithes du versant de la Drysdale river dans des temporalités du Pléistocène moyen. Datations cosmogéniques : Cazes et al., 2016.

Geomorphological map of the upslope part of Borologa site. The painted monoliths are under slope dynamics and fluvial constraints. $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ constraints on some of the Drysdale river monoliths (upper part of the slope) were correlated with slope degrees in Kimberley quartzite by Gaël Cazes and co-authors (2016) which placed slope-based processes that occurred on monoliths in a mid-Pleistocene temporality. Cosmogenic nuclear datings : Cazes et al., 2016.

La cartographie géomorphologique permet de distinguer l'escarpement principal (E1) qui est ici à l'interface entre le plateau et le canyon de la Drysdale River. On retrouve au sein de ce dernier les mêmes directions de fracturation observées à petite échelle sur la carte précédente (figure 35). On observe également le processus de détente mécanique à l'œuvre sur les bords du plateau, en bordure des gorges. Des blocs pluri-déca-métriques semblent se détacher de l'encaissant en suivant les lignes de fracturation précédemment mentionnées. Ces derniers sont ensuite soumis aux processus de versant (bascule et glissement). La morphologie très anguleuse des blocs détachés et la grande résistance des quartzites à l'érosion (Cazes et al., 2016) permet d'identifier facilement par cartographie morphologique visuelle. Ces processus ont pu être attestés par la bonne qualité des corrélations d'âge $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ sur des niches d'arrachement de certains monolithes de quartzite à quelques centaines de mètres du site Borologa (Cazes et al., 2016).

Certains monolithes de très grande taille (plus d'une dizaine de mètres) se retrouvent près de la rivière, sur le niveau de la terrasse à + 7 m. C'est le cas des monolithes de Borologa mais également, plus en amont, d'autres blocs de taille plus importante. Ces derniers sont notamment présents en aval de la partie la plus prononcée du coude du méandre, sous les escarpements sapés par la rivière. La taille de ces très gros blocs et leur forme suggèrent qu'ils sont directement descendus de l'escarpement sommital. Il est d'ailleurs possible de replacer sur le modèle 3D ceux dont la niche d'arrachement est encore visible au-dessus d'eux.

3. Méthodes d'acquisition topographique LiDAR pour l'analyse 3D.

3.1 Acquisition.

Afin de cadrer le site Borologa dans son environnement direct, une modélisation 3D du méandre a été conduite par photogrammétrie (multi-corrélation d'images permettant de reconstruire un relief par stéréoscopie à partir de l'algorithme SIFT, (Lowe, 1999), méthode décrite dans le chapitre 3) afin de mieux cerner l'organisation des bancs de quartzite. La construction est issue de relevés photographiques pris sur le terrain (rive gauche de la Drysdale River) combinés à des clichés aériens pris depuis l'hélicoptère du projet Kimberley Visions. Le nuage de points obtenu a été nettoyé de sa végétation et maillé selon une triangulation Delaunay 3D (voir figure 37) dans le seul objectif de mieux visualiser l'escarpement

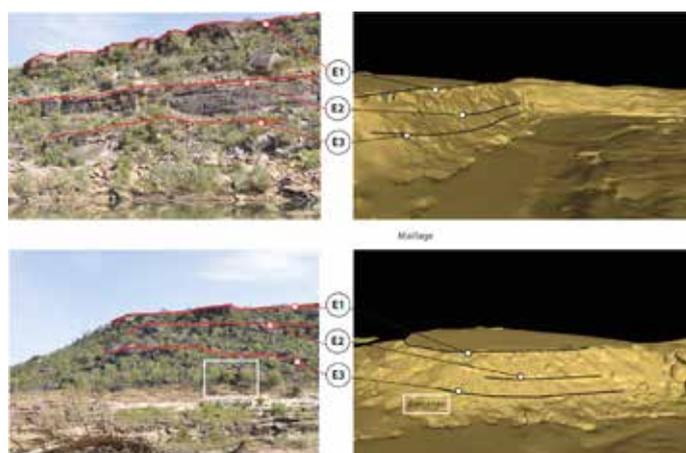


Figure 36 : Modélisation 3D de l'escarpement rocheux. La visualisation 3D permet de distinguer les 3 niveaux principaux (escarpements E1, E2 et E3), localisés en rive droite de la Drysdale River. *3D modelling of the rock walls of the Drysdale river. The 3D visualization allows to distinguish 3 main levels (E1, E2, and E3) that are all located on the right side of the Drysdale River.*

rocheux. La visualisation 3D de ce dernier confirme l'existence de trois niveaux d'escarpement en rive droite de la vallée qui se prolongent sur l'ensemble de la rive droite de la Drysdale River, à la sortie du plateau du Kimberley.

Les deux niveaux principaux d'escarpement (E1 et E2) sont bien visibles sur les photographies. Ils se développent en amont d'un moins important (E3). Le site Borologa en lui-même est situé sous l'escarpement E3, à l'interface entre la fin de ce dernier et les premières manifestations morphologiques des dynamiques fluviales (haute terrasse alluviale). La taille réduite des monolithes ornés comparée à celles de leurs homologues en amont et plus haut sur le versant, nécessite d'étudier le site en détail. Cette approche du site à l'échelle des monolithes ornés et du premier niveau d'escarpement (E3) a bénéficié de l'acquisition LiDAR mobilisée pour les questionnements archéologiques et anthropomorphologiques ; elle est ici mobilisée dans un objectif géomorphologique, pour comprendre l'origine de la disposition et la nature des monolithes ornés.

Afin de couvrir l'ensemble des 3 monolithes ornés et leur versant correspondant, 170 stations de scan ont été réalisées au LiDAR terrestre à décalage de phase, appareil de courte portée FARO focus 3D 360. Au total, une surface de 5000 m² a été couverte avec 700 millions de points et couvre un domaine partant de la terrasse sableuse au-devant des monolithes jusqu'à la première barre rocheuse de l'escarpement E3. La résolution du scanner est dépendante de l'angle entre deux points consécutifs et donc diminue avec l'éloignement. Sur cette opération, les résolutions vont d'un point tous les 10 cm pour les zones éloignées (escarpement) jusqu'à des résolutions infracentimétriques (2 mm) pour les

monolithes ornés (Tableau 1).

A ce modèle de l'environnement direct des sites ornés s'ajoutent les 42 scènes de scan issues des relevés journaliers de l'excavation sous le monolithe Borologa 1, et 12 autres scènes pour l'excavation sous Borologa 3.

Enfin, une meule retrouvée dans la fouille archéologique sous Borologa 1 a également été scannée lors de sa découverte. Les relevés LiDAR réalisés pour une étude détaillée de la stratigraphie de l'excavation archéologique ont été intégrés au sein du modèle topographique du versant. Les informations stratigraphiques issues des fouilles archéologiques renseignent également sur l'évolution du site.

3.2 Maillage des nuages de points.

Après une étape de consolidation et d'élimination manuelle de la végétation sur les relevés LiDAR (pour rappel, voir méthode Chapitre 1), le modèle a été maillé selon la méthode d'interpolation linéaire des triangles de Delaunay 3D à l'aide du logiciel 3DReshaper.

Cette opération permet de générer une surface à partir des points du relevé laser, en les reliant par des triangles. Les sommets de ces derniers peuvent correspondre à certains points du nuage original. La construction de ces derniers se fait par interpolation linéaire, les triangles se construisent donc les uns par rapport aux autres, en fonction des plus proches voisins.

Après un nettoyage de la végétation (voir chapitre 1), l'opération de maillage permet également de générer une topologie, une information de voisinage et donc une continuité à partir des informations discrètes que représentent les points. La triangulation construit une peau numérique qui restitue la surface des objets. Il est possible d'apercevoir l'escarpement immédiatement en amont des monolithes Borologa ainsi que ces derniers.

Dans l'optique d'étudier la dynamique morphogénique du versant, certains blocs ont été maillés indépendamment du sol. Cette opération que nous appelons ici maillage segmenté, est conduite parfois sur une face (gros blocs), parfois sur la totalité du bloc, même sur les zones invisibles (enfouies) de ce dernier.

L'attribution à ces blocs d'une topographie continue en volume présente donc des incertitudes plus ou moins importantes selon le bloc scanné et sa position par rapport au sol. Bien que les estimations soient parfois délicates, le débitage très anguleux des blocs de quartzite aide beaucoup dans le processus de reconstruction de ces derniers.

Ground surfaces and external environment	
A: Survey method	Short-range TLS + sphere registration
B: Point cloud accuracy	1 cm
C: Point cloud density	2 cm
D: Mesh accuracy	2 cm
E: Delaunay 3D triangle mean size	8 cm
F: Mapping tool	Faro Focus 3D 360 (2012)
Borologa 1 rock shelter and nearby blocks	
A	Short-range TLS + sphere registration
B	1 mm
C	6 mm
D	3 mm
E	1.2 cm
F	Faro Focus 3D 360 (2012)
Squares C5-C6-D5-D6-DV-DVI excavation pit	
A	TLS constrained photogrammetry
B	1 mm
C	2 mm
F	NIKON D 800 camera + 50 mm

Tableau 1 : spécifications de l'acquisition et du modèle 3D des monolithes Borologa. *Borologa rockshelters 3D mapping specifications.*

Figure 37 : Principe de la triangulation de Delaunay par interpolation. La géométrie obtenue est anguleuse (sommets des triangles) et peut, si tous les points sont utilisés comme sommet, strictement correspondre à la géométrie du nuage de points. D'après: Thibault et al., soumis. *Delaunay triangulation and interpolation method. The mesh is made up with triangles. The pattern can strictly correspond to the point cloud geometry. From : Thibault et al. submitted.*

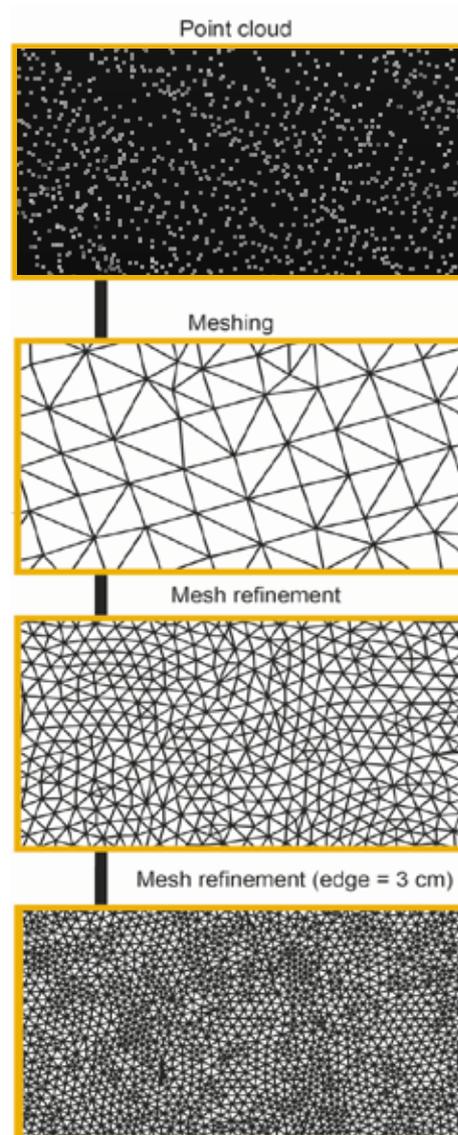
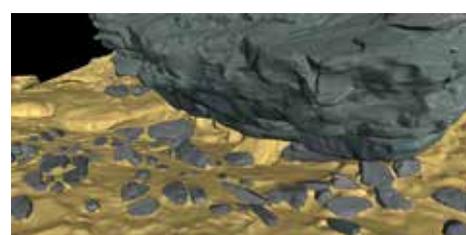
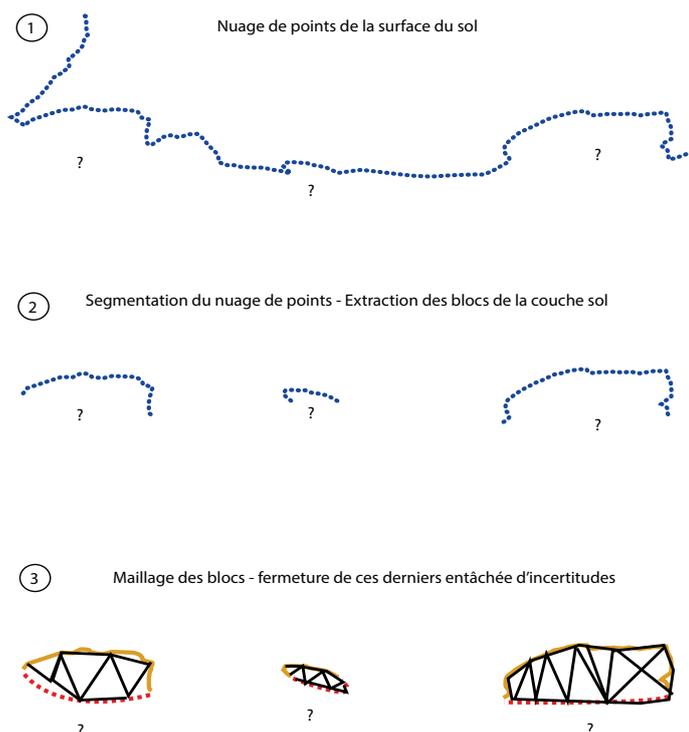


Figure 38 : Segmentation et maillage des blocs de quartzite. Ces derniers, une fois séparés de la couche sol, restent entachés d'incertitudes car seule une partie de la surface de ces derniers est acquise par le scanner. La géométrie des surfaces enfouies n'étant pas accessible par la méthode du LiDAR, elle est alors reconstruite par l'opérateur. *Rocks are meshed once separated from the soil layer. However, not the whole rocks can be accurately meshed because the buried parts cannot be acquired by LiDAR.*



4. Corrélation stratigraphique 3D des couches de quartzite : cartographie en coupe et mesures sur le modèle 3D.

4.1 Observations.

La couche de nuage de points représentant les sols a également été rastérisée avec une maille carrée de 2x2 cm afin de produire un support cartographique du site. Des traitements morphométriques ont été conduits sur la topographie de la surface afin d'affiner les observations morphologiques conduites sur le haut versant du site Borologa. Les calculs de pente, les ombrages, les modélisations des connections hydrologiques, sont autant d'informations tirées du modèle numérique de terrain qui permettent de mieux cerner les dynamiques du versant. Ces traitements ont été réalisés avec *CloudCompare* (Girardeau, 2018) et *SAGA-GIS* (Conrad et al., 2015).

Les traitements informatiques du MNT visible dans la figure 39 permettent de faire ressortir les informations morphométriques suivantes :

- la morphologie globale du versant par l'intermédiaire de la carte des pentes (1),
- une couche d'informations distinguant les différents blocs grâce au MNT ombré (2),

- une simulation du réseau hydrographique (5) fait également ressortir les processus de ravinement, difficiles à repérer sur le terrain mais bien réels, notamment vers l'aval du terrain où les sédiments plus meubles s'organisent autour de deux dépressions, exutoires du modèle.

Des processus de bascule (*tilting*) sont ainsi identifiés pour les blocs pluridécimétriques de quartzite. Les investigations conduites à partir du modèle 3D du site Borologa semblent suggérer, en plus du *tilting*, des processus de glissement-traduction des blocs et de phénomènes d'érosion plus complexes.

Par l'intermédiaire de la carte des pentes, on observe nettement les limites arrondies du chaos de blocs, ainsi que le changement brutal de la pente moyenne entre les différentes formes (escarpement - versant - replats).

La morphogénèse du versant, ainsi qu'un mouvement réel de ce dernier, restent cependant trop complexes pour être analysés par la seule caractérisation morphométrique car la morphologie complète des blocs n'est pas correctement prise en compte par l'approche cartographique 2.5D.

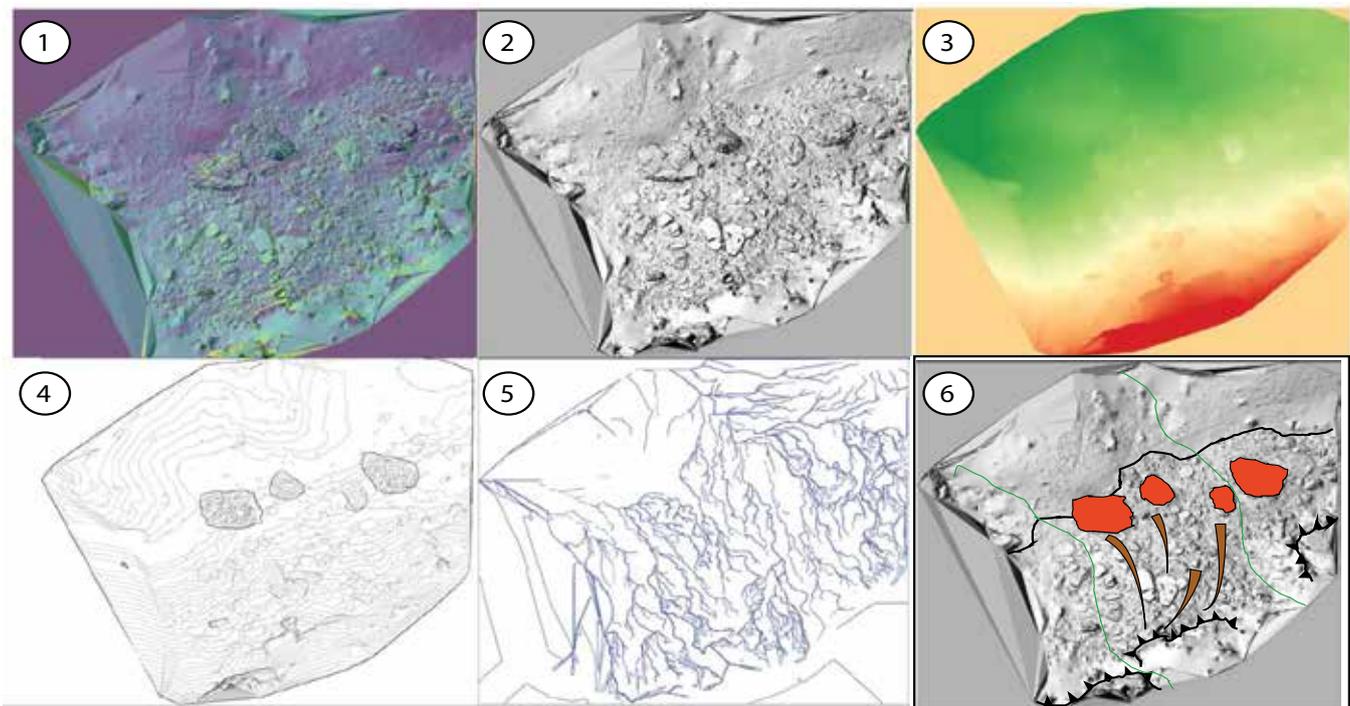


Figure 39 : Traitement géomorphométrique du MNT LiDAR (2 cm) sous le SIG d'analyse raster : SAGA-GIS. 1 : Carte des pentes. 2 : MNT ombré. 3 : Carte des altitudes. 4 : Isovaleurs d'altitude. 5 : Réseau hydrographique théorique. 6 : Cartographie géomorphologique du mouvement de versant. *Geomorphometrical analysis of the LiDAR DEM (2 cm) using SAGA-GIS raster analysis tools. 1 : Slope map. 2/ Hillshade. 3 : Heightmap. 4 : Altitude isovalues. 5 : Theoretical hydrographic network 6 : Geomorphological map of the slope movement.*

Cette dernière masque d'autres morphologies qui restent invisibles sur le modèle raster (notamment pour les grands monolithes ornés). Une analyse plus poussée du modèle, en visualisation 3D réelle, est nécessaire pour identifier ce processus.

4.2 Mesures sur le modèle et stratigraphie des bancs de quartzite.

A partir de relevés de terrain et de mesures sur le modèle 3D, la stratigraphie des bancs de quartzite du versant a été levée dans l'objectif d'identifier l'origine des blocs au sein du chaos, et donc leur provenance géographique. Cette méthodologie a déjà été mise en place à une échelle plus fine au sein de l'analyse anthropo-géomorphologique des monolithes (David et al., 2019). Des mesures d'épaisseur des bancs ont été conduites sur le modèle 3D au niveau des monolithes, de l'escarpement, et les blocs du versant du site Borologa afin d'établir une stratigraphie théorique de ces derniers.

Des variations d'épaisseur ont été mesurées entre les bancs de quartzite et des différences de faciès notées d'un banc à l'autre (grains plus ou moins grossiers). Certains semblent nettement plus aisément soumis à l'érosion (Wray, 1997). Ce processus est observable sur les blocs possédant des micro-morphologies d'écoulement, et au niveau de l'escarpement, avec des bancs entièrement débités qui contrastent avec

Figure 40 : Etablissement d'une coupe stratigraphique de synthèse à partir des mesures sur le modèle 3D. L'épaisseur des bancs de quartzite permet d'effectuer des corrélations entre les bancs à l'affleurement et les blocs de quartzite présents plus bas dans le versant. *Stratigraphy organization model made from 3D model observations and measurements. This study provides new insights on slope movements and a tool for correlation between bedrock sandstone layers and fallen blocks.*

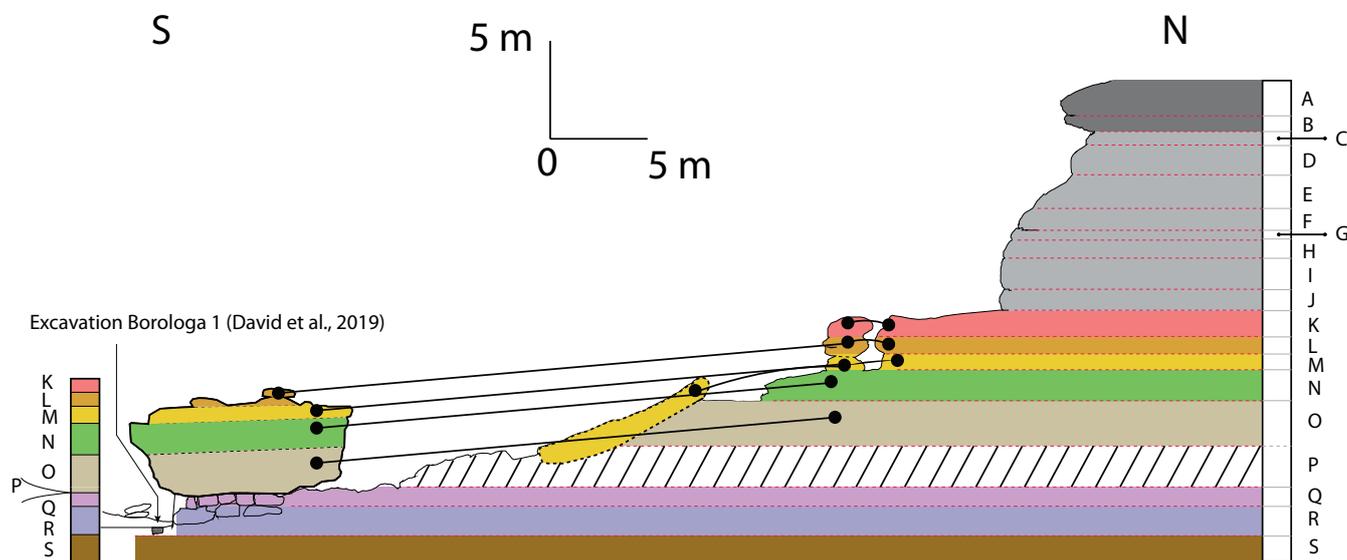
la conservation de certains autres plus massifs et compacts.

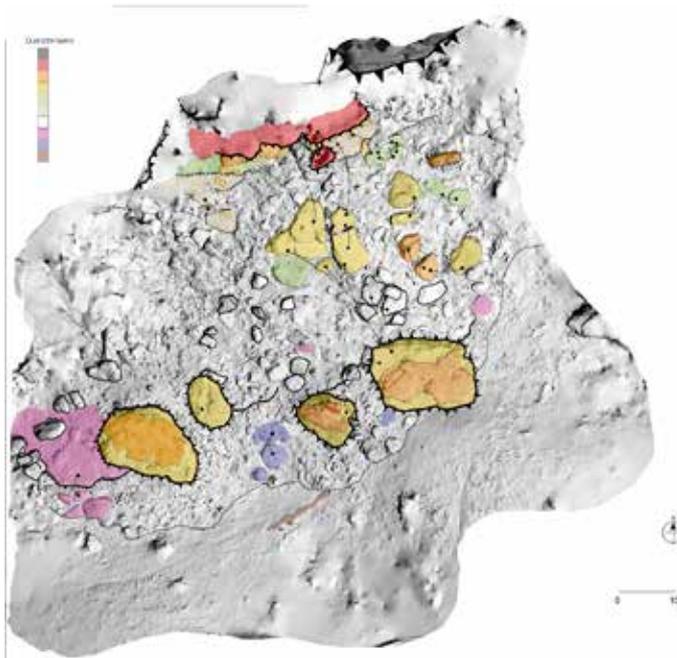
Ces caractéristiques permettent de distinguer les différents bancs de quartzite qui composent ce versant

Les mesures effectuées sur le modèle 3D parmi les monolithes, les gros blocs du chaos, et l'escarpement rocheux, mettent en évidence des similarités d'épaisseur entre les couches de quartzite. Leur report sur une coupe topographique (également issue du modèle 3D) met également en évidence une couche stratigraphique manquante (Couche « P », figure 40). L'absence de cette dernière, probablement d'une composition différente, moins résistante, peut expliquer la mise en place d'un mouvement de versant ayant généré le chaos visible aujourd'hui. L'érosion régressive de cette couche est un élément pouvant vraisemblablement amorcer ce mouvement de versant.

4.3 Identification 2D et corrélation visuelle des morphologies.

L'étude des quartzites sur le terrain couplée à la cartographie du relief met en évidence des corrélations géométriques visuelles entre les blocs. Etant donnée la fracturation anguleuse des blocs, il est relativement aisé de retrouver leur provenance sur le versant (niche d'arrachement aux formes similaires), ou de relier des morceaux d'un même ensemble rocheux brisé en deux ou plusieurs blocs (morphologies de liaison similaires, proximité des objets). De la même manière, des relations d'empilement stratigraphique peuvent également s'appliquer sur certains blocs :





5. Rétromodélisation de la dynamique morphogénique du versant par assemblage *best-fit* des blocs 3D.

La carte des relations entre les blocs permet de sélectionner certains entre eux et de les mobiliser dans le modèle 3D pour reconstruire une partie du versant tel qu'il devait être avant les mouvements gravitaires.

5.1 Protocole.

Les protocoles d'assemblage sont conduits dans un premier temps sur les blocs proches les uns des autres. Le faible éloignement favorise l'identification visuelle de morphologies communes et sont potentiellement la marque du mouvement le plus récent dans la chaîne de processus. Les possibilités d'erreur dans les choix des blocs à assembler sont ainsi méthodologiquement plus réduites.

Le processus de reconstitution se conduit en deux temps sur des blocs préalablement assemblés par corrélation stratigraphique et morphologique sur coupes et cartes. Une fois deux blocs choisis, ils sont rapprochés par l'intermédiaire d'un pré-alignement manuel, puis ajustés par la méthode du « *best-fit* », afin d'utiliser au mieux la morphologie des ruptures de blocs (Besl et McKay, 1992).

Figure 41: Identification de liens entre différents blocs par observation du modèle 3D et à partir des informations stratigraphiques des bancs de quartzite. Le travail préalable sur la stratigraphie des bancs de quartzite permet, ici en plan, de reconstruire une première hypothèse de mise en place du mouvement de versant. *Construction-links map built using a cartographic and 3D observation-based approach. The work is supported by the stratigraphy organization model. It provides a first interpretation of the slope-based movements.*

des corrélations horizontales peuvent alors être effectuées.

Une pré-assemblage a donc été réalisé par l'intermédiaire d'une cartographie 2D et de coupes topographiques.

Cette première cartographie permet de sélectionner les blocs potentiellement candidats pour la rétro-modélisation 3D de l'évolution du versant de Borologa. On entend par retro-modélisation le projet de reconstituer, sur le modèle 3D, certaines phases morphologiques de l'évolution du versant, notamment en replaçant virtuellement certains blocs à leur ancrage d'origine. Cette première approche cartographique permet également de visualiser la dispersion potentielle des blocs d'une « même génération » de bancs de quartzite, ce qui témoigne d'un mouvement de versant par glissement ou par effondrement de piliers.

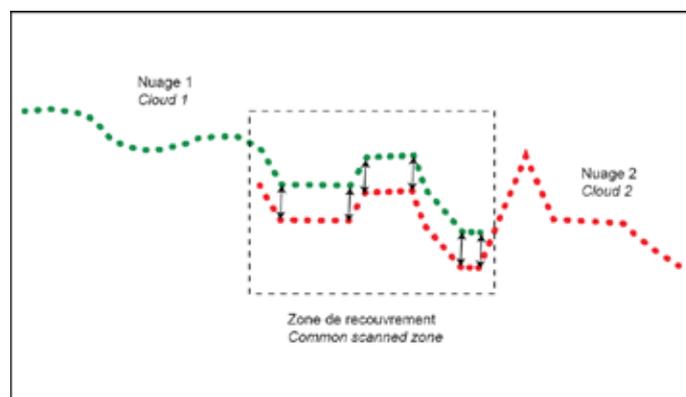


Figure 42 : assemblage par la méthode du « *best fit* » (Besl et McKay, 1992). L'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*) met en correspondance les morphologies en identifiant des points et des distances communes entre les nuages/maillages. Un pré-alignement manuel est donc souvent nécessaire. *Best fit registration of two point clouds (Besl et McKay, 1992). The ICP algorithm (Iterative Closest Point) makes links between clouds or meshes common points if they are already close to each other. A first rough registration is often necessary to make the ICP effective.*

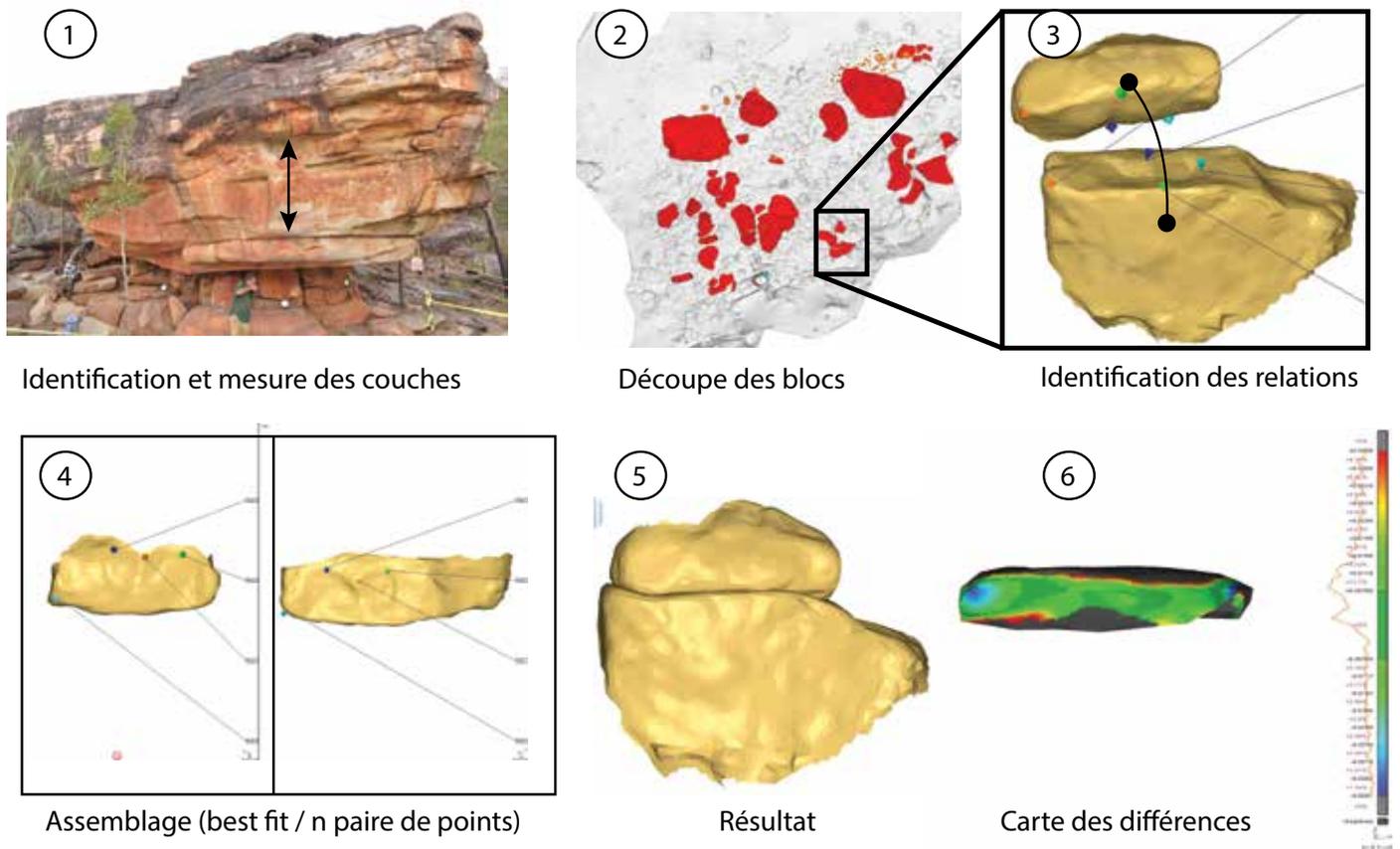


Figure 43 : Protocole méthodologique de rétro-modélisation du versant. A chaque étape du processus, un contrôle visuel est effectué. Il est primordial et, à la manière d'un puzzle, oriente le jugement et permet de conserver un recul sur l'assemblage (cohérence avec les processus ou pas). Les zones enfouies, l'érosion des escarpements et les distances parfois importantes entre les blocs font qu'une démarche par essai-erreur se justifie pleinement, en plus de l'identification des couches communes. *Methodological process of slope retro-modeling. At each stage of the process, visual control is important and prevents the 3D operator from merging blocks in the wrong ways. Despite the layer identification and correlations, successful merging operations are not guaranteed and a test-error process often happens to be necessary.*

Pour chaque opération, on établit une carte des différences afin d'estimer l'erreur de l'ajustement entre les deux surfaces, ou, le cas échéant, une capture d'écran montrant le contact morphologique utilisé pour justifier l'assemblage.

A cause de la taille relativement importante des triangles du maillage, cette étape de contrôle qualitatif donne cependant des résultats assez variables, notamment pour la carte de différences. Un contrôle visuel reste donc nécessaire pour chaque ajustement best-fit. L'inspection visuelle demeure en effet un des moyens les plus fiables pour valider les propositions d'assemblage des blocs entre eux. Les similarités entre les épaisseurs et leur variabilité peuvent ainsi être mises à l'épreuve en comparant le modèle 3D et les liens entre les blocs. En effet, l'œil humain décèle et ce qu'aucun algorithme ne propose. Les opérations de validation portent surtout sur des caractéristiques morphologiques comme la reconstruction d'une morphologie tabulaire, ou la concordance des bancs stratigraphiques entre eux (figure 44).

5.2 Résultats.

L'assemblage des blocs sur le modèle 3D apporte un nouveau regard sur l'évolution du relief. Les visuels ainsi générés permettent de réfléchir aux étapes et aux processus à l'œuvre sur le versant. La corrélation spatiale menée entre les blocs Borologa 1 et 2 a permis de fusionner les deux monolithes ensemble, permettant de reconstituer une morphologie d'abris (David et al., 2019), avec un vide assez important (plusieurs mètres). Le raccordement avec l'escarpement rocheux des monolithes 1 et 2 fusionnés a également été tenté et peut être considéré comme vraisemblable, tant au niveau de l'organisation stratigraphique (mêmes strates de mêmes épaisseurs replacées au même niveau) que sur le plan de la fusion des blocs (morphologies similaires ayant permis une reconstruction très visuelle, ce qui a d'ailleurs facilité l'assemblage). A l'échelle du versant, des assemblages ont notamment été effectués en retrouvant le lien (morphologique) entre les grands blocs effondrés au

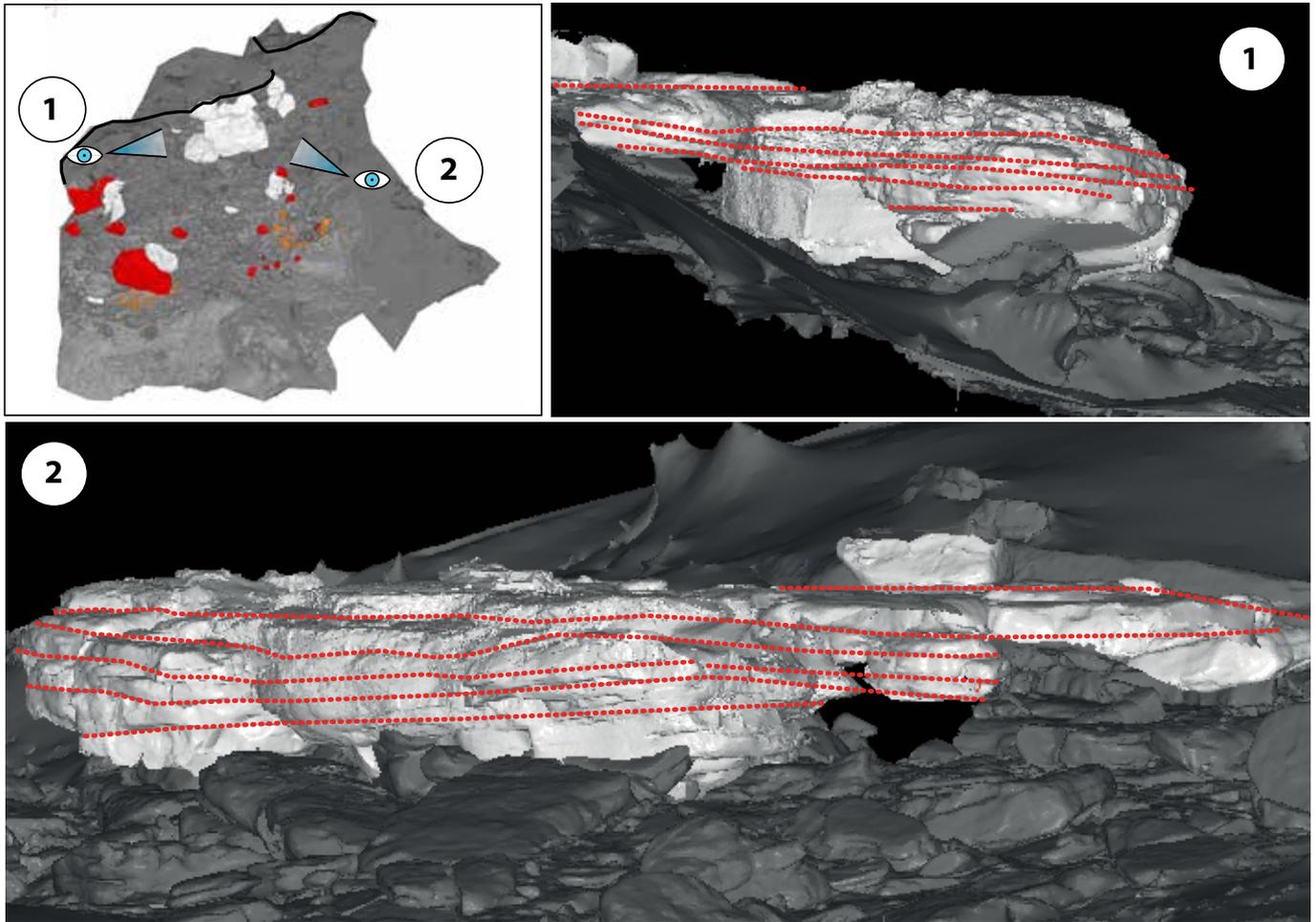


Figure 44 : Inspection visuelle des bancs de quartzite repositionnés près de l'escarpement : Les pointillés représentent la continuité des couches stratigraphiques, dont les épaisseurs semblent concorder. La reconstruction d'une morphologie tabulaire est également un point de contrôle important car ces morphologies sont fréquemment observées sur les versants. *Visual correlation of the quartzite layers once replaced near the bedrock wall. Dashed lines represent the stratigraphic agreement between the blocks. The reconstructed table is also an indication of good correlation as those morphologies are often observed in the landscape.*

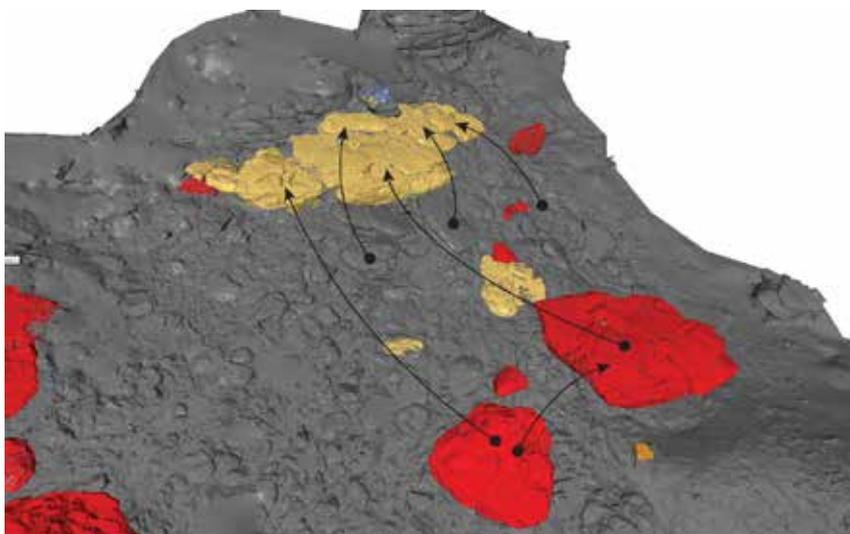


Figure 45 : Ajustement des blocs à leur emplacement originel. Certains blocs ont juste été reconstruits sur place, d'autres se sont scindés en groupements de blocs et ont servi à des reconstructions 3D plus importantes. La rétro-modélisation, guidée par l'analyse de la coupe stratigraphique de synthèse, a permis de proposer une reconstitution des monolithes à leur emplacement originel, ce qui génère un nouveau visuel de l'escarpement rocheux. *Rocks back to their original position. Some were just locally reconstructed while others formed groups of blocks that were moved again for further reconstruction. The retro modeling based on stratigraphic control led to discover the original position of the Borologa monoliths, as part of the upslope wall.*

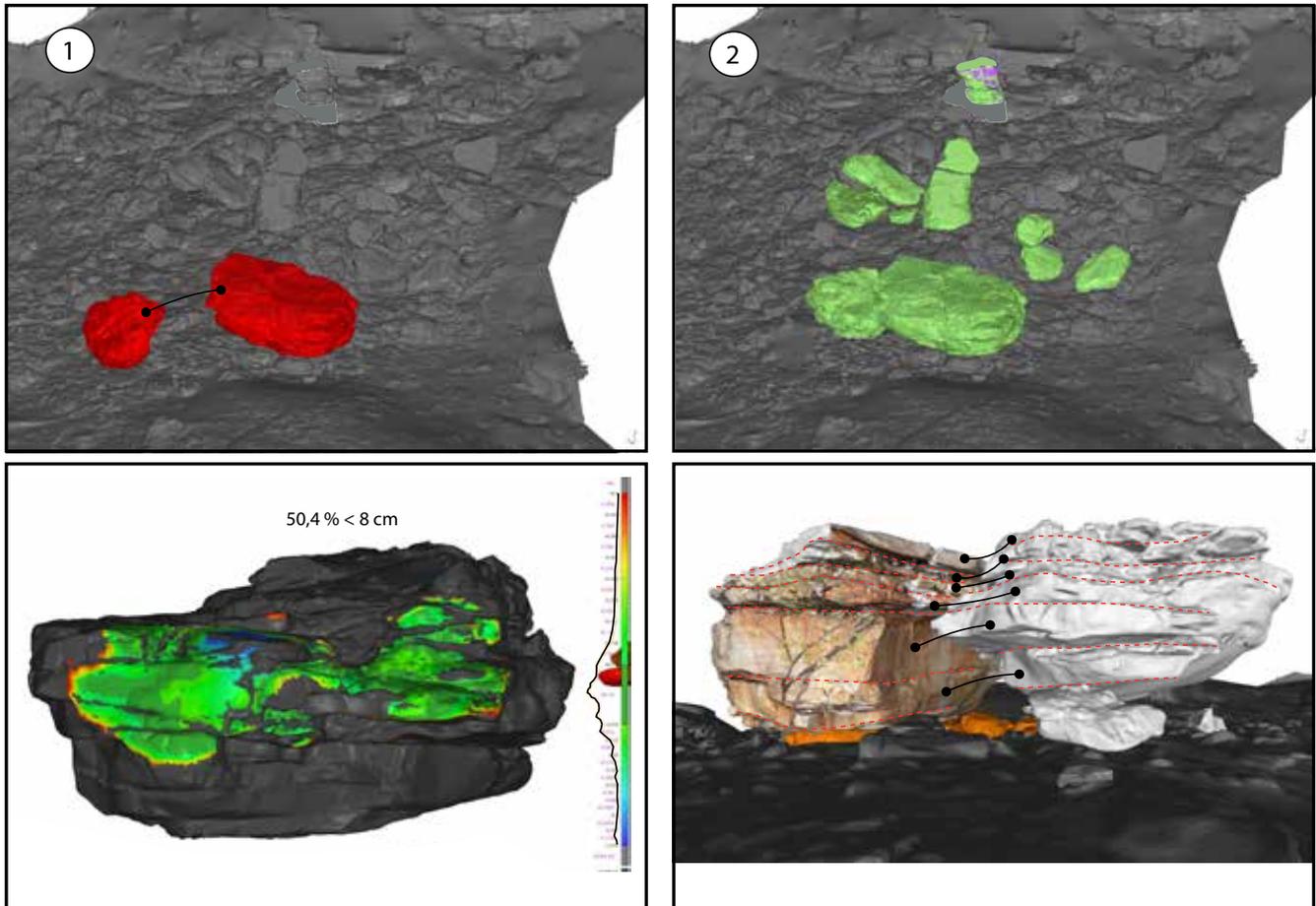
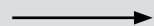
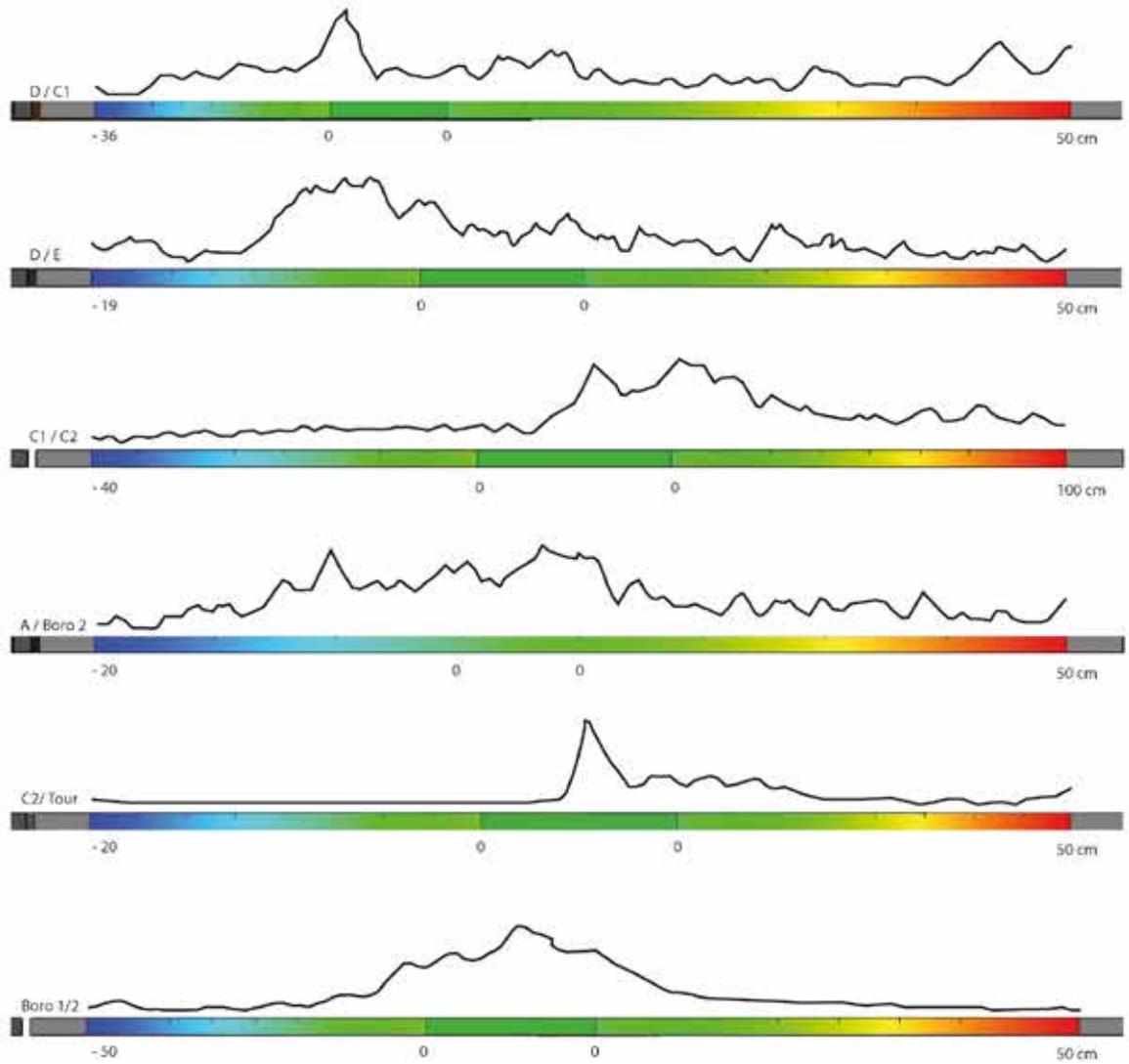
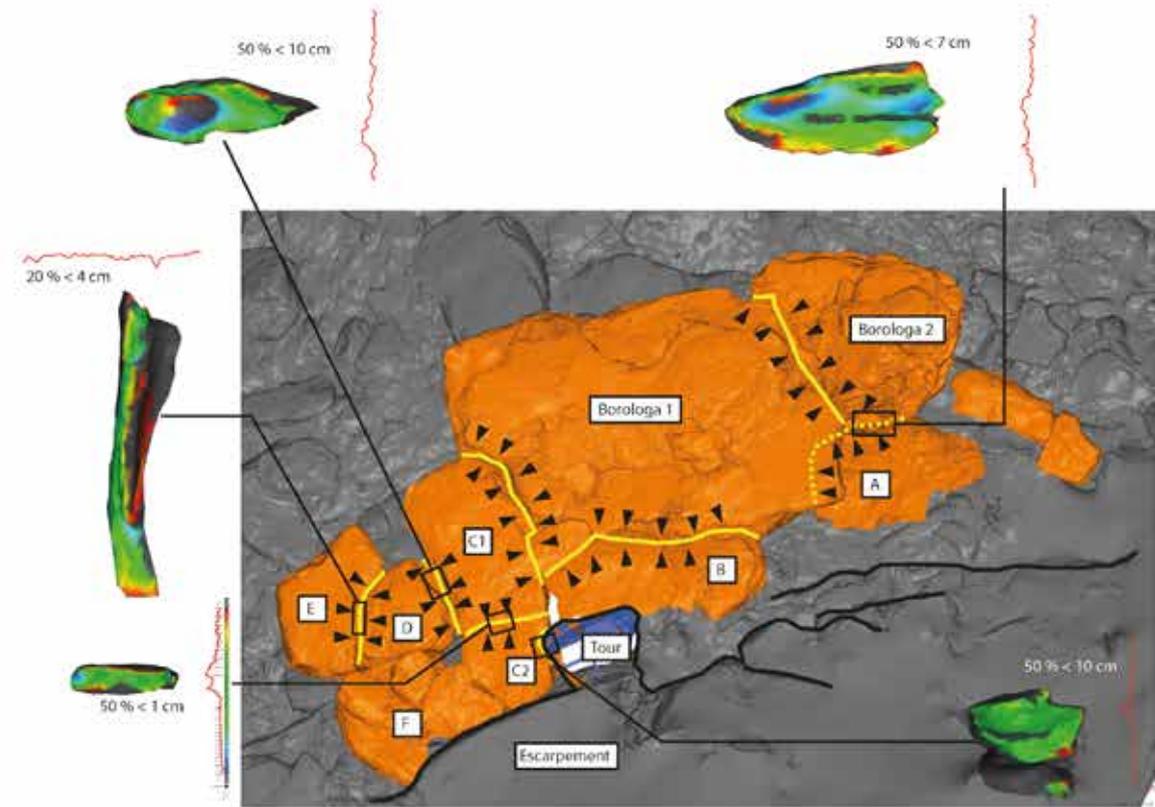


Figure 46 : Ajustement manuel, validé par ajustement best-fit des monolithes Borologa 1 et 2. Leur reconstruction en un seul monolithe permet de reconstituer la « chambre » sous forme d'abri, accueillant actuellement les peintures pariétales sur chacun des deux blocs. *Borologa 1 and 2 were merged in one big monolith. It led to the rebuild of a space decorated with parietal paintings.*

milieu du chaos et le monolithe Borologa 1-2. Ces grands blocs semblent avoir formé une table qui faisait la jonction entre l'escarpement actuel et les monolithes. Néanmoins, certains blocs n'ont pas pu être positionnés correctement, soit à cause de leur trop grande surface enfouie (pas assez de points communs pour valider les reconstructions), soit à cause d'une trop faible qualité de la modélisation 3D (pas assez de points, végétation n'ayant pas permis un maillage suffisamment fin pour observer des correspondances morphologiques). La reconstitution de l'escarpement est donc forcément partielle, localisée sur une zone en particulier. Ce travail permet néanmoins de réfléchir à la morphogénèse du versant de quartzite.

Figure 47 : L'assemblage des blocs est effectué par un choix de l'opérateur. Il est ensuite validé par les cartes de corrélation du best-fit ou de l'alignement manuel. Les corrélations sont avant tout visuelles et permettent de retracer l'origine des blocs, faisant anciennement partie intégrante de l'escarpement et formant un relief tabulaire. *The rock fusion is made by the operator's choice. It is validated by the best fit correlation maps as by manual alignment. under control of difference maps from best fit or manual correlation. The result is very visual and reveals the ancient rock wall before the blocks collapsed.*





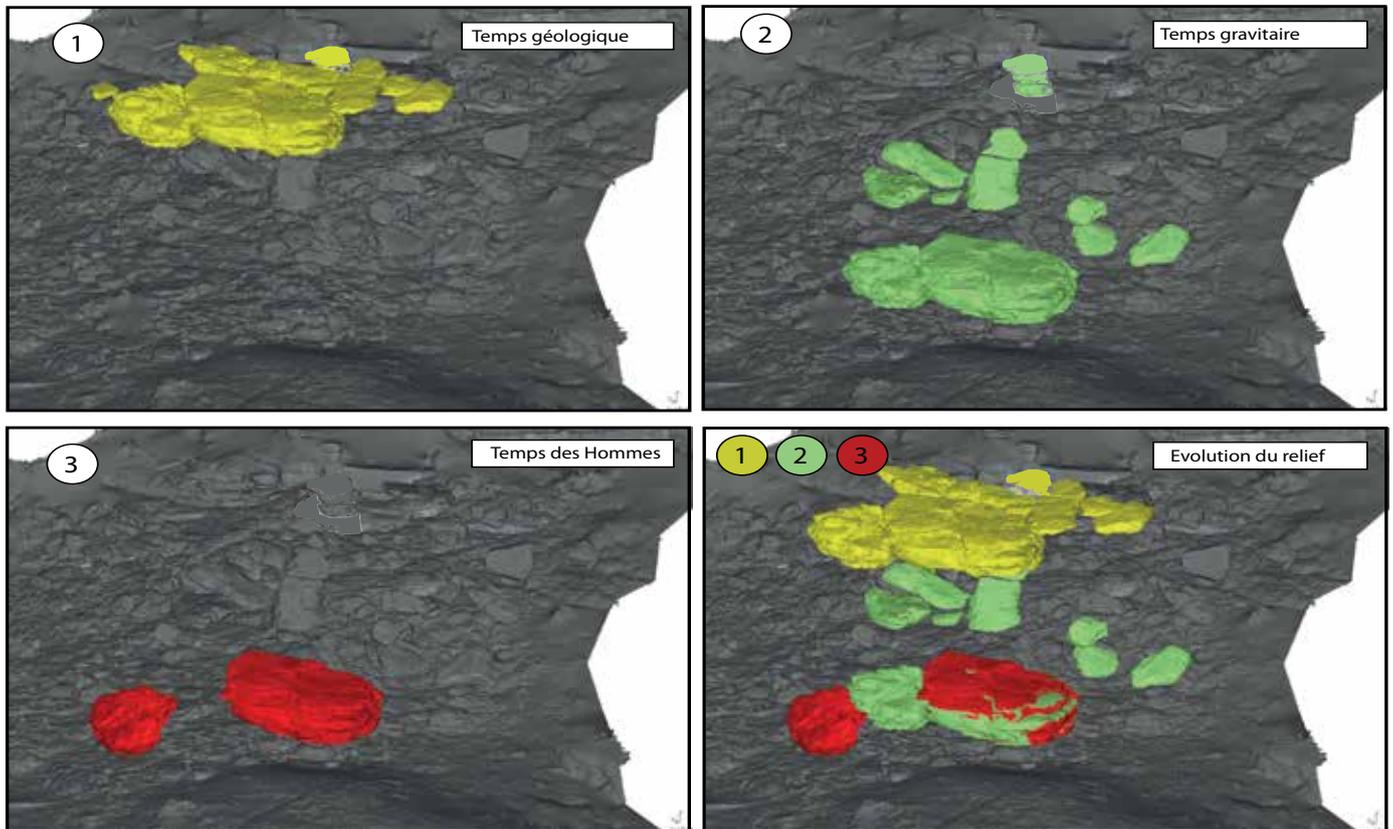


Figure 48 : Chronoséquence des dynamiques du versant reconstitué par la modélisation 3D. Les phases d'évolution du versant mettent clairement en évidence les processus de glissement et de basculement des blocs. *Timelapse of the slope processes of the Borologa rockwall. Evolution stages of the slope processes are clearly visible, with sliding rocks and tilting ones.*

6. Discussion.

6.1 Cartographie retro-géomorphologique des processus.

La retro-modélisation 3D du versant, proposée ici, permet un nouveau regard sur ce dernier : tout d'abord visuel (le modèle 3D reconstitué),

mais également géomorphologique, en permettant de réfléchir sur les dynamiques gravitaires.

Cet essai de reconstruction ayant débouché sur une hypothèse de placement des monolithes plus haut dans le versant. Les dynamiques morphogéniques peuvent de nouveau être discutées avec une cartographie non-plus des blocs en place, mais, des processus à l'œuvre sur ces derniers. C'est justement ce que permet la reconstruction 3D.

La cartographie géomorpho-dynamique du versant peut maintenant être complétée et permet de mettre en évidence les évolutions s'étant mises en place lors du recul du versant en lien avec la concavité du méandre encaissé de la *Drysdale River*.

La cartographie décrit la morphodynamique du versant, depuis l'escarpement sommital majeur (E3) encore en place au nord, jusqu'à la terrasse

sableuse au sud. Les monolithes sont tous en pied de versant et sont localisés à la limite de la terrasse alluviale. Cette dernière représente visiblement un niveau abandonné puisque des morphologies de ravinement peuvent être observées en son sein, témoignant d'une nouvelle organisation du drainage après l'abandon de ce niveau par la rivière. Cette dernière recouvre maintenant un banc de quartzite que l'on observe à l'affleurement un peu en aval du site Borologa 1, au centre du réseau hydrographique aval.

Certaines liaisons entre les blocs et l'affleurement restent seulement supposées, notamment en aval pour le monolithe de *Bichrome Rock* où un nombre trop faible de points au niveau du versant n'a pas permis de réaliser des corrélations spatiales 3D.

La rétro-modélisation couplée à la cartographie géomorpho-dynamique met en évidence la localisation de la faiblesse à l'origine du mouvement de versant : une grande partie des blocs semble provenir de la partie aval de l'escarpement. La pente et l'organisation en cône du chaos de blocs à partir de cet endroit le confirment. Les monolithes Borologa 1-2 sont descendus de la paroi avec le mouvement gravitaire des blocs de quartzite et le lent débitage de l'escarpement. Les monolithes ne

Cartographie géomorpho - dynamique de l'escarpement inférieur du versant Borologa

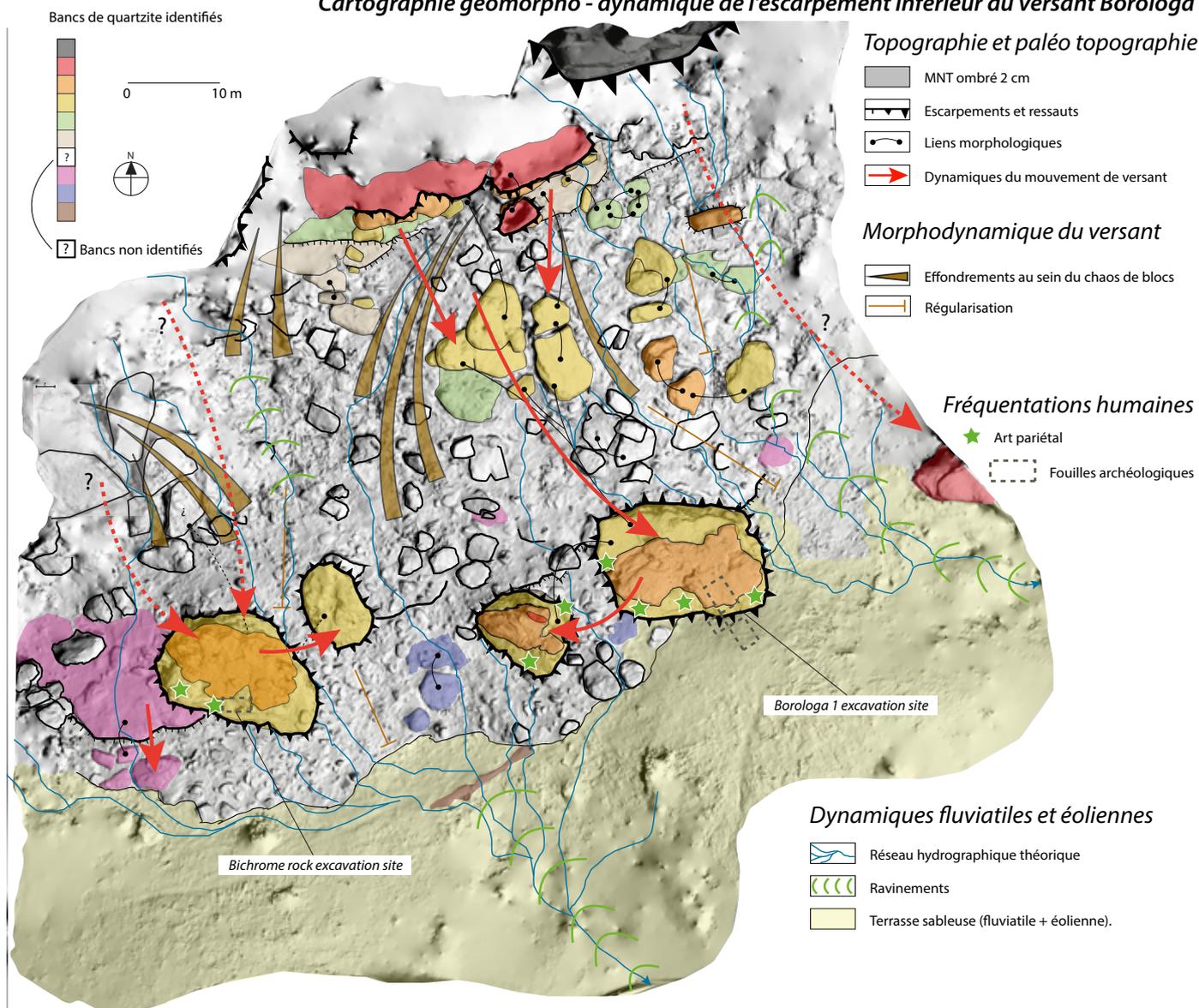


Figure 49 : Cartographie géomorpho - dynamique du recul du versant Borologa. Le mouvement de versant est identifié, ainsi que l'appartenance stratigraphique des blocs. Ce dernier s'arrête au niveau d'une terrasse sableuse d'origine fluviale et éolienne. Les corrélations spatiales sont bien établies sur la partie Est du modèle avec les monolithes Borologa 1 et 2 positionnés dans la continuité d'un mouvement global du versant, orienté dans le sens de la pente. Les corrélations sur la partie Ouest du modèle sont seulement supposées à cause d'un manque de données topographiques sur l'escarpement. *Dynamic and geomorphological map of the slope processes at the Borologa site. The slope-based movement stops near the alluvial sandbank. East correlations are well constrained and depict a global slope-based movement. The West side is, however, less constrained because of the lack of topographical data on the bedrock cliff; Correlations are then only supposed.*

sont donc vraisemblablement pas « en place » à leur localisation actuelle et sembleraient plutôt faire partie du lent processus d'érosion de l'escarpement E3 les surplombant. Le positionnement originel de Borologa 3 (*Bichrome Rock*) et d'un monolithe en amont de Borologa 1 reste à l'état de suppositions ; la qualité du levé LiDAR ne permettant pas de récupérer assez d'informations géométriques pour mailler correctement ces zones. La reconstitution de l'emplacement originel de Borologa 1-2 laisse cependant présager une origine issue de

l'escarpement, comme le laissent supposer les emplacements des niches d'arrachement en amont de l'escarpement E3 et le ravinement prenant source en aval de ce dernier.

Le réseau hydrographique, calculé à partir du module *r.flow* sous l'analyse raster *GRASS-GIS* (Mitášová et Hofierka, 1993), doit être considéré comme une tendance globale à l'échelle du versant scanné et non une réalité ; la modélisation ne prenant en compte que le relief superficiel (et non les infiltrations) et une grande partie des blocs n'a pas été enlevée des

sols pour le calcul hydrologique. La tendance permet néanmoins de faire ressortir deux zones de capture en aval, se poursuivant par des morphologies d'anses de ravinement. On peut noter que les monolithes Borologa 1 et 3 se situent aux interfluvies de cette modélisation du réseau hydrographique, et que les blocs s'étant détachés de ces deux monolithes (Borologa 3, gros bloc en amont de *Bichrome rock*), sont tombés en direction des entailles de ce réseau hydrographique de versant. Ce constat interroge sur le rôle de l'érosion régressive dans le processus de basculement des blocs, et donc du rôle éventuel de la rivière dans le débitage des bancs plus friables du versant. Cette hypothèse est à prendre en considération étant donné la proximité altitudinale de la terrasse alluviale de la Drysdale River avec l'escarpement rocheux. Le développement prononcé de ce dernier témoigne également d'une dynamique de sapement par la rivière sur le long terme, contrairement à la rive gauche, en face.

6.2 Les mouvements de bascule des blocs.

Le basculement des monolithes en provenance de l'escarpement supérieur (E1) a été mis en évidence par la cartographie du méandre. L'analyse 3D des correspondances niche d'arrachement/bloc arraché peut être mise en regard avec les datations cosmogéniques $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ (Cazes, 2016) réalisées plus haut dans le versant. Ces datations n'ont certes pas été effectuées au même endroit, mais elles confirment l'existence de processus de bascule des blocs et elles ancrent ces types d'évolution du versant sur des temporalités Pléistocène. En ce sens, elles complètent la compréhension du dispositif des monolithes. Des constats similaires

peuvent être conduits sur le versant Borologa, à partir de la reconstruction 3D. Le phénomène de bascule des blocs semble être une des constantes morphogéniques de ce type de versant développé dans les quartzites (pendage orienté dans la pente du versant). Le phénomène pré-cité semble entraîner une scission des blocs le long de lignes de fracture liées à la détente mécanique et ce, quelle que soit la taille du bloc.

Des blocs de petite taille ont ainsi pu se reformer le long de lignes de fracturation alors même qu'ils ne semblaient pas avoir été soumis à une chute. Peut-être faut-il mettre en lien ces cassures non seulement avec la bascule des blocs, mais également avec un mouvement de versant sur le temps long qui génère aussi des processus de glissement - translation.

6.3 Les processus de glissement - translation.

La reconstruction 3D a permis d'identifier la position originelle de plusieurs blocs et ainsi de les remonter plus haut dans le versant. La descente de ces derniers n'a pas forcément été causée par un événement brutal (effondrement, bascule d'un gros bloc), mais peut être liée à un processus de glissement lent du versant, à la manière de paquets glissés. En effet, la rétro-modélisation proposée montre des blocs qui ne semblent pas beaucoup varier de leur position originelle (notamment les gros). La conservation (toute relative) de l'orientation de ces derniers (quasiment aucun ne semble avoir basculé et roulé), parfois même assez loin de leur position originelle

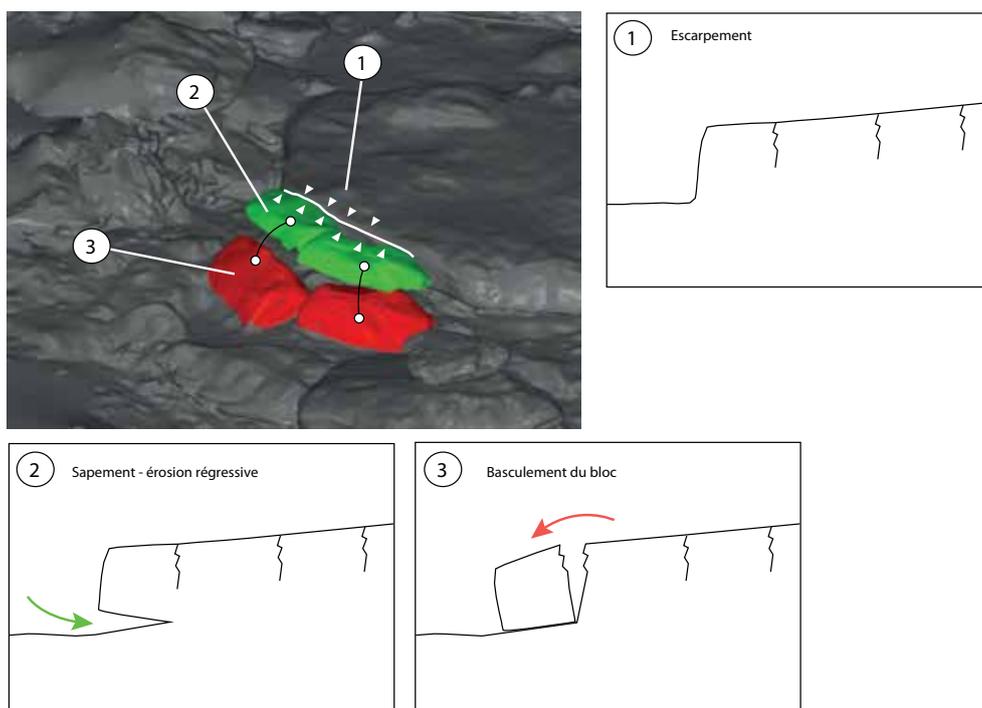


Figure 50 : Processus de bascule des blocs par érosion différentielle des bancs de quartzite. Cette dynamique affecte les blocs de toute taille, des monolithes ornés (Borologa 1 et 2) aux blocs de quelques dizaines de centimètres. *Tilting processes driven by differential erosion. That dynamic can be observed on both big monoliths and little rocks.*

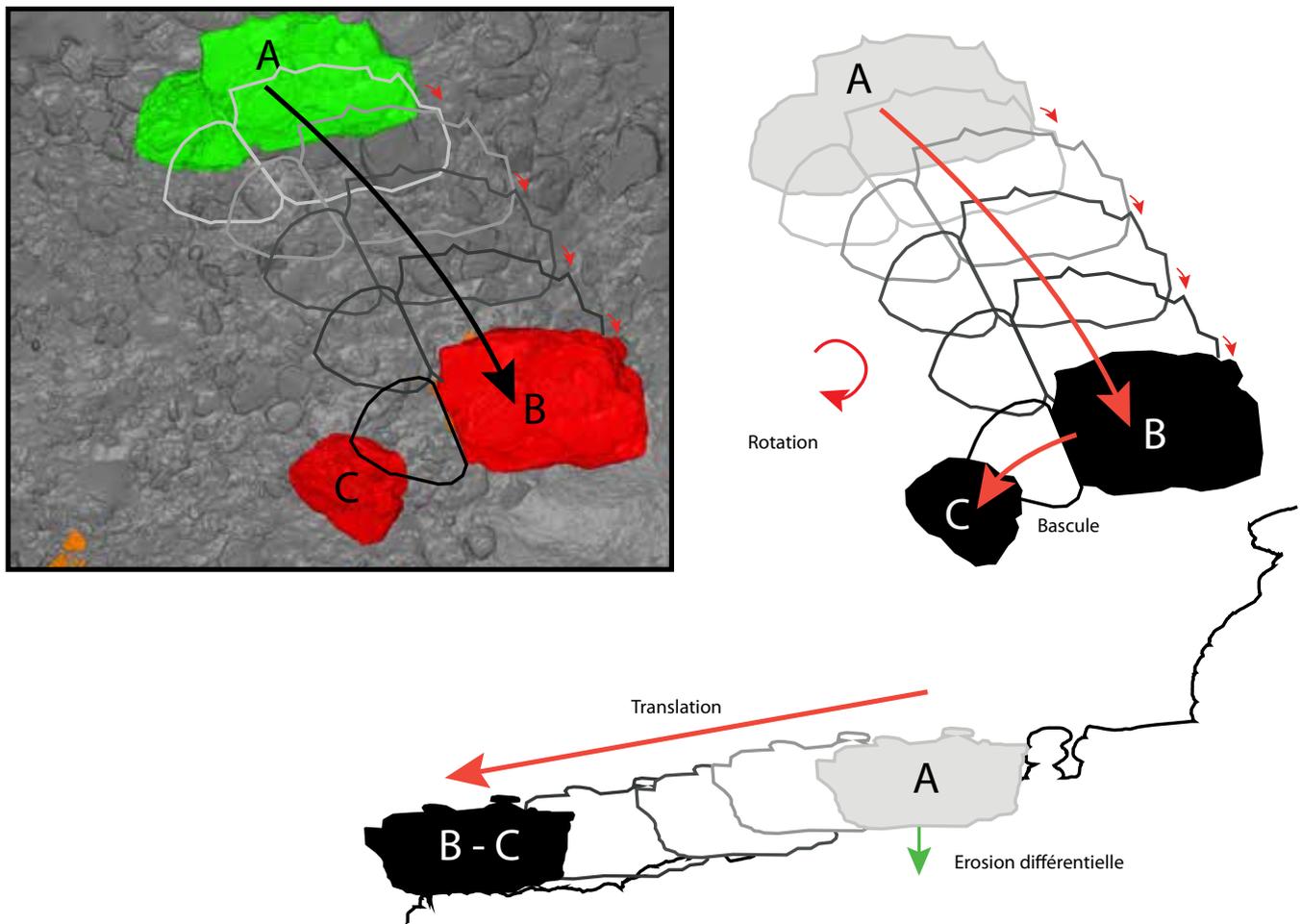


Figure 51 : Mise en évidence du processus de glissement des monolithes du versant. Bien que des phénomènes de rotation et de bascule s'appliquent également, le monolithe Borologa 1 conserve globalement ses caractéristiques de départ (pente et azimuth). La translation des gros blocs jusqu'au bas du versant met également en évidence le processus d'érosion différentielle des bancs de quartzite. La consistance de ces dernières peut varier et l'appel au vide entraîne alors la déstabilisation du versant. *Borologa 1 monolith slid from the rockwall and conserved some of its starting specifications (slope, orientation). That translation movement enlightens the differential erosion process that applies differently onto the quartzite layers, according to their consistency.*

(monolithe Borologa 1) pourrait être la marque de ce phénomène de lent glissement, qui suppose alors une déstabilisation du versant par érosion différentielle des bancs de quartzite. Le caractère roulant des sables provenant des quartzites et les écoulements laminaires en période de mousson sur ces versants imperméables ont peut-être favorisé ce phénomène de reptation-glissement des blocs.

6.4 Le rôle de l'incision de la rivière.

Les monolithes de Borologa sont actuellement tous immobilisés à un même niveau altitudinal correspondant à un banc de quartzite en place dont la résistance plus importante explique probablement la position actuelle de ces blocs. L'existence de cette banquette est peut-être à mettre en lien, une nouvelle fois, avec la Drysdale River. Le banc de quartzite est en effet à la même altitude que la terrasse alluviale

à + 7 m dont le prolongement est visible le long de la rivière. Les dépôts fluviatiles ont potentiellement pu être un des facteurs de conservation du banc de quartzite. La rivière est aujourd'hui incisée au moins 7 m plus bas, ce qui rend le banc de quartzite en position de ressaut, également susceptible d'être soumis à l'érosion par détente mécanique, et donc de remobiliser – à terme – les monolithes. Une campagne de datation absolue sur les terrasses alluviales pourrait être un moyen de mieux contraindre les temporalités d'érosion des versants, et de confronter les datations cosmogéniques sur l'escarpement principal E1 (Cazes, 2016) avec les temporalités d'évolution de la rivière. Par ailleurs, des datations par âge d'enfouissement au moyen de la méthode ESR sur Quartz (Yokoyama et al., 1985) sur des niveaux sableux profonds seraient à envisager compte tenu des temporalités d'évolution relativement longues de l'escarpement et des rivières du Kimberley.

7. Conclusion.

L'approche géomorphologique du site Borologa avait été pensée pour appliquer l'expertise géomorphologique de manière intégrée, notamment autour de l'origine des monolithes de quartzite et de leur morphogénèse au sein du versant. Elle a permis de confirmer les observations de terrain et les datations cosmogéniques par une approche géométrique haute-résolution, et de proposer des modèles d'évolution mécanique du relief en formalisant notamment les phénomènes de glissement/translation ainsi que de basculement observé sur les blocs de l'escarpement principal E1 (Cazes, 2016). Ces phénomènes ont également été mis en évidence sur l'escarpement E3 par l'approche géomorphologique 3D.

Ces résultats confirment la situation des monolithes non pas comme des objets géologiques sculptés dans l'encaissant par l'action météorique et chimique, mais bien comme faisant partie d'un glissement de versant dont l'occurrence pourrait s'inscrire dans une temporalité longue pléistocène. Ce glissement est à mettre en lien avec la déstabilisation du versant par détente mécanique, mais aussi, probablement, avec l'enfoncement de la rivière dans son lit rocheux.

Au-delà de l'apport purement géomorphologique sur la mécanique d'évolution du relief, la rétro-modélisation des blocs de quartzite permet également de mieux cerner le cadre physique dans lequel ont pu évoluer les communautés passées autour des monolithes ornés. La reconstitution des processus mène à réfléchir sur leurs implications sur les aménagements et les occupations du site par les Aborigènes.

Les résultats concordent aussi avec l'étude archéologique du site Borologa des fréquentations aborigènes depuis plus de 4000 ans (David et al., 2019). Les fréquentations se sont bien effectuées dans un cadre physique quasi-similaire à celui d'aujourd'hui, avec des monolithes déjà positionnés sur le bord de la banquette de quartzite, près de la terrasse fluviale. Le croisement de ces deux approches tend donc à confirmer la temporalité relativement longue (pléistocène) des mouvements de versant de quartzite (de plusieurs dizaines à des centaines de milliers d'années) déjà inférés par les résultats du $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$.

Certains processus du versant restent néanmoins à questionner et pourraient avoir eu lieu dans une temporalité plus restreinte : celle des occupations humaines. En effet, le monolithe Borologa 2, anciennement constitutif de Borologa 1, est également orné. Il est actuellement difficile de déterminer si ces peintures ont été effectuées avant, après, partiellement avant ou partiellement après la cassure entre les deux blocs.

La rétro-modélisation 3D, par l'intermédiaire d'une analyse géomorphologie du versant pourrait permettre d'affiner ces questions, notamment par le biais de mesures d'orientation (assiette) des œuvres qui pourraient être effectuées sur le modèle 3D texturé par des photographies, afin de déterminer si les œuvres peintes sur le site Borologa 2 ont été effectuées avec cette configuration du bloc ou pas. C'est leur mise en regard avec les résultats issus des questionnements archéologiques, artistiques, morphologiques et paléo-environnementaux, qui permettra d'aller plus loin dans le processus de recherche, auquel le modèle 3D servirait encore de support de réflexion, et de construction du savoir.

L'étude du site Borologa couplée à l'approche géomorphologique a démontré les applications multiples du modèle 3D, et sa capacité à fédérer les approches et à générer de nouveaux questionnements. L'utilisation de méthodes intégrées, non invasives, et centrées autour de la 3D, fait de Borologa un site de référence pour la recherche interdisciplinaire.

Cette première partie a mobilisé deux sites aux enjeux archéologiques forts pour lesquels la 3D a apporté une information nouvelle. Cependant l'approche géomorphologique est essentiellement restée confinée aux outils 3D et à la géométrie des formes visibles, l'histoire du relief n'étant pas l'objectif premier sur ces sites. Il est pourtant possible d'aller plus loin dans l'étude des formes en intégrant d'autres méthodes, d'autres approches, au sein d'un même espace. Alors que cette première partie était centrée sur l'acquisition topographique et ses potentialités d'exploitation sur différents sites, les parties suivantes présentent les résultats des différentes méthodes utilisées conjointement avec la topographie 3D pour l'étude du site Chauvet - Pont d'Arc (Ardèche, France).

PARTIE II

GEOMORPHOLOGIE 3D

CONSTRUCTION D'UN MODELE RELATIF D'EMBOITEMENT DES FORMES DU MEANDRE DE LA COMBE D'ARC.

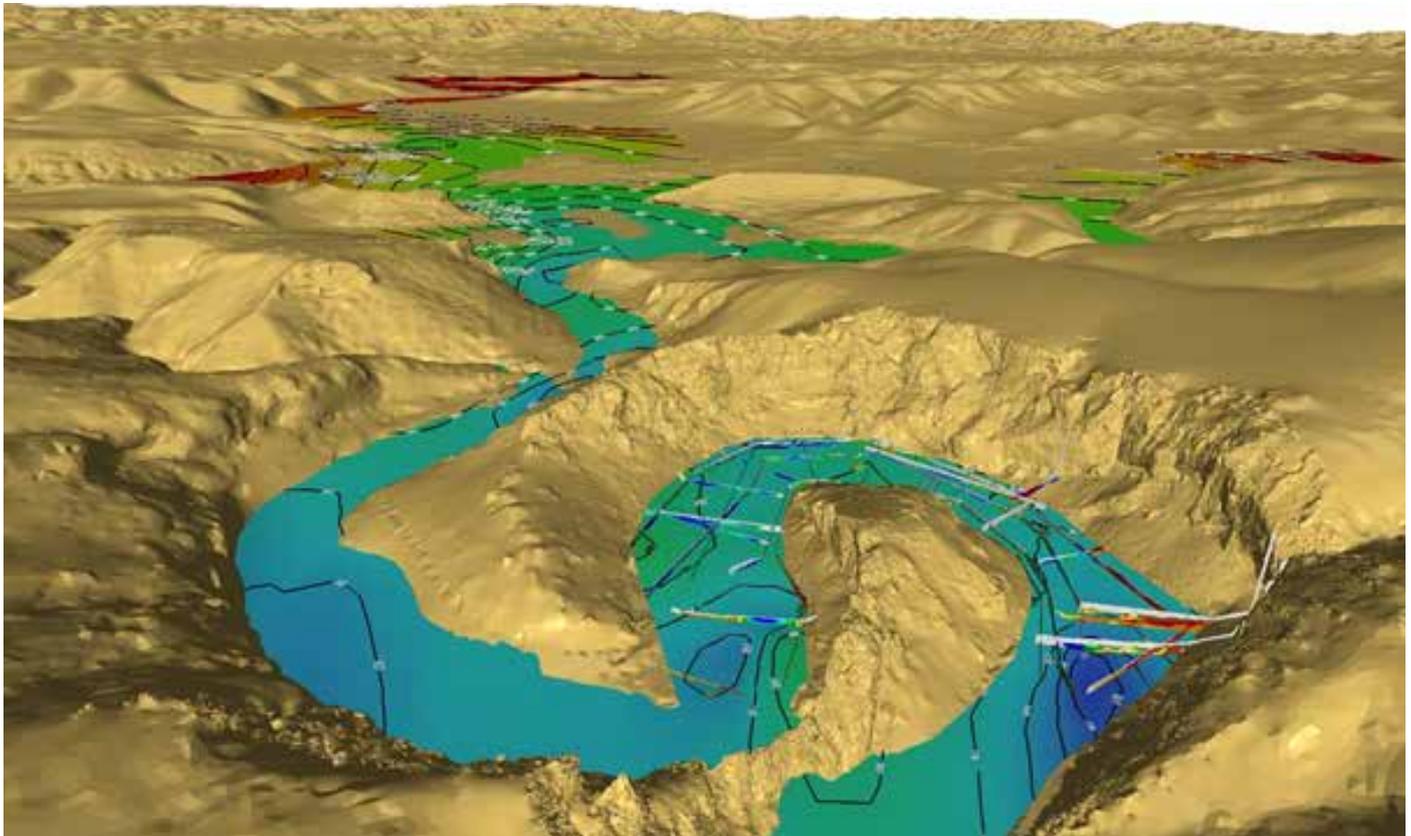


Figure 52 : Reconstitution topographique 3D du paléo-niveau de l'Ardèche à + 15 m à l'aide de relevés topographiques et de profils de tomographie électrique.

3D topographical reconstitution of the + 15 m paleo-level of the River Ardèche using topographical data mixed with ERT tomography cross sections.

Avant-propos

La première partie de ce travail, avait une vocation avant tout méthodologique. Les suivantes, tout en s'inscrivant dans ce prolongement, explorent les principes d'interdisciplinarité (tant par les approches que par les outils) évoqués auparavant. Les parties II et III s'organisent autour d'un même objet d'étude : l'environnement physique de la grotte Chauvet et plus particulièrement le méandre recoupé de la Combe d'Arc et l'arche du Pont d'Arc. Le choix de se centrer désormais sur un seul objet d'étude est lié à notre souhait de développer un raisonnement solide, centré sur la morphogénèse, intégrant par touches successives des informations issues de différentes entrées morphologiques présentes à la surface du relief mais également avec le sous-sol et dans l'endokarst.

Le chapitre 3 ouvre ainsi cette acquisition d'indices morphogéniques en s'attachant à l'environnement immédiat de la grotte Chauvet et en croisant les apports des relevés géomorphologiques avec les ou-

tils de modélisation 3D. L'objectif est de reconstituer l'évolution du relief au cours des différentes périodes du Quaternaire récent à partir des témoins morphologiques encore présents dans le paysage.

Comme évoqué dans les précédents chapitres, le recours aux outils de modélisation 3D - en plus d'offrir un support visuel à la reconstitution des morphologies disparues - permet également d'inclure d'autres approches méthodologiques. Ces dernières sont croisées au sein d'un même et seul modèle 3D afin d'intégrer et de confronter les données spatiales issues de plusieurs méthodes de recherche (Topographie 3D haute-résolution par LiDAR ou photogrammétrie, tomographie par résistivité électrique ERT, et géomorphologie karstique). Cette démarche intégrative dans un même référentiel de travail, permet de construire un modèle d'évolution morphogénique robuste. En fusionnant ces approches, le modèle devient un support de réflexion, un objet qui, finalement, évolue sans cesse, sans jamais être finalisé, permettant des corrélations entre les données comme entre les différentes disciplines.

Pour le site de la Combe d'Arc-Pont d'Arc, l'outil 3D été pensé pour le questionnement de recherches liées à l'approche géomorphologique. Il s'agit ici d'intégrer les données issues de différentes stratégies méthodologiques autour d'un questionnement géomorphologique : celui de l'évolution de la Combe d'Arc et du Pont d'Arc, en lien avec les périodes de fréquentation paléolithiques de la grotte Chauvet. Cette deuxième partie témoigne donc de la construction d'un modèle 3D et des emboîtements morphologiques relatifs de la Combe d'Arc, du Pont d'Arc et de leurs alentours. Elle s'ouvre par ce qui fait la base de la recherche en géomorphologie : des relevés de terrain.

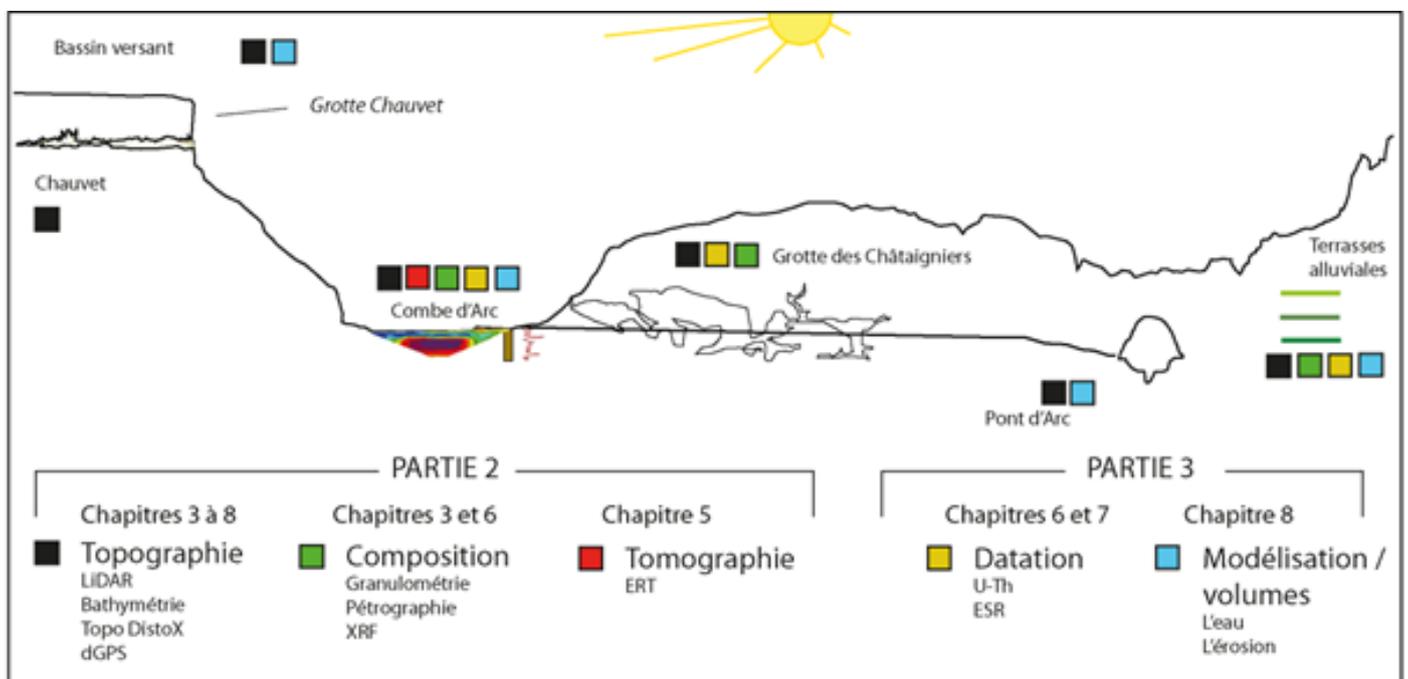


Figure 53 : Synthèse des différentes méthodes mobilisées dans le cadre de cette étude pour la reconstitution géomorphologique des paysages. Différentes méthodes d'analyse et de prospection ont été utilisées pour étudier le méandre de la Combe d'Arc et son environnement physique. Chaque méthode employée est reliée par l'intermédiaire d'une construction topographique 3D.

Different kinds of scientific tools and approaches are mobilized for paleo-geographic reconstitutions and to understand the landscape evolution. Every approach is connected through topographical relationship on the 3D model.

CHAPITRE 3

RECONSTITUTION DES PALEOMORPHOLOGIES FLUVIATILES ET KARSTIQUES PAR L'APPROCHE CARTOGRAPHIQUE 3D. APPLICATION AU SITE DE LA COMBE D'ARC-PONT D'ARC (ARDECHE, FRANCE).

Ce troisième chapitre a pour objet l'étude géomorphologique du site de la Combe d'Arc-Pont d'Arc, situé à l'amont des gorges de l'Ardèche. L'étude repose sur une double entrée : l'approche de terrain et la construction d'un modèle 3D. La première partie de ce chapitre a également fait l'objet d'une publication dans *Karstologia* (Genuite et al., 2018b).

1. L'Ardèche.

Le site étudié de la Combe d'Arc-Pont d'Arc se situe dans la vallée de l'Ardèche dont une partie des écoulements provient de la bordure cévenole. Depuis les rebords du Massif Central où elle prend sa source jusqu'à sa confluence avec le Rhône (40 m d'altitude NGF), la rivière incise l'encaissant

granitique du Massif Central avant de recouper les assises sédimentaires du Secondaire, puis les calcaires du Crétacé qu'elle recoupe en un profond canyon : les gorges de l'Ardèche.

A l'entrée de ces gorges, l'Ardèche divague en profonds méandres inscrits. Le premier d'entre eux, le Cirque d'Estre, est aujourd'hui abandonné par la rivière. L'eau s'écoule désormais sous une arche calcaire naturelle : le Pont d'Arc. C'est dans les escarpements subverticaux du Cirque d'Estre que s'ouvre la grotte Chauvet. Au cours de ce travail, nous utiliserons trois terminologies différentes pour définir cet espace grand d'environ 1 km² : le Cirque d'Estre correspond aux escarpements rocheux bordant l'ancien méandre, la Combe d'Arc correspond à l'ancien méandre et aux dépôts fluviaux encore en place. Le Pont d'Arc désigne l'arche calcaire sous laquelle s'écoule aujourd'hui le cours de l'Ardèche.



Figure 54 : Arche naturelle du Pont d'Arc. Les eaux de l'Ardèche s'écoulent aujourd'hui sous cet objet dont la facture topographique n'a pas d'équivalent sur terre. Les caractéristiques paysagères uniques de ce site en ont fait l'objet de deux démarches de mise en valeur : les opérations grand site de France, en 1991 (Duval et Gauchon, 2007) et 2017. Photographie : P. Genuite.

The Pont d'Arc arch shortcuts the first meander of the Ardèche canyon. This natural arch is a quite unique topographic feature that led to mass tourism and local promotion dynamics such as two Opération Grand Site de France projects, in 1991 (Duval et Gauchon, 2007) and 2017. Photograph : P. Genuite.

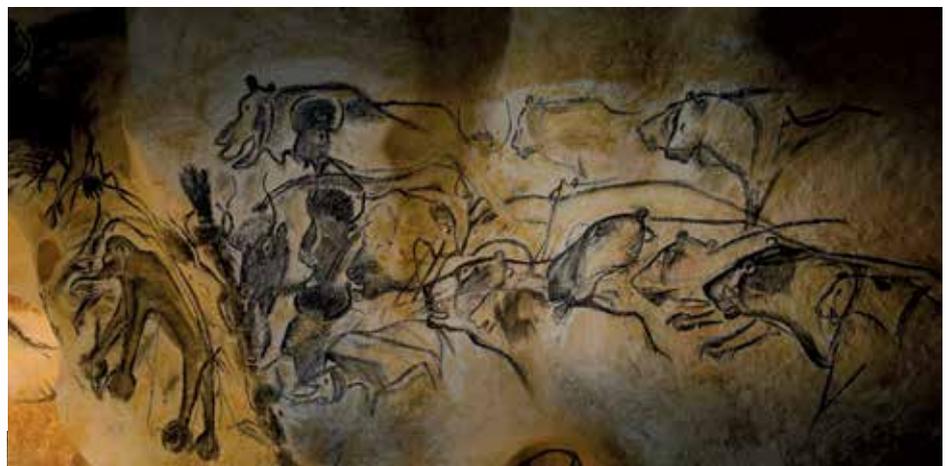
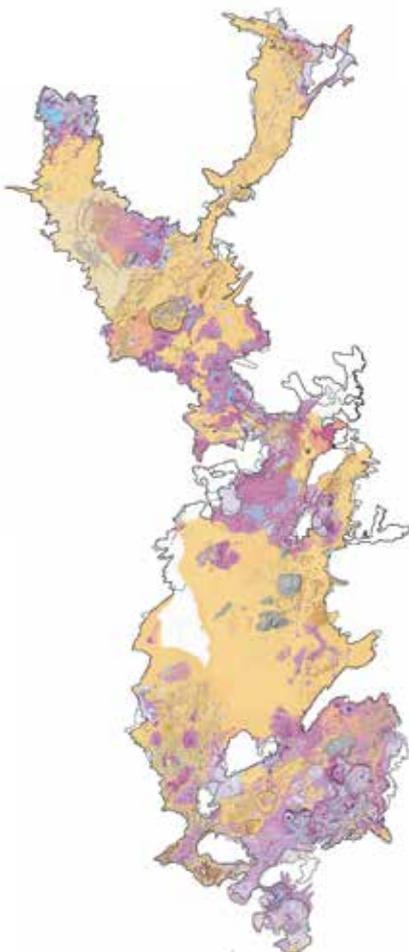
Différentes recherches géomorphologiques ont été conduites sur le méandre abandonné de la Combe d'Arc pour appréhender les dynamiques fluviales lors de son fonctionnement hydrologique et au cours de sa phase d'abandon (Bravard, 1993 ; Sheffer et al., 2003). D'autres recherches ont également été menées en lien avec les valeurs paysagères de ce site très particulier, situé à l'entrée des gorges de l'Ardèche (Duval, 2008). Le recoupement du pédoncule du méandre de la Combe d'Arc au niveau de la vaste arche naturelle du Pont d'Arc est une composante paysagère singulière, voire unique. Cette dimension est à l'origine de son classement au titre des monuments naturels dès 1931 puis des projets d'inscription comme Grand site de France pour ses valeurs naturelles, mais également touristiques (2ème site classé le plus visité de Rhône-Alpes après le Mont Blanc). Il faut noter que cette demande d'inscription s'est appuyée sur des travaux de géomorphologie soulignant la valeur paysagère de ce site (Delannoy et al., 2008).

Figure 55 : La grotte Chauvet, un haut lieu de l'art pariétal du Paléolithique supérieur (36000 ans BP). Cartographie géomorphologique des sols : Synthèse Jean-Jacques Delannoy. Photographies : Stéphane Jaillet.

The Chauvet cave was occupied by homo sapiens who painted its walls 36 kyrs ago. Geomorphological map: Jean-Jacques Delannoy. Photographs: Stéphane Jaillet.

La découverte de la grotte Chauvet en 1994 a conféré au site de nouvelles dimensions (Chauvet et al., 1995 ; Clottes, 1995). Grotte ornée parmi les plus anciennes connues à ce jour (36000 ans cal. BP, Quiles et al., 2016), l'état de conservation de son art pariétal et des sols archéologiques en ont fait une cavité de premier plan au niveau mondial . Depuis 1998 , elle a été investie par une recherche pluridisciplinaire et non invasive (Clottes 2001). Les 20 années de recherche menées dans la cavité ont permis de croiser les regards disciplinaires. La géomorphologie , quant à elle s'est penchée particulièrement sur la zone d'entrée de la cavité, l'analyse de l'escarpement d'effondrement et la datation des fermetures progressives du porche d'entrée de la cavité (Delannoy et al., 2010 ; Sadier et al., 2012). Ces travaux ont confirmé l'ancienneté des fréquentations humaines et animales de la grotte, antérieures à 21500 ans, âge qui marque la fermeture totale de l'entrée préhistorique. La contextualisation géomorphologique s'est concentrée sur la grotte, de même que les recherches et les questionnements archéologiques en lien avec la cavité. Une question majeure était restée en suspens : à quoi ressemblaient les paysages extérieurs au temps des occupations paléolithiques et comment ont-ils évolué au cours du Pléistocène récent ?

Poser la question des paysages physiques de la Combe d'Arc et du Pont d'Arc au moment des



périodes de fréquentations paléolithiques de la grotte Chauvet oblige à s'interroger sur l'évolution géomorphologique du site depuis 36 000 ans, c'est à dire dans des contextes morphoclimatiques différents de l'actuel : lors des dernières périodes froides du Quaternaire, au cours des récurrences tardiglaciaires et au début de l'Holocène. Cette problématique induit de nombreuses questions :

- Comment ont évolué les formes du relief ?
- Quels impacts ont eu les évolutions climatiques sur les paléogéographies de la Combe d'Arc, du Cirque d'Estre et du Pont d'Arc ?

Un second questionnement est sous-jacent au premier :

- Si aujourd'hui le paysage singulier du Pont d'Arc et du méandre abandonné de la Combe d'Arc interpelle tout visiteur, qu'en était-il au temps du Paléolithique supérieur ?

Même si les perceptions du relief par les Aurignaciens nous resteront toujours hors d'atteinte, cette question n'est pas anodine au regard des nombreux travaux sur les grottes ornées qui indiquent qu'elles se situent rarement dans des espaces géographiques neutres (Monney, 2012 ; David et Thomas, 2016). Au contraire, elles semblent se localiser dans des secteurs à forte valeur paysagère et morphologique (gorges de l'Ardèche – figure 54 ; Aldène, Mas d'Azil, Cuevas del Castillo, etc..). Concernant notre espace de recherche, plusieurs points paysagers remarquables semblent associés aux cavités ornées : entrée des gorges avec le Pont d'Arc (grotte Chauvet), milieu des gorges avec le rocher de la Cathédrale (grotte aux Points, Monney, 2018 ; Jaillet et Monney, 2018) et, en sortie aval des gorges, le relief singulier du Ranc Pointu avec les grottes des 2 ouvertures, grotte Chabot, grotte du Figuier, etc, (Chiron, 1889 ; Moncel et al., 2010 ; Monney, 2012).

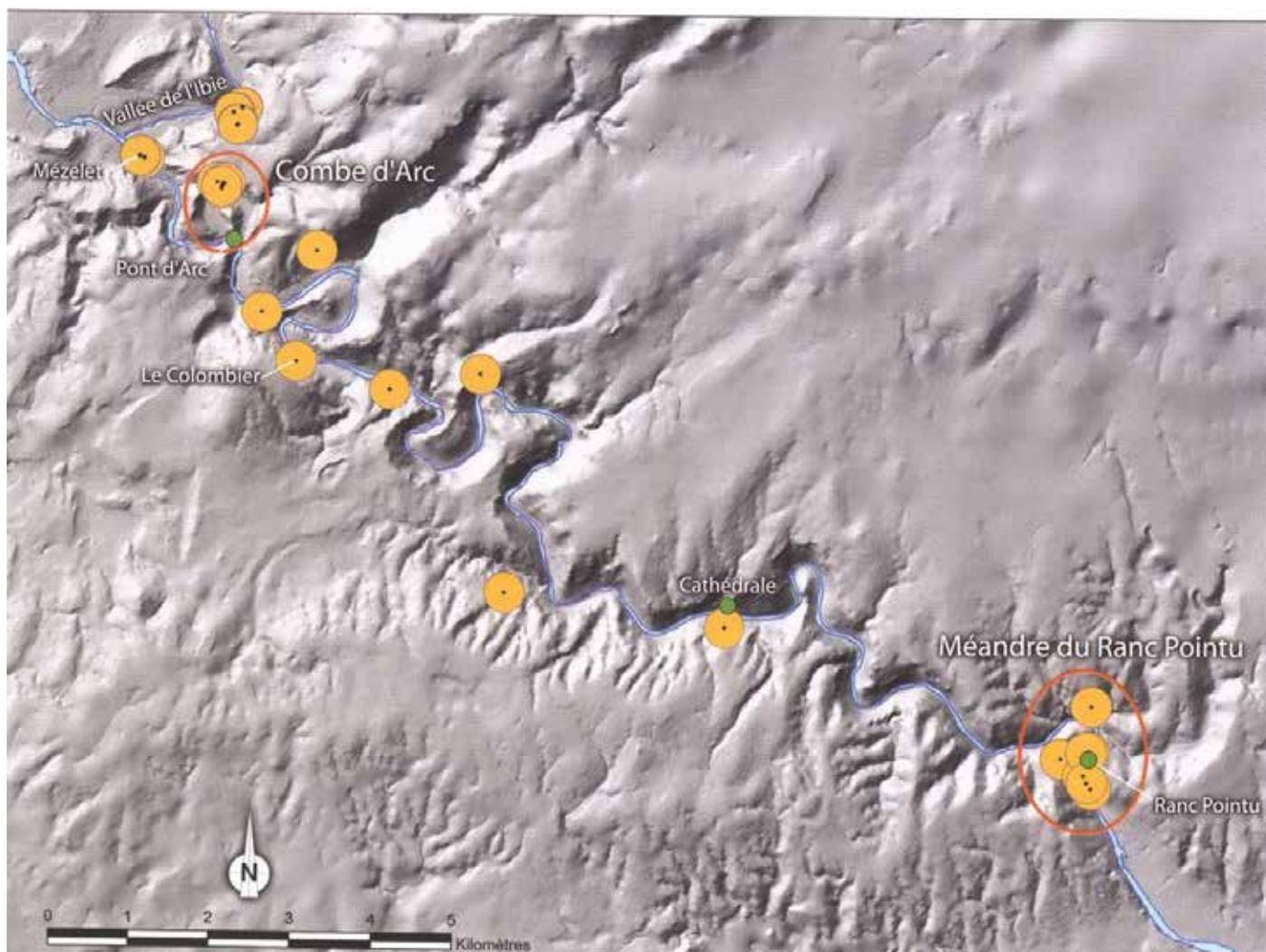


Figure 56 : Carte de localisation et de densité des grottes ornées des gorges de l'Ardèche au Paléolithique Supérieur. Le début et la fin du canyon ressortent nettement comme des zones de fréquentation. D'après : Monney, 2012. *Heat map of the painted caves in the Ardeche canyon. It clearly highlights the entrance and the end of the canyon. Map from : Monney, 2012.*

2. Reconstitution et évolution du cours de l'Ardèche au Quaternaire.

Afin de répondre aux précédentes interrogations, l'objectif de ce travail sera de reconstituer l'évolution du relief au cours des périodes récentes du Quaternaire à partir d'une analyse morphologique du paysage assise sur les supports de modélisation 3D.

Pour mémoire, le recours aux outils de modélisation 3D, en plus d'offrir un support visuel à la reconstitution des morphologies disparues, permet également d'inclure d'autres approches méthodologiques. Ces dernières sont croisées au sein d'un modèle 3D unique qui tente de mettre en relation les données issues d'autres disciplines (Tomographie de la résistivité électrique (ERT), analyses géochimiques, datations absolues...). En fusionnant les approches, le modèle devient support de réflexion, un objet qui, finalement, évolue au cours de la recherche sans jamais être finalisé, permettant des corrélations de données et de pensées.

2.1 Cartographie des dépôts fluviaux de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc.

Le Pont d'Arc, porte d'entrée amont emblématique des gorges de l'Ardèche, constitue un objet naturel remarquable, par la dimension de son arche (60 m de commandement) et par sa place particulière dans le paysage actuel mais peut-être aussi dans celui du Paléolithique. Cet objet marquant du paysage est au cœur des travaux croisant l'approche archéologique et géomorphologique pour appréhender son empreinte dans la géographie de la Combe d'Arc où s'ouvre, entre autres, la grotte Chauvet. La reconstitution du relief du Cirque d'Estre et de l'arche au Paléolithique supérieur permettrait de contextualiser la place de l'arche et celle de l'entrée de la grotte dans la géographie contemporaine des fréquentations préhistoriques (Clottes, 1995 ; Geneste, 2005). D'autres vestiges demeurent énigmatiques (concentrations de blocs ; André et Chabaud, 2000 ; Delannoy et al., 2010 ; Monney, 2012 ; Quilès et al., 2016).

L'origine et les conditions de genèse du Pont d'Arc sont, paradoxalement, encore mal connues aujourd'hui, bien que ce site soit souvent cité comme un cas d'école (Nicod, 1997). S'est-il mis en place rapidement ? Depuis combien de temps ? Est-il seulement la conséquence du recoupement de la rivière ou s'inscrit-il dans une histoire karstique plus ancienne ? Ou encore, est-il lié à la conjonction de processus fluviaux et karstiques ? Enfin, les communautés du Paléolithique l'ont-elles vu et, si oui, quelle était sa géométrie ?

Par l'intermédiaire de l'analyse géomorphologique couplée à l'utilisation d'outils topographiques haute-résolution, les reliefs environnant la Combe d'Arc ont été recréés au sein d'un modèle 3D. Ce dernier a été nourri par les travaux préexistants sur les niveaux de

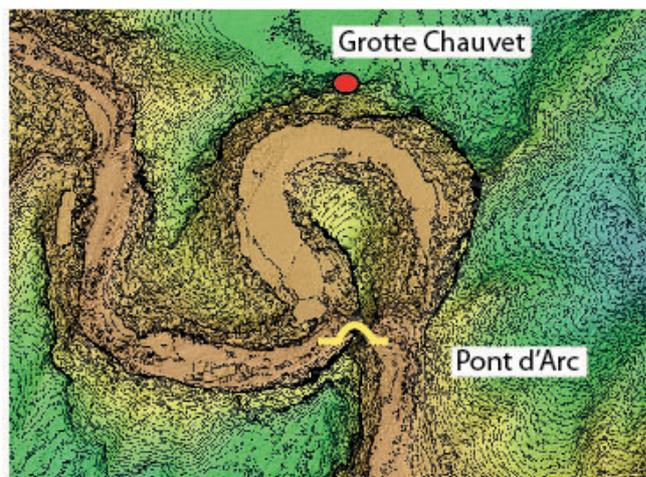
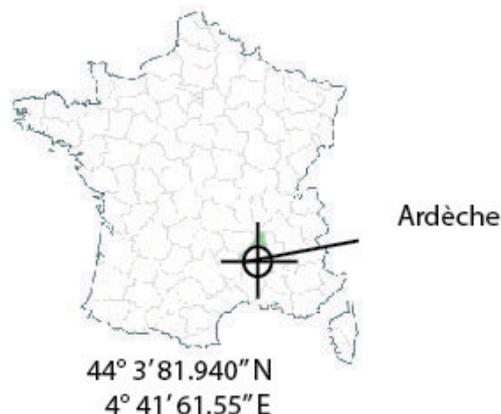


Figure 57 : L'arche naturelle du Pont d'Arc enjambe aujourd'hui le cours de l'Ardèche. Cet objet naturel majeur du paysage est aujourd'hui le lieu touristique le plus important du Sud-Ardèche. La connaissance de sa géométrie au Paléolithique supérieur, notamment durant les fréquentations connues de la grotte Chauvet, est au cœur de notre problématique géomorphologique.

The Pont d'Arc crosses the River Ardèche, a mediterranean, very reactive to rainstorms river, which ends into the River Rhône. What was its geometry like during the human occupation of the Chauvet Cave is one of the main questions of our work.

terrasses alluviales (Labrousse, 1977, Debar, 1988 ; Pascal et al., 1989 ; Bravard, 1993 ; Mocochain et al., 2009) et par les relevés de terrain que nous avons pu mener. Cette approche croisée permet ainsi de poser les premiers jalons de la reconstitution des paléogéographies du Cirque d'Estre et, ainsi, de jeter les premières bases de la mise en place et de l'évolution du Pont d'Arc.

Différentes recherches se sont intéressées aux terrasses alluviales de l'Ardèche afin de traiter de ses phases d'enfoncement en lien avec les événements paléogéographiques et paléoclimatiques. Les études ont porté sur la zone précédant les gorges, leur entrée (Labrousse, 1977 ; Michou, 1984 ; Mocochain et al., 2009) ainsi que la sortie de ces dernières, à la confluence Ardèche-Rhône (Mocochain et al., 2006) sans oublier les affluents directs comme le

Chassezac (Jacob et al., 2006). D'autres travaux se sont centrés sur les niveaux alluviaux à l'intérieur des gorges (Debard, 1988 ; Bravard, 1993). Un des nœuds de raisonnement commun à ces études est le secteur de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc et celui de la confluence de la Beaume, du Chassezac, et de l'Ardèche (appelé « Le Trident » ou plaine de Ruoms). Ces zones sub-planes favorisent la conservation des dépôts, alors que le caractère étroit des gorges est peu propice à la sédimentation et à la conservation des formations alluviales. En amont immédiat des gorges, dans la plaine de Vallon-Pont-d'Arc, les cartographies entreprises par Labrousse (1997) ont

permis de caractériser les surfaces alluviales, mais c'est avec le travail de Mocochain et al. (2009) qu'une évolution de l'Ardèche est véritablement proposée, depuis le Pliocène jusqu'aux basses terrasses du Quaternaire récent. Les divagations de l'Ardèche au nord et au sud de la butte de Montingrand y sont particulièrement discutées, tout comme les relations avec les niveaux de karstifications entre 260 m et 75 m (Mocochain et al., 2009). Ces niveaux sont à nouveau discutés par Sadier (2013). Sur le haut-bassin de l'Ardèche, les relations entre niveaux de karstification et terrasses alluviales ont également été étudiées sur l'affluent de l'Auzon (Audra et al., 2001). Nos travaux de terrain se sont focalisés sur

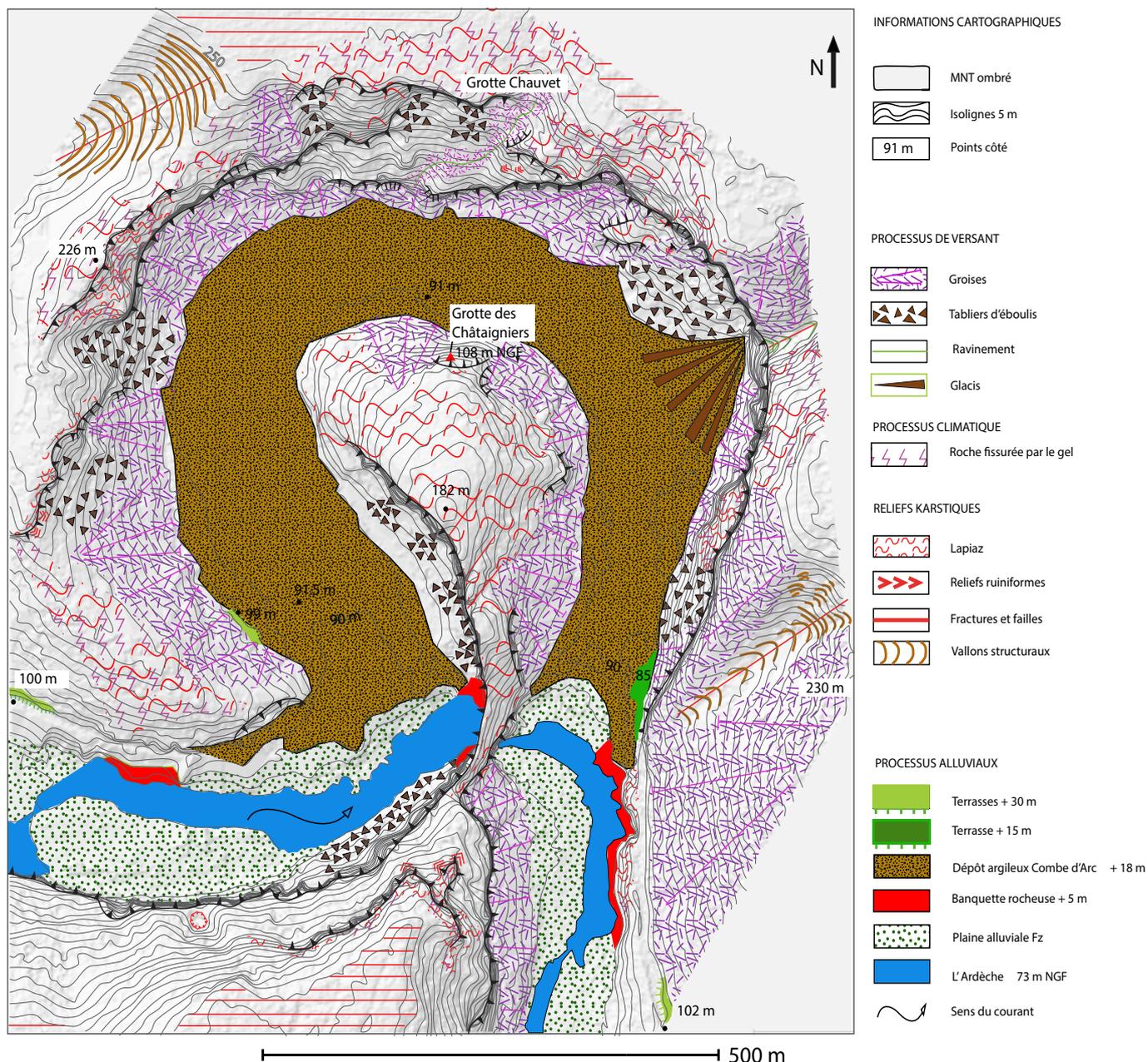


Figure 58 : Carte géomorphologique de la Combe d'Arc. Le méandre recoupé de l'entrée des gorges de l'Ardèche contient des marqueurs alluviaux caractérisés par des dépôts de galets, notamment dans sa partie amont et en rive gauche, après le Pont d'Arc. Ces niveaux, perchés par rapport à l'Ardèche actuelle (+ 30 m), sont la plupart du temps recouverts par des dépôts de pente.

Geomorphic cartography of the Combe d'Arc. The abandoned meander at the entrance of the Ardèche canyon contains numerous alluvial deposits, especially at its beginning and its end. The sediment levels are quite high- usually + 30 m above the current water level. They are generally covered by periglacial slope deposits.

les dépôts alluviaux des basses terrasses, aux environs de la Combe d'Arc, et ont visé à répondre à la question de leur mise en place et de ses liens avec l'évolution du karst, du méandre recoupé et du Pont d'Arc.

Dans le cadre de ce travail préliminaire, il a été effectué un positionnement topographique précis ainsi que la caractérisation pétrographique et granulométrique des morphologies alluviales et des dépôts présents dans le Cirque d'Estre et ses abords. La géométrie de l'ensemble de la Combe d'Arc a bénéficié d'une acquisition par lasergrammétrie terrestre (LiDAR). Quant au géoréférencement des formations alluviales le long de l'Ardèche, il a été effectué en x, y, z au moyen d'un GPS différentiel (dGPS Trimble Geo7x centimeter edition) précis à 3 cm (cf. données constructeur Trimble).

Cette étape de relevés et de caractérisation a permis de mettre en évidence différents emboîtements entre les formes et formations de la Combe d'Arc et de poser les étapes de leur mise en place.

A) Le méandre abandonné de la Combe d'Arc.

Une cartographie détaillée été menée au sein de la Combe d'Arc, afin d'identifier les principaux facteurs susceptibles d'avoir impacté le recoupement du méandre. Si les remplissages alluviaux sont présents dans le méandre, les accès directs aux affleurements de cailloutis sont peu nombreux. Il est possible de retrouver de galets à + 27 m dans les amonts ouest du méandre, mais ce sont les seuls marqueurs grossiers visibles. Le sol du méandre est composé de limons fins, avec parfois une fraction plus sableuse.

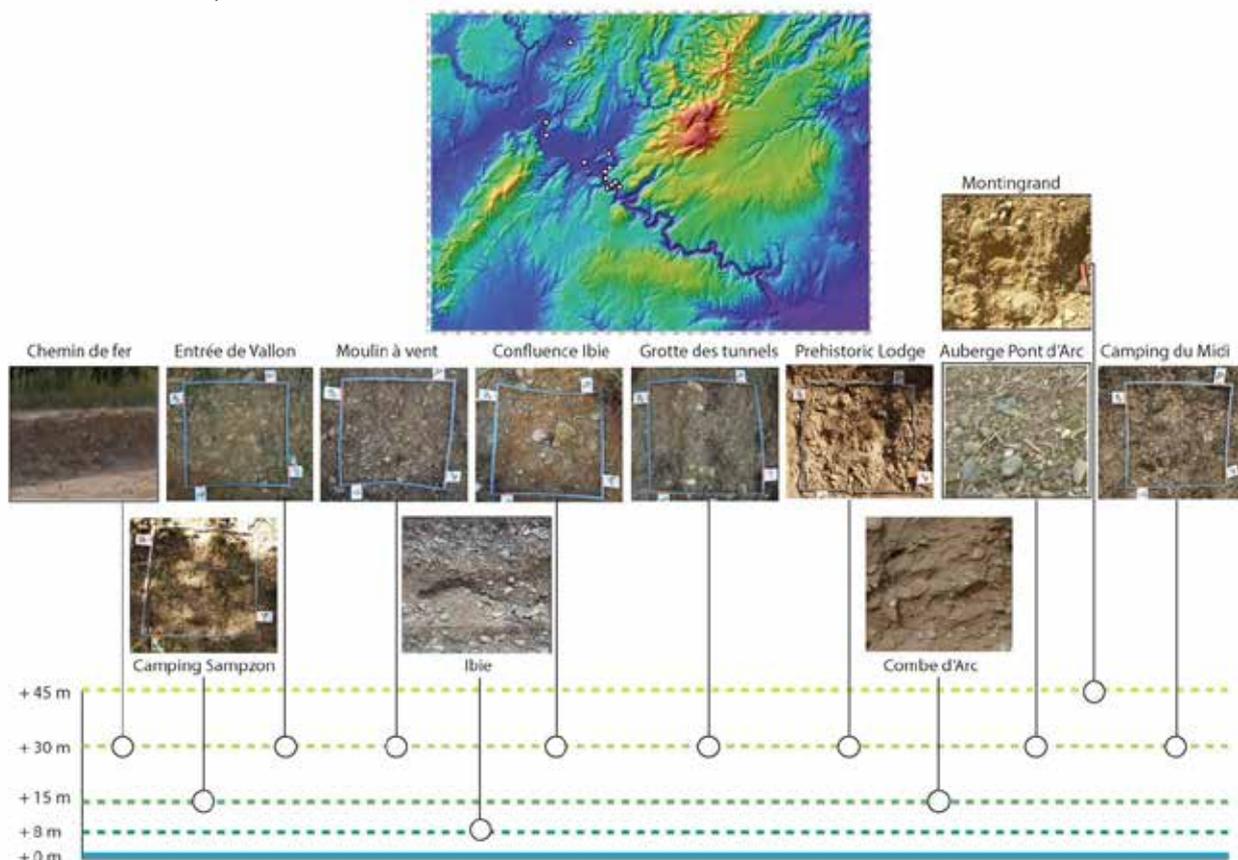


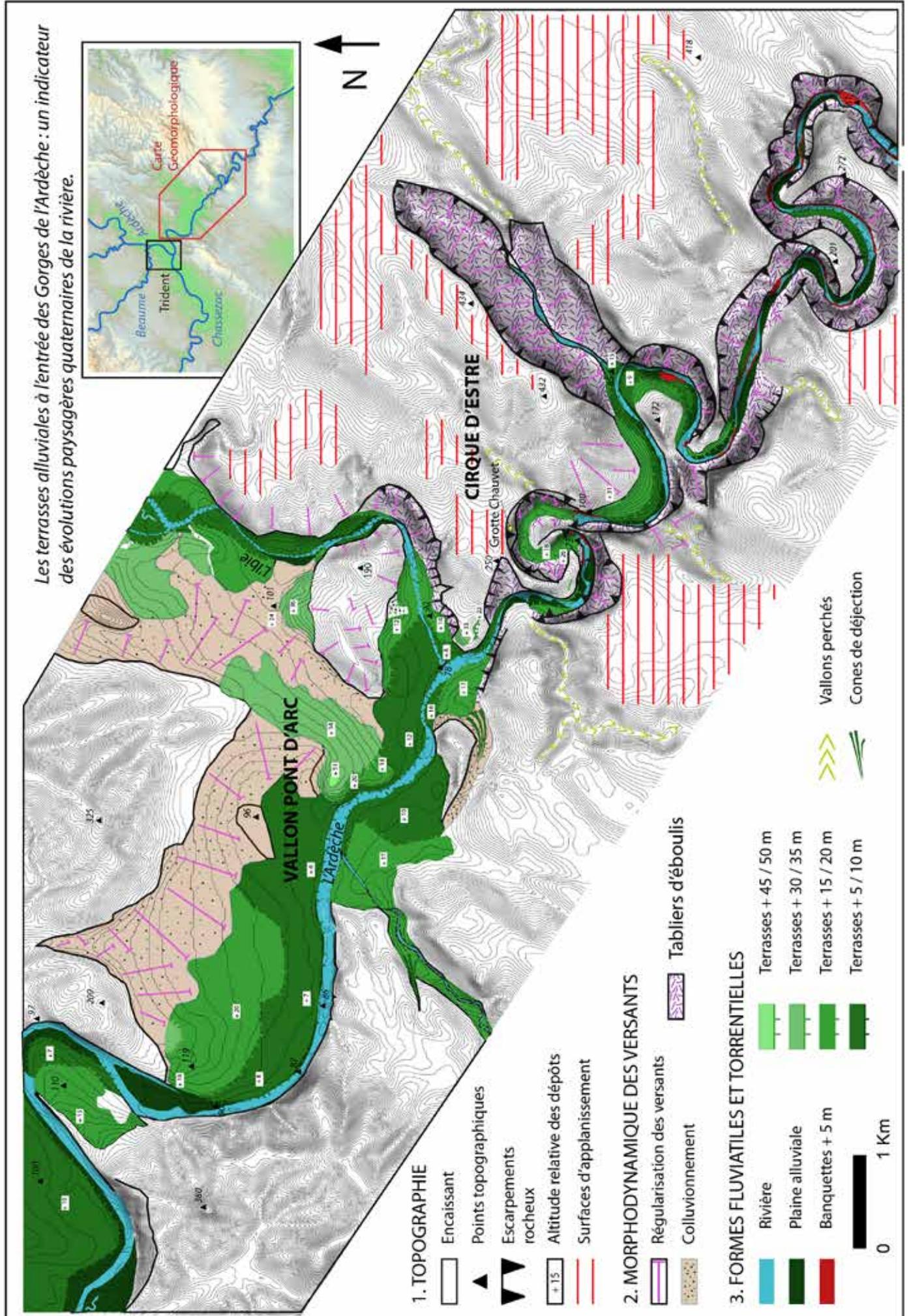
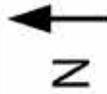
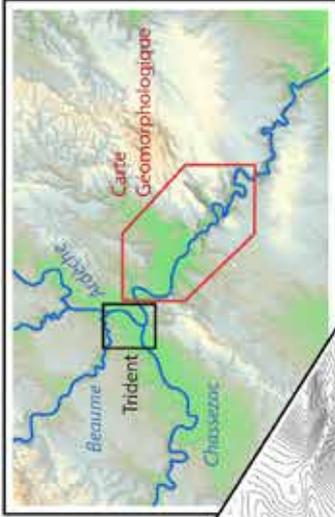
Figure 59 : Affleurements de galets localisés aux abords de l'Ardèche. Une fraction de ces derniers est visible dans le paysage à la faveur des aménagements routiers ou immobiliers ; la charge grossière représente le lit mineur de la rivière.

River Ardèche pebbles were found near road structures and house foundations. Regarding their size, the pebbles can be considered as testimonies of the old minor bed of the river.

Figure 60 : Carte géomorphologique des formes et formations alluviales à l'entrée des gorges de l'Ardèche. On relève la présence de terrasses par leurs replats typiques dans le relief. Les altitudes de ces niveaux alluviaux sont cartographiées à partir des relevés de terrain au dGPS, ou avec un point coté à proximité. Fond cartographique : MNE 1m, et réutilisation des travaux de Labrousse (1977), Mocochain et al. (2009), modifié.

Geomorphological map of alluvial landforms at the entrance of the Ardèche canyon. The planar forms near the Vallon-Pont-d'Arc town are typical alluvial deposits. Their elevations are calculated using a dGPS, or a geodesic point of the French geodesic network. Cartography using a 1m DEM, Labrousse works on River Ardèche deposits (1977) and Mocochain et al. (2009), modified.

Les terrasses alluviales à l'entrée des Gorges de l'Ardèche : un indicateur des évolutions paysagères quaternaires de la rivière.



1. TOPOGRAPHIE

- Encaissant
- Points topographiques
- Escarpements rocheux
- Altitude relative des dépôts
- Surfaces d'aplanissement

2. MORPHODYNAMIQUE DES VERSANTS

- Régularisation des versants
- Colluvionnement
- Tabliers d'éboullis

3. FORMES FLUVIATILES ET TORRENTIELLES

- Rivière
- Plaine alluviale
- Banquettes + 5 m
- Terrasses + 45 / 50 m
- Terrasses + 30 / 35 m
- Terrasses + 15 / 20 m
- Terrasses + 5 / 10 m
- Vallons perchés
- Cones de déjection



Des dépôts grossiers à + 15 m sont visibles à l'extrémité Est du méandre (figure 58). Il faut noter l'importance de la dynamique périglaciaire ayant affecté les versants avec notamment d'épais tabliers d'éboulis, plus ou moins indurés, se raccordant au replat alluvial du méandre. Un niveau de banquette calcaire perché à environ + 2 et + 5 m est visible aux abords du Pont d'Arc. Ce dernier a été ré-incisé par le cours d'eau (Bravard, 1993 ; Jacob-Rousseau 2008).

B) Les dépôts fluviaux de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc.

Trois niveaux particulièrement bien marqués de cailloutis et de galets fluviaux ont été identifiés. Ces derniers sont exprimés en altitude relative au-dessus de l'étiage actuel de la rivière : le premier niveau à + 5 / + 10 m, le deuxième à + 15 / + 20 m, et le dernier à + 30 / + 35 m. Un niveau supérieur à + 45 m, moins bien conservé, a également été reconnu. Ici, contrairement à la plaine d'épandage de Vallon Pont d'Arc, le resserrement de la vallée a pour effet de favoriser une chasse rapide des dépôts. Ils sont donc moins présents et très peu conservés au sein du canyon lorsqu'ils ont pu se déposer. On remarque que leur conservation répond à des contextes topographiques particuliers : méandres recoupés ou interfluves.

Au côté des formations alluviales, on relève la présence d'une banquette calcaire perchée entre + 1 et + 5 m, au-dessus du niveau actuel de l'Ardèche. Cette dernière, correspondant peut-être à un ancien niveau de talweg de l'Ardèche, est visible quasiment tout au long des gorges.

Afin de raccorder ces niveaux alluviaux à la dynamique de l'Ardèche, une recherche plus large a été menée, en amont et en aval du Pont d'Arc : différents affleurements de galets en place, ont pu être reconnus, visibles la plupart du temps suite à leur recoupement par une route ou un chemin. Leur étude a été conduite selon la méthode de comptage par granulométrie linéaire et type pétrographique des galets (Cailleux et Tricart, 1959) : le long d'un axe de 4 m en ligne droite tracé sur un dépôt, les galets traversés par la ligne sont comptés, mesurés et identifiés. Les galets sélectionnés doivent être en place, il faut parfois creuser une petite tranchée dans l'affleurement pour limiter les possibilités de remaniement. Dans l'ensemble des cas, les comptages ont été effectués sur les parties hautes de l'affleurement, zones topographiques subverticales limitant ainsi la possibilité d'analyser des dépôts remaniés par les dynamiques de versant. Pour chaque niveau de terrasse identifié, un relevé au dGPS, une analyse de composition pétrographique et de granulométrie ont été effectués. Cette étude a été menée d'amont en aval, depuis le camping de Sampzon jusqu'au Pas du Mousse, méandre suivant le cirque d'Estre (voir figure 60).

2.2 Réalisation d'un modèle 3D haute-résolution.

Ce travail vise à replacer les informations morphogéniques sur les paléogéographies dans un même modèle de référence géographique ayant une bonne résolution spatiale. Nous travaillons à une échelle métrique en x et en y, et souhaitons approcher le décimètre en Z, car une partie de la reconstitution des évolutions paysagères repose sur la précision avec laquelle on pourra replacer l'étagement des terrasses alluviales, éléments majeurs dans la reconstruction des dynamiques morpho-fluviales au niveau du Pont d'Arc. Les levés de terrain ont été réalisés à partir de la confluence du « Trident » (Ardèche, Baume, Chassezac), jusqu'à la sortie du méandre du Pas du Mousse (figure 60). Les hauteurs des terrasses ont été mesurées par GPS différentiel afin d'obtenir des précisions infra-décimétriques.

Lors du levé topographique de la Combe d'Arc, le recours à un LiDAR terrestre a permis d'obtenir une bonne précision topographique. 56 scènes de scan ont été réalisées entre 2010 et 2017, pour un nuage assemblé et nettoyé de près de 28,5 millions de points, avec une résolution moyenne de 18 cm entre chaque point pour les zones visibles, et un point tous les 5,75 m pour le sol sous couvert végétal (moyennes calculées sur 40 mesures indépendantes, avec 3DReshaper).

L'assemblage, réalisé par recalage par n paires de points puis par « *best fit* » (Besl et McKay 1992) sous *CloudCompare*, reste compris dans une *Root Mean Square Error* (Erreur moyenne quadratique) globale (somme des *RMSE* de chaque « *best fit* » calculée sous *CloudCompare*) de moins de 15 cm.

Après avoir manuellement éliminé les points représentant la végétation, le modèle est recalé sur les points dGPS avec une précision infra-décimétrique. Le maillage ainsi géoréférencé a servi de fond topographique pour replacer les informations morphogéniques recueillies sur le terrain, sur une cartographie géomorphologique très détaillée.

Le nuage de points est ensuite maillé par l'intermédiaire du logiciel de maillage *3DReshaper*. Ce maillage sert de support visuel à la digitalisation des terrasses sous forme de plans 3D passant par les points dGPS représentant les terrasses alluviales. Le caractère relativement plan des formations alluviales s'accorde avec ce type de géométrie et permet ainsi une meilleure visualisation de ce que pouvaient être les niveaux de terrasses actuellement attribuées aux deux dernières périodes froides du Quaternaire. On peut alors dessiner les premières esquisses des paléogéographies alluviales.

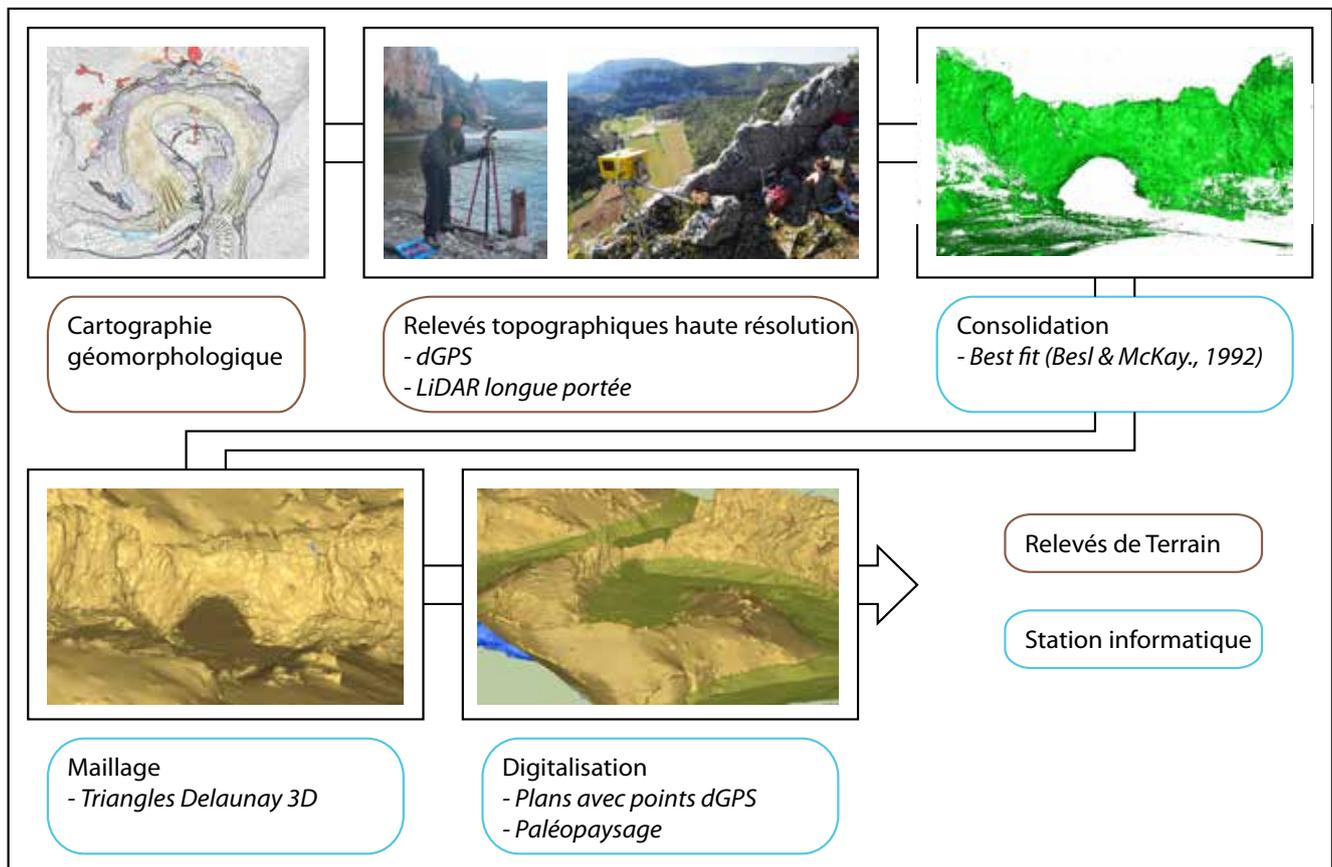


Figure 61 : Méthodologie 3D : la Combe d'Arc scannée, nettoyée de sa végétation et consolidée (assemblée). La résolution est suffisante pour permettre d'observer les modelés fluviatiles - banquettes calcaires et dépôts sédimentaires - de part et d'autre du Pont d'Arc. Les plans digitalisés à partir des relevés au dGPS dessinent une première esquisse de la paléo-topographie du modelé fluviatile du Cirque d'Estre.

3D methodology: the Combe d'Arc landscape has been scanned with a terrestrial LiDAR and the vegetation removed. The precision is sufficient to identify the alluvial morphologies around the Pont d'Arc. Digitized plans using dGPS points, recreate a possible paleotopography of the Combe d'Arc landscape.

3. Résultats.

3.1 Pétrographie des dépôts alluviaux.

L'analyse de la terrasse située à + 30 m et attribuée au Riss par Labrousse (1977), se caractérise par une composition pétrographique dominée par des granites et une absence notable d'éléments calcaires rapportée à une dissolution postérieure (Bornand, 1978). Cette distribution pétrographique diffère fortement de la composition du matériel alluvial présent dans le talweg actuel des gorges (10 à 20 % de galets calcaires en amont, et parfois jusqu'à 50 % dans le lit même de la rivière). La taille assez imposante des galets (10-15 cm pour les granites) s'accorde avec la description des terrasses dites « rissiennes » de Labrousse (1977). La transformation des galets de granite en gore (altération et dégradation des galets en grains de sable), pourrait être un indicateur d'ancienneté. L'âge du dépôt peut être estimé par la courbe d'arénisation des dépôts cristallins du Rhône proposée par Bornand (1978).

Les relevés ont été effectués entre 1 m et 4 m sous le replat alluvial et contenaient environ 20 % de galets altérés en gore sableuse (dont ne reste que le fantôme de la forme originelle du galet). Une identification du dépôt comme appartenant à un stade ancien du Würm ou au Riss (respectivement stades isotopiques MIS 4 ou MIS 6) pourrait être cohérente.

La terrasse considérée comme würmienne par Labrousse (1977) se situe à + 15 m sous la butte du Moulin à Vent ; elle se caractérise par une composition différente du précédent niveau : les galets sont ici de moindre taille (moins de 10 cm pour les granites).

Cette tendance se retrouve également pour le même niveau alluvial reconnu au camping de Sampzon. Ces observations recoupent celles de Labrousse (1977) sur la différence granulométrique entre les terrasses associées au Riss et au Würm. Une autre différence majeure est l'abondance des basaltes. Alors que ces derniers représentent environ 20 % du dépôt à + 30 m, leur proportion baisse jusqu'à 5 % pour la terrasse + 15 m.

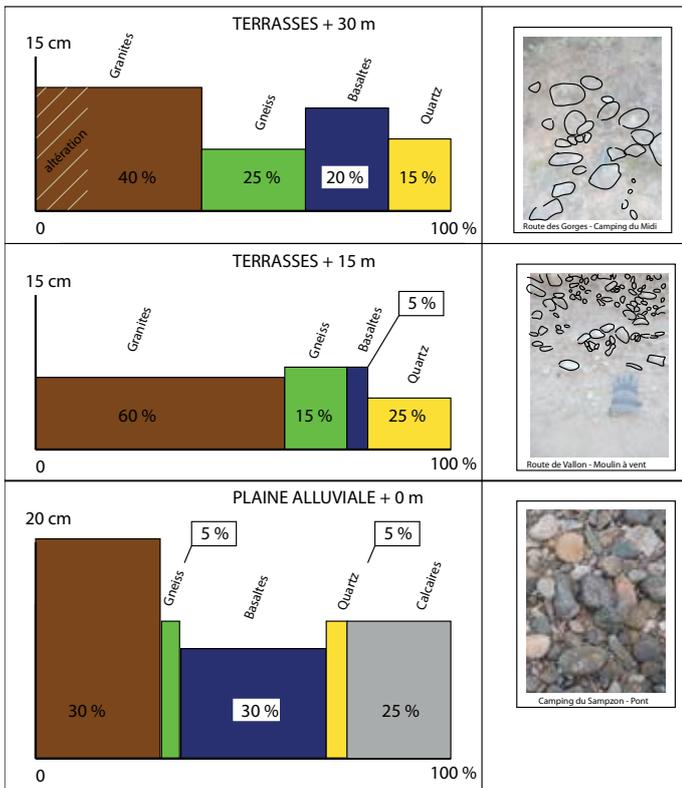


Figure 62 : Tableau comparatif des terrasses + 30 m, + 15 m et actuelle. La terrasse + 30 m possède des galets aux axes d'allongement plus importants que ceux de la terrasse + 15 m, ainsi qu'une proportion plus importante de galets de basalte. Dans les deux cas, les galets de calcaires sont absents ce qui contraste fortement avec la composition du cailloutis actuel où ces derniers représentent une portion majeure du spectre pétrographique.

Comparative table of three levels of alluvial deposits: the + 15 m, + 30 m levels and the current alluvial plain. The highest level contains more basaltic rocks and bigger ones too, whereas the + 15 m deposit has tinier rocks and almost no basaltic ones. Both deposits are clear of limestone rocks, which strongly contrasts with the composition of the current alluvial deposits of the River Ardèche.

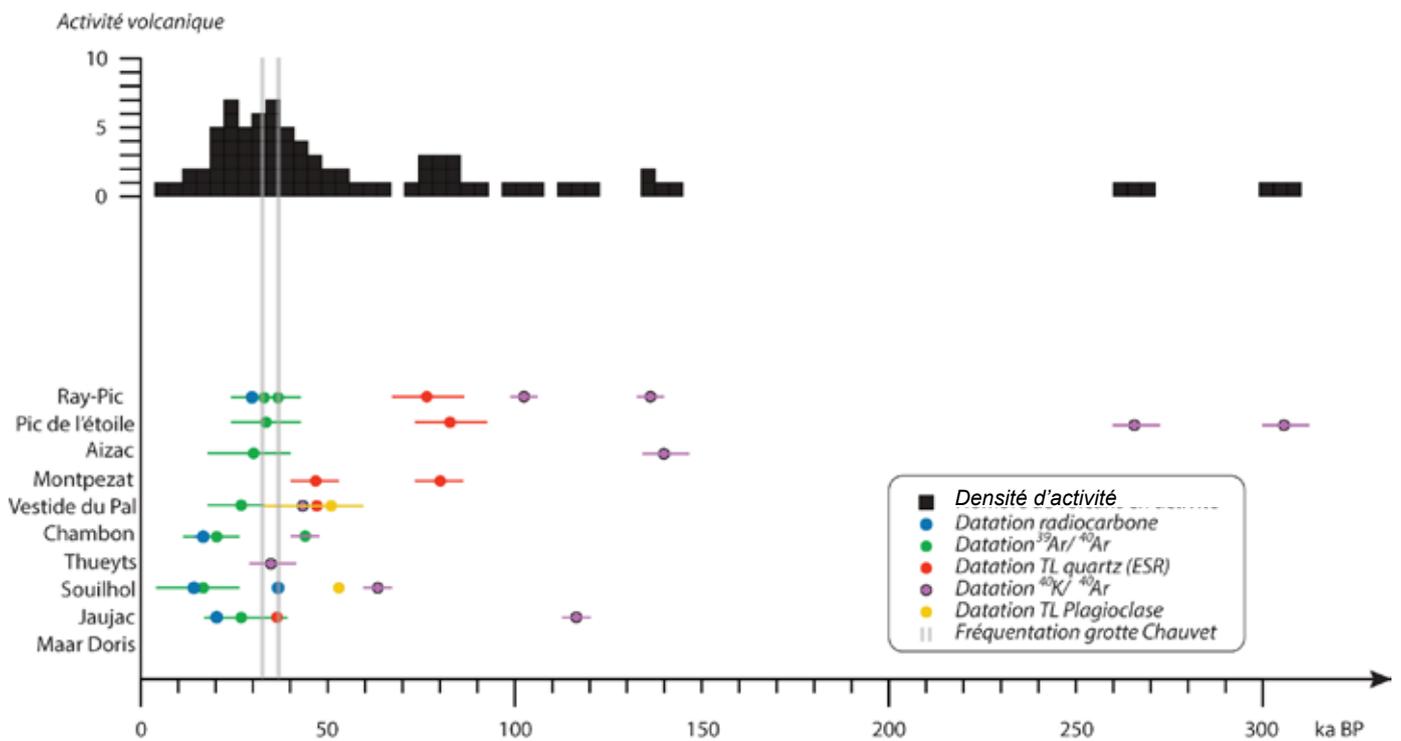


Figure 63 : Synthèse des datations effectuées sur les volcans pléistocènes du bassin versant ardéchois (sans les coulées des Coirons, très anciennes, 6 Ma) et densité d'activité. Radiocarbone : Berger, 1975. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: Nomade et al., 2016 ; Sasco et al., 2017. $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$; Sasco et al., 2017. TL Quartz : Pilleyre et al., 1992; Sanzelle et al., 2000. TL plagioclases : Fleming, 1970; Guérin et Gillot, 2007.

Dating review of the Pleistocene volcanic activity inside the Ardèche watershed and activity density plot. Radiocarbon dating : Berger, 1975. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating : Nomade et al., 2016 ; Sasco et al., 2017. $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ dating : Sasco et al., 2017. TL Quartz dating : Pilleyre 1992 ; Sanzelle et al., 2000. TL plagioclases dating : Fleming, 1970 ; Guérin & Guillot, 2007.

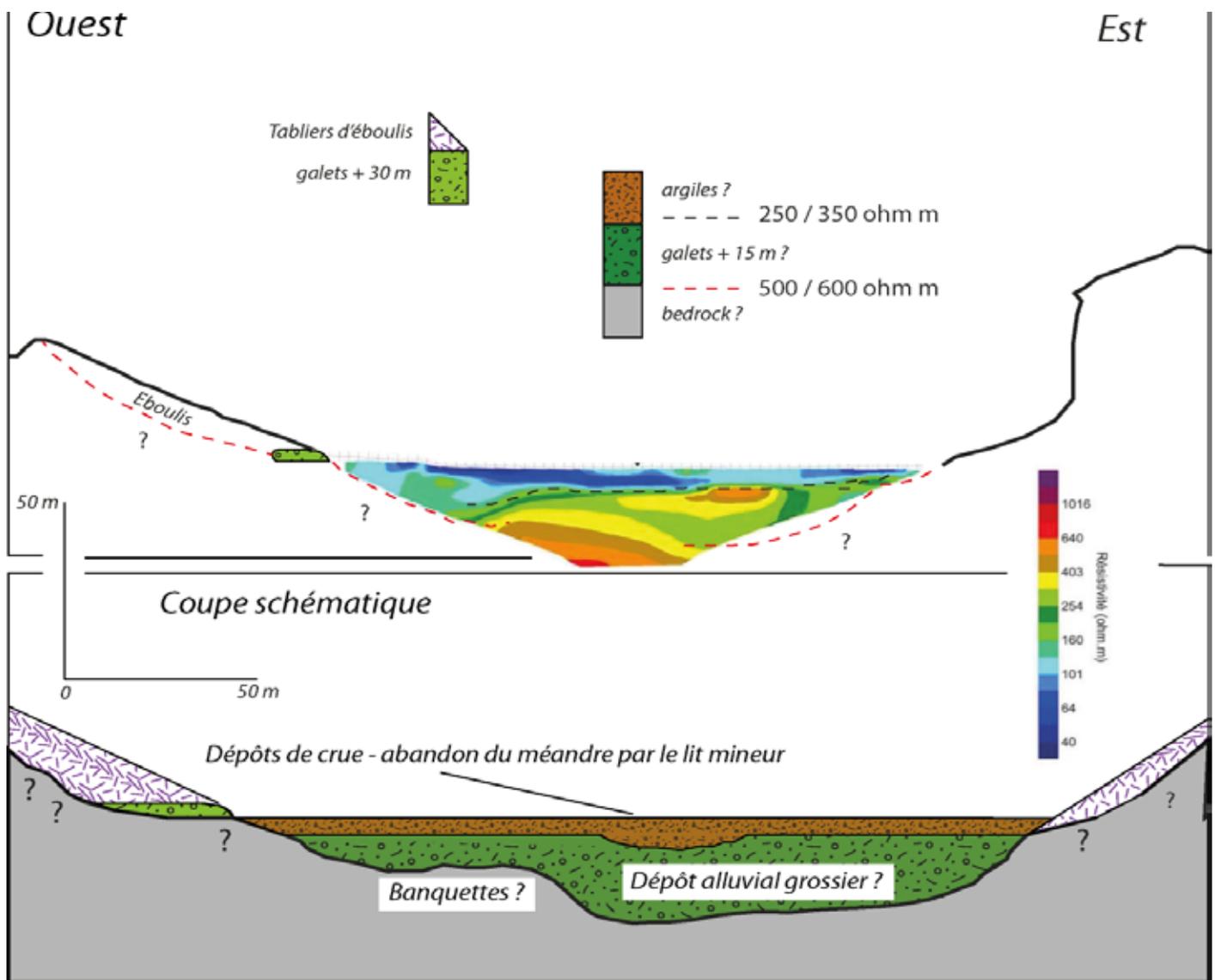


Figure 64 : Profil tomographique de la Combe d'Arc (Leroux et al., 2010). L'investigation des sous-sols par la méthode de l'ERT révèle plusieurs niveaux de résistivité électrique, pouvant correspondre à des niveaux limoneux, de galets, ou à la roche mère. L'organisation altitudinale des terrasses révèle un système étagé entre les terrasses + 30 m et + 15 m, et un système emboîté pour la terrasse + 15 m et les dépôts limoneux situés juste au-dessus d'elle (Sheffer et al., 2003).

ERT tomography of the Combe d'Arc meander, with the meander cross-section. The ERT reveals several resistivity levels, which can correspond either to fluvial deposits (flood sediments or shingles) or to bedrock limestone. In the Combe d'Arc, the alluvial deposits are made of silts, due to paleoflood deposits (Scheffer et al., 2003). The clay probably covers an ancient shingle riverbed located a few meters below the flood deposits (Leroux2010). The deposits are organised in two ways: local deposits for the + 30 m bank and continuous growing deposits inside the meander which seem to be composed of the + 15 m shingles of the alluvial bank, and of 4 metres of thin deposits (sand, clay).

Si on tient compte de l'importance des galets de basalte dans la composition du talweg actuel de l'Ardèche (environ 20 à 30 %), ce hiatus est peut-être à mettre en relation avec l'histoire volcanique de la Basse-Ardèche. Des phases de volcanisme récentes se sont produites entre 80 000 et 30 000 ans environ (Berger, 1975 ; Rochette et al., 1993 ; Nomade et al., 2016). Cela pourrait expliquer les proportions des basaltes dans la terrasse + 30 / + 35 m. Leur rareté dans les terrasses à + 15 m pousse à considérer ce dépôts comme plus ancien.

Une phase de volcanisme a également été reconnue vers moins 15 000 ans (Berger, 1998), ce qui pourrait correspondre avec la composition de la plaine alluviale actuelle de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc, riche en basaltes.

3.2 La surface alluviale de la Combe d'Arc.

La surface actuelle de la Combe d'Arc s'apparente à une plaine alluviale de débordement sablo-limoneuse. Sa mise en place est associée aux apports des anciennes crues de l'Ardèche en matériaux fins (Scheffer et al., 2003). Le dépôt de galets correspondant au lit mineur de l'Ardèche lorsque cette dernière empruntait encore le méandre, se situe probablement sous plusieurs mètres de ces dépôts de crue. Dans le cadre du projet « Datations Grottes Ornées » (Monney, 2010), cinq profils électriques acquis par tomographie électrique (ERT), ont été réalisés en 2010 par Olivier Leroux, Gilles Menard et Julien Monney dans le cadre du projet « Datation Grottes Ornées » (Monney, 2010). Ils fournissent des indices intéressants : en recalant ces profils sur le modèle topographique du Cirque d'Estre, il est possible d'identifier un niveau résistif assez constant à environ 4 m de profondeur tout au long de la Combe (vers 85-87 m NGF).

Le niveau résistif marqué apparaît autour de 250 ohm/m et se trouve au même niveau que le haut des terrasses repérées à + 15 m. Il s'apparente peut-être à la hauteur maximale d'un niveau de galets. Le sommet du remplissage du méandre abandonné correspondrait alors aux dépôts d'épandage limoneux de crue. L'épaisseur de ces derniers est confirmée par sondage sur au moins 2,80 m de profondeur (Scheffer et al., 2003). Cependant, l'étroitesse de la plupart des profils et l'absence de calage des valeurs de résistivité par forage pousse à rester prudent vis-à-vis des interprétations concernant le *bedrock* ou bien d'éventuelles variations de composition des dépôts à plus grande profondeur.

Les niveaux de terrasse étant inclus dans le modèle 3D avec les plans, il est possible de visualiser l'ensemble des informations morphogéniques au sein d'un même objet 3D. Sur la coupe de la figure 65, on observe ainsi que le banc à + 30 m passe au-dessus de la voûte du Pont d'Arc. Le banc + 15 m, reste, quant à lui, sous le niveau actuel de la Combe d'Arc, mais devait obstruer une grande partie de l'arche du Pont d'Arc si elle existait.

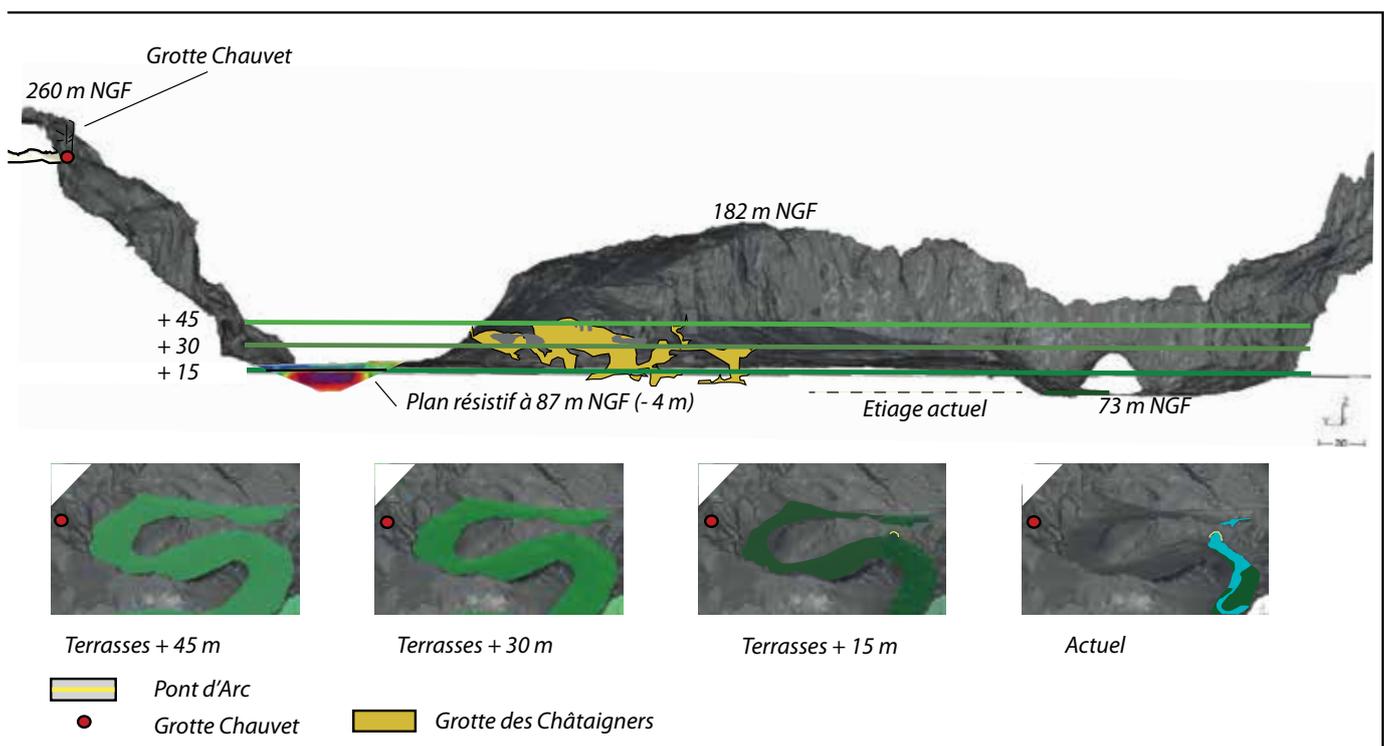


Figure 65 : Vue perspective nord-sud de la Combe d'Arc. Sur cette coupe passant par la grotte Chauvet jusqu'à l'Arche et comprenant une partie de la plaine alluviale, on identifie le niveau résistif situé à 87 m NGF. Il correspond à une profondeur de 4 m par rapport au sol (à 91 m NGF), et indique vraisemblablement un niveau de galets. Tomographie : Leroux 2010 ; topographie en coupe de la grotte des Châtaigniers.

North-South perspective of the Combe d'Arc landscape. The cross-section stretches from the Chauvet Cave to the arch. The + 15 m deposits are buried inside the Combe d'Arc. They may correspond to the shingle riverbed that seems to appear on the tomography results, 4 m above the soils (91 m A.S.L). Tomography: Leroux 2010. Topographic section of the Châtaigniers Cave.

Si on tient compte de ces informations, qui restent à préciser, le report des niveaux altitudinaux + 15 m et + 30 m fait ressortir l'image d'un Pont d'Arc offrant finalement une ouverture très faible (en considérant la hauteur de l'arche constante), voire inexistante pour le niveau de la terrasse à + 30 m. La position particulière de la grotte des Châtaigniers qui s'ouvre à 106 m NGF, au sein du pédoncule et son abaissement altitudinal plus bas que celui des dépôts, en font une cavité privilégiée pour notre étude. En effet, elle constitue un piège potentiel des dépôts de la rivière et un milieu propice à leur conservation, notamment ceux de la terrasse + 45 m (localement située à 110 m NGF). Certains dépôts plus fins pourraient également y être conservés. Si des concrétions scellent ces derniers, il sera possible de les replacer dans une chronologie absolue en datant les concrétions par la méthode des radio-éléments U/Th (Pons-Branchu et Quinif, 2018). C'est pourquoi cette cavité et l'étude de ses concrétions feront l'objet d'un chapitre à part entière (cf. chapitre 6).

4. Discussions.

Ce premier travail de reconnaissance géomorphologique avait pour objectifs d'identifier les différents objets (terrasses alluviales notamment) se déployant dans le Cirque d'Estre et aux abords du Pont d'Arc, et de poser ainsi les bases d'une reconstitution de l'évolution d'une géographie avant, pendant et après les fréquentations connues de la grotte Chauvet. La cartographie détaillée, supportée par une topographie 3D haute-résolution du modelé, permet de disposer de premiers éléments pour élaborer la création d'un paléo-modèle du méandre recoupé de la Combe d'Arc au Paléolithique supérieur.

Pour autant, malgré la grande précision de l'instrumentation topographique 3D, de nouveaux relevés de terrain doivent être réalisés pour compléter et élargir l'analyse topographique des terrasses, notamment à l'amont des gorges. D'après Labrousse (1977), l'épaisseur des nappes alluviales aurait pu atteindre une vingtaine de mètres lors des dernières périodes froides (Plaine du Chassezac, bordure de la butte du Moulin à Vent). Par exemple, on retrouve des lambeaux de la terrasse rapportée au Würm à +10 m, mais également jusqu'à + 25 m à certains endroits (Labrousse, 1977). De grandes incertitudes demeurent quant à la forme, à l'épaisseur, et à la pente des dépôts alluviaux rapportés au Quaternaire récent. Il est possible que des dépôts soient encore en place dans la grotte des Châtaigniers, bien qu'aucun cailloutis n'y ait été retrouvé pour l'instant. Peut-être que certaines morphologies de la cavité peuvent être corrélées avec les niveaux de base correspondant aux différentes terrasses alluviales.

Labrousse (1977) parle de terrasses rissiennes pour des dépôts entre 25 et 35 m dans le Chassezac, mais il cartographie ces dépôts dans la plaine de Vallon Pont d'Arc à + 45 m, et même à + 54 m à Vallon-Pont-d'Arc, au niveau de la butte du Moulin

à Vent. Il date les terrasses + 30 m de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc du Würm. Jacob et al., (2006) parlent d'un niveau pouvant se rapporter au Riss à + 20 m / +35 m dans les gorges du Chassezac, affluent direct de l'Ardèche en amont de la plaine de Ruoms, mais retrouvent ce niveau à + 17 m à la sortie des gorges : les changements topographiques du modelé des encaissements (alternances plaines et canyon) induisent en effet des variations importantes dans les épaisseurs de remplissages qu'il faut considérer. Une haute terrasse à + 40 / 50 m est également évoquée par ces auteurs. Les reliquats de terrasses sont donc à corrélés avec d'autres relevés aux alentours pour générer des plans représentatifs cohérents.

Pour distinguer les dépôts, nous avons utilisé la composition et la granulométrie des galets. Finalement, si les travaux de Labrousse (1977) et de Jacob et al. (2006) proposent des indications sur l'âge des terrasses de l'Ardèche, il reste difficile d'estimer précisément la date de ces formations et leurs relations avec les dernières périodes froides quaternaires. L'attribution d'un niveau de terrasse à telle ou telle période froide reste pour l'instant délicate : plusieurs stades isotopiques pouvant se succéder au sein d'une même période glaciaire (par exemple, stades 2 et 4 au cours de la glaciation de Würm). Justement, dans la Combe d'Arc, les dépôts à + 30 / + 35 m diffèrent en composition et en granulométrie des dépôts à + 15 m, également rapportés au Würm par Labrousse (1977). Correspondent-ils aux deux dernières périodes froides (stades isotopiques 2, 4 et 6) ? Pourrait-il s'agir, au contraire, de deux stades isotopiques différents au sein de la dernière période froide (stades isotopiques 2 et 4) ? L'étude des terrasses recontextualisées dans la géométrie globale de la vallée et des gorges de l'Ardèche, via l'approche 3D, pourrait apporter de nouveaux modes de raisonnement sur les formes et déterminer les sites d'étude à dater. Il convient donc de replacer ces morphologies fluviales dans une chronologie absolue confrontant à la fois des données de type archéologique (période paléolithique), géologique (chronologie alpine Riss et Würm) et paléoclimatique (stades isotopiques). Le recours à des datations absolues sur les niveaux alluviaux a été envisagé par la méthode OSL (Mercier, 2008) mais la mise en oeuvre s'effectuera finalement par ESR (Résonance de spin électronique, Yokoyama et al., 1985) (cf. Chapitre 7). Ces calages chronologiques sont nécessaires car un niveau fluvial à + 15 m (Labrousse 1977 ; Jacob et al., 2006) dessine déjà un modelé très différent de celui d'aujourd'hui, avec un lit de l'Ardèche remblayé par une abondante charge alluviale, et une arche beaucoup plus modeste, provoquant, possiblement, le comblement de l'arche du Pont d'Arc par le cours d'eau avec des apports massifs de sédiments fins lors des périodes de crues (Sheffer et al., 2003). L'aggradation sédimentaire dans le talweg de l'Ardèche durant ces dernières périodes froides pose la question de l'influence du Pont d'Arc sur les dynamiques de la rivière. Si l'on suppose l'existence d'un Pont d'Arc déjà formé - même partiellement - au moment de l'établissement de la terrasse à + 15 m, offrait-il un passage privilégié

pour l'eau ou bien son comblement alluvial, même partiel, permettait-il une dérivation – totale ou partielle des écoulements - dans le méandre de la Combe d'Arc ? Si cette situation semble plausible en période de crue au regard des grands épisodes cévenols au cours de l'Holocène, l'Ardèche à + 15 m à l'étiage empruntait-elle déjà le passage du Pont d'Arc ? Pour répondre à ces interrogations, il est capital de bien caler dans le temps et l'espace, les niveaux de remblaiements alluviaux et leur ré-incision.

L'altitude des formations alluviales déposées lors des dernières périodes froides interroge sur les conditions de leur sédimentation et sur le rapport entre ces niveaux et le degré d'ouverture du Pont d'Arc, et donc questionne aussi sur l'évolution morphologique de ce dernier. Le Pont d'Arc, peut-être moins ouvert qu'aujourd'hui, disposait-il d'un moindre gabarit lors des dernières périodes froides du fait du comblement alluvial du lit de l'Ardèche ? La Combe d'Arc était-elle alors le passage du lit mineur de la rivière ?

Étant donné la présence, potentiellement importante d'un niveau de galets rapporté au Würm dans le fond du méandre recoupé, une nouvelle campagne de tomographies ERT apparaît nécessaire pour approcher la réalité et l'épaisseur de ce niveau alluvial et préciser la topographie du *bedrock* calcaire et son altitude (cf. Chapitre 5).

On l'aura compris, si les éléments essentiels de la problématique sont posés, il est cependant très délicat de poursuivre l'étude à cette échelle : la seule analyse des dépôts alluviaux dans la Combe d'Arc et leur insertion dans un cadre géométrique fin (modèle 3D haute-résolution) ne sont pas suffisants. Le périmètre du Pont d'Arc et de sa Combe offre, certes, une cohérence pour l'étude des paléo-paysages au temps des fréquentations humaines de la grotte Chauvet, mais l'insertion dans un cadre temporel implique un « coup de zoom » arrière, une analyse à l'échelle de toute la rivière Ardèche, depuis ses têtes de bassins jusqu'à son débouché dans la vallée du Rhône.

5. Création d'un modèle topographique 3D étendu.

Pour mieux cerner cette emprise hydrographique et l'étagement des terrasses notamment + 15 m et + 30 m, un modèle topographique étendu a donc été nécessaire. La construction de ce dernier constitue également l'occasion de modéliser les reliefs amont visibles depuis les gorges de l'Ardèche. Au final, l'ensemble du bassin versant de la rivière a donc été modélisé en 3D.

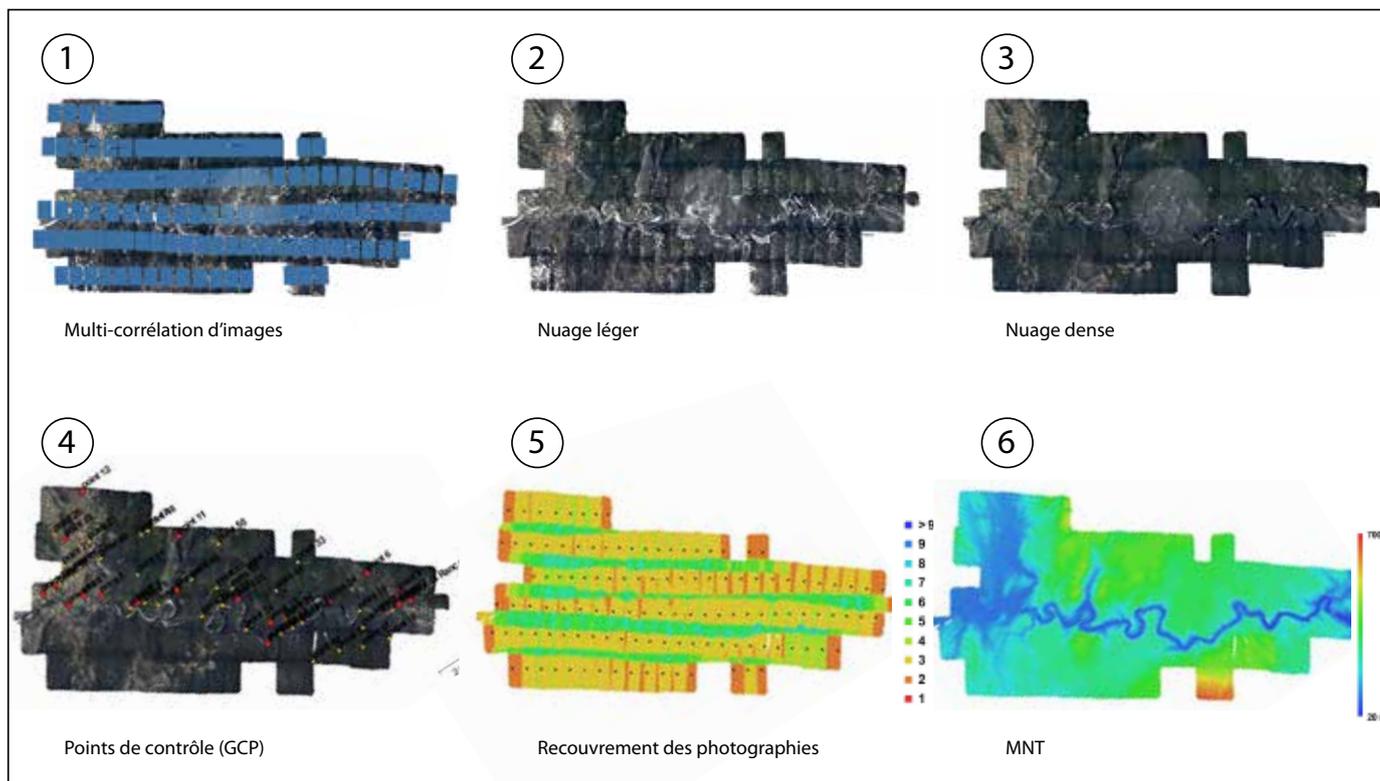


Figure 66 : Etapes de construction du nuage de points des gorges de l'Ardèche par multi- corrélation d'images. 1. Campagne aérienne (121 photos), 2. Nuage léger (1 585 768 points), 3. Nuage dense (686 349 324 points), 4. Points de contrôle au sol (56 points), 5. Recouvrement des photographies (131 km²), 6. Modèle Numérique de Terrain (MNT 5x5 m).

Construction steps of the Ardèche canyon point cloud. 1. Aerial photographs (121 photographs), 2. Light cloud (1 585 768 points), 3. Dense cloud (686 349 324 points), 4. Ground control points (56 GCP), 5. Photographs coverage (131 km²), 6. Digital Elevation Model (5x5 m DEM).

Cependant, générer un modèle 3D sur une telle emprise surfacique (plusieurs milliers de km²), nécessite de contraindre fortement certains paramètres. Alors que le méandre de la Combe d'Arc a été acquis à haute-résolution par LiDAR terrestre, un tel lever est techniquement impensable à l'échelle des gorges de l'Ardèche sans un soutien logistique suffisant et irréalisable sur l'ensemble du bassin versant. L'utilisation de modèles topographiques dégradés au fur et à mesure de l'éloignement de la Combe d'Arc a donc été choisie pour l'ensemble du jeu de données topographiques.

Les gorges de l'Ardèche ont été modélisées par photogrammétrie à partir de la campagne aérienne de l'IGN de 1980. Pour le bassin versant de l'Ardèche, le MNT IGN 25, rééchantillonné en nuage de points a été préféré. La qualité de ce dernier (tant en termes de résolution que d'exactitude) n'étant pas satisfaisante pour le présent travail, il a servi de base

topographique uniquement en amont du méandre de Sampzon et, en aval, à la sortie du canyon, au-delà de Saint Martin d'Ardèche. Constituant cependant le jeu de données topographiques le plus étendu, le système de coordonnées/projection du MNT IGN 25 (RGF93/L93) a été utilisé pour l'ensemble des jeux de données topographiques qui ont ensuite été construits.

5.1 Génération du modèle photogrammétrique des gorges de l'Ardèche.

Le modèle topographique a été réalisé par SFM (algorithme SIFT : Lowe 1999). La méthode de la multi-corrélation d'images a été conduite sous le logiciel *Agisoft Photoscan Pro*, à partir de la campagne aérienne de l'IGN de 1980.

Cette année a été privilégiée pour sa qualité (résolution d'environ 25 cm/pix) car l'avion volait à

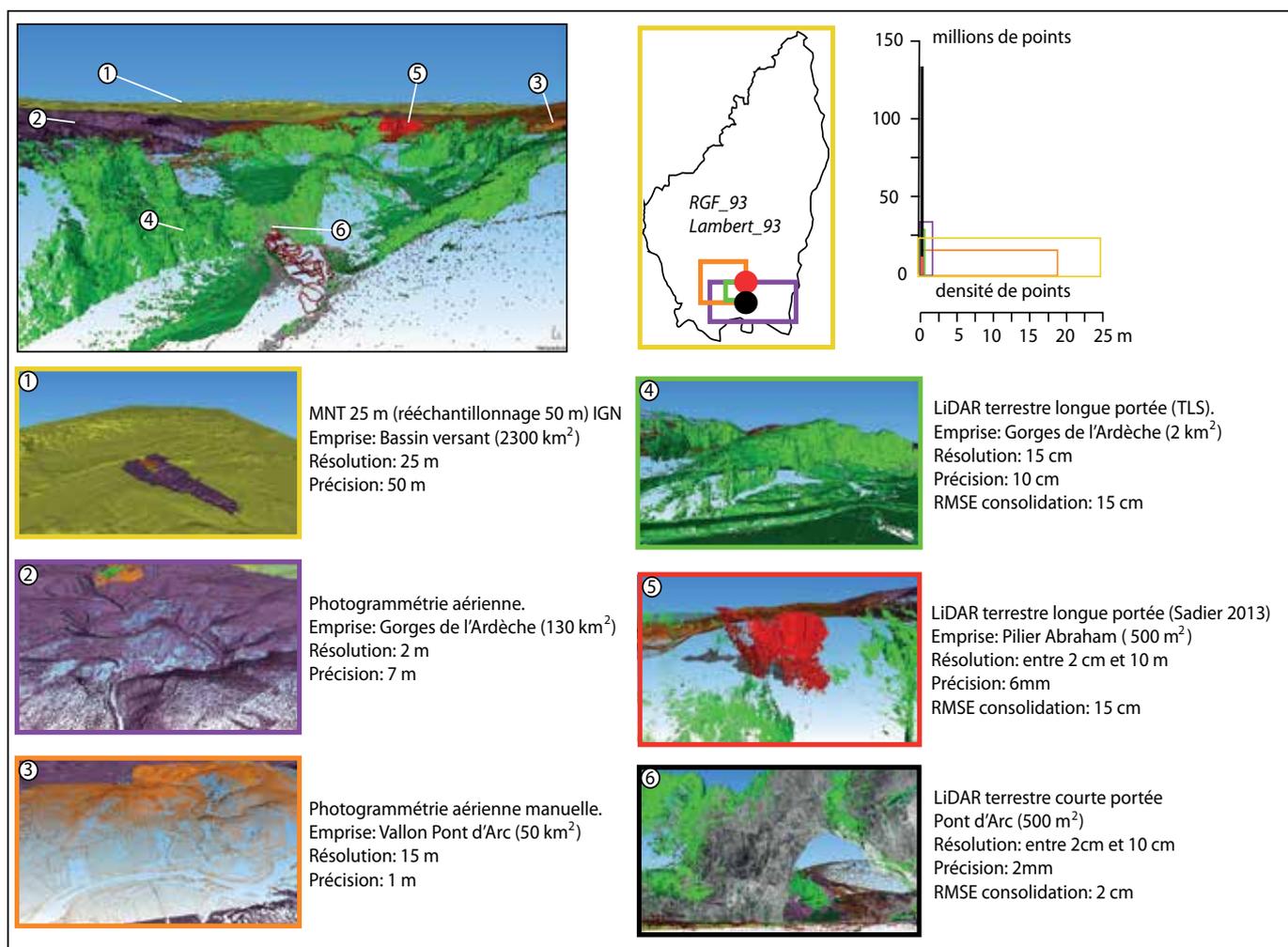


Figure 67 : Assemblage des nuages de points d'origines et de résolutions différentes, pour obtenir un modèle topographique uni. La résolution et l'exactitude du modèle assemblé diminue au fur et à mesure de l'éloignement avec le centre de l'objet d'étude : le Pont d'Arc. *Merging of multi-origin point cloud data in order to obtain a complete point cloud. Trueness and resolution quality decrease with the distance from the main studied object: the Pont d'Arc.*

basse altitude et a mené des passes spécialement dédiées aux gorges de l'Ardèche.

Afin d'obtenir une qualité de reconstruction suffisante pour produire un modèle topographique avec une maille inférieure à 10 m d'exactitude, 56 points de contrôle (*Ground control points – GCP*) ont servi à contraindre la géométrie du modèle. Certains points de contrôle ont été mesurés au dGPS sur le terrain, sur des points remarquables, identifiables sur les photos. Lorsqu'ils étaient visibles sur les photographies, des points cotés ont également été rajoutés dans le modèle SFM comme points de contrôle supplémentaires. Les GCP restants n'ont pas eu de coordonnées attribuées car servant uniquement de contrôle local à la multi-corrélation d'images SFM. Le résultat est un modèle dont la RMSE des GCP donne 5.3 m en X, 4.8 m en Y et 7.6 m en Z, pour une erreur de 0.6 pixel (Annexe 1).

Ces erreurs sont relativement faibles étant donné la taille et l'ampleur spatiale du modèle. Néanmoins, le faible nombre de photographies dans le dernier tiers du canyon génère une légère dépression inexistante en réalité (une dizaine de mètres). Elle est compensée, en fin de canyon, par les points GCP acquis au dGPS.

5.2 Protocole de consolidation.

Les différents jeux de données ne sont pas toujours comparables en termes de résolution et d'exactitude pour être assemblés visuellement. Pour les modèles haute-résolution (Combe d'Arc LiDAR et Pont d'Arc LiDAR, gorges de l'Ardèche), l'étape de consolidation entre les objets a été conduite par la méthode du *best-fit* (Besl & McKay 1992), en vérifiant la qualité de la consolidation à l'aide de points pris au dGPS). Pour assembler les modèles haute-résolution avec ceux couvrant un domaine plus large (gorges de l'Ardèche avec le bassin versant de l'Ardèche), un recalage par translation sous contrainte (blocage des axes de rotation X et Y) a été conduit au niveau de points dGPS car les morphologies n'étaient pas assez similaires pour justifier l'utilisation d'un *best-fit*.

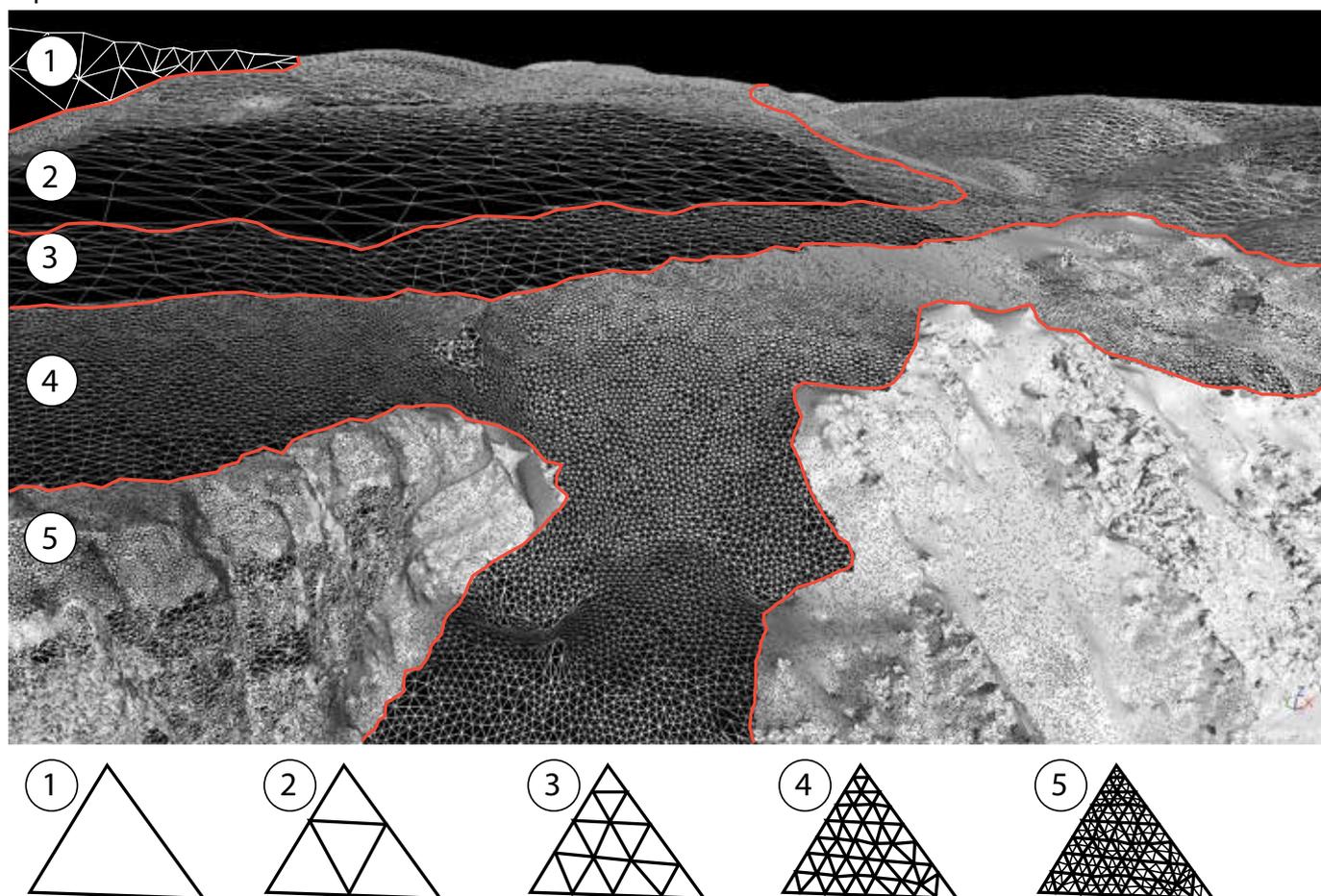


Figure 68 : Maillage de la surface topographique des gorges de l'Ardèche. Au fur et à mesure de l'éloignement de la Combe d'Arc, les triangles sont de plus en plus grossiers. Les transitions s'effectuent sur les zones de replat afin de minimiser l'impact visuel de ces dernières sur le modèle 3D et d'assurer une vraie continuité topographique. Taille moyenne des triangles : 1 (50m) ; 2(25m) ; 3(10m) ; 4(2m) ; 5(30cm).

Ardèche canyon meshing process. The more the mesh is far away from the Combe d'Arc meander, the bigger the triangles. Transition zones are placed on flat areas in order to minimize their visual impact. Average triangle size: 1 (50m) ; 2(25m) ; 3(10m) ; 4(2m) ; 5(30cm).

5.3 Maillage 3D.

L'opération de consolidation effectuée, un nuage de points unique, couvrant l'ensemble du secteur d'étude, a pu être généré.

Celui-ci couvre au final une surface totale de plus de 2300 km² (le bassin versant de l'Ardèche) et comporte un peu moins de 210 millions de points avec une densité moyenne de 0.2 points par m², une densité minimale de 0.25 pts/m² et maximale de 100 pts/m². Ce nuage de points a ensuite été triangulé en Delaunay 3D (Delaunay, 1934) afin d'obtenir une surface topographique 3D. Etant donné la grande disparité de certains nuages de points, une attention particulière a été portée aux zones de transition entre les jeux de données.

Ces dernières ont été interpolées selon la moyenne de tous les points qui les représentaient en partant des triangles les plus grossiers du maillage précédent, au moyen de la fonction « interpolation de nouveaux points » de *3DReshaper*. Cette dernière décrit les nuages de points avec une courbe de tendance qui les sous-échantillonne. Cette méthode autorise des zones de transition lissées qui ne tranchent pas dans le modèle 3D, permettant ainsi une continuité paysagère du modèle.

C'est sur ce modèle continu sur l'ensemble du bassin versant ardéchois que toutes les données issues de l'analyse géomorphologique sont ensuite implantées.

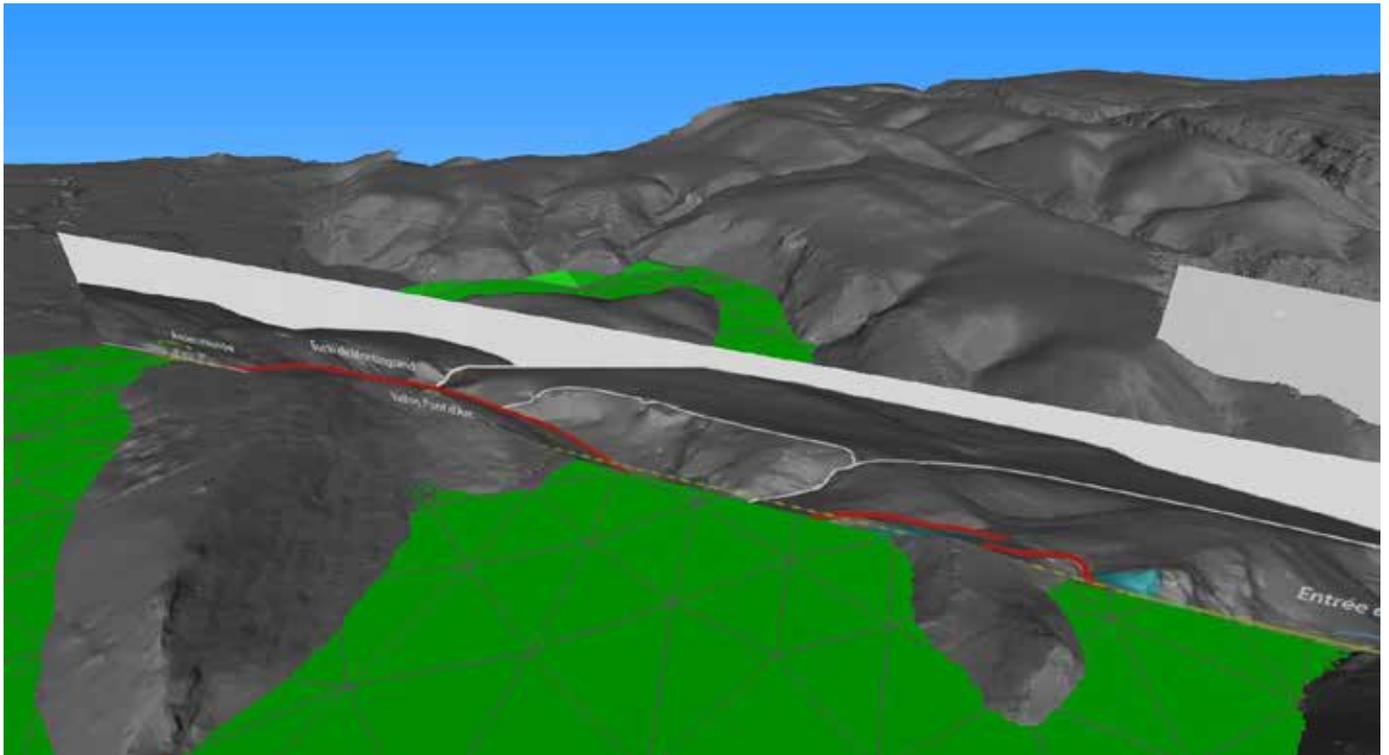


Figure 69 : Modélisation 2.5D des terrasses alluviales sous 3DReshaper. Le processus d'interpolation nécessite de collecter toutes les données topographiques des terrasses alluviales (replats topo et points dGPS). Lorsqu'un point topo est réalisé sur un versant, son homologue est placé à la même altitude sur le versant opposé, perpendiculairement à la rivière, afin de permettre à l'algorithme d'interpolation de reconstruire toute la terrasse fluviatile.

2.5D modeling of the fluvial terraces on 3DReshaper software. Topographical data is acquired (topographical flat areas, dGPS points) for the interpolation process. When a point is acquired on one side of the river, its homologue is placed on the opposite side, perpendicularly to the stream.

6. Reconstitution 3D des paléo-niveaux fluviaux + 15 m et + 30 m dans les gorges de l'Ardèche.

6.1 Acquisition des points topographiques.

Les fortes aggradations sédimentaires ayant entraîné la création des niveaux + 15 m et + 30 m au cours des périodes froides du Pléistocène ont pu avoir un impact paysager important. Dans l'objectif de mieux cerner leur emprise et l'impact sur le régime hydrologique de l'Ardèche au cours des périodes froides, les deux niveaux principaux (+ 15 m et + 30 m) ont été reconstitués en 3D au sein d'un modèle topographique étendu à l'ensemble du bassin versant de l'Ardèche.

Les niveaux de terrasse ont été observés sur le terrain et cartographiés (Labrousse, 1977 ; Génuit et al., 2018) . Leur localisation topographique a été acquise par dGPS. Lorsque les mesures faisaient défaut, les relevés dGPS ont été complétés par la topographie du modèle 3D et par les données de la carte géologique, elle-même bâtie principalement à partir de la cartographie de Labrousse (1977).

Ces données ont ensuite été rassemblées et converties, lorsque cela s'avérait nécessaire, en nuages de points. Lorsqu'un point est digitalisé sur

une terrasse, un point homologue est ajouté sur l'autre versant, en face, à la perpendiculaire au cours d'eau actuel. Cette méthode permet de rajouter les points nécessaires à l'interpolation de part et d'autre du cours d'eau, sans contrevenir à la logique géomorphologique de la rivière (le niveau altitudinal moyen du cours d'eau sur le versant en face étant considéré par hypothèse à la même altitude).

6.2 Interpolation linéaire par les voisins naturels.

L'interpolation est conduite sous SAGA GIS (Conrad et al., 2015) (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>). Les points collectés sont interpolés avec la méthode des voisins naturels (Sibson et Barnett, 1981). Cet algorithme se base sur le diagramme de Voronoi résultant des nuages de points et permet une interpolation linéaire lissée, ce qui est pertinent ici, étant donné les morphologies supposées sub-horizontales (et linéaires) des terrasses alluviales.

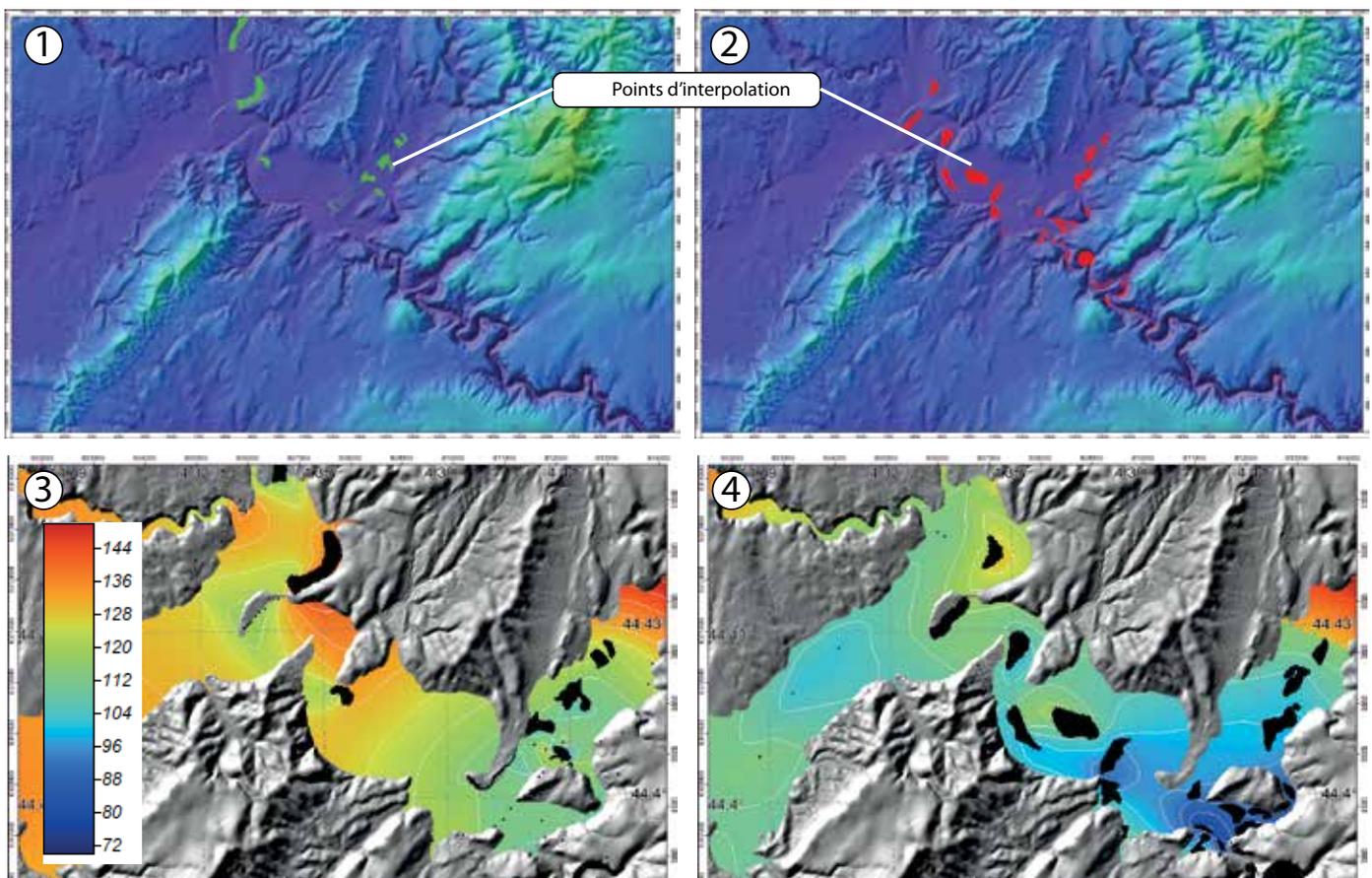


Figure 70 : Modélisation des terrasses + 15 m et + 30 m par interpolation au moyen des voisins naturels. 1 et 2. Points de donnée des niveaux, respectivement à +15 m et à + 30 m. 3 et 4 : Interpolation par les voisins naturels (maille du raster : 100x100m).

Alluvial banks modeling (15 m and 30 m) using the natural neighbours interpolation method. 1 and 2: topographical dataset for 15 m and 30 m levels. 3 and 4: Natural neighbours interpolation (raster cells: 100x100 m).

6.3 Implémentation et visualisation dans le modèle 3D.

Les niveaux + 15 m et + 30 m modélisés sont ensuite ajoutés dans le modèle 3D pour visualiser ces dernières et leur impact paysager par rapport à la topographie actuelle.

La reconstitution visuelle met en avant l'ampleur spatiale des paysages fluviaux lors des périodes d'aggradation de la rivière au Pléistocène. La butte de Montingrand forme un îlot pour le niveau à + 30 m.

On note également que ce même niveau passe au-dessus de l'altitude actuelle de la Combe d'Arc, ainsi que de celle du sommet de la voûte de l'arche. Les résultats de l'interpolation de ce niveau sont donc en accord avec les observations géomorphologiques effectuées aux alentours du méandre abandonné. De même, l'interpolation du niveau à + 15 m passe légèrement en-dessous de l'altitude du méandre abandonné de la Combe d'Arc, ce qui est également en accord avec les observations altitudinales locales, et donne du crédit aux résultats de l'interpolation par voisins naturels pour ce type de morphologie.

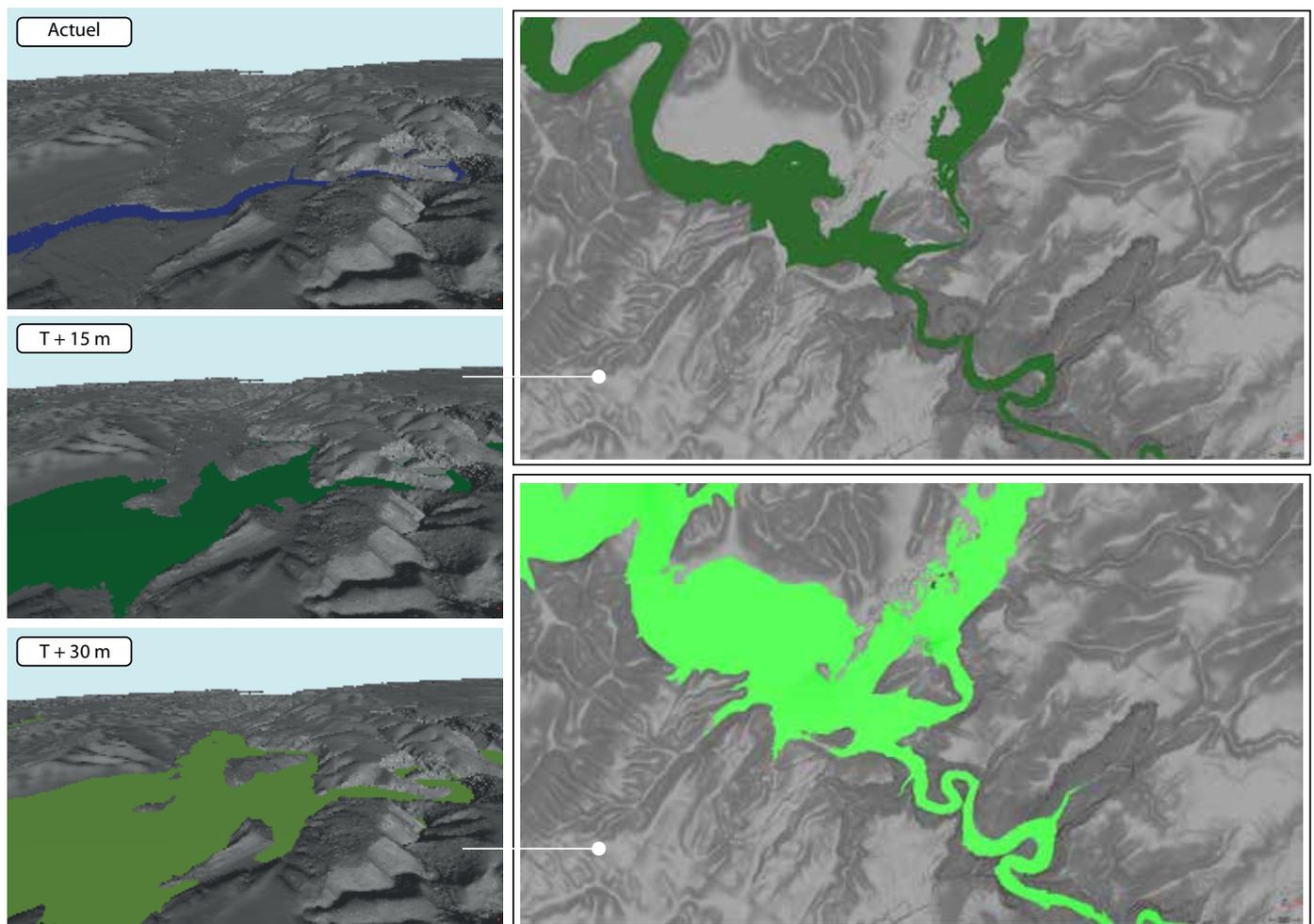


Figure 71 : La reconstitution 2.5D des niveaux de terrasses + 15 m et + 30 m par rapport au relief actuel révèle l'importance de l'aggradation pour ces deux niveaux et amène à reconsidérer l'évolution des paléo-géographies en fonction des importantes variations du niveau de la rivière.

The 2.5D reconstitution of the + 15 m and + 30 m levels reveals the wide space taken by alluvial deposits during the upfilling stages of the river leading to reconsider the morphogenic evolution of the river according to the variations of its levels.

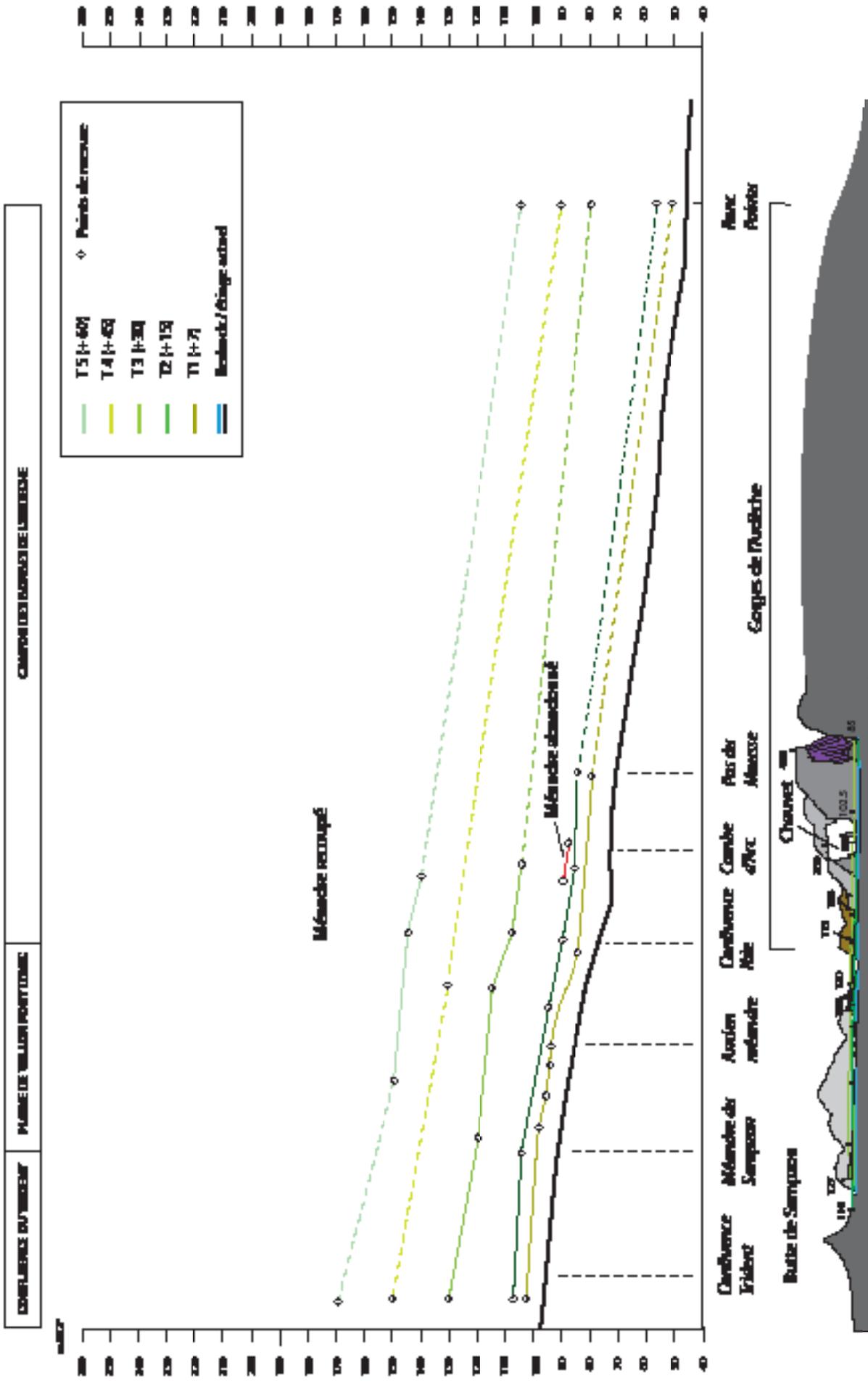


Figure 72 : Coupe projetée des terrasses alluviales de la basse-Ardèche. La large plaine d'épandage de Vallon Pont d'Arc se réduit une fois la rivière entrée dans les gorges, à une mince section active. Cette réduction liée à une contrainte topographique pourrait expliquer l'importance du remplissage sédimentaire juste à l'amont du canyon.

Cross-section of the lower Ardèche River alluvial deposits. The broad alluvial plain of Vallon Pont d'Arc is replaced by a narrow section in the Ardèche canyon, which may explain the important height of the alluvial deposits in the Vallon Pont d'Arc plain.

7. Discussions.

7.1 L'interface plaine-gorges : un goulot d'étranglement morphogène.

L'extension spatiale du paysage fluvial, pour les niveaux + 15 m et + 30 m, interroge sur le régime du cours d'eau lors de ses phases de sédimentation. La stratigraphie des terrasses alluviales à galets, ainsi que celle des cours d'eau plus en amont comme le Chassezac, (Jacob et al., 2006) témoignent de terrasses formées par tressage d'aggradation. Cette observation est ici renforcée par l'étendue potentielle des épanchements fluviaux. La rivière a vraisemblablement fonctionné par un système de chenaux anastomosés. Par divagation et avulsion, l'Ardèche sédimente alors sur toute la largeur de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc.

Le report des niveaux alluviaux présentés sur une coupe topographique fait également ressortir des pendages différents entre la plaine de Vallon pont d'Arc et les gorges de l'Ardèche. La pente moyenne du talweg de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc est nettement plus importante que celle du talweg des gorges. La pente atteint 1.8 % dans la plaine (Bravard, 1993), tandis qu'elle avoisine 1.25 % dans les gorges de l'Ardèche (Bravard, 1993).

Une observation similaire, bien que plus localisée, peut être menée sur les pentes reconstituées des terrasses alluviales. Leur coupe développée présentée figure 72 atteste de gradients de pente différents au sein de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc et à l'entrée des gorges, notamment pour les plus basses terrasses (à +30 et +15 et + 8 m). Cette configuration étonnante de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc a pu favoriser l'apport de sédiments à l'entrée des gorges et, du fait des différences topographiques marquées (rétrécissement de la section à l'entrée des gorges), provoquer des aggradations alluviales marquées. En ce qui concerne les pendages des terrasses alluviales + 15 et + 30 m, une rupture de pente est visible à l'entrée des gorges de l'Ardèche. Une dynamique spécifique des vagues d'érosion régressive pourrait expliquer le pendage relativement élevé dans cette zone : l'étréitesse relative des gorges de l'Ardèche a pu maintenir un certain équilibre entre érosion et accumulation au sein du canyon, comme en témoigne la pente relativement faible des sédiments dans les gorges de l'Ardèche. Arrivé à l'amont des dites gorges, l'apport sédimentaire, très excédentaire en phase froide, ne parvenait peut-être pas à s'évacuer dans l'incision des gorges, engendrant en conséquence un cône de progradation ; d'où la petite rupture de pente que l'on retrouve sur les surfaces interpolées comme sur les affleurements sédimentaires de cette zone.

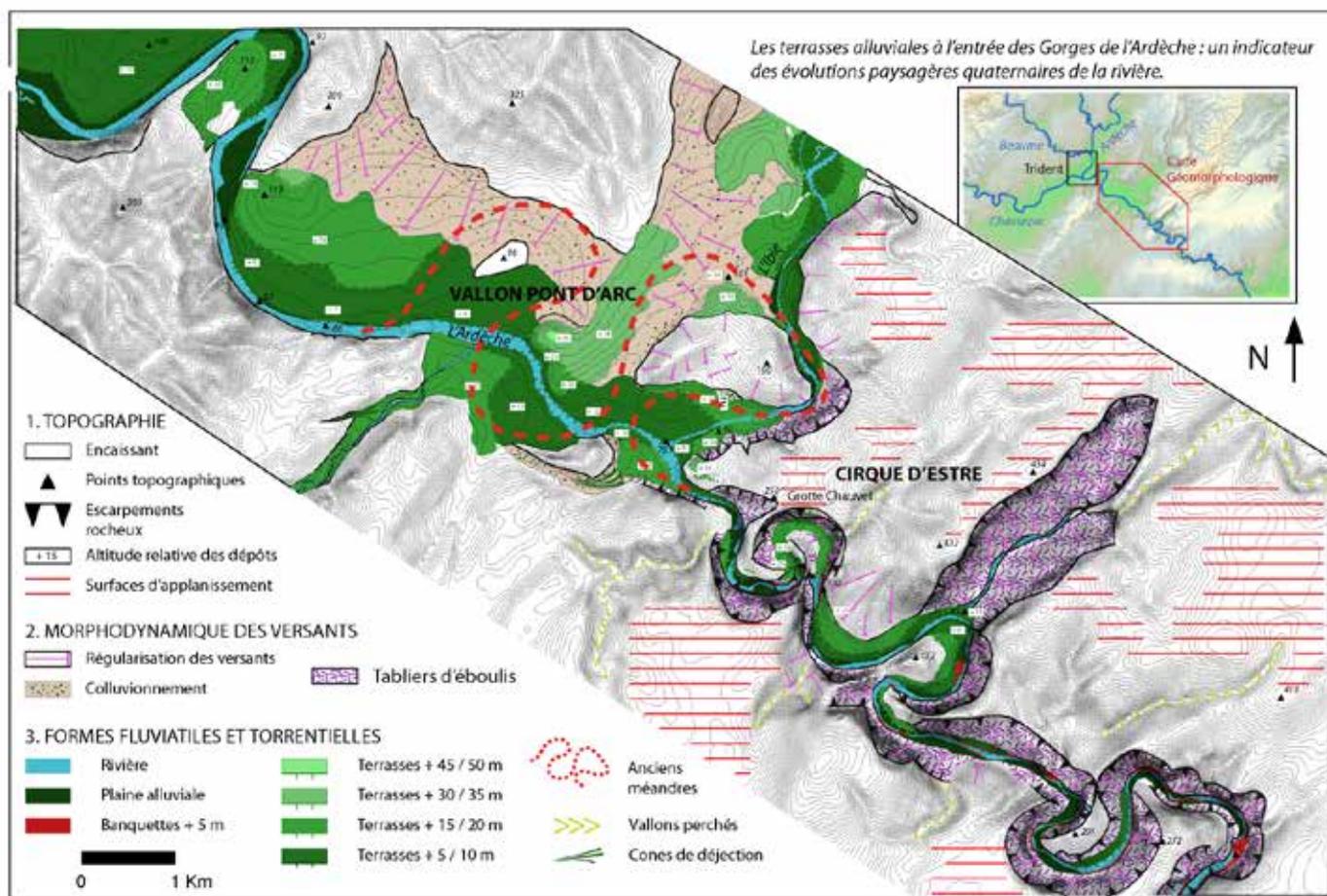
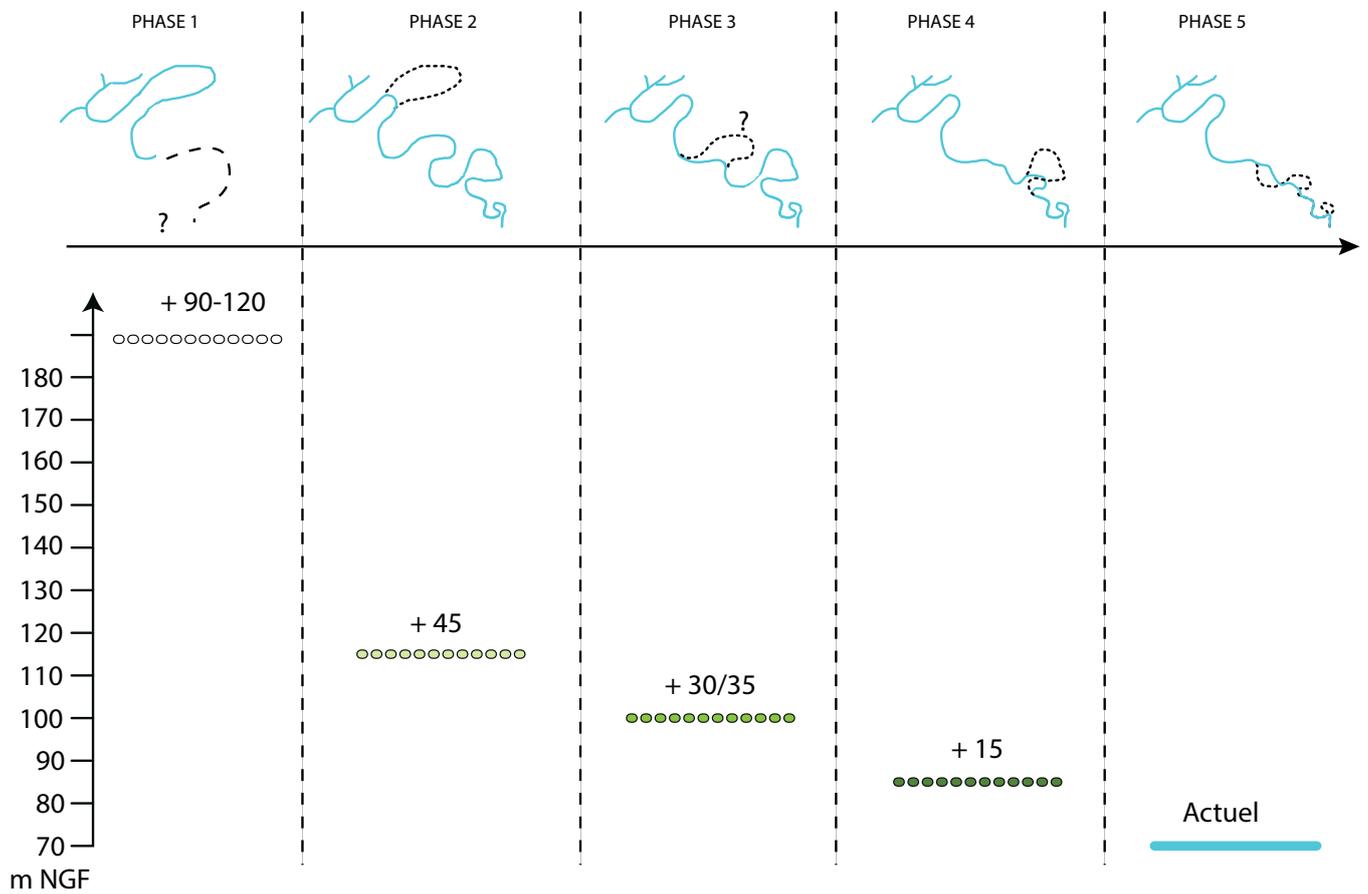
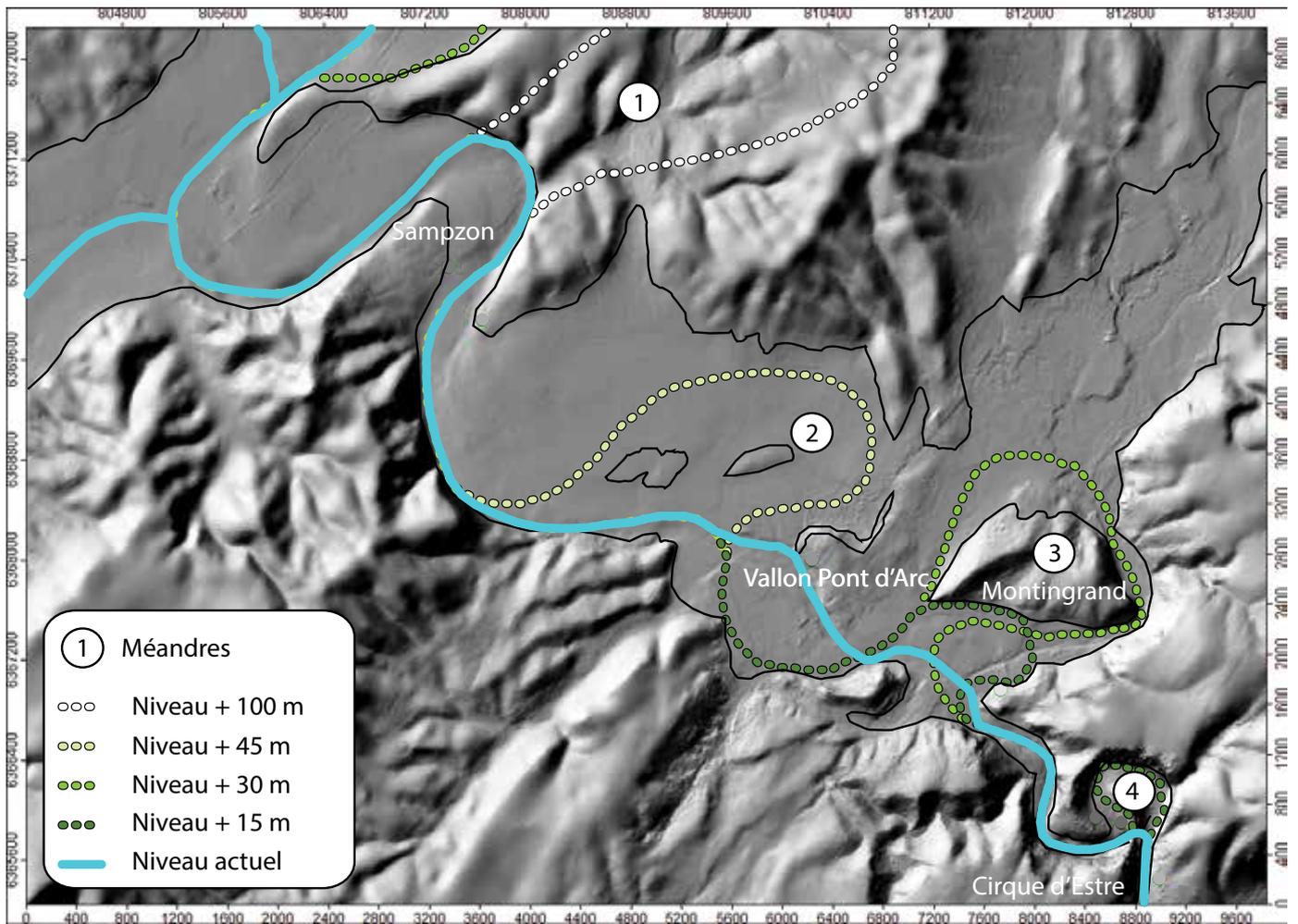


Figure 73 : Les terrasses alluviales de la plaine de Vallon Pont d'Arc : des témoins des paléo-méandres de l'Ardèche en amont de ses gorges.

Alluvial deposits in the Vallon Pont d'Arc plain: testimonies of ancient abandoned meanders.



Le niveau + 15 m semble relativement en pente à partir du début des gorges jusqu'au deuxième méandre (méandre du Pas du Mousse), tandis que le niveau + 30 m, plus homogène, souligne une rupture tout juste en amont des gorges, puis se régularise rapidement. Cette évolution de la pente entre les deux niveaux interroge sur d'éventuels phénomènes de morphogénèse ayant conduit à transformer les conditions de pendage entre les deux phases de construction sédimentaire.

7.2 Une plaine témoignant de la présence d'anciens méandres, aujourd'hui recoupsés.

L'importance de la charge sédimentaire couplée au phénomène d'avulsion latérale, caractéristique des rivières en tressages anastomosés, implique potentiellement des dynamiques d'abrasion latérales, affectant directement les versants rocheux. Cette question se pose dans les gorges de l'Ardèche, étant donné la section relativement réduite de la rivière. Néanmoins, ces dynamiques sont également valables pour la plaine de Vallon Pont d'Arc et ont pu jouer un rôle dans la morphogénèse du cours d'eau. Le cours actuel de la rivière se caractérise par un cheminement assez rectiligne au niveau de la plaine de Vallon Pont d'Arc ; la cartographie géomorphologique met cependant en évidence des paléo-morphologies de méandres dans ce qui est aujourd'hui une plaine alluviale.

Ces méandres sont potentiellement anciens et pourraient être hérités de paléo-tracés datant du Miocène et du Pliocène (Mocochain et al., 2009). Ces anciennes morphologies du cours d'eau sont aujourd'hui défoncées par l'érosion (Menneron, 2003) et ont pu évoluer, plus récemment, au cours du Pléistocène. La question des recoupements de certains méandres se pose notamment avec le passage de l'Ardèche au nord de ce qu'est aujourd'hui la butte de Montingrand pour les niveaux à + 30 m et + 45 m. Les sondages d'archéologie préventive effectués pour les travaux de déviation de la route touristique (Saison et al., 2017), ont en effet dégagé des cortèges de galets cévenols (granites,

gneiss, quartz) à environ 1.8 m de profondeur dans les sondages. Ces derniers ont révélé le passage de l'Ardèche vers le nord de la butte. L'altitude de ce niveau de galets correspondant strictement à la terrasse à + 30 m, ils peuvent lui être rapportés. La présence de galets de granite arénisés a également pu être constatée plus loin autour de la butte de Montingrand où un dépôt fluviatile en forme de croissant (figure 73) et composé de gros galets (> 10 cm) est en place à une altitude de + 45 m. Ce dépôt avait été constaté par Labrousse (1977) qui l'avait cartographié, mais peut-être sans contrainte pétrographique, car il l'avait rapporté à l'Ibie. Or, cette proposition peut être raisonnablement exclue car l'affleurement présente toutes les caractéristiques pétrographiques de la rivière Ardèche (notamment les granites), contrairement à l'Ibie qui est composée à 100 % de carbonates. La présence d'affleurements à + 45 m et les sondages préventifs à + 30 m permettent donc de rediscuter des paléo-circulations de l'Ardèche, autour de la butte de Montingrand, avec des paléo-tracés avérés pour ces deux niveaux de basses terrasses.

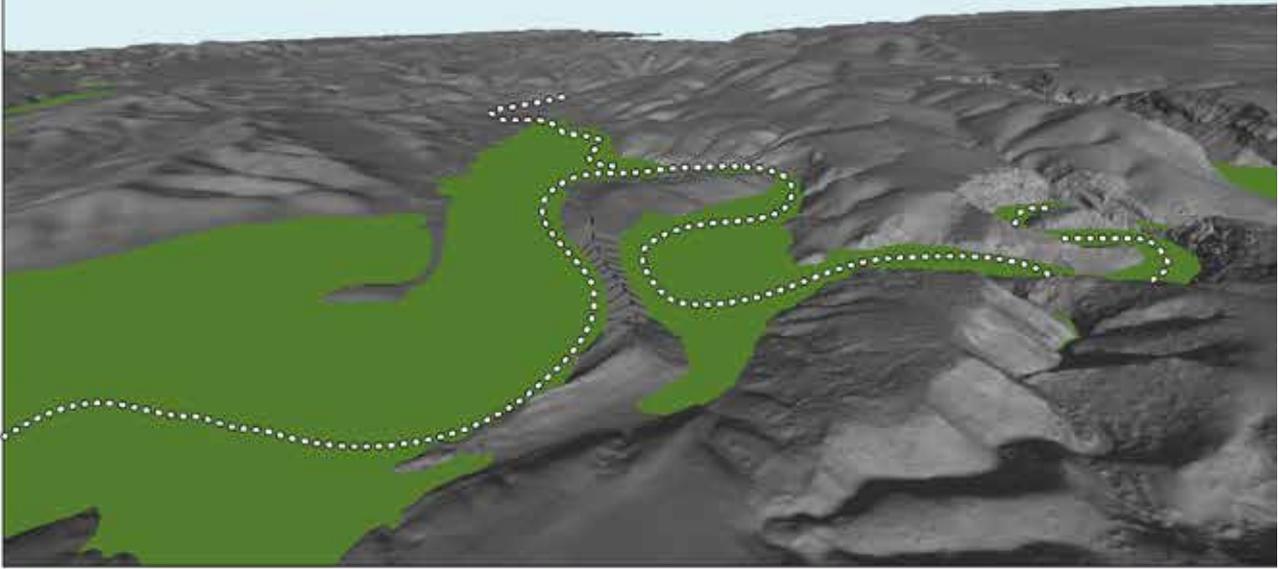
Les anciens méandres de la rivière sont aujourd'hui relégués à l'état de témoins morphologiques, avec des degrés de conservation très variables, ce qui rend l'interprétation des recoupements complexe. Plusieurs propositions de paléo-tracés ont d'ailleurs été émises autour de la butte de Montingrand par Menneron (2003) et Mocochain et al. (2009). Ces derniers proposent même un passage autour de la paléo-vallée au sud de Salavas. Les interprétations chronologiques doivent être considérées avec prudence par absence de datation absolue, mais dans l'ensemble, les éléments de la littérature scientifique ainsi que les observations pétrographiques et d'archéologie préventive tendent vers une paléo-Ardèche qui circulait autour de la butte de Montingrand, désormais réduite à l'état de reliquat morphologique d'ancien méandre.

La topographie haute-résolution permet de rediscuter les hypothèses de paléo-tracés et d'aborder avec un nouveau regard certaines phases morphologiques du secteur en lien avec les basses terrasses, au gré des recoupements des méandres de la plaine de Vallon et de la Combe d'Arc. Elle permet aussi d'établir un modèle chronologique relatif de ces méandres en ne raisonnant que sur l'emboîtement altitudinal et spatial des formes.

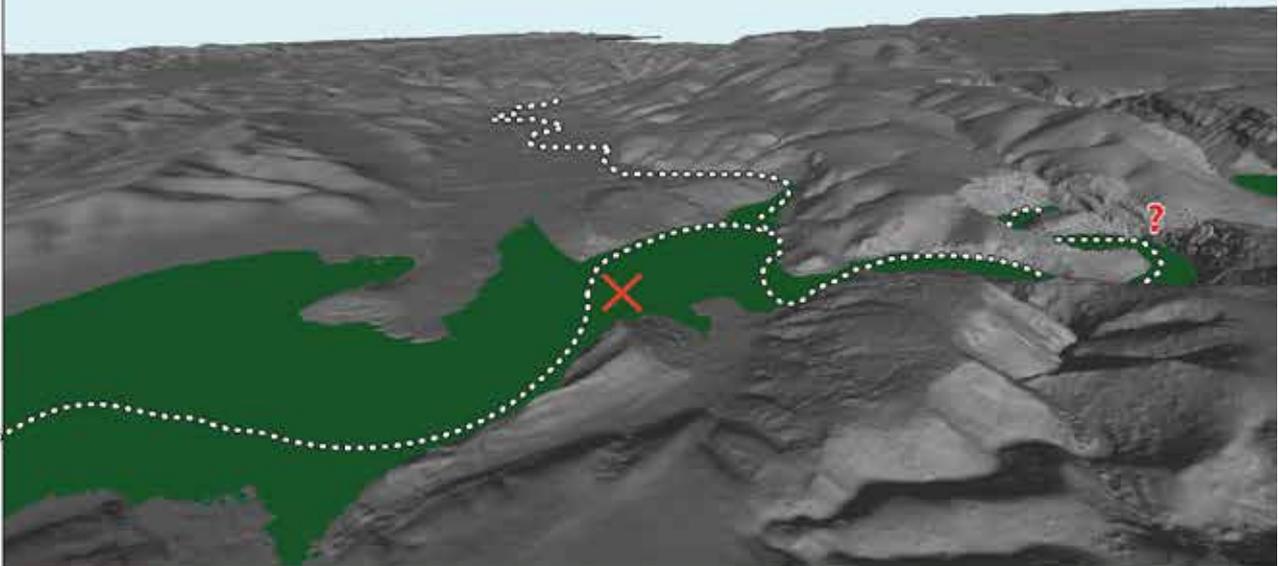
Figure 74 : Modèle relatif d'évolution de la rivière pour aboutir à la plaine actuelle de Vallon Pont d'Arc. Le cours d'eau tend à se raidir au cours du temps par avulsion, phénomène également proposé par Mocochain et al. (2009). L'échelle d'altitude est en mètres NGF.

Evolution model of the Ardèche river before the current Vallon Pont d'Arc plain. The river stream naturally evolves from meanders to a straighter flow path because of avulsion phenomena (Mocochain et al., 2009). Altitudinal scale is in meters A.S.L.

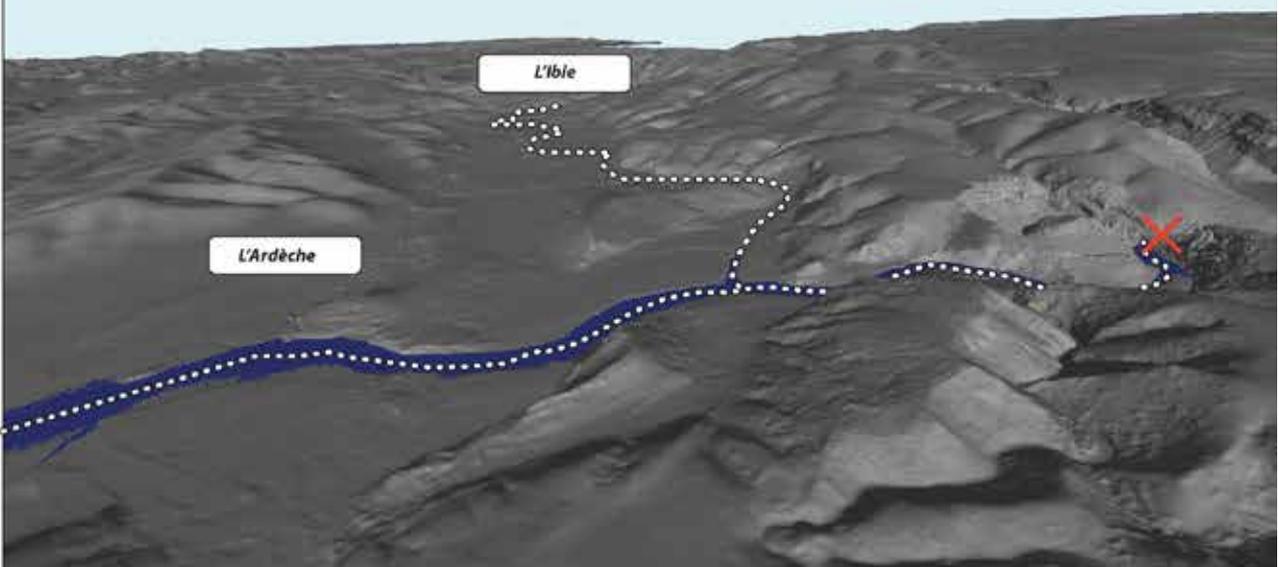
T+ 30



T+ 15



Actuel



PHASE 1:

De nombreux trains de méandres visiblement anciens présents avant les gorges de l'Ardèche ont aujourd'hui disparu avec l'érosion. Certains ont cependant laissé des morphologies encore visibles aujourd'hui, notamment à l'intérieur des gorges avec des morphologies d'abandon qui persistent au niveau de Labastide de Virac, ou encore du Serre de Tourre et autour du cirque de la Madeleine. Ces anciennes morphologies sont à mettre en relation avec des stades anciens de l'histoire de l'Ardèche, qui ont été discutés à de nombreuses reprises par Mochain et al. (2009) ou encore Sadier (2013). Toutes sont repérables sur le modèle 3D des gorges de l'Ardèche. Nous préférons ici discuter des méandres en relation avec des terrasses de basse altitude. L'histoire et l'évolution, potentiellement plus récente, de ces méandres serait peut-être corrélée avec l'incision de la rivière au Quaternaire.

PHASE 2 :

Parmi les paléo-morphologies de méandre visibles dans la plaine de Vallon Pont d'Arc, on peut noter la très haute boucle à 190 m d'altitude NGF (+ 120 m), repérée par Labrousse (1977) et correspondant à l'ancien tracé de l'Ardèche au niveau de Sampzon, à l'entrée de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc. L'altitude de ce méandre peut être mise en relation avec des niveaux très anciens de l'Ardèche, peut-être avec le niveau terminal de la rivière au Pliocène ? Le méandre actuel de Sampzon est positionné dans le même axe que cet ancien tracé, avec, cependant, moins d'amplitude.

PHASE 3 :

Des paléo-morphologies de méandre sont également visibles au sein de la plaine de Vallon Pont d'Arc. Au milieu de cette dernière, une butte de *bedrock* pourrait être associée à un reliquat de pédoncule recoupé. Nous ne pouvons pas affirmer l'existence de ce paléo-méandre, mais les morphologies en arc de cercle de la plaine de Vallon autour de cette zone plaident pour une considération de cette hypothèse. Ce pédoncule est aujourd'hui plus bas que la terrasse à + 45 m et son état critique (il est quasiment invisible dans le paysage) témoigne d'un stade d'érosion très avancé qui ne nous permet pas de discriminer une relation avec un quelconque niveau fluvial. Il convient donc de rester prudent et de considérer l'existence de ce paléo-méandre comme seulement possible, et vraisemblablement très ancienne.

Figure 75 : Proposition de reconstitution des évolutions du relief en lien avec les variations des niveaux de la rivière à +30 m, +15m, jusqu'à aujourd'hui. Les recoupements de méandre sont mis en relation avec l'altitude des terrasses alluviales. Les croix rouges représentent les recoupements de méandre, et les points blancs le tracé des rivières.

Proposition of landscape evolution reconstitution for the + 30 m, + 15 m, and current river levels. The meander shortcuts are linked with the altitude of the river deposits. Red crosses represent the meander cutoffs and dashed white lines represent the flow pathway.

PHASE 4 :

Tant du fait de son état de conservation que du grand nombre d'indices de son existence, le paléo-méandre de Montingrand est une des morphologies les plus frappantes de l'entrée des gorges de l'Ardèche. La présence, enfouie, du niveau à + 30 m au nord de la butte, et la conservation d'une morphologie fluviale en forme de croissant à + 45 m pousse à mettre en relation son recoupement avec une des deux basses terrasses alluviales. La morphologie en croissant encore bien conservée au nord de Montingrand implique une circulation pérenne à + 45 m autour d'un méandre fonctionnel, non recoupé. La présence de la terrasse à + 30 m autour de la butte, présence révélée par les sondages d'archéologie préventive, atteste également du passage de la rivière autour de la butte pour ce niveau. Les morphologies d'érosion en arc de cercle en rive gauche et en rive droite de l'affluent (l'Ibie actuelle) peuvent être interprétées comme les conséquences de ce recoupement, ont imprimé leur marque dans le *bedrock*. Ces marques se trouvent comprises entre 115 m NGF et 93 m NGF et suggèrent une mise en rapport avec les terrasses à + 30 m (localement à 108 m NGF). Ces morphologies impliquent vraisemblablement un recoupement du méandre en lien avec l'établissement de la terrasse à + 30 m construction (figure 57).

Les phases d'aggradation sédimentaire sont bien identifiables à l'entrée des gorges. Etant donné leur importance, elles sont susceptibles d'entraîner des divagations de la rivière. La marque de ce processus est visible pour la terrasse à + 30 m entre Chauzon et Ruoms, où l'Ardèche emprunte une autre voie suite à une phase d'aggradation sédimentaire importante. Il est possible que cette phase morphologique ait également eu lieu à + 30 m au niveau du centre d'un pédoncule de Montingrand, aujourd'hui disparu ; c'est-à-dire dans la partie logiquement la plus basse du méandre. Ces phénomènes de recoupement par avulsion sont connus et bien documentés ((Bishop 1995) ; modèle A dans Brocard et al. (2011)) et pourraient être une des explications du recoupement du méandre de Montingrand, lors de la ré-incision de la rivière.

L'hypothèse, toujours en lien avec le niveau à + 30 m, d'un recouplement facilité par la présence de conduits endokarstiques n'est pas à exclure pour autant (modèle B dans Brocard et al. (2011)), mais difficile à prouver aujourd'hui car il ne reste plus rien de la partie centrale du pédoncule dans le paysage. Cette hypothèse d'interprétation à partir de la topographie haute résolution et de l'étude pétrographique des terrasses replacerait donc ce recouplement de méandre plus tard que la proposition de MocoCHAIN et al. (2009) qui propose un recouplement par avulsion lors de l'aggradation pliocène.

PHASE 5 :

Cette dernière étape morphogénique de l'Ardèche correspond au raidissement du tracé de l'Ardèche jusqu'à sa forme actuelle au niveau de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc, et du recouplement du méandre de la Combe d'Arc, qui a entraîné la formation de l'arche du Pont d'Arc. Nous constatons que la terrasse à + 30 m a été complètement érodée dans la Combe d'Arc et que la voûte de l'arche se situe en dessous de ce niveau, ce qui reporte le recouplement à une phase plus tardive. Le niveau à + 15 m pourrait alors correspondre à la terrasse d'abandon du méandre de la Combe d'Arc et témoigner d'une ancienne circulation au sein de ce dernier pour ce niveau sédimentaire. Afin de lever le voile sur le paléo-tracé de la rivière, des prospections par tomographie de la résistivité électrique ont été menées dans ce méandre et font l'objet du chapitre 5 de cette étude.

8. Conclusion.

Du terrain au modèle 3D exploité, l'approche géomorphologique jointe à la documentation XYZ des morphologies, a nécessité de coupler les techniques d'acquisition topographique du relief avec les observations pétrographiques des affleurements afin de les confronter, au sein d'un même modèle topographique.

Le travail sur les relations altitudinales des dépôts fluviaux a ensuite permis de proposer une hypothèse de reconstitution des morphologies disparues, avec une modélisation spatiale 2.5D des niveaux fluviaux à +15 m et + 30 m.

Ce premier niveau de reconstitution de l'environnement des gorges de l'Ardèche en trois dimensions a été autorisé par une cartographie détaillée des paléo-reliefs fluviaux de la plaine de Vallon Pont d'Arc. Il re-questionne les dynamiques de la rivière, et donc l'environnement dans lequel s'inscrivaient les communautés qui ont fréquenté la grotte Chauvet. En effet, avec un sol actuellement à + 19 m, le méandre abandonné de la Combe d'Arc s'inscrit pleinement dans les dynamiques pléistocènes à + 30 m, + 15 m et + 8 m de l'Ardèche.

Lorsque la rivière s'enfonce dans les gorges, les dépôts se réduisent jusqu'à disparaître entièrement, déblayés par l'érosion régressive. Leur étude par l'intermédiaire de la cartographie des reliefs n'est alors plus possible et d'autres moyens doivent être utilisés. Afin de poursuivre l'étude du relief et de mieux comprendre les dynamiques de la rivière au niveau du Pont d'Arc, d'autres méthodes et d'autres types d'objets peuvent être mis en place, notamment par le biais du piège naturel pour les sédiments que constitue l'endokarst. C'est donc par l'étude des conduits souterrains, et notamment ceux de la grotte des Châtaigniers, située dans le pédoncule du Pont d'Arc, qui se poursuit cette étude, à une échelle cette fois-ci plus restreinte : celle du Pont d'Arc et de la Combe d'Arc.

Photographies de terrain



Photo 3 : Acquisition par LiDAR longue portée de la partie amont du méandre de la Combe d'Arc. Crédits : P. Génuite, 2017.

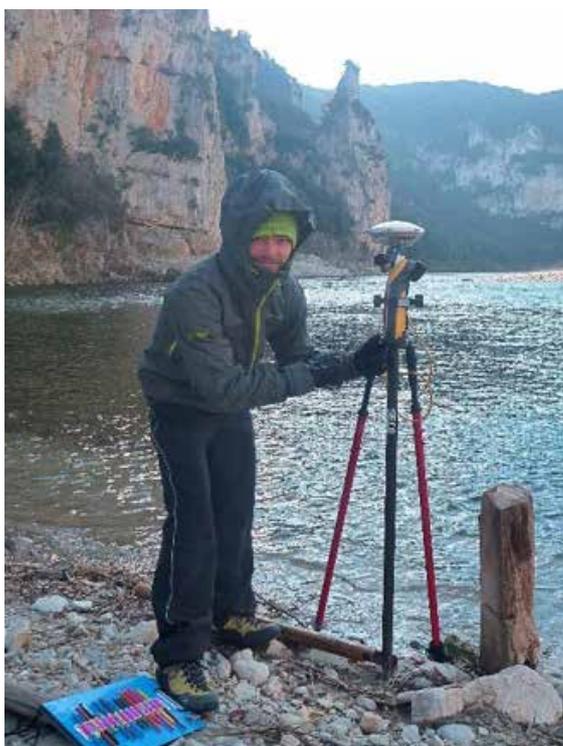


Photo 4 : Pointage dGPS de l'altitude de la berge de l'Ardèche au niveau du méandre du Pas du Mousse. Crédits : P. Génuite, 2017.



Photo 5 : Acquisition par LiDAR longue portée de la partie aval du méandre de la Combe d'Arc. Crédits : P. Génuite, 2017.



Photo 6 : Prospection sur les plages de galets actuelles en amont du Pont d'Arc. Crédits : P. Génuite, 2017.

CHAPITRE 4

APPORTS DE L'ETUDE DES RESEAUX ENDOKARSTIQUES DANS LA COMPREHENSION DE L'EVOLUTION DU MEANDRE DE LA COMBE D'ARC.

Avant-propos.

Une partie de ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans le journal du Groupe Français de Géomorphologie : *Géomorphologie : relief, processus, environnement (G.R.P.E)*, sous l'intitulé suivant :

Le Pont d'Arc et la grotte des Châtaigniers (Gorges de l'Ardèche, France), indicateurs des processus du recoupement du méandre de la Combe d'Arc.

Nous avons choisi de ne pas le présenter sous le format de l'article, mais de recontextualiser nos recherches dans une perspective plus globale, incluant des observations supplémentaires effectuées dans la cavité de Spectaclan ainsi que des discussions qui ont été parfois élargies à l'échelle des gorges de l'Ardèche.

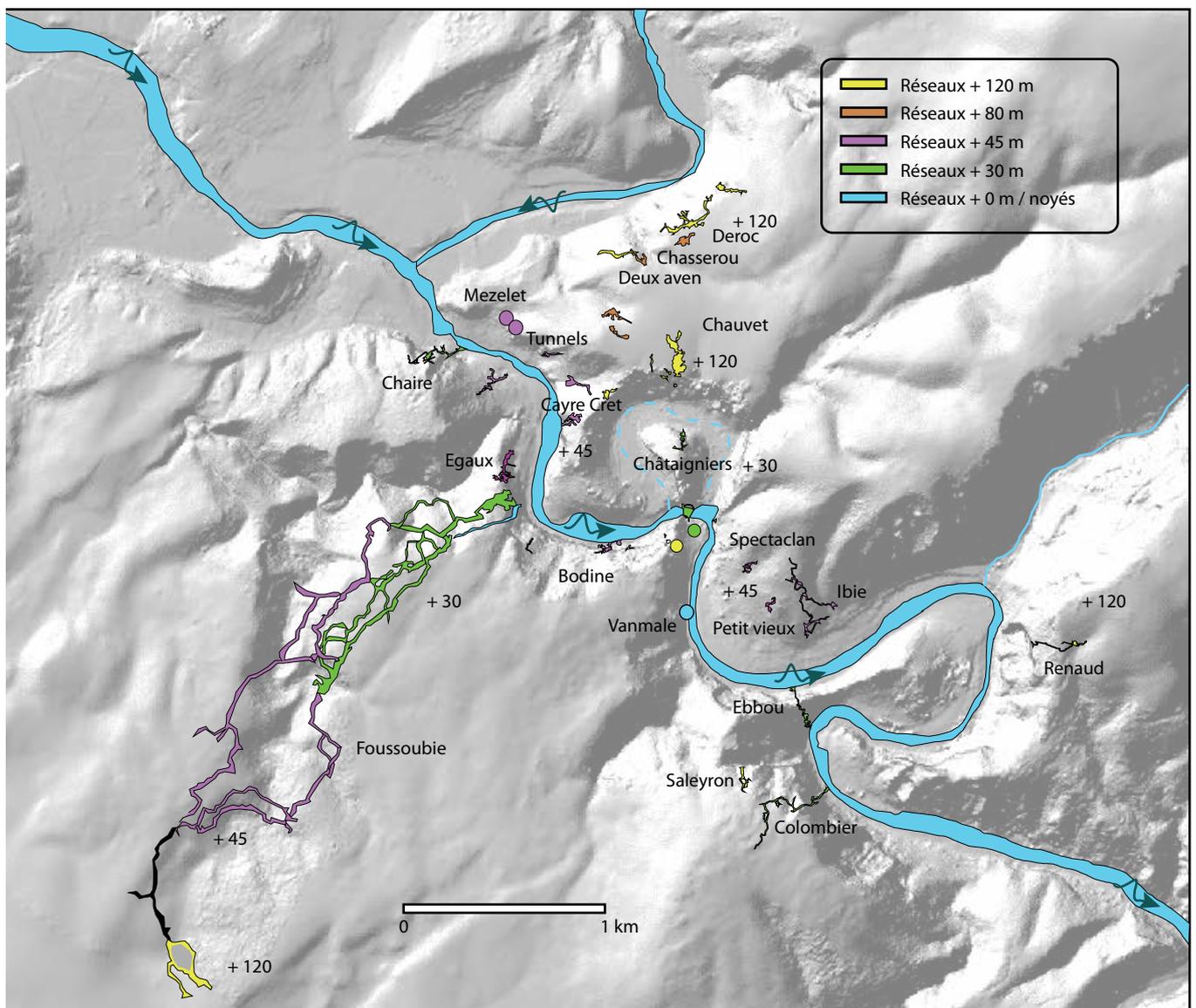


Figure 76 : En pénétrant dans les gorges de l'Ardèche, la rivière abandonne les plaines alluviales du Trident et de Vallon Pont d'Arc pour s'enfoncer en domaine karstique. L'entrée des gorges de l'Ardèche est particulièrement dense en cavités. Ces dernières se développent du plateau (260 m NGF / + 120 m) jusqu'au niveau actuel de la rivière (70 m NGF). La majorité des cavités découvertes s'ouvre dans les gorges de l'Ardèche ainsi que dans la partie terminale de l'Ibie. Données topographiques : Inventaire cavités CDS 07.

The River Ardèche drills its bed through the karstic canyon of the "gorges de l'Ardèche", abandoning flat morphologies such as the Vallon Pont d'Arc plain for a cave-riddled canyon structure which develops between the plateau and the current river talweg. Most of the caves open inside the Ardèche canyon and in the cliffs of the River Ibie, next to the confluence. Speleological topographies data: Courtesy of CDS 07.

Introduction.

L'entrée des Gorges de l'Ardèche marque un changement hydrodynamique avec le passage d'une large dépression favorable à la sédimentation alluviale (plaines de Ruoms et de Vallon Pont d'Arc), à une géométrie plus contrainte en gorges où les formations alluviales sont moins présentes et moins bien conservées. Suivre l'évolution morphologique de la rivière par les ensembles alluviaux est, de fait, délicat au sein des Gorges de l'Ardèche. Cependant, les réseaux souterrains peuvent constituer des relais intéressants (figure 76). En effet, ceux-ci sont nombreux dans l'encaissant calcaire du canyon (calcaires à rudistes du Barrémien et du Bédoulien à faciès Urgonien ; Pascal et al., 1989). Des cavités de grand développement sont présentes dès le début du canyon (Event de Foussoubie, grotte Chauvet, grottes de Chasserou-Déroç par exemple (cf. figure 76). Plusieurs générations de karstification sont ainsi présentes depuis les plateaux à 260 m NGF, jusqu'au talweg actuel de la rivière, et parfois plus profondément (26 m NGF pour la source de Vanmale).

Les nombreuses cavités qui se développent dans le karst recoupé par les gorges de l'Ardèche ont enregistré des informations à la fois paléogéographiques (Mocochain et al., 2009 ; Jaillet et al., 2012 ; Sadier, 2013 ; Tassy, 2013) , paléo-environnementales (Genty et al., 2004) ainsi que spéléogénétiques, en lien avec les fréquentations paléolithiques (Debard, 1988 ; Delannoy et al., 2001 et 2004 ; Monney, 2018). Les informations contenues dans l'endokarst sont complémentaires de celles enregistrées dans les morphologies extérieures. Elles prennent d'autant plus de sens lorsque les archives externes sont indigentes ; ce qui est souvent le cas dans des géométries contraintes comme celles des gorges. Ce chapitre a pour objet de mobiliser les mémoires spéléogénétiques susceptibles d'apporter des informations morphogéniques sur le recoupement du Pont d'Arc et les différentes phases de formations alluviales et de creusement de l'Ardèche (terrasses à + 45 et + 30 m). Notre attention s'est focalisée sur la grotte des Châtaigniers qui se développe dans le pédoncule recoupé par l'Ardèche et dont les développements et morphologies spéléologiques résonnent avec les niveaux alluviaux extérieurs.

Ce chapitre tente de présenter un modèle d'évolution relatif au cours du Pléistocène, non plus dans l'espace horizontal XY (divagations latérales de la rivière dans la plaine de Vallon) mais plutôt selon une logique verticale (étagement des réseaux souterrains et des terrasses alluviales).

L'origine et les processus à l'œuvre pour aboutir à l'arche du Pont d'Arc (figure 77) ainsi que l'âge du recoupement du méandre restent mal connus (Nicod, 1997a ; Mocochain et al., 2009). Les recoupements de méandre sont aujourd'hui un processus bien étudié en région de plaine et de faible énergie topographique

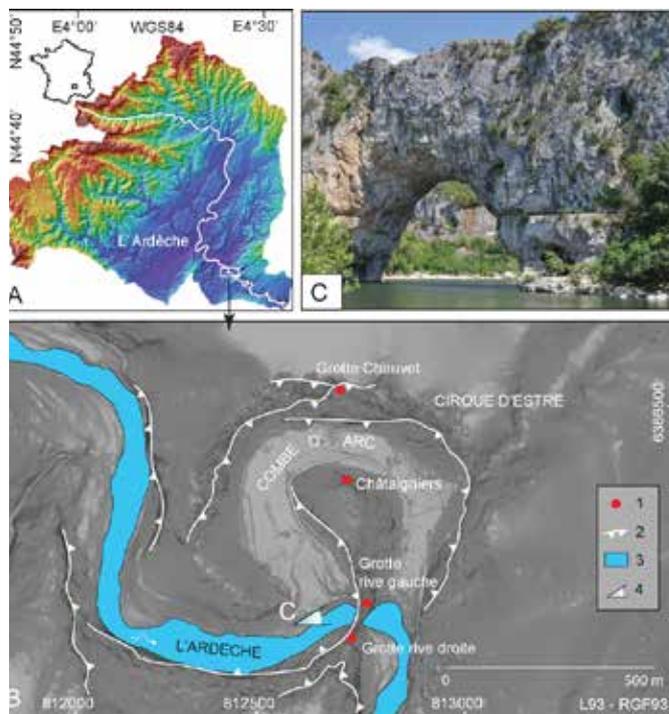


Figure 77 : Carte de localisation. Le méandre abandonné de la Combe d'Arc et le Pont d'Arc, à l'entrée du canyon karstique des Gorges de l'Ardèche. La rivière s'écoule aujourd'hui sous l'arche calcaire, cette dernière s'ouvrant dans la partie la plus fine du pédoncule de la Combe d'Arc. Les phénomènes karstiques environnant le Pont d'Arc sont les environnements analysés dans ce chapitre : 1. Le Pont d'Arc ; 2. Entrée de la grotte des Châtaigniers ; 3. Grottes de la rive droite du Pont d'Arc ; 4. Grottes de la rive gauche du Pont d'Arc ; 5. Grotte Chauvet ; 6. Point de vue de la photographie.

Localisation : Les Gorges de l'Ardèche. Système de coordonnées : Lambert 93 - RGF 93.

Location map. The abandoned meander of the Combe d'Arc is located at the entrance of the Ardèche canyon. The Pont d'Arc arch crosses the River Ardèche at the narrowest part of the stalk. The surrounding karsts of the Pont d'Arc are studied in this chapter: 1. Pont d'Arc; 2. The Châtaigniers cave entrance; 3. Right bank caves; 4. Left bank caves; 5. Chauvet cave entrance; 6. Photograph viewpoint.

(Taillefer, 1949 ; Johannesson et Parker, 1989 ; Camporeale et al., 2008) où l'évolution des courbures de méandre est généralement associée à des modifications morphogéniques engendrées par des variations climatiques (Brice, 1974). Dans le cas des méandres inscrits, l'évolution des sinuosités semble davantage fonction de la nature de l'encaissant et de son état de cohésion (Stark et al., 2010). Les recoupements de ce second type de méandre se produisent sur des temporalités beaucoup plus longues. Dans le cas de gorges en domaine karstique comme celles de l'Ardèche, l'évolution des méandres est soumise aux processus fluviaux mais également karstogéniques (Nicod, 1997b). La

karstogénèse, en favorisant le développement de vides souterrains, joue vraisemblablement un rôle dans les phénomènes de recouplement de méandre (exemple des Ponts de Minerve ; Ambert, 1976). Or, les plateaux calcaires du Bas-Vivarais ont connu une longue karstogénèse qui s'est enclenchée dès le Miocène et se poursuit encore aujourd'hui (Callot, 1979 ; Belleville, 1985 ; Audra et al., 2001 ; Jaillet et al., 2007 ; Delannoy et al., 2009 ; Mocochain et al., 2009 ; Sadier, 2013).

Le recouplement du méandre du Pont d'Arc est discuté depuis longtemps. Giraud-Soulavie (1781) est le premier à décrire le phénomène sous un angle naturaliste. Il constate la complexité des morphologies en observant « *cette voûte [...] brute, et toute hérissée d'angles & d'aspérités, tandis que les roches usées par les eaux courantes sont toujours polies* ». Martel (1930) ; Roman (1950) ; Bourdier (1962) ; Ambert (1976) ; Belleville (1985) ; Gombert (1988) et Nicod (1997a et b) vont ensuite souligner le rôle potentiel du karst dans l'évolution du Pont d'Arc mais sans pouvoir trancher. La présence clairement visible de formes endokarstiques encore conservées au sein même de l'arche, témoigne d'anciens processus spéléogénétiques ayant affecté le pédoncule du méandre. Afin de mieux appréhender le rôle potentiel du karst dans le recouplement du méandre et la mise en place du Pont d'Arc, leur étude s'avérait indispensable.

Comment le Pont d'Arc s'est-il formé ? L'encaissement progressif de la rivière en milieu karstique a-t-il influencé le recouplement du méandre ? Gombert (1988), Menneron (2003) et Mocochain et al. (2009) proposent une interprétation chronologique de ce recouplement à l'aide des niveaux alluviaux inscrits sur la carte géologique. Tous trois le replacent dans une temporalité quaternaire (Pléistocène récent).

Par leur géométrie, le talweg actuel de l'Ardèche, le Pont d'Arc, les niveaux de terrasses et les cavités se développant à proximité de la Combe d'Arc, ont enregistré des dynamiques morphogéniques différentes. Il va s'agir de les croiser pour définir leur complémentarité informationnelle dans l'objectif de la compréhension du recouplement du méandre. Par exemple : des relations altitudinales semblent ressortir entre les drains endokarstiques à 75-80 m NGF et 95-100 m NGF de la Grotte des Châtaigniers et des morphologies équivalentes de part et d'autre du Pont d'Arc. Ces formes répondent-elles de mêmes dynamiques morphogéniques répétées dans le temps à mesure de l'enfoncement du réseau hydrographique ou sont-elles le reflet d'enregistrement différents ? C'est sur la dialectique entre niveaux repères extérieurs et souterrains qu'est construit ce chapitre.

1. Méthode : Topographie 3D des morphologies à l'échelle de la Combe d'Arc.

Afin de rendre compte au mieux des corrélations altitudinales entre les différents niveaux repères, les relevés topographiques ont été réalisés avec la plus grande précision possible (LiDAR terrestre) ; ils ont été calés à l'aide d'un GPS différentiel, et ont, enfin, été fusionnés dans un même modèle topographique tridimensionnel. Ces supports ont, par la suite, servi à la réalisation de la carte géomorphologique de la grotte des Châtaigniers dans son contexte morphogénique (Combe d'Arc et Pont d'Arc). Des coupes ont également été réalisées afin de visualiser la distribution altitudinale des drains-repères de la grotte des Châtaigniers et des niveaux repères extérieurs (terrasses, ouvertures de conduits spéléologiques dans le Pont d'Arc), afin de poser la nature de leurs relations

La figure 78 présente l'ensemble des différentes méthodes ayant débouché sur l'acquisition 3D de la Combe d'Arc et du Pont d'Arc. Ces méthodes ont permis de poser les bases d'un modèle 3D intégrant l'ensemble des données topographiques suivantes :

- Relevé global haute-résolution par LiDAR terrestre longue portée (Terrestrial Laser Scanning - TLS) de la Combe d'Arc ;
- Relevé haute-résolution du Pont d'Arc et de la grotte de la rive droite par Lidar terrestre courte portée 360° (Faro Focus 3D).
- Relevé bathymétrique de la mouille sous le Pont d'Arc, avec synchronisation d'un échosondeur et d'un GPS différentiel (dGPS) ;
- Topographie spéléologique de la grotte des Châtaigniers. L'incertitude altimétrique de la topographie réalisée est de ± 22 cm (erreur de bouclage très faible de 0,08 % pour 433 m, de l'entrée jusqu'au siphon). La précision était ici recherchée afin de recalcr correctement les morphologies de la cavité dans l'environnement externe de la Combe d'Arc

L'ensemble de ces relevés a été assemblé par la méthode *best fit* (Besl et McKay 1992), avec un contrôle par dGPS sur certains points d'assemblage, permettant ainsi d'afficher une erreur finale de recalage inférieure à ± 22 cm (erreur maximale issue du relevé filaire de la grotte des Châtaigniers).

Le modèle 3D ainsi généré permet d'identifier des niveaux repères ayant des altitudes communes à l'intérieur des grottes comme à l'extérieur (méandre abandonné et arche). Cette consolidation topographique réalisée, l'étape suivante consiste à croiser les informations morphogéniques présentes aux mêmes niveaux altitudinaux.

2. Comparaison morphologique et altitudinale des cavités de basse altitude du Cirque d'Estre et de l'entrée des Gorges de l'Ardèche.

2.1 Cartographie des données structurales de la Combe d'Arc.

La grotte des Châtaigniers se développe au cœur du pédoncule de la Combe d'Arc (figure 79). Elle s'ouvre légèrement au-dessus de la surface du méandre recoupé et descend, dans sa partie terminale, jusqu'au niveau actuel de l'Ardèche. Elle se développe entre 70 et 110 m NGF, soit dans la même tranche altitudinale que l'arche. Les morphologies présentes au sein de la cavité constituent des clés de compréhension de son évolution karstique, laquelle sera à croiser avec celle de l'arche calcaire.

La cartographie de la grotte des Châtaigniers fait nettement ressortir deux grandes directions d'accidents (N/S et ONO/ESE) sur lesquelles se calquent les réseaux souterrains ainsi que le méandre lui-même. L'axe principal de direction Nord / Sud pourrait être mis en lien avec le fossé d'Alès rapporté à l'Oligocène (Denizot, 1932). Les formes endokarstiques au sein de l'arche - les grottes de la rive gauche et de la rive droite du Pont d'Arc - traversent également le pédoncule selon cette même direction. Tous les étages karstiques semblent être affectés par cette structure : les bas réseaux (grotte des Châtaigniers) comme les plus hauts en altitude (grotte Chauvet).

Deux autres directions d'accidents (ONO/ESE et SE/NO) ont également été relevées dans la grotte des Châtaigniers ainsi que dans les cavités du Pont d'Arc (figure 79). L'axe de fracturation ONO/ESE correspond aussi à l'axe de recoupement que constitue l'arche par rapport à la rivière.

En termes de développement altitudinal, les similarités entre la grotte des Châtaigniers et les vides souterrains de part et d'autre de l'arche du Pont d'Arc suggèrent des phases de karstogénèse communes. Deux étages de karstification peuvent y être identifiés à 80 m et 100 m NGF, ce qui pousse à étudier plus en détail le Pont d'Arc et la grotte des Châtaigniers.

2.2 Le Pont d'Arc.

L'étude morphogénique du Pont d'Arc met en avant différents processus pouvant être à l'origine de sa facture actuelle. L'action des phénomènes fluviaux est bien visible dans la partie amont de l'arche. Aux alentours de 100 m NGF, on relève des morphologies adoucies sur les bords de la voûte de l'arche attestant du passage de la rivière (les chroniques des grandes crues de l'Ardèche ont en effet attesté de niveaux d'eau presque jusqu'au sommet de la voûte de l'arche sur des temporalités historiques (Mardigny, 1860 ; Sheffer

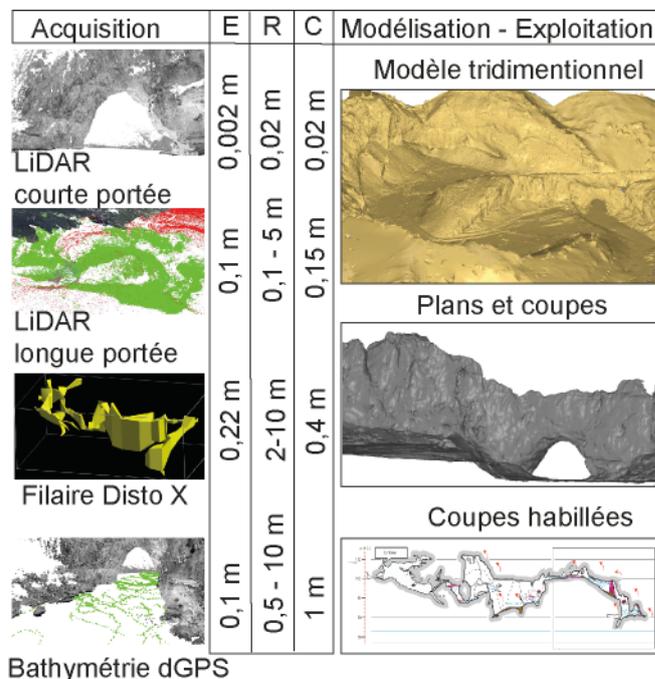


Figure 78 : Les différentes méthodes d'acquisition topographiques et leur fusion au sein d'un même modèle 3D. Malgré la diversité des méthodes d'acquisition topographiques, la consolidation des données acquises au sein d'un même référentiel géographique permet d'obtenir un modèle tridimensionnel unique. L'ensemble de cette opération a été effectué sous le contrôle de points dGPS pris en extérieur. E. Exactitude : la fidélité d'un relevé par rapport à la réalité ; R. Résolution : la quantité de points fournissant l'information topographique pour une surface donnée ; C. Consolidation : procédé d'assemblage entre les différentes acquisitions topographiques. L'assemblage des données entre elles permet une évaluation de l'incertitude finale du modèle à +/- 22 cm.

Topography acquisition methods and registration inside a single 3D model. The registration of all the data generated one unique model. Despite the multi-origin of the topographic data, they were merged into the same geographical coordinate system. It was constrained using dGPS data.

E. Trueness; R. Resolution; C. Registration of the different topographic data. Thanks to the common merging process, the final global uncertainty is inferior to +/- 22cm.

et al., 2003). Les phénomènes de détente mécanique ont également affecté les parois amont surplombant l'arche, générant des escarpements sub-verticaux de 100 à 131 m NGF. On constate également la présence de morphologies endokarstiques au sein de l'arche. Certaines sont présentes seulement à l'état de témoins et leur modelé en pendants de voûte (voir figure 80) n'est pas sans rappeler ceux de la grotte Chauvet (Delannoy et al., 2004). Par ailleurs, dans certaines zones, l'intérieur de l'arche

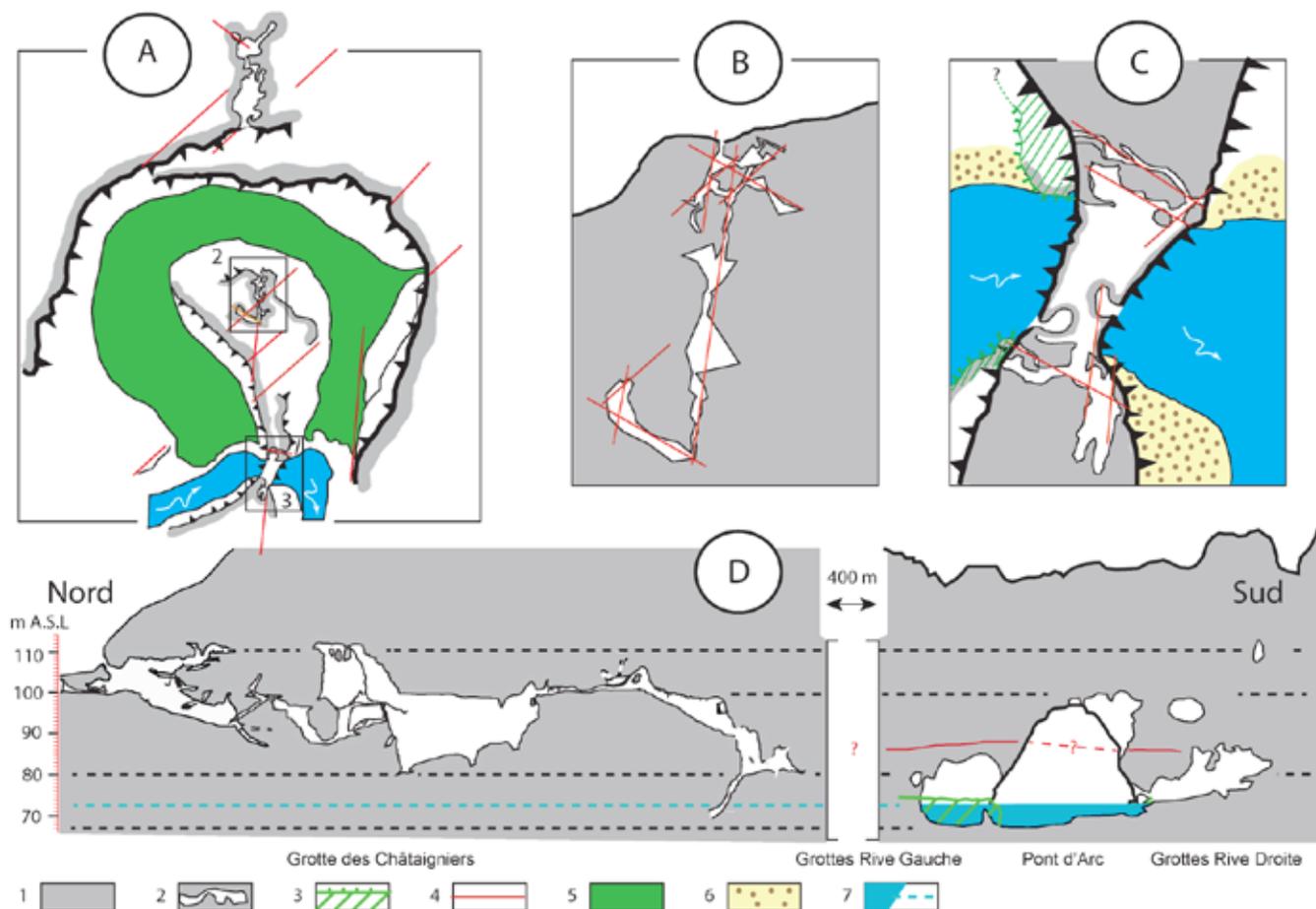


Figure 79 : Comparaison géométrique entre les grottes du Pont d'Arc et des Châtaigniers.

Les plans du Pont d'Arc et de la grotte des Châtaigniers présentent des axes de structuration karstiques similaires (notamment N/S et ONO/ESE). La coupe (D) met en évidence des similarités altitudinales entre le système du Pont d'Arc et celui de la grotte des Châtaigniers : Un niveau s'établit autour de 80 m NGF dans le Pont d'Arc, tandis que le niveau 100 m NGF est plus marqué dans la grotte des Châtaigniers.

A. Cirque d'Estre ; B. Grotte des Châtaigniers ; C. Pont d'Arc ; D. Comparaison altitudinale. 1. Encaissant calcaire ; 2. Cavités ; 3. Banquettes à + 5 m ; 4. Fracturation ; 5. Méandre abandonné ; 6. Bancs de sable ; 7. L'Ardèche.

Topographie Grottes de la rive droite : Gilbert Platier.

Comparison between the karstic axes of the Pont d'Arc and the Châtaigniers cave. The cross-section reveals two main drains at 80 and 100 m A.S.L.; they are visible in both karstic systems. The Pont d'Arc and the Châtaigniers cave cross-sections have structural similarities (N/S and WNW/ESE). A. Cirque d'Estre; B. The Châtaigniers cave ; C. Pont d'Arc ; D. Altitude comparison.

key : 1. Limestone; 2. Caves; 3. Eroded water table at + 5 m; 4. Fractures; 5. Abandoned meander; 6. Sand deposits; 7. Ardeche River.

Right side cave topography: Gilbert Platier.

se poursuit profondément dans l'encaissant calcaire formant de véritables cavités aux vides métriques à décimétriques, notamment sur la rive droite. Ces ensembles, majoritairement orientés Nord-Sud se développent au voisinage de 80 m NGF.

Un second ensemble de témoins endokarstiques plus discrets, se situe autour de 95 / 100 m NGF. Ce niveau est visible dans la voûte même de l'arche ainsi que dans la grotte rive droite.

Enfin, des conduits parallèles au recoupement se développent également dans les grottes de la rive gauche et de la rive droite du Pont d'Arc autour de

75 à 80 m NGF. Ces drains subhorizontaux (figure 80) sont orientés dans le sens du recoupement.

A l'amont immédiat du Pont d'Arc, aux mêmes altitudes que les drains ONO/ESE des grottes des rives gauche et droite, on observe des banquettes rocheuses s'établissant entre 75 et 76 m NGF et surplombant d'environ 5 m la rivière à son niveau d'étiage (figure 80). Des morphologies similaires sont également observables dans les méandres du Chassezac, un des principaux affluents de l'Ardèche (Jacob et al., 2006 ; Jacob-Rousseau, 2008).

La présence de ces banquettes rocheuses de part et d'autre du cours d'eau, même dans les concavités des méandres serait l'expression d'un ancien *bedrock* réentaillé par la rivière (Bravard, 1993). Au niveau du Pont d'Arc, les banquettes de la rive gauche s'avancent au-devant de l'arche et non en-dessous. Elles représentent aujourd'hui un obstacle au passage de l'eau et semblent se prolonger vers l'amont extérieur de l'arche en direction du méandre abandonné. Cependant, elles ne sont pas présentes sous l'arche en lui-même.

La présence de témoins morphologiques caractéristiques de l'endokarst au sein du Pont d'Arc (cavités, pendants de voûte érodés) interroge sur les modalités de formation d'une telle structure dans le paysage. Une investigation des morphologies endokarstiques a donc été menée dans la grotte des Châtaigniers.

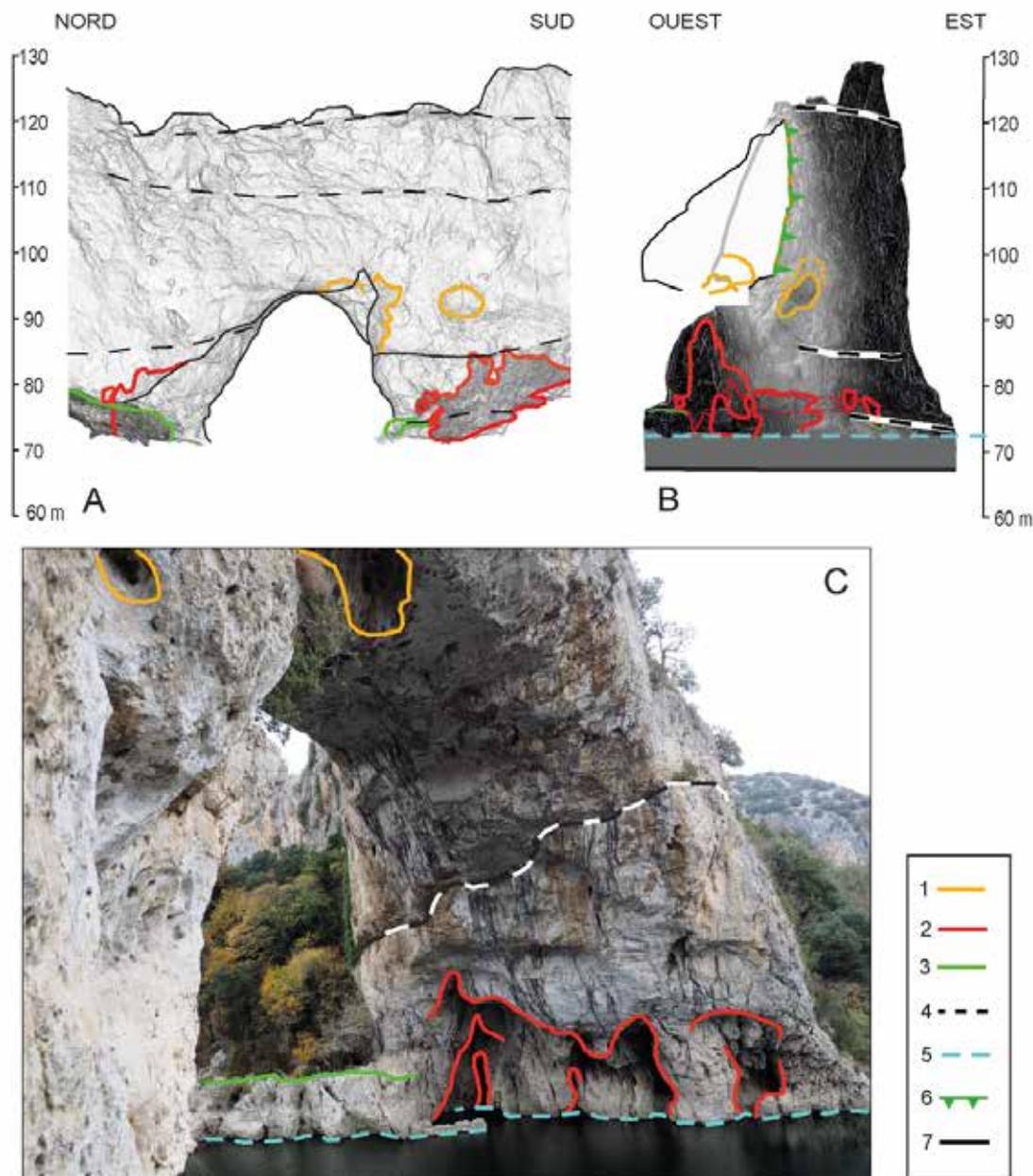


Figure 80 : Vues détaillées des morphologies karstiques du Pont d'Arc.

A. Vue N-S du Pont d'Arc. B. Vue E-O du Pont d'Arc. C. Rive gauche du Pont d'Arc, vue depuis l'aval, en rive droite : les morphologies endokarstiques sont bien visibles, notamment pour le niveau 75-80 m NGF, beaucoup plus développé que celui à 100 m.

1. Niveau à 100 m NGF ; 2. Niveau à 80 m NGF ; 3. Banquettes calcaires + 5 m ; 4. Joints de strate ; 5. Etiage actuel de l'Ardèche ; 6. Escarpement rocheux ; 7. Topographie.

Detailed cross sections of the Pont d'Arc arch.

A. N-S Pont d'Arc cross section. B. E-W Pont d'Arc cross section. C. Photograph of the left side of the arch: the endokarstic morphologies are clearly visible, especially the 75-80 m A.S.L ones.

1. Horizontal 80 m A.S.L drains ; 2. Horizontal 100 m A.S.L drains ; 3. Ancient river base level; 4. Geological interstrata; 5. Current water level; 6. Cliff; 7. Topography.

3. La grotte des Châtaigniers.

3.1 Description.

La grotte des Châtaigniers s'ouvre à 108 m NGF. Si certains réseaux se développent autour de cette altitude (108 / 110 m NGF), la cavité descend par palier jusqu'au niveau de l'Ardèche (80 m NGF). Le fond de la cavité débouche sur un siphon dont le prolongement souterrain est plus bas que le niveau d'étiage actuel de l'Ardèche : il pourrait correspondre au fond rocheux de la rivière qui se situe vers 67 m NGF. Les plongées du siphon n'ont jusqu'à présent pas permis d'aller au-delà d'une dizaine de mètres de développement.

Dans la grotte, on distingue différents niveaux étagés de conduits connectés par des puits-cheminées (Camus, 2003). Ces morphologies confèrent au parcours spéléologique un caractère sportif avec une succession de montées et de descentes jusqu'au terme final (puits-incliné) (voir figure 81). Ces différents étages correspondent à d'anciens drains karstiques et sont situés autour de 110, 100 et 80 m NGF. Le niveau à 110 m est bien visible dans la première partie de la cavité ; le niveau à 100 m l'est également, avant le puits terminal. La reconnaissance d'un niveau vers 80 m est moins aisée, bien que des vides soient aussi présents à cette altitude, notamment à la base du puits final, dans la salle donnant sur le siphon.

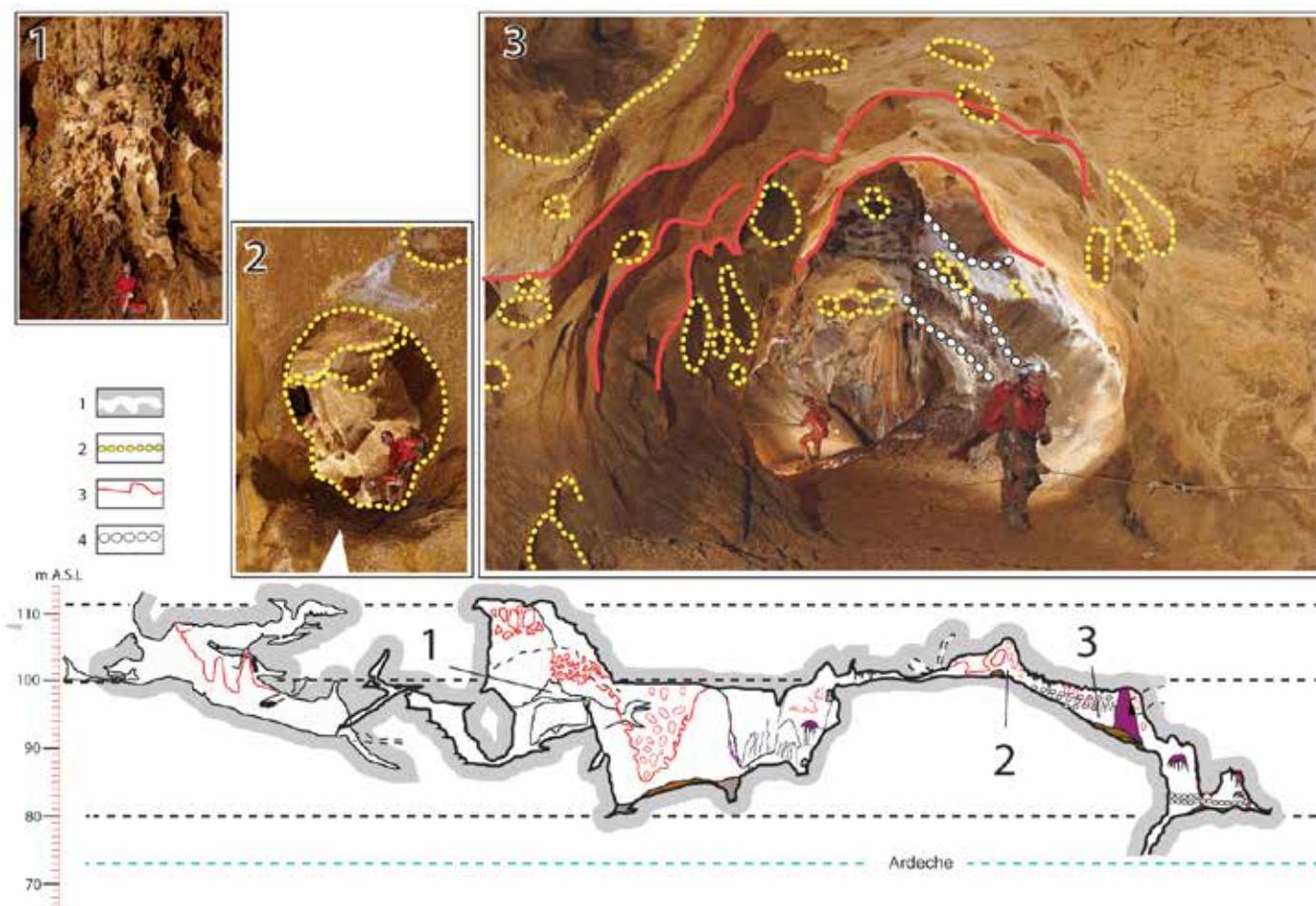


Figure 81 : Coupe topographique développée de la grotte des Châtaigniers et illustrations des morphologies noyées. Ces dernières sont très marquées dans la cavité et sont présentes à toutes les altitudes. 1. Cavité ; 2. Coupôles ; 3. Pendants de voûte. 4. Banquette limite. Crédits photo : Stéphane Jaillet.

Cross section of the Châtaigniers cave and photographs of paragenetic morphologies visible everywhere in the cave. Key : 1. Cave ; 2. cupola ; 3. Drowned morphologies ; 4. Side benches.

Photographs: Stéphane Jaillet.

3.2. Des morphologies noyées dans un réseau de basse altitude.

La cavité présente des morphologies noyées caractéristiques d'un fonctionnement de type paragénétique avec une remontée du niveau de base : des banquettes limitées, des pendants de voûte, ou encore des puits–cheminées (Lauritzen et Lundberg, 2000 ; Camus, 2003 ; Mocochain et al., 2006) the Mediterranean Sea was characterized by a short lived (5.95–5.32 Ma. Ces morphologies, illustrées en figure 81, sont présentes dans l'ensemble de la cavité, depuis l'entrée jusqu'au siphon terminal.

Sur les parois et les plafonds des grands vides de la partie amont de la cavité, les morphologies de dissolution en contexte noyé se présentent sous forme de petits pendants de voûte (3), rappelant les morphologies similaires de la grotte Chauvet dont les faciès de parois sont parfois très altérés (Delannoy et al., 2004 ; Delannoy, 2018). Les nombreuses coupoles de dissolution évoquent le modèle de karstogénèse

paragénétique associé à la transgression Pliocène de la Basse-Ardèche (Mocochain et al., 2009 ; Jaillet et al., 2011 ; Sadier, 2013).

Les morphologies paragénétiques associées à la remontée du niveau de base pliocène et à l'aggradation continentale sont aujourd'hui encore visibles dans des réseaux relativement perchés par rapport au talweg actuel des gorges de l'Ardèche, comme à Chauvet (Delannoy et al., 2004), à Orgnac ((Jaillet et al., 2011), ou encore à Saint Marcel (Mocochain et al., 2006) the Mediterranean Sea was characterized by a short lived (5.95–5.32 Ma).

La présence de morphologies similaires dans la grotte des Châtaigniers, à une relative proximité du fond des gorges, interroge quant aux événements ayant pu engendrer une mise en charge des réseaux et une lente remontée du niveau de base de plusieurs dizaines de mètres. D'autres informations morphologiques, plus ténues, ont donc été investiguées pour mieux cerner l'histoire de la cavité, cette fois - ci à l'échelle des parois.

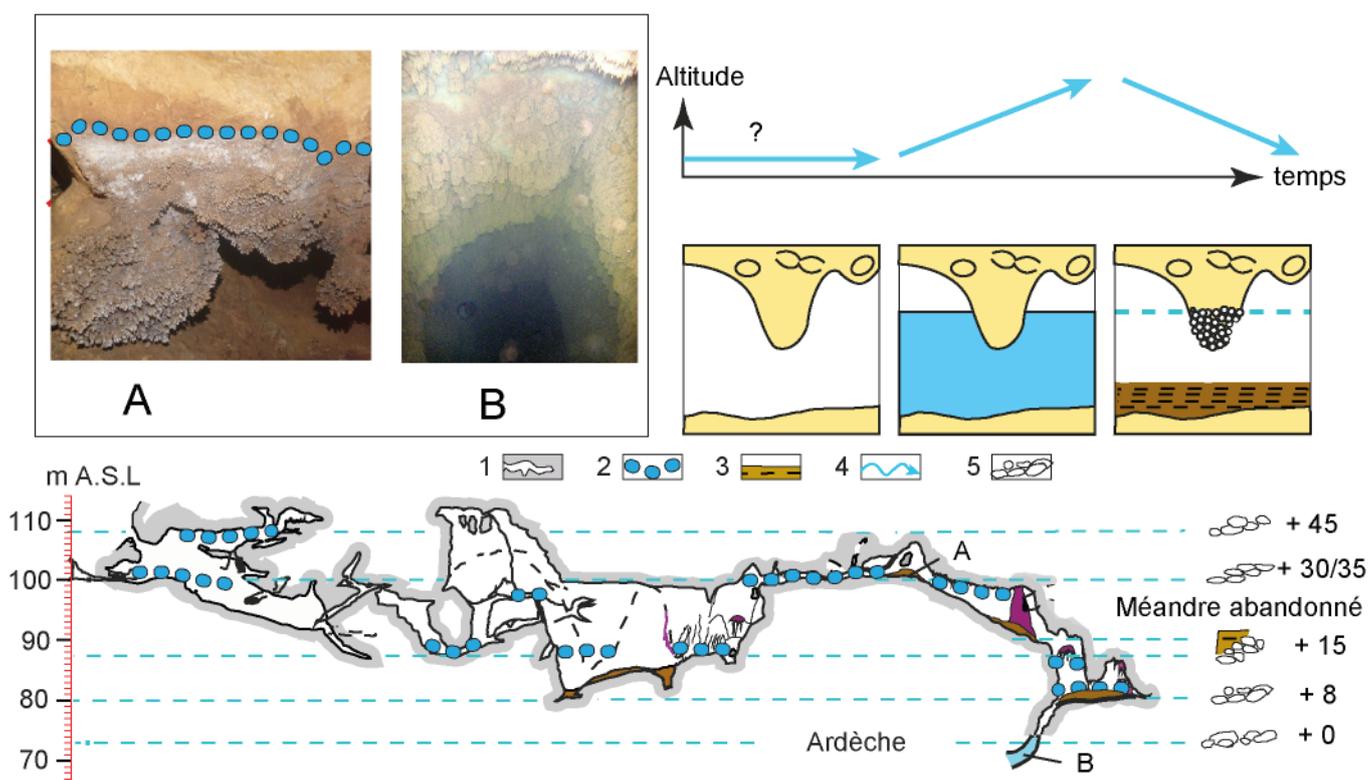


Figure 82 : Carte des micro-formations de calcite et des dépôts liés à l'enneigement de la grotte des Châtaigniers. Ces morphologies de ré-enneigement de la cavité affectent notamment les niveaux 110, 100, 85 et 80 et 73 m NGF. Ces niveaux sont peut-être en relation avec les terrasses alluviales de l'Ardèche. La présence de ces morphologies au niveau du siphon terminal (B) témoigne de leur développement en milieu noyé ou épinoyé. 1. Topographie ; 2. Limite supérieure des cristaux en dents de cochon ; 3. Dépôts argileux laminés ; 4. Evolution du niveau de base, 5. Niveau des terrasses alluviales. Credits photo: Pat Génuitte.

Châtaigniers cave walls affected by ancient water levels. Subaqueous calcite can be seen at 110,100,85 and 80, 73 m A.S.L which correspond to the exterior alluvial deposits of the River Ardeche. Those morphologies are also visible in the sump, which testifies their subaqueous development.

1. Topography; 2. Underwater calcite crystals; 3. Clay sediment; 4. Water base level evolution; 5. River Ardeche levels. Photographs: Pat Génuitte.

3.3. Des modelés et cristallisations de paroi attestant de phases de ré-ennoisement de la cavité.

Des cristaux de calcite centimétriques à infracentimétriques appelés cristaux de gour ou encore cristaux en dent de cochon (Gèze, 1973 ; Choppy, 1985) tapissent les parois de la cavité et ce à différents niveaux du réseau ; elles sont également visibles dans le siphon terminal (figure 82).

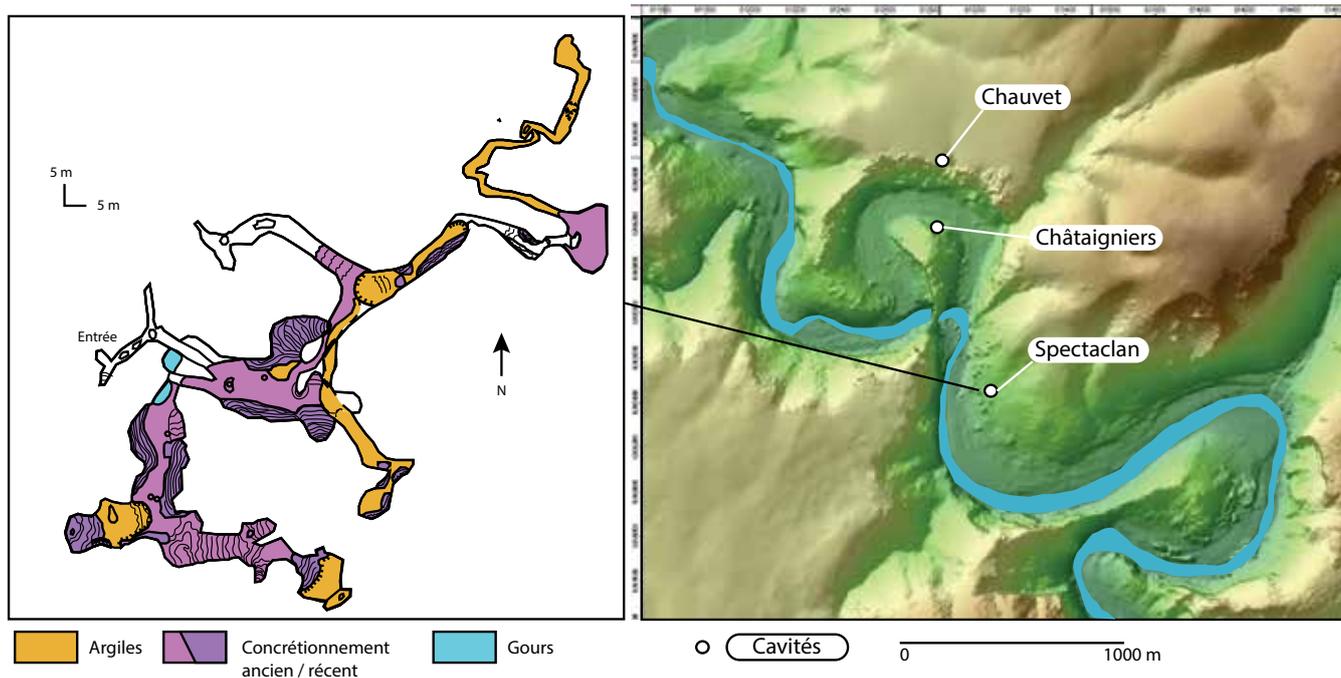
Ce type de cristallisation pourrait être associé à des phases de mise en charge du réseau par des eaux saturées en carbonate sur des périodes courtes (Choppy, 1985). Ces niveaux de cristallisation qui s'établissent autour de 80 m, 85 m, 100 m et 110 m NGF pour le plus haut, pourraient être un marqueur des niveaux de stabilité de l'ennoisement du réseau souterrain.

La limite de cristallisation marque la zone de passage entre la partie ennoyée et la partie exondée de la cavité, au même titre que les gours.

Ces morphologies se développent sur les pendants de voûte de la grotte. Des dépôts argileux sont également visibles à des niveaux altitudinaux proches des cristaux à dents de cochon, notamment à 80 m et 100 m NGF, pour le puits terminal visible dans la figure 82. Les dépôts argileux, comme les niveaux de cristallisation relevés à différents niveaux dans la cavité, peuvent être associés à d'anciennes phases d'ennoisement.

Il est intéressant de relever que leurs altitudes sont proches de celles des terrasses alluviales de l'Ardèche, identifiées à +8, +15, +30/35, et +45 m NGF (Labrousse, 1977 ; Génuite et al., 2018). Les niveaux fluviaux à +15 m et +30 m sont identifiables dans la Combe d'Arc. A l'échelle de la vallée de l'Ardèche, l'ensemble des niveaux fluviaux modélisés au niveau du Pont d'Arc correspondent aux altitudes 80, 85, 100, et 110 m NGF (figure 82).

Afin de vérifier si les observations effectuées dans la grotte des Châtaigniers et sur les terrasses alluviales concordent, d'autres cavités nécessitent d'être investiguées.



4. La grotte de Spectaclan.

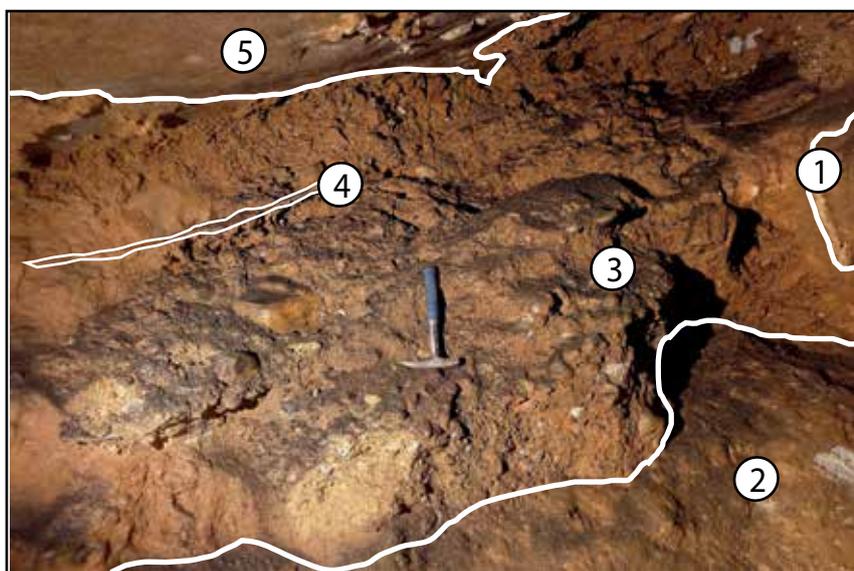
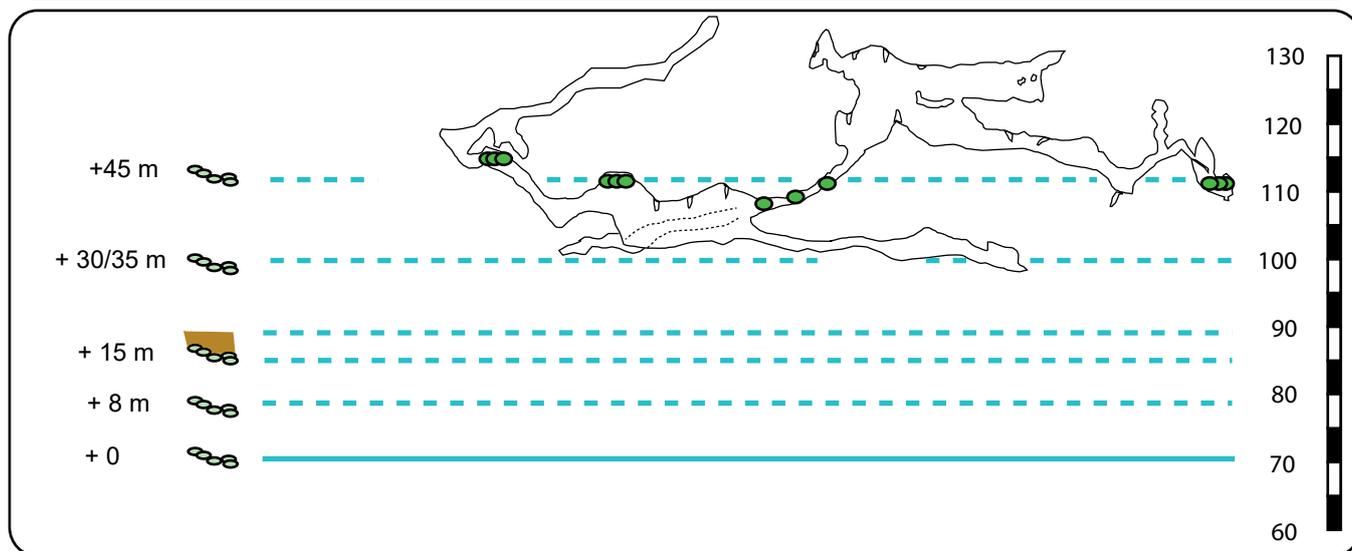
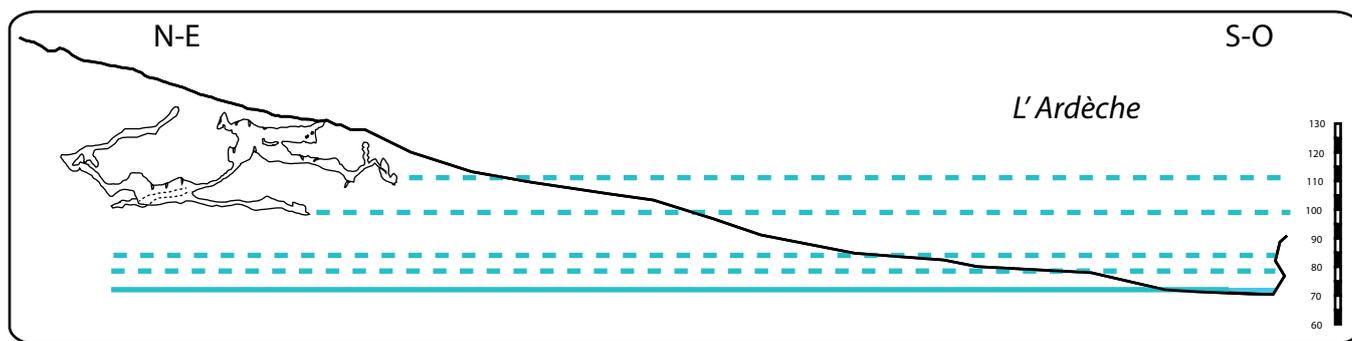
Une autre cavité a été explorée avec la même approche géomorphologique : la grotte de la Rouvière, dite aussi Spectaclan (figure 83).

Cette cavité, facilement accessible, s'ouvre à 131 m NGF en aval du Pont d'Arc et se développe à des altitudes comprises entre 100 m et 135 m NGF. La topographie de Michel et al. (2007) a servi de support au relevé géomorphologique à partir de la vue en coupe ce qui a permis ainsi la comparaison avec les observations réalisées dans la grotte des Châtaigniers.

Figure 84 : Cartographie des niveaux de galets à + 45 m dans la grotte Spectaclan. Les altitudes sont en mètres NGF. Topographie : Michel et al., 2007(modifiée). Ronds verts : galets. Pointillés bleus : anciens niveaux de rivière. Ligne bleue : Ardèche actuelle.

Cross-section maps and photograph of the + 45 m pebble alluvial deposits inside the Spectaclan cave.

Altitudes are given in meters A.S.L. Topography : Michel et al., 2007 (modified). Green dots : pebbles. Dashed blue lines : ancient alluvial levels. Blue line : Ardèche curent level.



- ⑤ Plancher stalagmitique supérieur
- ④ Plancher stalagmitique inférieur
- ③ Galets
- ② Sables
- ① Bedrock

Notre choix s'est porté sur cette cavité car elle se situe dans des gammes altitudinales proches de celles des terrasses alluviales à + 30/35 m et + 45 m. Comme la grotte des Châtaigniers, la cavité présente des morphologies caractéristiques du paragénétisme, avec des pendants de voûte, des banquettes-limites, des morphologies de plafond en pied d'éléphant ainsi que des chenaux de voûte bien marqués (Lauritzen et Lundberg, 2000).

Comme pour la grotte des Châtaigniers, ces morphologies sont présentes dans l'ensemble de la grotte et à différents niveaux altitudinaux. On relève dans la grotte de Spectaclan deux niveaux de drain : le premier vers + 30 m est bien développé. Il représente le fond actuellement connu de la cavité. Le second à + 60 m représente les plafonds de cette dernière. Comme pour la grotte des Châtaigniers, le niveau à + 30 m est rempli de sédiments argileux. Des bancs de galets encastrés dans les parois, visibles en figure 84 ont également été identifiés autour de + 45 m (110 m NGF).

Un niveau de poudingue situé à + 45 m, dans la terminaison sud de la cavité, est scellé à son sommet ainsi qu'en son propre sein, par des planchers stalagmitiques. Cette intercalation de phases de remplissage et de concrétionnement rend compte d'alternances entre des phases de forte énergie (transport de galets) et d'autres de moindre écoulement.

La figure 85 présente une hypothèse d'évolution de l'endokarst et des sédiments qui sont encore

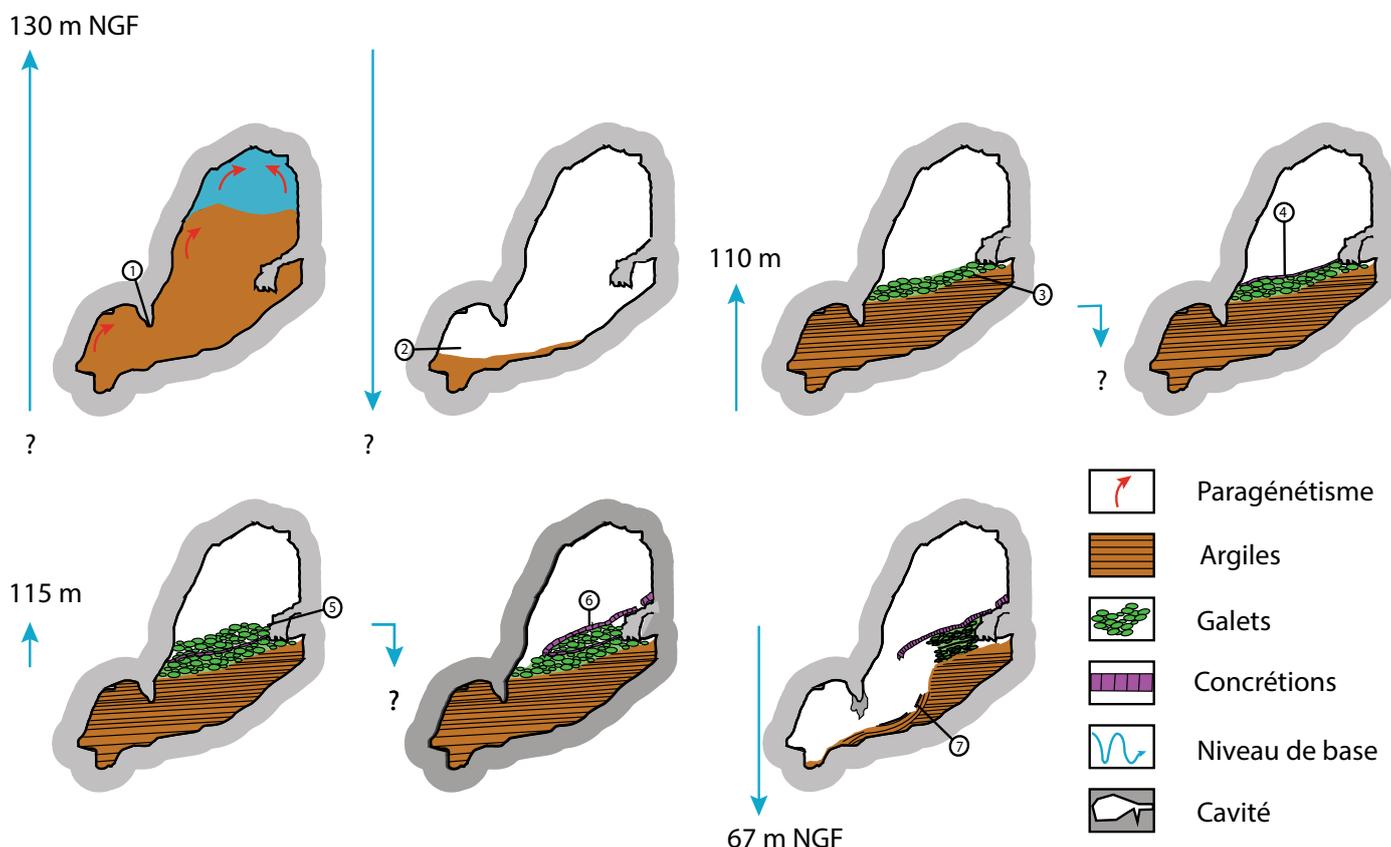
présents dans la grotte de Spectaclan à + 45 m. Comme pour la grotte des Châtaigniers, la présence de morphologies paragénétiques affectant les parois (pieds d'éléphant, chenaux de voûte et banquettes limite) atteste d'une phase spéléogénétique associée à une remontée du niveau de base karstique (1). Ces morphologies sont visibles sur l'ensemble de la cavité, entre 100 m et 130 m NGF ; elles pourraient correspondre à l'aggradation continentale pliocène (Mocochain et al., 2009). Ces auteurs mettent en avant une phase de ré-incision postérieure qui aurait pu contribuer à l'évacuation des argiles paragénétiques

Figure 85 : Modèle chronologique relatif de la morphogénèse (spéléogénèse et dépôts) de la salle terminale sud de Spectaclan. Topographie : Michel et al., 2007.

1. Paragénétisme ; 2. Incision ; 3. Aggradation terminée par une phase grossière ; 4. Stabilité, pousse d'un plancher intermédiaire ; 5. Aggradation terminale grossière ; 6. Plancher stalagmitique massif ; 7. Incision généralisée.

Location and chronological model of the southern final pit of the Spectaclan cave. Topography from: Michel et al., 2007.

1. Paragenetism ; 2. Incision ; 3. Upfilling with pebbles on top ; 4. Intermediate calcite deposit ; 5. Final pebble aggradation ; 6. Massive calcite deposit ; 7. New incision.



(2) ; la rivière aurait également pu pénétrer dans les vides karstiques proches des versants et y déposer du matériel alluvial grossier (3). Le niveau de galets, aujourd'hui perché à + 45 m, correspondrait alors à cette dynamique. Un plancher stalagmitique intermédiaire s'intercale au milieu du banc de galets (4), signe d'une reprise de l'aggradation fluviale après la pousse de ce plancher (5). Les galets sont scellés par un épais plancher stalagmitique (6) qui traduirait des conditions biostatiques (interglaciaires, interstadias).

Le déblaiement du poudingue alluvial marque, enfin, une redescende du niveau de base (7).

Il est intéressant de noter que le niveau d'invasion de ces galets est similaire à celui de la terrasse à + 45 m que l'on retrouve sous forme de petits lambeaux dans la plaine de Vallon Pont d'Arc, notamment au niveau de la butte du Moulin à vent et autour de celle de Montingrand. La présence des galets dans la grotte de Spectaclan confirme donc l'intérêt de discuter des relations karst/rivière pour les bas niveaux karstiques et fluviaux dans les Gorges de l'Ardèche.

5. Discussions.

L'approche comparative de la grotte des Châtaigniers, de la grotte Spectaclan et du Pont d'Arc a permis de mettre en évidence des étages de karstification et des formes communes à ces trois objets, notamment la présence généralisée de formes paragénétiques dans les conduits de basse altitude de l'amont des Gorges de l'Ardèche. Les témoins, plus discrets de phases épiphréatiques ayant affecté la grotte des Châtaigniers, et la présence de galets dans l'Aven Spectaclan ont également fait l'objet d'un positionnement altitudinal. Ces morphologies sont maintenant discutées dans un modèle d'évolution global en lien avec la rivière. Trois échelles d'analyse sont abordées : Les Gorges de l'Ardèche, la Combe d'Arc, et enfin : le recoupement du Pont d'Arc.

5.1 L'enregistrement de l'évolution de la rivière dans les conduits karstiques de basse altitude des Gorges de l'Ardèche.

Parmi les marqueurs morphologiques retrouvés dans les conduits karstiques, les galets à + 45 m de l'Aven Spectaclan sont peut-être les plus éloquents car ils sont en place et soulignent ainsi la proximité et la relation directe de cette cavité avec le niveau de l'Ardèche. Ce niveau de galets à + 45 m peut être altitudinalement corrélé au cortège des basses terrasses à + 45 m de la plaine de Vallon Pont d'Arc, visibles notamment autour de la butte de Montingrand. D'autres grottes possèdent également des niveaux de galets dans des galeries à + 45 m : des galets autochtones dans le réseau de Foussoubie au sein de la galerie SCUCL (Jaillet et al., 2012) ; ou encore les galets de la Baume des Cloches, au sortir des gorges de l'Ardèche (méandre du Ranc Pointu). La présence de ce niveau semble généralisée sur

l'ensemble du canyon et son encadrement par des niveaux de sables et des planchers stalagmitiques dans la grotte Spectaclan en fait une cible potentielle pour d'éventuelles datations Uranium-Thorium sur les concrétions, d'OSL ou d'ESR sur les dépôts sableux. La taille pluricentimétrique à décimétrique des galets s'accorde très bien avec les observations en extérieur des terrasses à + 45 m. Ces dépôts de gros galets peuvent être interprétés comme une arrivée massive de sédiments dans la cavité ; or, **cette** intrusion n'est possible que si la grotte a été préalablement nettoyée des argiles. Le niveau de galets à + 45 m est particulièrement intéressant car il signe également l'antériorité de la formation du conduit karstique à + 45 m de l'Aven Spectaclan, et donc de l'ancienneté potentielle des morphologies paragénétiques associées à ce niveau.

La présence de ces galets associés à un même niveau de conduit endokarstique sur l'ensemble des Gorges de l'Ardèche, amène à réfléchir aux liens entre niveau de base karstique et niveau de base fluviale dans les Gorges. La proximité entre drains endokarstiques et niveaux de rivière est observable aussi bien en amont qu'en aval du canyon. Les dynamiques géomorphologiques associées au cycle eustatique messino-pliocène ont fait l'objet de nombreuses études, synthétisées en figure 86, notamment en ce qui concerne l'étagement des plus hauts niveaux karstiques à 330/360 m NGF, à 220/250 m NGF, et à 180/200 m NGF (Audra et al., 2001 ; Mocochain et al., 2006 ; Mocochain et al., 2009 ; Delannoy et al., 2009 ; Tassy et al., 2013 ; Sadier 2013). A l'échelle des Gorges de l'Ardèche, une telle organisation se retrouve également à basse altitude, pour les niveaux à + 45 (90/120 m NGF), à + 30m (70/110 m NGF) et à + 5 m (45/75 m NGF).

La figure 86 fait la synthèse (non exhaustive) des niveaux des conduits endokarstiques subhorizontaux repérés dans les Gorges de l'Ardèche. Deux ensembles se détachent nettement l'un de l'autre : Un premier étagement de cavités à un haut niveau altitudinal entre 150 et 330 m NGF, et un second correspondant aux bas niveaux endokarstiques entre 120 et 45 m NGF. L'Ardèche comporte également des niveaux de conduits phréatiques tout le long des gorges.

La comparaison entre niveaux de karstification et niveaux fluviaux théoriques dans le canyon fait apparaître des proximités possibles pour les niveaux + 45 m et + 30 m, étages clairement observables dans les cavités, mais seulement visibles en amont et en aval du canyon pour les dépôts fluviaux. Une autre correspondance intéressante est celle du niveau des banquettes rocheuses à + 5 m avec le niveau de karstification + 5-8 m. Un exemple peut être donné avec la résurgence de Guigonne qui coule directement sur la banquette rocheuse à + 5 m quand elle est émissive. Il nous est impossible de déceler d'éventuels liens entre la genèse des conduits karstiques de basse altitude et les niveaux de terrasses alluviales visibles en amont des Gorges de l'Ardèche.

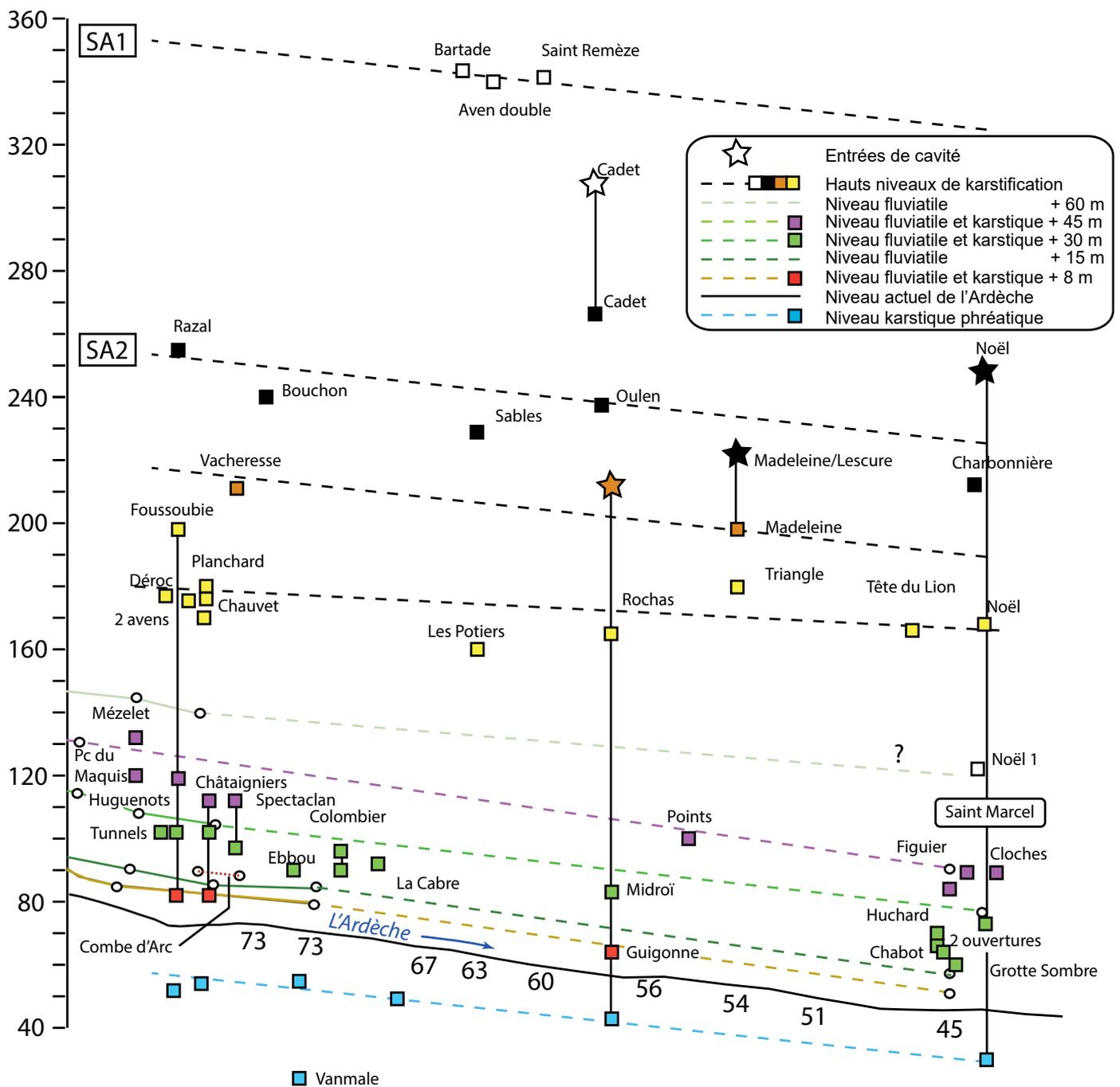


Figure 86 : Synthèse des principaux drains endokarstiques subhorizontaux sur une coupe projetée des Gorges de l'Ardèche (d'après : (Monney et al, 2012) ; (Tassy et al. 2013), et (Sadier et al. 2013) ; modifiés). Des niveaux de karstification apparaissent nettement. Les hauts niveaux de karstification Mio-Pliocène ont été étudiés par (Mocochain et al. 2009), (Tassy et al. 2013) et (Sadier 2013). Des niveaux de karstification de basse altitude avoisinent les niveaux de terrasses alluviales, de part et d'autre du canyon, et ceux des galets de basalte retrouvés dans les cavités des Gorges. Les traits pleins verticaux montrent l'appartenance de conduits étagés à un même réseau.

Cross- section of the River Ardèche canyon with the main endokarstic levels. (Altitudinal reports synthesis from: Monney 2012, Tassy et al. 2013 and Sadier 2013. In the same way as high Mio-Pliocene levels, the lower endokarstic levels (+ 30 m, + 45 m) fit with the alluvial terrace levels. Black vertical lines show horizontal drains linked to the same karst network.

L'invasion des galets à + 45 m dans le conduit de Spectaclan sous-tendrait même plutôt l'inverse : des conduits endokarstiques paragénétiques formés antérieurement à l'établissement des niveaux fluviaux à + 30 m et + 45 m, permettent l'invasion des galets dans le karst seulement une fois les conduits vidangés de leurs argiles paragénétiques, (Harmand et al., 2017). Néanmoins, l'hypothèse d'une karstification au moins partiellement pléistocène, des niveaux à + 30 m, + 15 m et + 6-8 m n'est pas à exclure.

Quelques dizaines de milliers d'années peuvent suffire à générer des conduits souterrains plurimétriques, ce qui rend plausible la karstogénèse, au moins partielle, de niveaux subhorizontaux en relation avec des dynamiques pléistocènes (Ford et Williams, 1989 ; Harmand et al., 2017).

La correspondance endokarst / niveaux fluviaux à + 30 m et + 45 m, pourrait alors découler de niveaux de base relativement stables qui ont pu contribuer à développer des réseaux déjà existants.

Nous n'avons cependant, pour l'instant, pas retrouvé de remplissages fluviaux grossiers (galets pluricentimétriques), pouvant potentiellement correspondre aux niveaux à + 30 m et + 15 m). Le niveau de rivière à + 45 m serait-il alors particulier ? L'invasion des galets dans les réseaux à + 45 m suppose une proximité directe entre le karst et la rivière, ce qui placerait les conduits souterrains à + 45 m en position de pertes juxtafluviales. Il serait intéressant de mener des investigations plus poussées sur l'ensemble des cavités de basse altitude des Gorges, afin de réaliser un inventaire plus complet de leurs éventuels remplissages fluviaux.

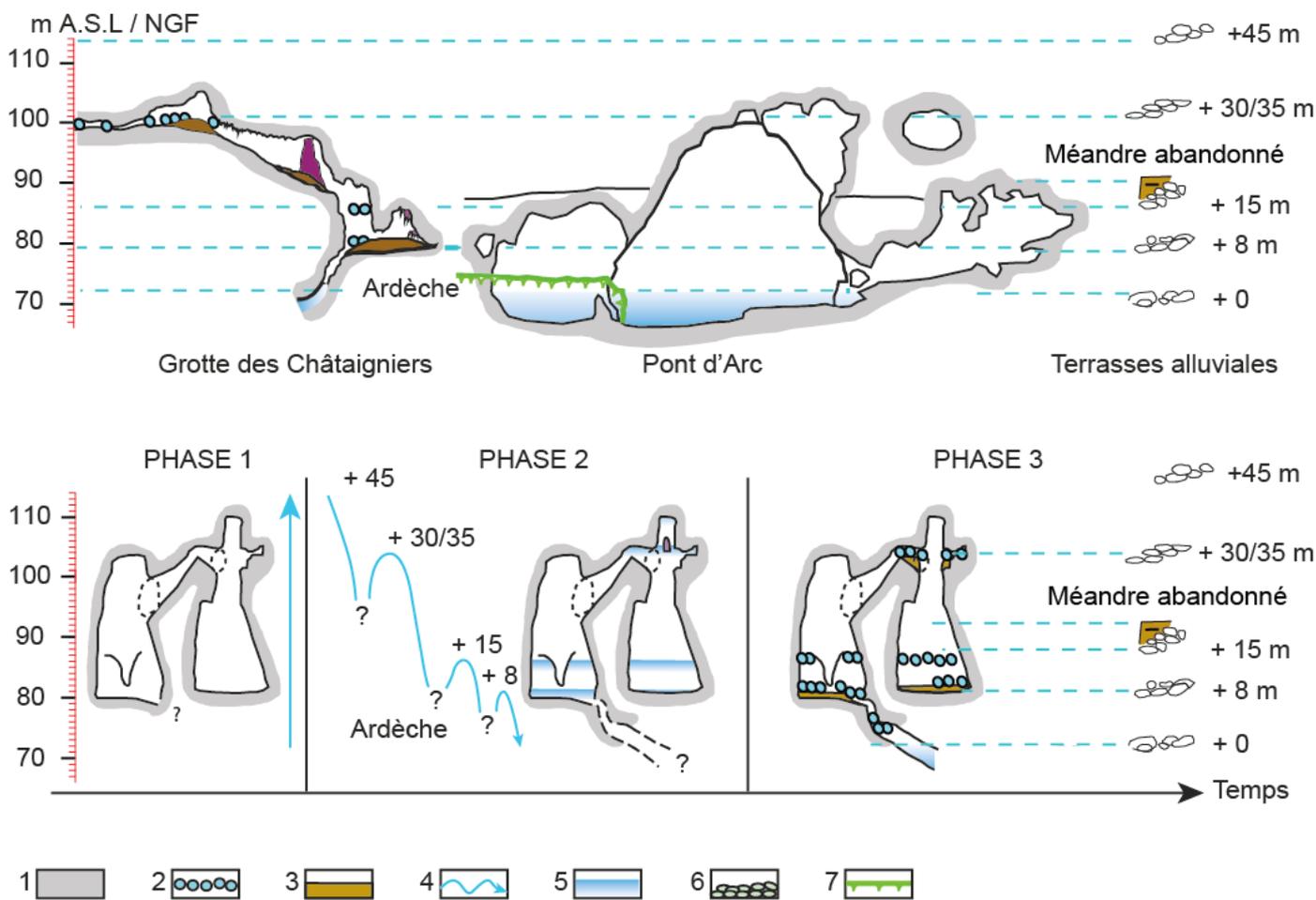


Figure 87 : Relations entre les morphologies visibles dans la grotte des Châtaigniers et les terrasses alluviales de l'Ardèche et proposition d'un modèle d'évolution de la cavité. La partie supérieure de la figure est une représentation en coupe du puit terminal de la grotte des Chataigniers et du Pont d'Arc. La partie inférieure de la figure représente seulement une coupe des Châtaigniers, mais sous un autre angle. 1. Encaissant calcaire ; 2. Nodules de calcite ; 3. Argiles ; 4. Variations du niveau de la rivière ; 5. Niveaux maximums de la rivière ; 6. Terrasses alluviales de l'Ardèche ; 7. Surface d'érosion alluviale à + 5 m.

Relationships between the endokarst and the River Ardèche : evolution model proposal for the Châtaigniers cave. Upper part is a simplified cross section of the Châtaigniers cave and the Pont d'Arc. Lower part represent cross sections of the Châtaigniers cave taken from another orientation. 1. Limestone; 2. Calcite nodes; 3. Clays; 4. Evolutions of the river water table; 5. Maximum river levels; 6. Alluvial deposits; 7. Eroded alluvial surface at + 5 m.

5.2 L'enregistrement de l'évolution de la rivière dans les conduits karstiques.

Bien que ne présentant pas de remplissages de galets, les conduits plus bas en altitude de la grotte des Châtaigniers semblent néanmoins, également, pouvoir être discutées en fonction des évolutions de la rivière.

Des relations entre les conduits karstiques situés à 80 m NGF et à 100m NGF du Pont d'Arc et de la grotte des Châtaigniers peuvent être avancées car ils ont en commun une organisation structurale Nord-Sud et des morphologiques caractéristiques de système noyé. Il est probable que les paléo-cavités du Pont d'Arc et les réseaux étagés de la grotte des Châtaigniers appartiennent à une même évolution karstogénique. Etant donné la présence de ces morphologies au sein même du Pont d'Arc, la phase de karstogénèse qui leur est associée est vraisemblablement antérieure au recoupement du pédoncule puisque les témoins endokarstiques sont encore conservés au sein de l'arche, perpendiculairement au sens du recoupement (ouest-est). Leur mauvais état de conservation pousse également à raisonner en ce sens, les formes complètes ayant par la suite, été vraisemblablement érodées par le passage de la rivière sous l'arche. Ces observations posent avec plus de poids l'hypothèse de la pré-existence de conduits endokarstiques au sein du pédoncule, avant leur recoupement au niveau de ce qui est aujourd'hui le Pont d'Arc.

La mise en évidence d'une relative convergence altitudinale entre les niveaux des terrasses de l'Ardèche et ces micro-morphologies pariétales (cristallisation) invite à les associer dans un même modèle d'évolution, en lien avec des phases de forte dynamique de sédimentation alluviale engendrant des remontées locales du niveau de base karstique. Les oscillations climatiques pléistocènes peuvent être un des moteurs des variations morpho-fluviatiles du lit de l'Ardèche (figures 87 et 88). Dans cette perspective, la mise en charge des conduits karstiques correspondrait aux périodes d'aggradation sédimentaire de l'Ardèche associées aux péjorations climatiques pléistocènes. Dans la grotte des Châtaigniers, l'impact des fluctuations pléistocènes de la rivière sur l'endokarst semble limité à des mises en charge périodiques qui seraient à l'origine de la cristallisation présente sur les parois, voire sur des pendants de voûte. L'âge de cette phase karstogénétique reste néanmoins difficile à évaluer : les morphologies noyées de pendants de voûte peuvent-elles être raccordées à la lente remontée pliocène du niveau de base ?

L'importance des aggradations pléistocènes a peut-être également pu permettre le développement de phases karstogéniques notamment celles des morphologies noyées dans la grotte des Châtaigniers, et celles des drains subhorizontaux des conduits parallèles au recoupement des grottes du Pont d'Arc. Dans le cas de ces grottes, les conduits parallèles au recoupement s'inscrivent vraisemblablement dans une temporalité quaternaire, tant par leur orientation

(celle du recoupement) que par leur évidente proximité altitudinale avec les banquettes à + 5 m. En considérant les planchers stalagmitiques scellant les pendants de voûte dans la grotte des Châtaigniers comme des terminaux *ante-quem* (Desachy, 2005), leur datation par les méthodes radiométriques Uranium/Thorium (Quinif, 1989 ; Pons-Branchu et Quinif, 2018) ou Uranium/Plomb (Schoene, 2014) pourrait permettre de replacer ces formes dans une chronologie plus contrainte, en déterminant un âge minimal pour la karstogénèse en régime noyé. Les anciens conduits visibles dans le Pont d'Arc sont aujourd'hui réduits à l'état de paléo-karst, trépanés, défoncés et recalibrés latéralement par l'érosion fluviale. Certains témoins morphologiques sont cependant conservés, ce qui souligne l'antériorité de ces conduits karstiques sur le recoupement engendré par l'action de la rivière.

5.3 Le sapement latéral de la concavité du méandre par la rivière.

L'expression des fluctuations pléistocènes de la rivière se rapporte dans le paysage extérieur aux différents niveaux des terrasses. Elles sont majoritairement composées de galets dont certains, de taille décimétrique, ont été associés aux conditions périglaciaires quaternaires (Labrousse, 1977) . La chronologie de ces terrasses reste encore discutée (Genuite et al., 2018a). Les auteurs semblent s'accorder sur une datation pléistocène moyen-supérieur des terrasses à gros cailloutis (Labrousse, 1977 ; Pascal et al., 1989) qui sont rapportées à d'anciens niveaux de la rivière ayant pu contribuer au sapement des parois de l'escarpement sur plusieurs dizaines de mètres. L'impact de l'abrasion et le sapement latéral de la rivière sur les parois de la concavité du pédoncule a dû participer à l'amincissement de ce dernier et ce, à tous les niveaux de l'arche (depuis le haut de la voûte, jusqu'au niveau actuel de la rivière).

D'autres morphologies témoignent également de l'action de la rivière, comme les banquettes calcaires à + 5 m qui s'avancent au-devant de l'arche en amont, rive droite. Ces dernières sont peut-être aussi à mettre en relation avec les fluctuations pléistocènes. Debard (1988) et Bravard (1993) discutent de ces dernières et les mettent en lien avec les phases d'enfoncement du lit fluvial. Si on considère que les principales terrasses alluviales de l'Ardèche sont liées aux périodes froides du Quaternaire (Labrousse, 1977), les phases d'enfoncement du lit, voire de surcreusement du *bedrock* seraient, d'après ces auteurs, à rapporter aux épisodes interglaciaires, contrairement aux phases d'aggradation fluviale, représentées par les niveaux de galets.

Bien qu'il soit, pour le moment, difficile de dater cette phase d'incision. Une des questions-clés pour appréhender la mise en place du recoupement est celle de l'âge des banquettes. La conservation de ces dernières au-devant même du recoupement

questionne : les banquettes se poursuivent-elles sous le méandre ? Le paléo-méandre de la Combe d'Arc a-t-il continué d'inciser son talweg rocheux jusqu'à un niveau proche du talweg actuel de l'Ardèche ? Malheureusement, les dépôts en provenance des versants et ceux déposés dans le méandre masquant une grande partie des morphologies de la roche-mère, cette couverture sédimentaire empêche une lecture claire de la continuité supposée des banquettes le long du méandre.

5.4 Les modalités du recouplement de la Combe d'Arc.

La présence des vides spéléologiques précédemment mis en évidence dans le pédoncule, a pu jouer un rôle dans ses recouplements souterrains, notamment aux niveaux à 80 m et à 100 m NGF. Une correspondance altitudinale existe en effet entre les niveaux karstiques

et alluviaux. Néanmoins, la présence d'un paléo-karst dans le pédoncule n'est pas le seul facteur ayant pu faciliter la mise en place d'un recouplement à cet endroit précis. D'autres éléments visibles ont également pu jouer un rôle dans ce dernier. La direction structurale ONO/ ESE peut sans doute être évoquée comme ayant pu favoriser la mise en place de conduits recoupant le pédoncule puisque les deux conduits à 80 m NGF, en rives gauche et droite, se développent selon cette direction de fracturation.

Enfin, la figure 88 illustre, dans la partie amont de l'arche, à 90 m NGF, la présence d'un joint de strate bien visible qui a également pu être un élément favorisant le passage de la rivière dans cette zone de fragilité du pédoncule.

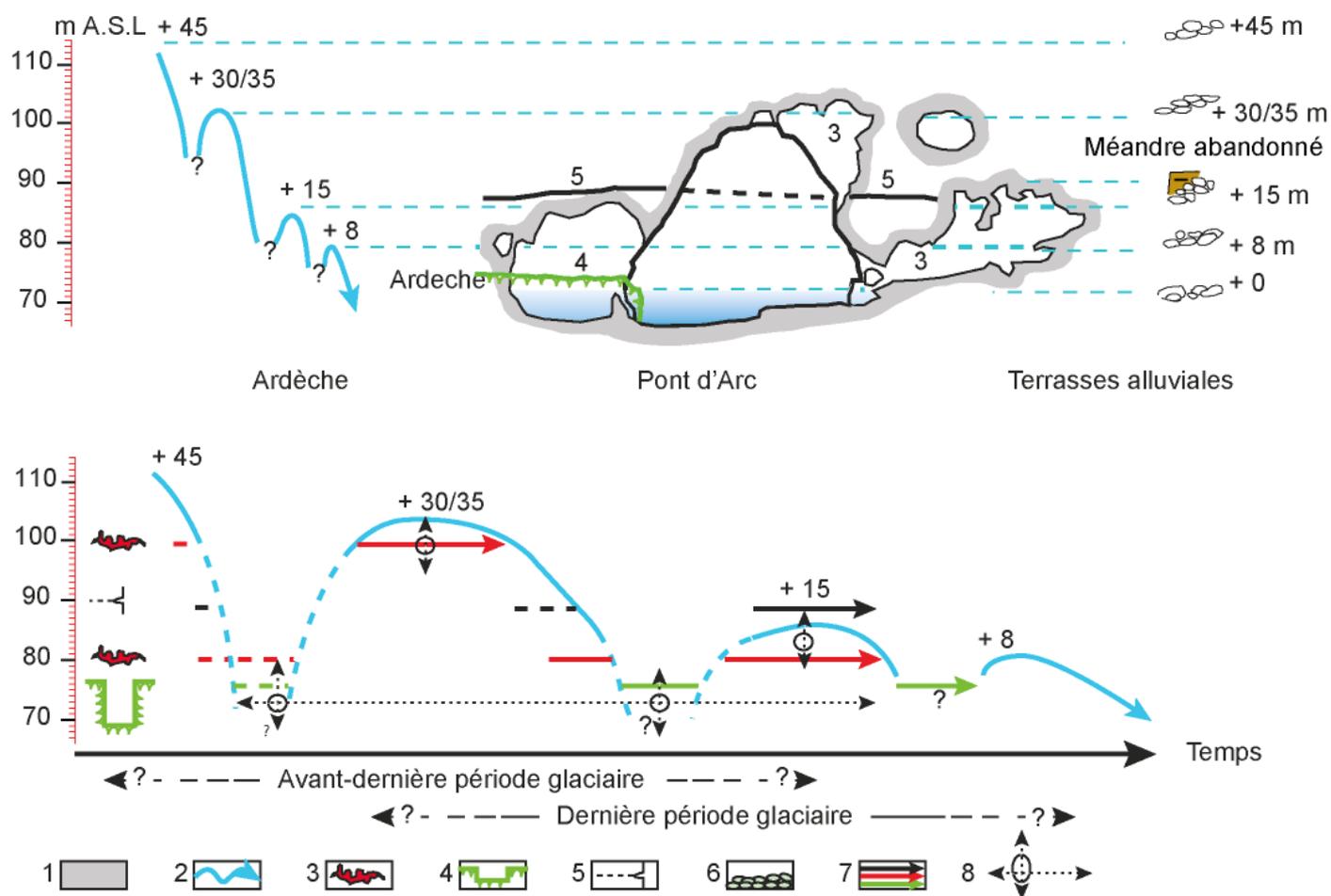


Figure 88 : Frise chronologique des objets géomorphologiques marquant et intervenant dans le recouplement du méandre en fonction de l'altitude et des oscillations de l'Ardèche.

1. Pont d'Arc, 2. Variations du niveau de l'Ardèche, 3. Conduits endokarstiques, 4. Banquettes à +5 m, 5. Joint de strate, 6. Niveaux alluviaux, 7. Mise en relation théorique des faiblesses morphostructurales du pédoncule avec les niveaux alluviaux de l'Ardèche au cours du temps : (Vert : incision des banquettes, rouge : rôle de l'endokarst, noir : joint de strate), 8. Possibilités de recouplement.

Chronological model of the shortcut possibilities, according to the speleogenesis, the limestone sedimentation, and the river variations. 1. Pont d'Arc, 2. Ardeche evolution, 3. Endokarstic levels, 4. +5 m erosion alluvial surfaces, 6. Alluvial levels, 7. Theoretical relationships between the river and the morphostructural weaknesses which could have led to the shortcut: (green: talweg drilling, red: endokarstic drains, black: stratification weakness in the limestone strata). 8. shortcut possibilities.

Ces différents éléments ont pu être autant de points de faiblesse qu'aurait exploité le sapement latéral de la rivière ; qu'il s'agisse du niveau endokarstique visible dans la voûte de l'arche (100 m NGF), des niveaux des terrasses + 30/35 m ; d'un joint de strate marqué dans l'assise calcaire vers 90 m NGF, mais aussi de la présence des conduits souterrains orientés ouest-est vers 80 m NGF.

La terrasse du méandre abandonné constitue également un élément majeur. Elle marque une période où la rivière passait toujours dans le méandre. Son altitude est assez proche du joint de strate du Pont d'Arc dont le niveau correspond exactement à celui de la terrasse à + 15 m. Cette phase du passage de la rivière en ferait un moment idéal pour le recouplement.

L'importance de la charge alluviale couplée à des écoulements pléistocènes potentiellement plus puissants que ceux actuels (Jacob et al., 2006), plaide sinon pour une mise en place rapide des conditions d'un recouplement, tout au moins pour un amincissement efficace du pédoncule. La conservation de la partie sommitale de ce dernier sous forme d'une arche, ainsi que celle des témoins endokarstiques à 80 et 100 m NGF laisse penser que le recouplement de méandre a pu être rapide.

6. Conclusion

Ce chapitre a essayé de mettre en lien des objets morphologiques observés dans les conduits karstiques avec l'étagement des terrasses alluviales. L'étude de l'étagement des drains karstiques, de leurs morphologies et de leurs remplissages spécifiques a donc été menée avec la même méthode de contrainte altitudinale que celle sur les terrasses alluviales. L'investigation de Spectaclan et de la grotte des Châtaigniers a permis d'observer la généralisation des morphologies paragénétiques sur les conduits karstiques de basse altitude. La plupart d'entre eux semblent antérieurs aux phases d'aggradation de la rivière ayant débouché sur les niveaux à + 15/+30/+45 m. Ils appartiendraient donc à une autre histoire, plus ancienne. Cette antériorité des réseaux karstiques a néanmoins pu permettre à ces conduits d'enregistrer les évolutions de l'Ardèche par le biais de dépôts de galets, d'argiles, et peut-être de marques épiphréatiques sur les parois. La grotte des Châtaigniers s'est révélée être un témoin de premier ordre pour étudier les modalités du recouplement. Sa position stratégique et son altitude - clé ont permis de comparer ses morphologies avec celles du Pont d'Arc et de replacer ce dernier en lien avec /en rapport avec les fluctuations quaternaires de la rivière. L'identification des différentes faiblesses structurelles du Pont d'Arc par l'intermédiaire du modèle tridimensionnel a permis de poser les jalons géomorphologiques des causes potentielles du recouplement, sans pour autant en privilégier une particulièrement, mais en mettant en avant

l'importance des niveaux de la rivière pour discriminer les étapes de la genèse du Pont d'Arc.

L'étude des réseaux souterrains a apporté des précisions quant aux modalités du recouplement de méandre, mettant en évidence la particularité de la terrasse + 15 m face aux nombreux éléments de faiblesse au niveau du recouplement. Ce niveau fluvial semble crucial pour comprendre les paléodynamiques du méandre. Son étude est donc primordiale pour mieux contraindre le recouplement dans le temps. Néanmoins, ce niveau reste faiblement représenté dans la grotte des Châtaigniers et de manière générale sur l'ensemble des conduits endokarstiques des gorges de l'Ardèche. Il est cependant bien cartographié dans la plaine de Vallon Pont-d'Arc et présente les replats aux plus grandes extensions spatiales, à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche. Le sol actuel de la Combe d'Arc s'élève à + 19 m, sa composition et son épaisseur nous sont inconnues. Il cache également les morphologies du *bedrock* de la Combe d'Arc, issues d'un temps où l'eau s'écoulait encore dans le méandre. Ces dernières présentent-elles la même facture que le talweg actuel des gorges de l'Ardèche ? Quelles peuvent être l'épaisseur et la composition de la charge fluviale ? Répondre à ces questions nécessite de travailler directement dans la Combe d'Arc, sur les sédiments du méandre abandonné, afin de mieux comprendre leur mise en place et ce qu'ils cachent.

Photographies de terrain

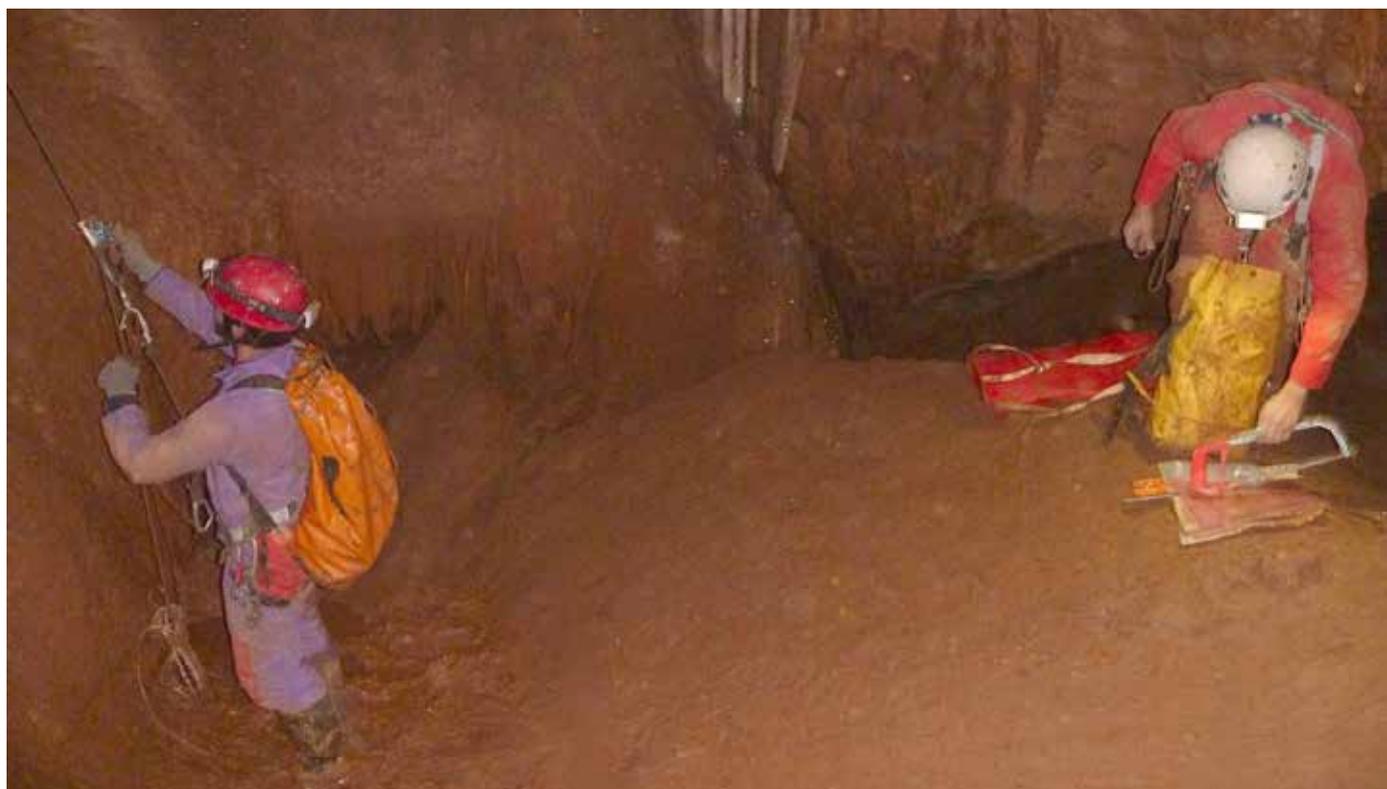


Photo 7 : exploration de la grotte des Châtaigniers. Crédits : T. Marchand, 2017

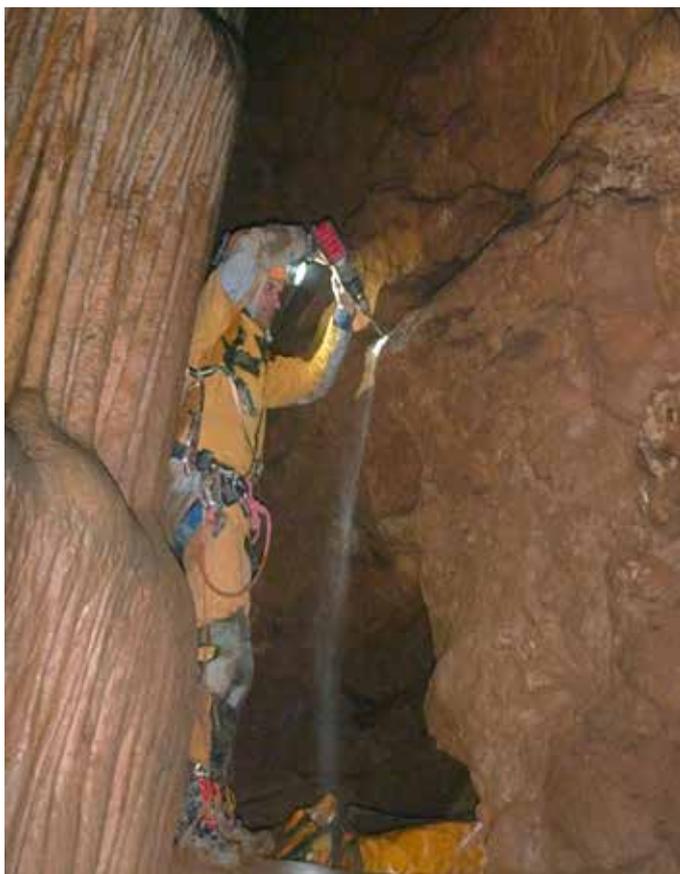


Photo 8 : équipement de la grotte des Châtaigniers en vue de la retopographie. Crédits : P. Génuite, 2018



Photo 9 : Morphologies paragenétiques en pied d'éléphant dans la grotte de Spectaclan. Crédits : S. Jailliet, 2019



Photo 10 : Les paléo-morphologies endokarstiques de la rive gauche du Pont d'Arc, ainsi que les banquettes rocheuses à l'amont de ce dernier (côté gauche de l'image). Vue depuis la rive droite, à l'intérieur de l'arche. Crédits : K. Génuite, 2018.



Photo 11 : Croquis de terrain du banc de galets de l'Ardèche logé à + 45 m dans la grotte de Spectaclan. Crédits : S. Jaillot, 2019.

CHAPITRE 5

IMAGERIE DU SOUS-SOL DE LA COMBE D'ARC PAR RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE (ERT).

L'étude des sédiments de la Combe d'Arc, tant dans leur organisation géométrique que dans leur nature, permettrait d'apporter plus d'informations sur le fonctionnement du méandre et son abandon. Afin d'investiguer les remplissages sédimentaires du méandre, la méthode de prospection par tomographie électrique (ERT) a été déployée sur l'ensemble du méandre abandonné. Contrairement aux forages et aux carottages sédimentaires, cette méthode permet d'investiguer le sous-sol de manière non destructive. Ce chapitre est le fruit de deux campagnes de géophysique réalisées en collaboration avec A. Revil et M. Gresse du laboratoire ISTERRE.

La Tomographie de la Résistivité Electrique (ERT – Electrical Resistivity Tomography) est une méthode « classique » pour prospecter en domaine sédimentaire, notamment pour imager le substratum rocheux. Ses applications sont variées : l'hydrogéologie souterraine, la gestion agricole, la caractérisation des horizons pédologiques, la présence de permafrost, ou encore la profondeur d'un substratum rocheux (Zhou et al., 2000 ; Samouëlian et al., 2005 ; Jardani et al., 2006). Elle offre des informations complémentaires aux études géomorphologiques de surface car elle permet de renseigner la nature et la géométrie du sous-sol. C'est en revanche une méthode moins couramment utilisée en milieu karstique, mais qui a déjà fait ses preuves (Cardarelli et al., 2006 ; Valois et al., 2010 ; Robert et al., 2011 ; Carrière et al., 2013 ; Chalikakis et al., 2011 ; Valois et al., 2010 ; Jaillot et al., 2018). Les mesures de la résistivité électrique ont été développées à la fin des années 1970 (Edwards, 1977). Basée sur l'étude de la capacité des matériaux à s'opposer au passage d'un courant électrique (résistivité), cette technique d'observation permet de mettre en évidence les hétérogénéités du milieu (Scapozza et Laigre, 2014). Les résistivités obtenues sur le terrain sont des résistivités apparentes mesurées, non interprétables directement car influencées par les différentes couches traversées et par le dispositif d'acquisition (Loke et Barker, 1996).

Cette méthode appliquée aux géométries et aux sédiments alluviaux de l'Ardèche complète les données acquises par l'approche géomorphologique et l'étude spéléogénique des grottes des Châtaigniers

et de Spectaclan. En premier lieu, les observations morphologiques réalisées aux alentours de la Combe d'Arc permettent de contraindre le corps sédimentaire du méandre dans un modèle théorique. Les résultats de la tomographie électrique avec les inversions 2D et 3D des données sont ensuite comparés à ce modèle. Enfin, les résultats de la géophysique sont discutés avec deux objectifs : d'abord celui d'affiner le modèle d'emboîtement des niveaux alluviaux et des morphologies fluviales de la rivière, ensuite de mieux caractériser les morphologies enfouies pouvant être associées à l'abandon du méandre et à l'ouverture du Pont d'Arc.

1. Modèle géomorphologique théorique du sous-sol de la Combe d'Arc.

La Combe d'Arc incise les calcaires à rudistes à faciès Urgonien du Barrémien supérieur (Masse, 1976 ; Pascal et al., 1989). La structure est potentiellement hétérogène, tant en terme de fracturation que de porosité interne, ce qui peut rendre l'interprétation des résultats complexe (Chalikakis et al., 2011 ; Carrière et al., 2013).

Les valeurs de résistivité mesurées dépendent en partie de la nature de l'encaissant étudié, qui lui-même peut enregistrer des résistivités variables (Palacky, 1988) selon la complexité interne, à l'échelle macroscopique (structures, failles et fractures pour les calcaires de la Combe d'Arc), comme à l'échelle microscopique. Rappelons que la composition des sables et des limons ardéchois est potentiellement riche en éléments conducteurs comme les smectites/montmorillonites (Labrousse, 1977).

L'interprétation des profils de résistivité électrique nécessite donc un calage des valeurs enregistrées. Dans l'objectif de bien contraindre les résultats de la prospection ERT, ces derniers ont été couplés à l'étude géomorphologique des affleurements, ainsi qu'à une étude des propriétés pétrophysiques et géochimiques à la fois de l'encaissant et des sédiments, afin d'établir un premier modèle théorique de l'organisation interne des dépôts.

1.1 Organisation des dépôts sédimentaires de la Combe d'Arc.

Des observations de surface et les études menées par Sheffer et al. (2003) ont montré que le méandre abandonné avait été le siège de dépôts fins sablo-limoneux caractéristiques des limons de débordement.

Sheffer et al. (2003) qui ont analysé ces dépôts sur environ 3,30 m de profondeur dans deux tranchées, les ont datés par les méthodes ¹⁴C et OSL. Ces auteurs reconstituent ainsi les 3,30 derniers mètres d'aggradation du méandre par une succession de dépôts fins sur plus de 8700 ans. L'âge et la morphométrie de ces derniers confirment leur mise en place lors d'épisodes de crues au cours de l'Holocène. Sheffer et al. (2003) identifient des apports sablo-limoneux alternant parfois avec des horizons pédologiques dans la coupe ATM1, ainsi que des apports de colluvions dans la tranchée STM4 (voir figure 89).

Ces derniers sont les signes du caractère épisodique de ces aggradations (dépôts instantanés des crues) avec parfois de longues périodes sans dépôts sédimentaires (développement des sols et apports de colluvions issus du versant). A la faveur de ravinements ou de travaux et tranchées lors de l'aménagement des abords du Pont d'Arc pour l'opération « Grand Site »

(www.grandsite-combedarc-ardeche.fr), nous avons pu réaliser de nouvelles observations. Celles-ci complètent les informations sur l'organisation des dépôts sédimentaires dans le méandre recoupé. Trois sites présentent des galets au sein du remplissage alluvial.

La découverte des galets place le toit de ces derniers aux alentours de 84 m / 85 m NGF. La taille du matériel alluvial (plusieurs centimètres de diamètre) permet de l'associer à des périodes où la rivière avait un fonctionnement pérenne dans le méandre de la Combe d'Arc. Cette hypothèse est étayée par la correspondance altitudinale du niveau du toit des galets de la Combe d'Arc avec la terrasse de galets à + 15 m visible dans toute la plaine de Vallon Pont d'Arc (Genuite et al., 2018a). Les sédiments fins (argiles et sables) ont été, quant à eux, identifiés par Sheffer et al. (2003) comme datant de l'Holocène, au moins sur les trois premiers mètres de sédiments. La mise en place de ces derniers s'est vraisemblablement effectuée lors de fortes crues de l'Ardèche dont les eaux envahissaient le méandre alors abandonné (plaine d'inondation).

En parallèle aux recherches de Sheffer et al. (2003), un témoignage photographique de la crue de 1890 confirme le passage de l'eau dans le méandre lors de crues exceptionnelles : le niveau de l'Ardèche était monté de 21 m en 1827 (Mardigny, 1860) et de 19,5 m au Pont d'Arc en 1890 (Bravard, 1993).



Figure 89 : Photographie de la crue de 1890. Le niveau de l'eau a dépassé celui de la Combe d'Arc, l'Ardèche reprend son ancien cours, le temps de la crue. (Edition C. Artige et E. Beaumel).

Photograph of the 1890 Ardèche flood. The water reached the meander threshold and re-used its old path along the abandoned meander. (C. Artige and E. Beaumel edition).

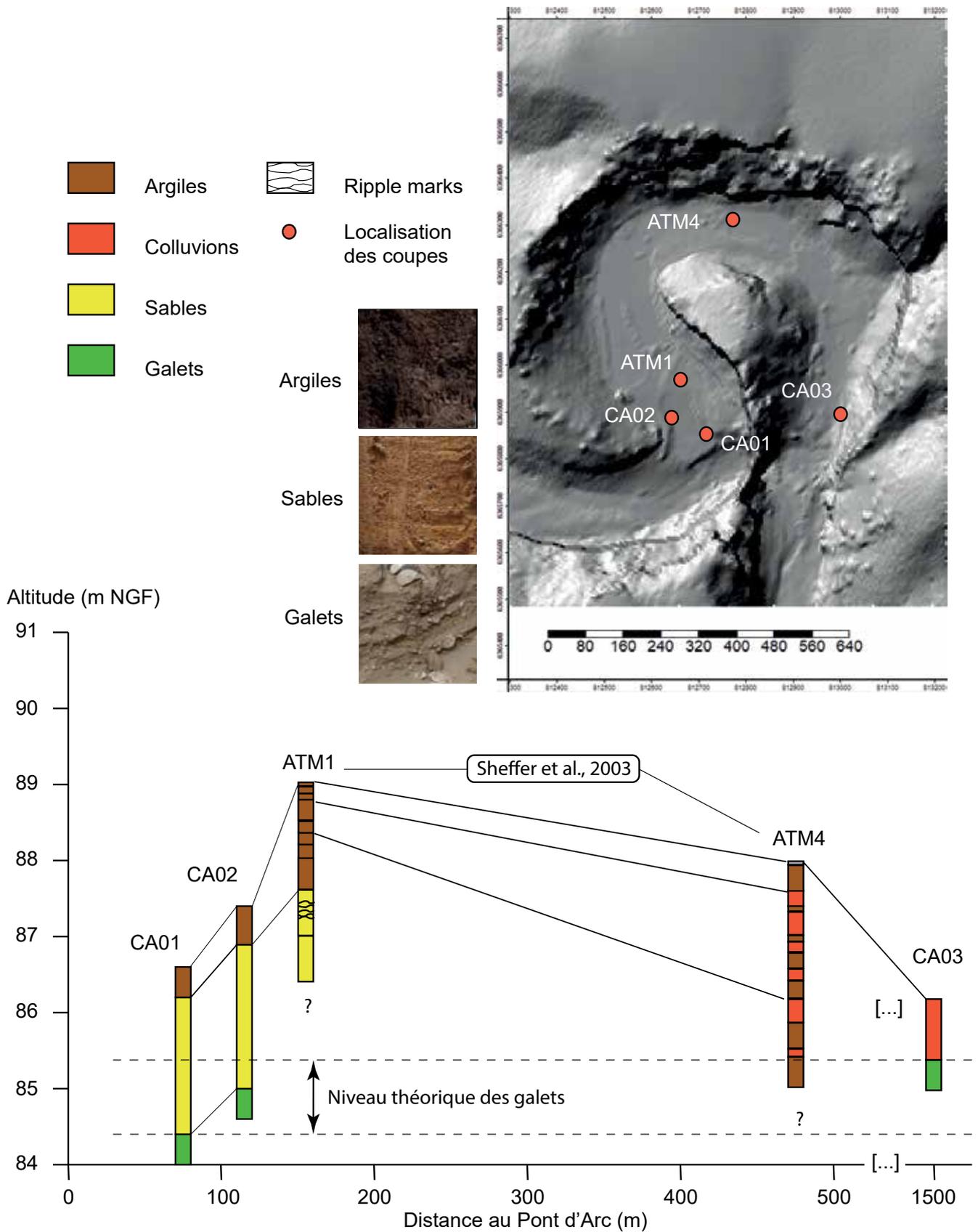


Figure 90 : Localisation des coupes sédimentaires et des tranchées observées dans le méandre de la Combe d'Arc. Les deux sondages de Sheffer et al. (2003) n'avaient pas révélé de niveaux de galets et graviers mais les tranchées notées ici CA01, 02 et 03 ont dégagé le sommet du toit d'un remplissage de galets. Une transition sable/argile semble perceptible au sommet des tranchées CA01 et CA04, de même que dans la coupe ATM1 de Sheffer et al. (2003).

Location map of the sedimentary cross sections made inside the meander. Two of them reveal some pebbles at their basis, and a sand-clay transition in the upper parts.

Lors de ces épisodes extrêmes, engendrés par des précipitations exceptionnelles sur le haut - bassin cévenol de l'Ardèche, l'arche du Pont d'Arc n'est pas suffisante pour assurer le transit de la totalité du débit de crue. L'Ardèche ré-envahit alors le méandre de la Combe d'Arc, générant une montée des eaux de plusieurs dizaines de mètres (17,5 m en 1980) dans la plaine de Vallon Pont d'Arc par un effet de barrage lié au rétrécissement du Pont d'Arc. Les très hauts niveaux atteints par les crues expliquent la surélévation du méandre abandonné par rapport aux terrasses à + 15 m (Sheffer et al., 2003).

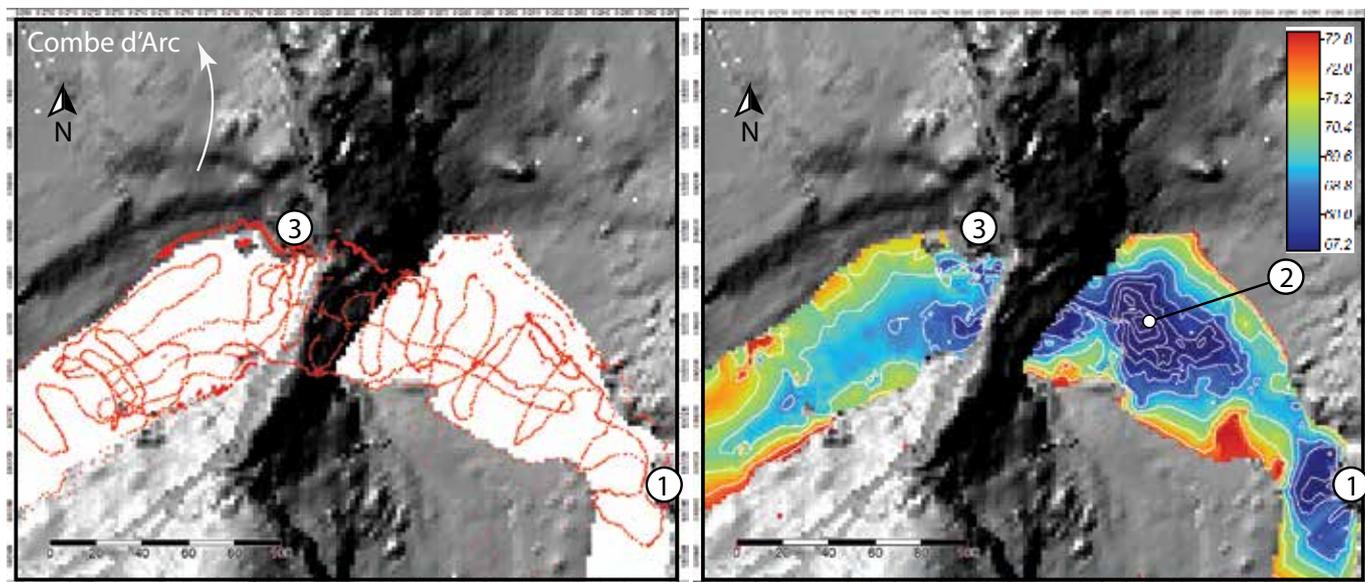
1.2 Le bedrock et les banquettes à + 5 m.

Afin d'appréhender au mieux les modalités du recoupement du méandre, différents calages topographiques du bedrock ont été effectués. Le niveau du talweg actuel a été identifié lors d'une plongée, en parallèle d'une mission de levés bathymétriques couplant un échosondeur à un dGPS. Le tronçon de l'Ardèche investigué allait du rapide dit « du Charlemagne » (en amont du Pont d'Arc) jusqu' au droit de la grotte de Paul et Virginie, sous le belvédère du Pont d'Arc (en aval de l'arche, voir figure 91).

Ces relevés ont permis de caler la base du creusement moyen actuel de la rivière autour de 67 m NGF à l'aval du Pont d'Arc. Un surcreusement a également été localisé à l'aval de l'arche avec une mouille descendant à 63 m NGF (figure 91). Celle-ci reste limitée au débouché de l'arche et ne se poursuit pas vers l'amont (qui reste à des altitudes proches de 67 m NGF).

Cette morphologie de mouille semble donc locale. L'étroit passage que représente l'arche a peut-être concentré les flux, générant un sucreusement du talweg rocheux. On constate également, à l'aval du Pont d'Arc et dans la convexité du méandre (rive droite), que le dépôt de galets se prolonge sous l'eau et forme un lobe, cachant ainsi une partie des morphologies du talweg rocheux. Enfin, au droit de l'arche proprement dite, le bedrock présente des morphologies de marmitage de plusieurs mètres d'extension.

Visible sur l'ensemble des gorges de l'Ardèche (notamment sur la partie aval), un niveau de banquettes rocheuses se développe à environ + 5 m par rapport au niveau d'étiage de la rivière. Comme précédemment évoqué (cf. chapitre 4), ce niveau peut être suivi depuis la plaine de Vallon Pont d'Arc jusqu'au méandre du Ranc Pointu, au terme aval des gorges. L'une de ces banquettes s'avance au-devant même de l'arche à 76 m NGF. Elle n'est pas encore entièrement érodée par l'incision fluviale de l'Ardèche. La présence de ce témoin morphologique suggère une existence probablement antérieure à l'ouverture de l'arche. La configuration extérieure de ces banquettes pose la question de l'âge de ces surfaces d'érosion et de leur présence au sein du méandre abandonné, sous les sédiments fluviaux actuellement en place. L'ensemble de ces observations topographiques permet de proposer un premier modèle géométrique du sous-sol de la Combe d'Arc, et d'apporter des contraintes morphologiques directes, utiles pour interpréter ensuite les résultats de la tomographie électrique.



Campagne bathymétrique
Echosondeur bifréquence + dGPS Trimble Geo7x
LiDAR externe

Carte du talweg de l'Ardèche
Triangulation Delaunay 2D (SAGA GIS)

Figure 91 : Bathymétrie du talweg de l'Ardèche sous le recoupement du Pont d'Arc. Le niveau du talweg se situe en moyenne autour de 67 m NGF. Légende : 1. Grotte de Paul et Virginie ; 2. Surcreusement du talweg à 63 m NGF. 3. Banquettes à + 5 m.

Bathymetric map of the Ardèche River talweg underneath the Pont d'Arc shortcut. The bedrock is located at an average 67 m A.S.L. Key :1. Paul and Virginie cave; 2. Local pool system at 63 m A.S.L. + 5 m limestone water tables.

2. Acquisition des profils de tomographie électrique ERT.

2.1 Interprétation de la résistivité électrique.

En accompagnement des mesures ERT et dans l'objectif de bien contraindre les caractéristiques des sédiments accumulés dans la Combe d'Arc, la détermination de la capacité d'échange cationique des dépôts a été effectuée sur 8 échantillons de formations issues de la Combe d'Arc (Chapman, 1965 ; Rhoades, 1982). En effet la conductivité électrique est la somme de deux contributions. La première est une contribution de volume contrôlée par la teneur en eau et la salinité de l'eau porale. La seconde est une contribution dite de surface (à la surface des grains dans la double couche électrique) et se trouve contrôlée par la capacité d'échange cationique (CEC) du matériau, très lié à la minéralogie de la phase argileuse. Les échantillons ont été prélevés au sein de la coupe CA02 dans la Combe d'Arc (figure 89). Cette donnée est essentielle à l'interprétation des résultats des campagnes de géophysique (Gresse, 2018).

La CEC représente la capacité maximale de cations échangeables qu'un sol peut retenir à un pH donné (Chesworth 2008), ce qui correspond à la somme des sites d'échange occupés par des cations (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, H⁺ et Al³⁺). Elle s'exprime en centimoles (Cmol) de charge par kilo de sol sec.

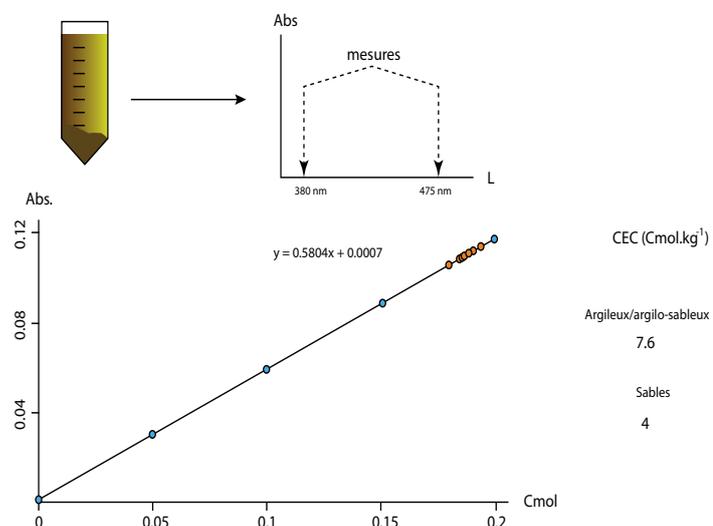


Figure 92 : Schéma théorique du calcul de la CEC par mesure de l'absorbance de la solution restante avec un spectrophotomètre. Les valeurs de CEC obtenues ont été moyennées sur 5 mesures pour les échantillons argileux/argilo-sableux pour une valeur assez faible de 7.6. Les sables ont été moyennés sur 2 échantillons à une valeur très faible de 4.

CEC methodology for absorption measurement using spectrophotometer. Clay mixed with sand sediments samples were averaged to a 7.6 value and sand sediments samples to a CEC value of 4.

Elle représente également le pouvoir tampon du sol, c'est-à-dire sa résistance au changement de pH. Elle est fortement liée aux teneurs en argile et en matière organique.

Nous avons déterminé la CEC par l'intermédiaire du protocole à la cobalthexamine (Co(NH₃)₆Cl₃, couramment utilisé à des fins agronomiques (Orsini et Remy, 1976). Le protocole a été mené/appliqué sur sept échantillons de sédiments du méandre, de granulométries différentes (des sables aux argiles). Ces prélèvements ont été effectués dans la partie amont du méandre. Le principe de la méthode de CEC par la cobalthexamine repose sur un échange ionique entre une solution mère de cobalthexamine à la concentration connue (ici NF X31-130,1993 [0.0166 mol.L⁻¹]), et un prélèvement de sédiments. En faisant réagir les ions de cobalthexamine avec ceux du dépôt, il est possible d'évaluer, par mesure colorimétrique d'absorption des échantillons, la quantité d'ions ayant réagi, et ainsi en déduire la capacité maximale d'échange cationique du prélèvement de sédiments.

Pour chaque mesure, 2 g de sédiment ont réagi avec 40 mL de cobalthexamine à [0.0166 mol.L⁻¹]. Après un passage au mélangeur pendant 1h, les échantillons ont été centrifugés 6 minutes pour séparer la solution du soluté (le sol). En parallèle, cinq échantillons maîtres ([Cobalthexamine]/[Eau désionisée] à 100%, 75%, 50%, 25%, 0%) ont également été préparés pour étalonner le spectre d'absorbance (Ciesielski et al., 1997). Les échantillons sont analysés au spectrophotomètre, aux longueurs d'onde 475 nm et 380 nm, afin d'éliminer d'éventuelles erreurs de mesures liées à la matière organique dissoute. Les valeurs d'absorbance calculées sont converties en concentration selon la droite de régression calculée avec les échantillons tests.

La CEC des 8 échantillons donne des valeurs assez faibles (une moyenne de 7.6 meq/100 g pour des échantillons argileux et argilo-sableux et autour de 4 meq/100 g pour les sables). Ces valeurs sont cohérentes avec les observations réalisées dans la Combe d'Arc dont les dépôts sont composés de sédiments sableux parfois dès la surface (Sheffer et al., 2003). De faibles valeurs sont susceptibles de révéler des zones de résistivité importante pour les sables. Les mesures de CEC ainsi obtenus donnent des valeurs faibles, signe d'une forte teneur en sédiments sableux (Ersahin et al., 2006).

Nous avons tenté d'estimer la conductivité électrique d'échantillons sableux et argilo-sableux de la Combe d'Arc. La méthode employée est décrite dans Gresse (2018) utilise l'équation décrite par Revil et al. (2017) :

$$\sigma' = \frac{1}{F} S_w^n \sigma_w + \left(\frac{1}{F\phi} \right) S_w^{n-1} \rho_g \beta_{(+)} (1 - f) CEC$$

Equation 1.

Avec σ' : la conductivité électrique totale, ϕ représente la porosité moyenne de l'échantillon, F est le facteur de formation intrinsèque associé à la porosité résiduelle dans la loi d'Archie (Archie, 1942).

Cette dernière stipule que $F = \phi \cdot m$, avec n le facteur de saturation que l'on suppose égal à 2.

S_w représente le volume d'eau interstitielle (que l'on fixe à 0.05)

σ_w représente la conductivité électrique du fluide poral (mesurée à 0.1 S m⁻¹).

Pour une telle valeur de conductivité électrique, on considère la simplification suivante : $m = n$.

$\beta(+)$ représente la mobilité ionique des cations interstitiels que l'on suppose égale à 5.19 pour un fluide avec du sel.

La CEC (en C. kg⁻¹, avec 1 meq/100g = 963.20 C.kg⁻¹) est utilisée dans la seconde partie de l'équation.

ρ_g représente la densité des grains, que l'on suppose égale à 2750 kg. m⁻³ pour une roche granitique.

Le terme f (a-dimensionnel) traduisant le coefficient de partition (fraction des contre-ions dans la couche de Stern) est fixé à une valeur de 0.95.

Les termes σ_w et $\beta(+)$ sont également dépendants de la température et suivent la loi décrite par Revil et Pezard (1998) :

$$\sigma_w(T) = \sigma_w(T_0) [1 + \alpha_f(T - T_0)] ,$$

$$\beta_{(+)}(T) = \beta_{(+)}(T_0) [1 + \alpha_{(+)}(T - T_0)] .$$

Equations 2

T_0 est la température de référence à 300 K. Les deux coefficients sont fixés à : $\alpha_f \approx 0.023$ K⁻¹, et $\alpha_{(+)} \approx 0.037$ K⁻¹, et sont indépendants de la température.

Ces mesures sont en cours d'acquisition sur les sédiments de la Combe d'Arc et devraient servir à estimer la conductivité électrique des premiers mètres de sédiments, ceci afin de mieux contraindre les interprétations des profils. L'approche et les interprétations présentées au sein de ce chapitre se basent donc sur la seule approche comparative avec les morphologies et compositions pétrographiques topographiées et observées à l'affleurement.

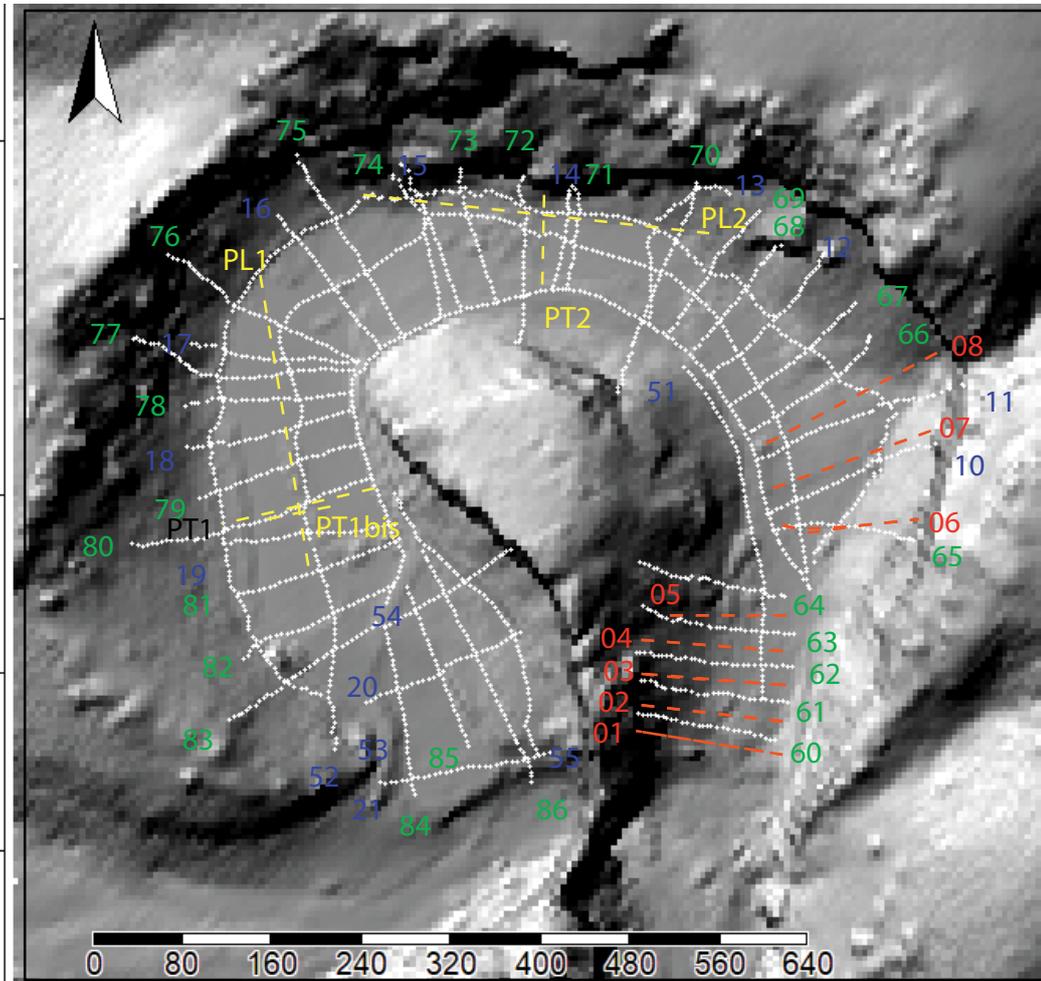
2.2 Campagnes de terrain 2017 – 2019.

Le dispositif d'acquisition Wenner 64 XL (équidistance des électrodes avec les électrodes de courant à l'extérieur) a été utilisé. Il permet une bonne résolution horizontale des structures du sous-sol tout en minimisant la sensibilité aux bruits électriques ambiants (Dahlin, 2001). L'acquisition en ERT a été effectuée avec un système multi-électrodes ABEM Terrameter SAS 1000 (2017) et SAS 4000 (2019), tous deux composés de 4 canaux pour un dispositif de 64 électrodes. Un total de 17 profils a été réalisé en novembre 2017 puis 27 profils en janvier 2019 (figure 93). L'écart entre les électrodes a toujours été de 5 m. Les 44 profils totalisent 2111 électrodes pour 11817 mesures de résistivité électrique utilisées après filtrage. L'altitude et la position des électrodes ont été levées par GPS différentiel (dGPS) en 2017 et en 2019, afin d'assurer une précision de recalage des électrodes suffisante. Pour chaque mesure, le temps d'acquisition était de 0,3 s avec une temporisation de 0,5 s. L'intensité de l'injection variait entre 1 mA et 200 mA selon la résistance du sous-sol. Pendant l'acquisition, si un point mesuré avait une RMS Error (RMSE) > 1 %, la mesure est répétée 2 fois pour avoir une idée de l'incertitude sur les mesures. Les mesures avec une déviation standard trop importante (> 10 %) sont écartées de l'analyse.

A l'aide de flûtes espacées de 5 m, l'ensemble de la Combe d'Arc a ainsi été couvert par des profils de résistivité électrique. Sur un profil horizontal de 32 / 32 électrodes, l'espérance de profondeur des mesures est de 50 mètres au centre. Pour les très longs profils courant sur plus d'1 km (cf. les profils 52, 53 et 54, figure 93). Certaines acquisitions le long du méandre ont été effectuées selon la technique du roll along (Dahlin et Zhou, 2004) qui permet de réaliser des profils sur plusieurs kilomètres si nécessaires.

Figure 93 : Carte de localisation des profils de tomographie électrique réalisés dans la Combe d'Arc de 2010 à 2019. Lors des campagnes de 2017 et 2019, 44 profils se sont avérés utilisables ; ils ont totalisé 2111 électrodes (points blancs). Les profils COMB01 à COMB10 (pointillés rouges) ont été localisés mais n'ont pas été utilisés, de même pour les 5 profils de Leroux et al. (2010) en pointillés jaunes. Une grande densité de mesures était nécessaire pour conduire correctement la prospection des sous-sols dans un environnement aussi contraint topographiquement.

Location of electrical resistivity tomography profiles in the Combe d'Arc meander. 44 ERT cross sections were acquired between 2017 and 2019 for a full usable dataset of 11817 measurements from 2111 points (white dots). Ancient profiles from Leroux et al. (2010) in dashed yellow lines, as well as the first ten 2017 measurements (dashed red lines) were not used. High- resolution is necessary to process the inversion in such a constrained topography.



Profils 2010
(PL/PT X)

Profils 2017 Eliminés
(COMB01 à COMB08)

Profils 2017
(COMB10 à COMB54)

Profils 2019
(COMB60 à COMB86)

Au total, six personnes se sont relayées pendant 7 jours pour mettre en place le matériel sur le terrain et acquérir les données. Malgré des problèmes d'accès (vignes, ronciers et taliers d'éboulis), le domaine sédimentaire de la Combe d'Arc a facilité l'implantation des électrodes : le substratum argilo-sableux permettant un très bon contact avec les électrodes (résistance de contact < 10 kOhm).

3. Inversions.

La mesure de résistivité brute est appelée résistivité apparente et s'obtient par la loi d'Ohm classique à partir du courant injecté, de la mesure de la différence de potentiel entre les électrodes de potentiel M et N et d'un facteur géométrique qui dépend du positionnement des électrodes utilisées (Wenner dans notre cas). Dans un milieu parfaitement homogène, ces mesures pourraient s'apparenter à la résistivité réelle, mais la composition par nature hétérogène du sous-sol amène à procéder à une inversion (tomographie) pour connaître la distribution réelle des valeurs de résistivité électrique : leur position et leur profondeur.

L'opération d'inversion consiste à interpréter les données par rapport à un modèle théorique mathématique de répartition des flux électriques, et à minimiser l'écart entre le modèle théorique et les données mesurées par les moindres carrés.

L'objectif de l'inversion est d'obtenir la distribution des

résistivités réelles (mesurées) à partir des données observées. Il faut donc minimiser l'écart entre les résistivités apparentes simulées par le modèle et les résistivités apparentes mesurées. Un état de l'art peut être trouvé dans Gresse (2018) qui en fait la synthèse.

Les données ont dans un premier temps fait l'objet d'une inversion 2D indépendante pour chacun des profils afin de faciliter l'interprétation et de pouvoir mettre plus facilement en lien les données LiDAR de la topographie extérieure avec les profils du sous-sol. Ensuite, dans l'objectif de l'interprétation globale des morphologies du méandre, les profils ont fait l'objet d'une inversion conjointe.

3.1 Inversion 2D.

Une première passe d'inversion a été réalisée sous le logiciel Res2Dinv avec la version 3.54.44 qui utilise la méthode d'inversion par les moindres carrés pour produire un modèle 2D du sous-sol à partir des résistivités apparentes mesurées (Loke et Barker, 1996). Etant donné le caractère linéaire et subhorizontal (dépôts fluviaux) des morphologies à identifier, les inversions ont été stoppées à l'itération n° 3, car la RMSE était satisfaisante pour chaque profil (inférieure à 8 %).

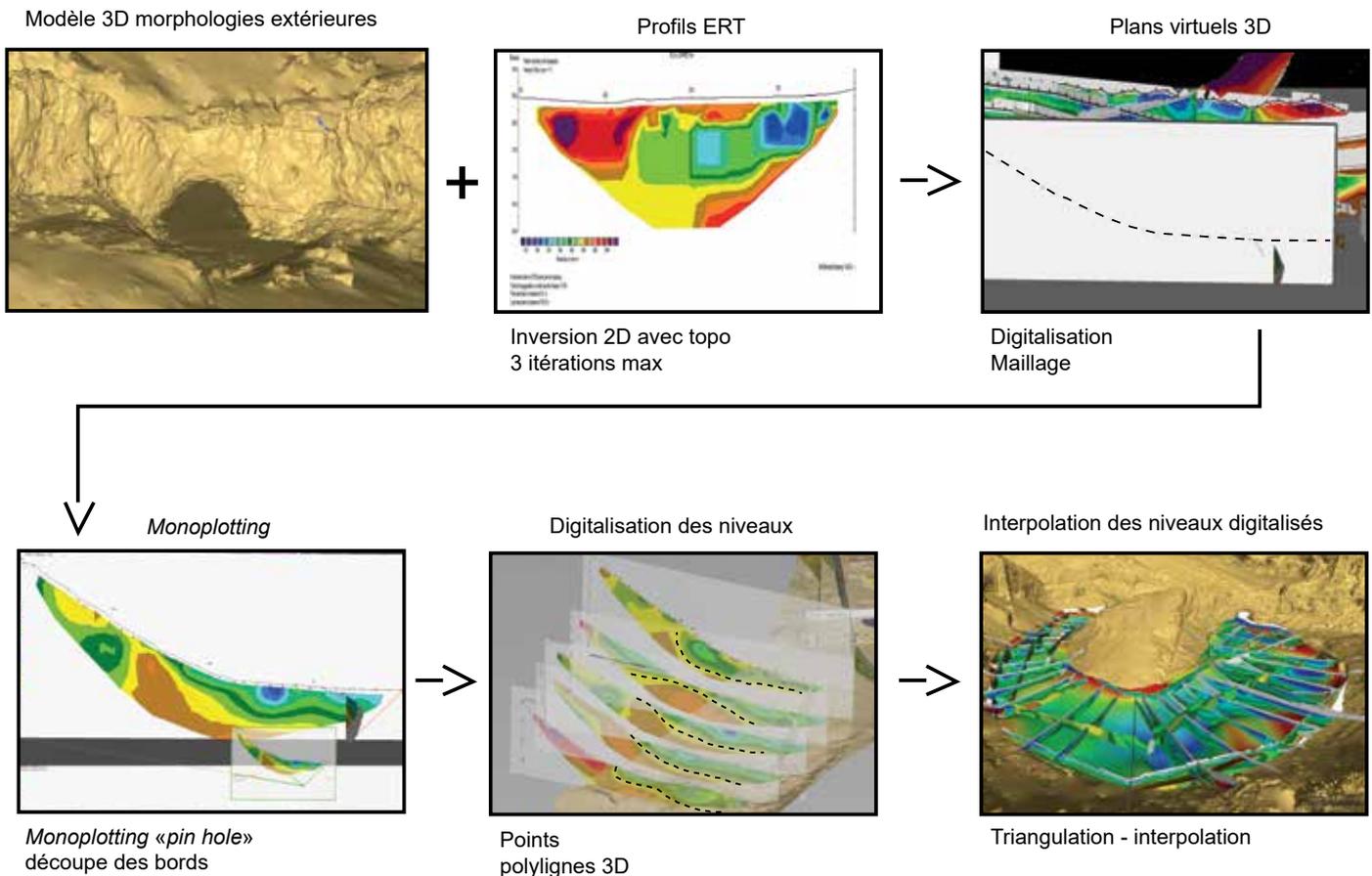


Figure 94 : Le monoplotting des profils de résistivité électrique permet de recaler les informations issues de la résistivité électrique par rapport aux témoins géomorphologiques extérieurs apportés par le modèle 3D LiDAR. *ERT profiles are replaced in a 3D environment (LiDAR 3D model) in order to be joined with external geomorphological observations*

Afin d'intégrer les contraintes géomorphologiques dans le processus d'inversion, les profils géophysiques 2D ont été ajoutés au sein du modèle 3D maillé. Les résultats des inversions 2D ont été drapés sur des plans virtuels selon la méthode du monoplotting (Bozzini et al., 2012 ; Wiesmann et al., 2012 ; Berthet, 2016).

3.2 Résultats 2D.

L'analyse conjointe des profils de résistivité électrique et de la topographie extérieure permet d'observer des continuités morphologiques sous-sol / surface. Le modèle géomorphologique théorique du sous-sol servant de point de départ à l'interprétation, il est ainsi plus facile de guider certaines hypothèses concernant la composition et la géométrie souterraine de la Combe d'Arc. La proximité du niveau de bedrock affleurant, topographié par bathymétrie et LiDAR (cf. figure 89) et les acquisitions ERT autour de 600 ohm m permettent de reconnaître des morphologies subhorizontales qui suggèrent la continuité du bedrock. Ces niveaux altitudinaux sont très proches (70-72 m NGF) du talweg rocheux de l'Ardèche actuelle (70 m NGF en amont). Les valeurs de résistivité obtenues peuvent être considérées comme normales et concordent bien avec celles attachées aux calcaires Urgoniens du Barrémien (Carrière et al., 2013). Les valeurs mesurées, situées

autour de 600-900 ohm m, sont cohérentes avec l'encaissant calcaire de la Combe d'Arc.

Le toit des galets, repéré dans les ravinelements et les tranchées à proximité du Pont d'Arc (entrée de la Combe d'Arc, cf. figure 89), correspond à un niveau résistif aux alentours de 250 ohm m. Ces valeurs sont proches de celles des sédiments fluviaux issus du Massif Central (Vayssière et al., 2016). Les caractéristiques géométriques également subhorizontales des niveaux fluviaux sont en accord avec les observations d'isovaleurs de résistivité qui sont relativement horizontales au sein de la Combe d'Arc. Leur prolongement sur l'ensemble du méandre autour de 85 m NGF confirme la présence d'un toit relativement bien marqué de galets dans les sédiments du méandre abandonné. Ce résultat s'accorde donc avec le modèle théorique inféré par les observations des galets au sein des tranchées forées dans le méandre.

Le grand nombre de profils géophysiques réalisés permet également de rendre compte de la morphologie de la paléo-vallée (méandre abandonné). En mettant en lien les données géophysiques et les informations sur le toit des galets à + 15 m, il est possible d'interpréter la morphologie de ces derniers au sein du méandre. Les profils ERT suggèrent des variations morphologiques et des évolutions latérales de la terrasse de galets à +15m qui est enfouie sous des sédiments fins argilo-sableux.

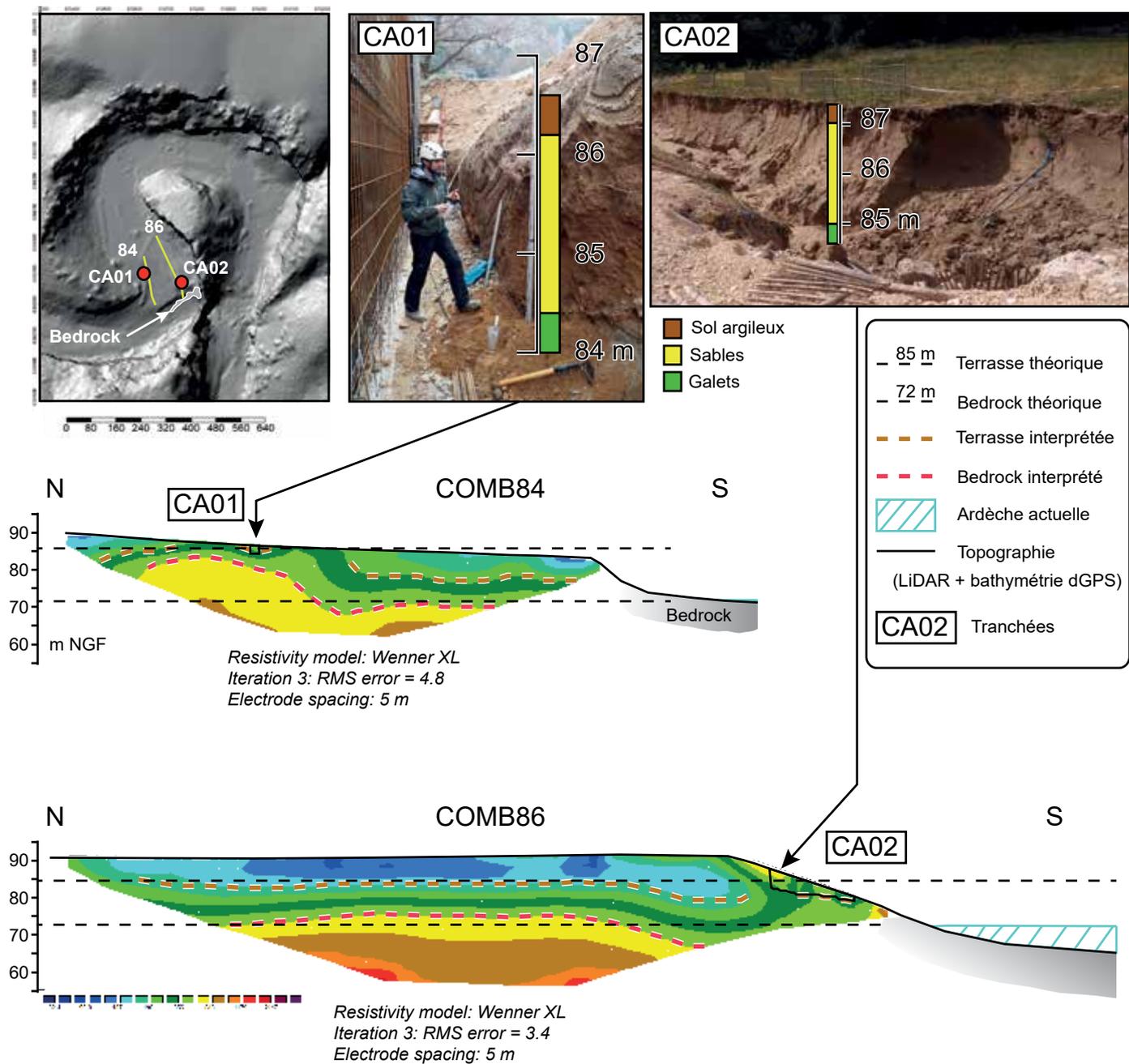


Figure 95 : Topographie LiDAR/bathymétrie, avec les profils de résistivité électrique COMB84 et COMB86 et intégration des tranchées sédimentaires CA01 et CA02. La cohérence intérieur-extérieur permet de calibrer les valeurs de résistivité du talweg rocheux (environ 600 Ohm. m) et du toit de galets de la terrasse à + 15 m.

Electrical resistivity calibration using sedimentologic cross-sections and high-resolution external topography (LiDAR and bathymetric data). The + 15 m pebbles (= galets in french) summit can be guessed inside the abandoned meander.

Ces variations semblent se poursuivre sous les éboulis plus récents descendant des versants de la Combe d'Arc. Hormis quelques anomalies locales vraisemblablement causées par les câbles de courant électrique (relai-transformateur EDF au centre du méandre et câblage électrique à destination des

grottes du Treuil et Chauvet), les valeurs de résistivité électrique indiquant potentiellement le toit des sédiments grossiers, se situent aux alentours de 250 ohm m. Cette valeur reste théorique car les galets eux-mêmes sont emballés dans une matrice argilo-sableuse, si on se réfère aux dépôts des terrasses + 15 m et + 30 m de la plaine de Vallon Pont d'Arc.

La mise en relation des données ERT avec le modèle 3D permet également de visualiser les morphologies d'éboulis (figure 95), révélés par le LiDAR, qui semblent se poursuivre dans la Combe d'Arc, parfois sous le niveau actuel du méandre. Les valeurs de résistivité électrique associées aux clastes qui composent les tabliers éboulis contrastent nettement avec les remblaiements fluviaux.

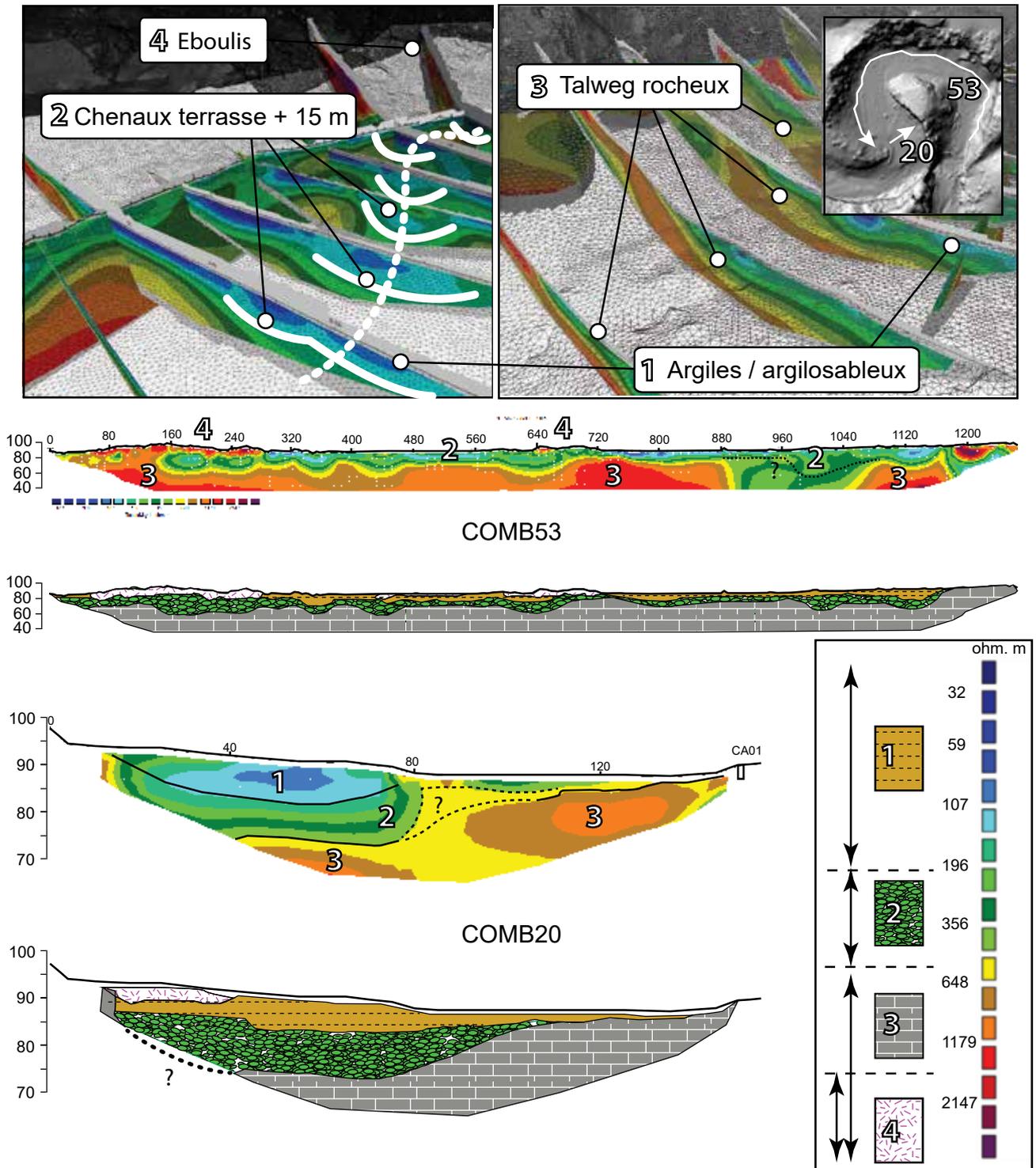
Elles commencent aux alentours de 600 ohm m et montent parfois jusqu'à 2500 ohm m (zones externes vraisemblablement poreuses et peu saturées en eau drainante car dans la zone vadose).

3.3 Inversion 3D.

Le couplage tenté entre l'inversion 2D et le modèle 3D LiDAR a donné de bons résultats. Néanmoins, si la visualisation en 2.5D des profils géophysiques est couramment utilisée pour interpréter les résultats (Carrière et al. 2013), dans notre objectif, il était important de tendre vers une visualisation 3D car les résistivités mesurées peuvent avoir d'importantes variabilités latérales en fonction des milieux investigués. Une des difficultés provenait du fait que les mesures obtenues ne sont pas forcément exactement positionnées à la verticale des points d'acquisition, notamment lorsque les profils décrivent des courbes sur le terrain, ce qui a parfois été le cas dans la Combe d'Arc, notamment

Figure 96 : Implantation des profils géophysiques dans le modèle LiDAR de la Combe d'Arc et interprétation des valeurs de résistivité électrique. Ces dernières sont interprétées conjointement avec le modèle 3D et avec les informations ponctuelles issues des coupes et ravinelements. 1. Argiles ; 2. Clastes ; 3. Galets ; 4. Encaissant.

Geophysical cross-sections are added to the LiDAR 3D model in order to interpretate the results with the external morphologies and the discrete substratum information. Data are merged together into an "all in one" model that allows a joined geomorphological and geophysical analysis. 1. Clay ; 2. Periglacial slope deposits; 3. Pebbles ; 4. Bedrock.



pour les grands profils en roll along. Dans ce cas, certaines zones de recoupement des profils peuvent perdre en cohérence (Carrière et al., 2013). Par ailleurs, les incertitudes topographiques se rajoutant aux inversions réalisées séparément pour chaque profil, génèrent parfois des incohérences au niveau des zones de croisement. Ces dernières peuvent constituer un frein à l'interprétation du sous-sol.

Les récents progrès en matière d'inversion 3D présentent des solutions possibles pour pallier ces problèmes et peuvent fournir des modèles d'inversion 3D plus cohérents que ceux réalisés en 2D (Revil et al., 2010 ; Rödder et Kneisel, 2012 ; Gresse et al., 2018). Une des limites méthodologique de cette méthode reste la nécessité d'une couverture très large de profils ERT (Carrière et al., 2013). L'investigation du sous-sol de la Combe d'Arc a été pensée dès le départ pour travailler en inversion 3D : d'où le très grand nombre de profils (cf. figure 93).

Il faut noter qu'un essai d'inversion 3D de résistivité électrique est peu courant dans la compréhension d'un méandre karstique et dans un environnement aussi topographiquement contraint.

L'inversion a été conduite avec le programme E4D (<https://e4d.pnnl.gov/Pages/Home.aspx>). Le processus se base sur la résolution itérative de l'algorithme non-linéaire de Gauss-Newton, qui est décrit dans Johnson et al. (2010). Ce dernier utilise la topographie externe comme base de construction à la génération de tétraèdres discrétisant le sous-sol. Dans notre étude, le maillage résultant est issu des 2111 électrodes et comporte 707953 noeuds élémentaires pour 157017 tétraèdres sur lesquels une modélisation du problème de résistivité électrique est effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis.

3.4 Résultats 3D.

Les résultats de l'inversion 3D s'apprécient également par le recours à l'imagerie, au moyen du visualiseur 3D VisIt (<https://wci.llnl.gov/simulation/computer-codes/visit/>), qui accepte le format « .exo » en sortie de E4D (Johnson et al., 2010). Grâce à la modélisation 3D en volume (par l'intermédiaire des tétraèdres), la grande versatilité de VisIt offre la possibilité de visualiser les résultats de l'inversion 3D depuis l'intérieur même du maillage en découpant ce dernier selon un plan de « clipping » (visualisation des valeurs sur une coupe), mais également sous forme de maillage des iso-valeurs (ici de la résistivité électrique).

Les mesures convergeant très bien entre-elles pour cette inversion 3D (cf. figure 97), peu d'itérations ont suffi pour obtenir une représentation correspondant au modèle théorique de répartition des sédiments dans le méandre. Nous avons donc décidé de nous arrêter à l'itération 10 proposée par E4D. C'est cette dernière qui a été utilisée pour visualiser les résultats car elle offre un taux de convergence satisfaisant (RMSE = 3.302) tout en faisant apparaître correctement les structures linéaires logiquement attendues en contexte sédimentaire.

La visualisation des valeurs de la résistivité électrique inversée est possible. Elles peuvent être représentées en couches 2D surfaciques (drapées sur le modèle) ainsi qu'en maillages 3D d'iso-valeurs de résistivité.

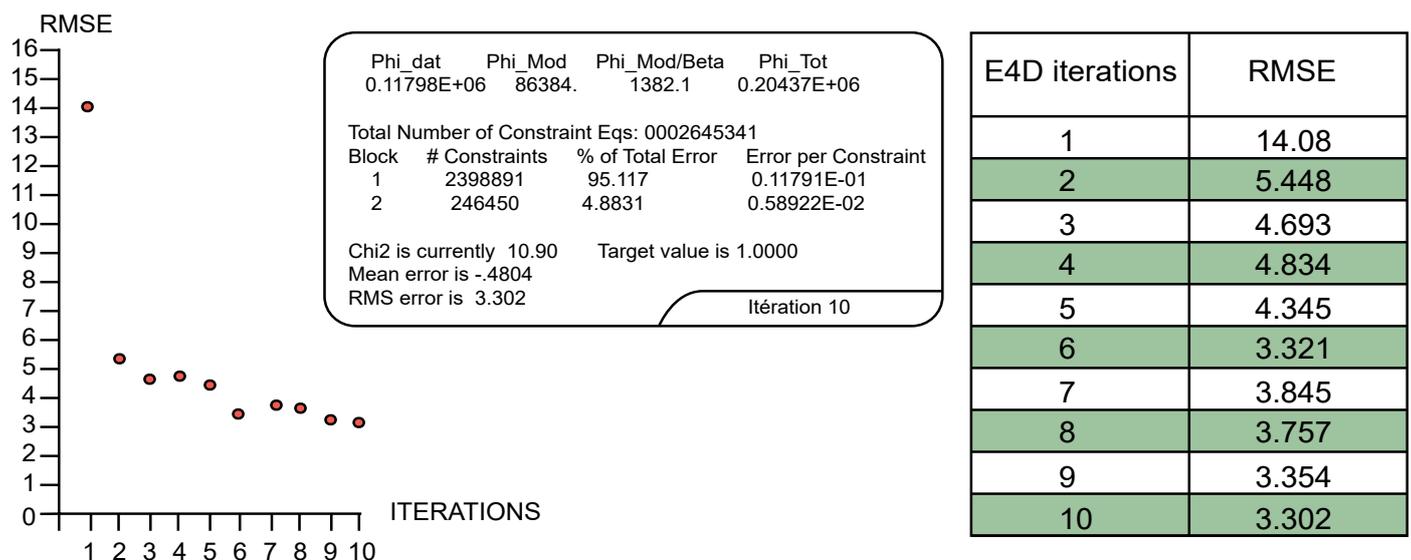


Figure 97 : Convergence des données lors de l'inversion 3D. La RMS error indique la fiabilité de la convergence. Les données acquises dans la Combe d'Arc convergent très rapidement, au bout de quelques itérations seulement.

Data convergence during E4D 3D inversion. The RMS error can be used as a check parameter to assess the quality of the inversion convergence. Combe d'Arc dataset is very consistent so inversion convergence is quick.

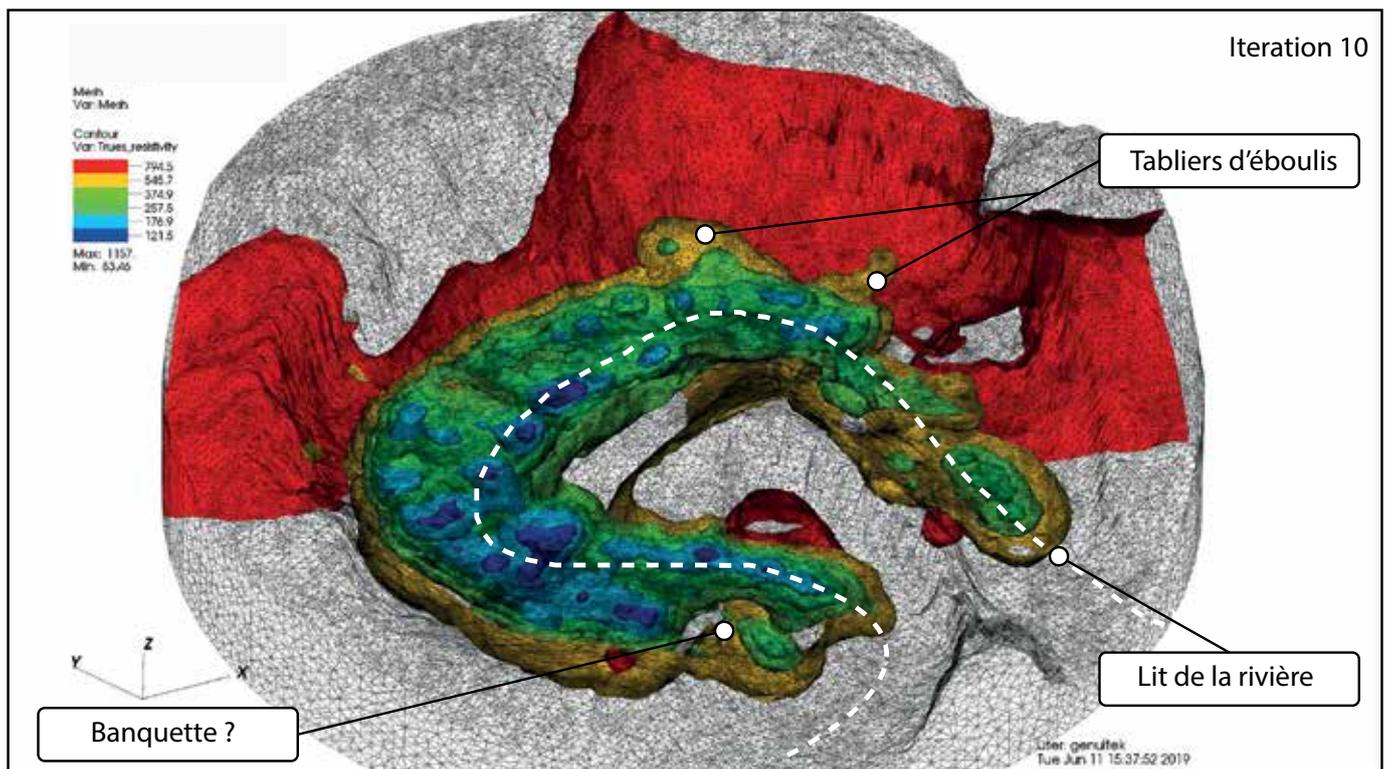
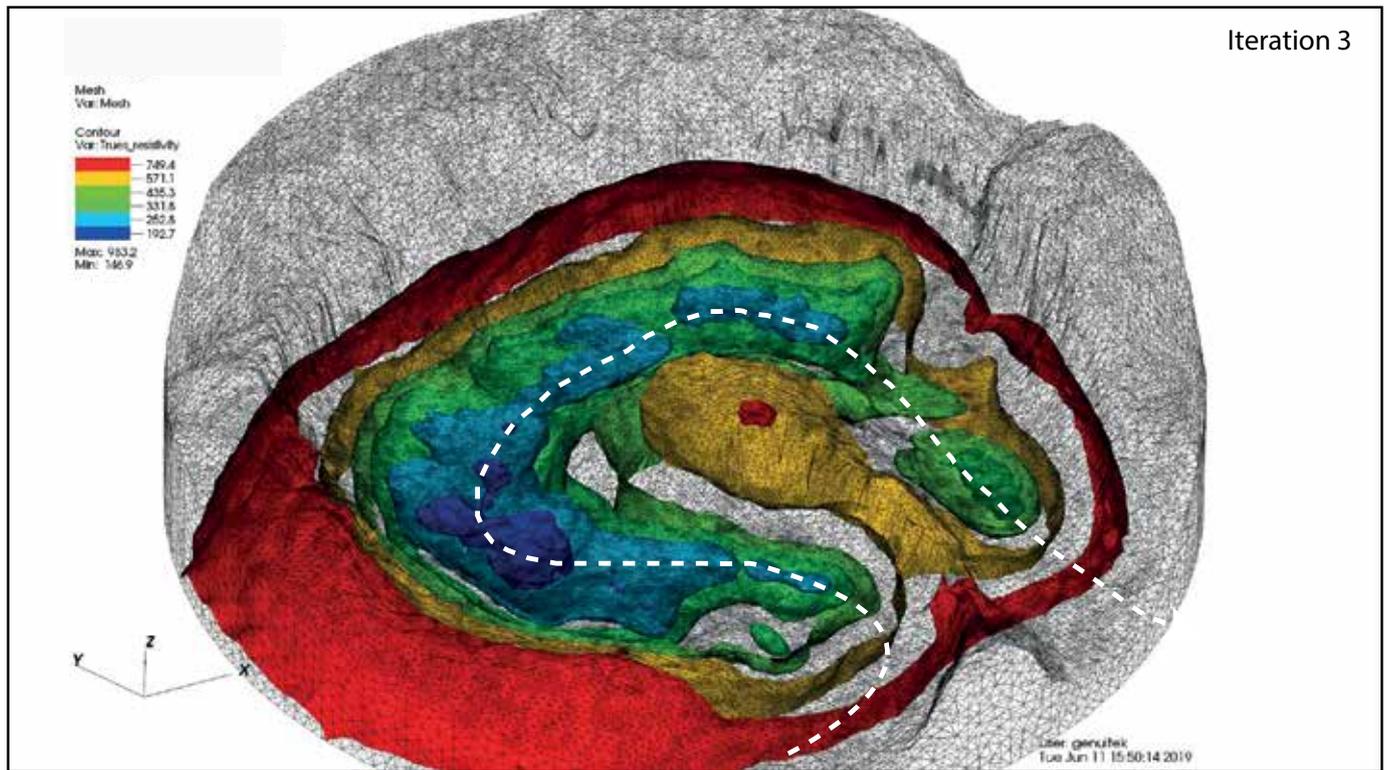


Figure 98 : Illustration et représentation du processus d'itération sur l'imagerie des iso-valeurs de résistivité électrique. Les itérations montrées ici (3 et 10) sont proposées à titre d'exemple pour figurer l'évolution de l'inversion et la bonne convergence des données dès les premières itérations. La visualisation 3D des iso-valeurs de résistivité électrique sous VisIt peut être conduite par une représentation surfacique de la résistivité électrique, ou bien par maillage (triangulation) des iso-valeurs de résistivité électrique en fonction de l'itération demandée. Les morphologies sub-linéaires des dépôts fluviaux sont imagés avec très peu d'itérations. L'itération 10 révèle également des zones plus résistives correspondant potentiellement à des banquettes rocheuses et des tabliers d'éboulis.

3D visualisation of electrical resistivity (ERT) results can be conducted both by surface colorization or by 3D mesh of the resistivity iso-values. Sub-linear morphologies such as the river ones can be imaged after only a few iterations. Higher resistivity values are also imaged and suggest limestone buried tables and slope deposits.

Les résultats visibles en figure 98 montrent clairement l'emprise des sédiments fluviaux (en bleu) dans le méandre abandonné), ; ils reposent sur un bedrock globalement plus résistant (vert à rouge). Les tabliers d'éboulis (rouge foncé), situés sous les escarpements sud-est et sud-ouest, ressortent également nettement. La figure 98 montre que les morphologies de la rivière sont déjà bien caractérisées dès les premières itérations (cf. figure 98). L'itération 10 représente un bon compromis et permet également d'imager les morphologies plus complexes comme des banquettes rocheuses.

4. Reconstitution géométrique des morphologies du sous-sol de la Combe d'Arc.

4.1 Modélisation 3D des morphologies du toit des galets de la terrasse à + 15 m.

La cartographie du toit des galets a été conduite par interpolation sous SAGA-GIS (Conrad et al. 2015) des points correspondant à l'iso-valeur 250 ohm.m. L'utilisation de la méthode de la triangulation Delaunay 3D, rendue possible grâce au très grand nombre de profils, a permis de rendre compte des géométries et des dépôts du sous-sol au moyen d'une interpolation linéaire.

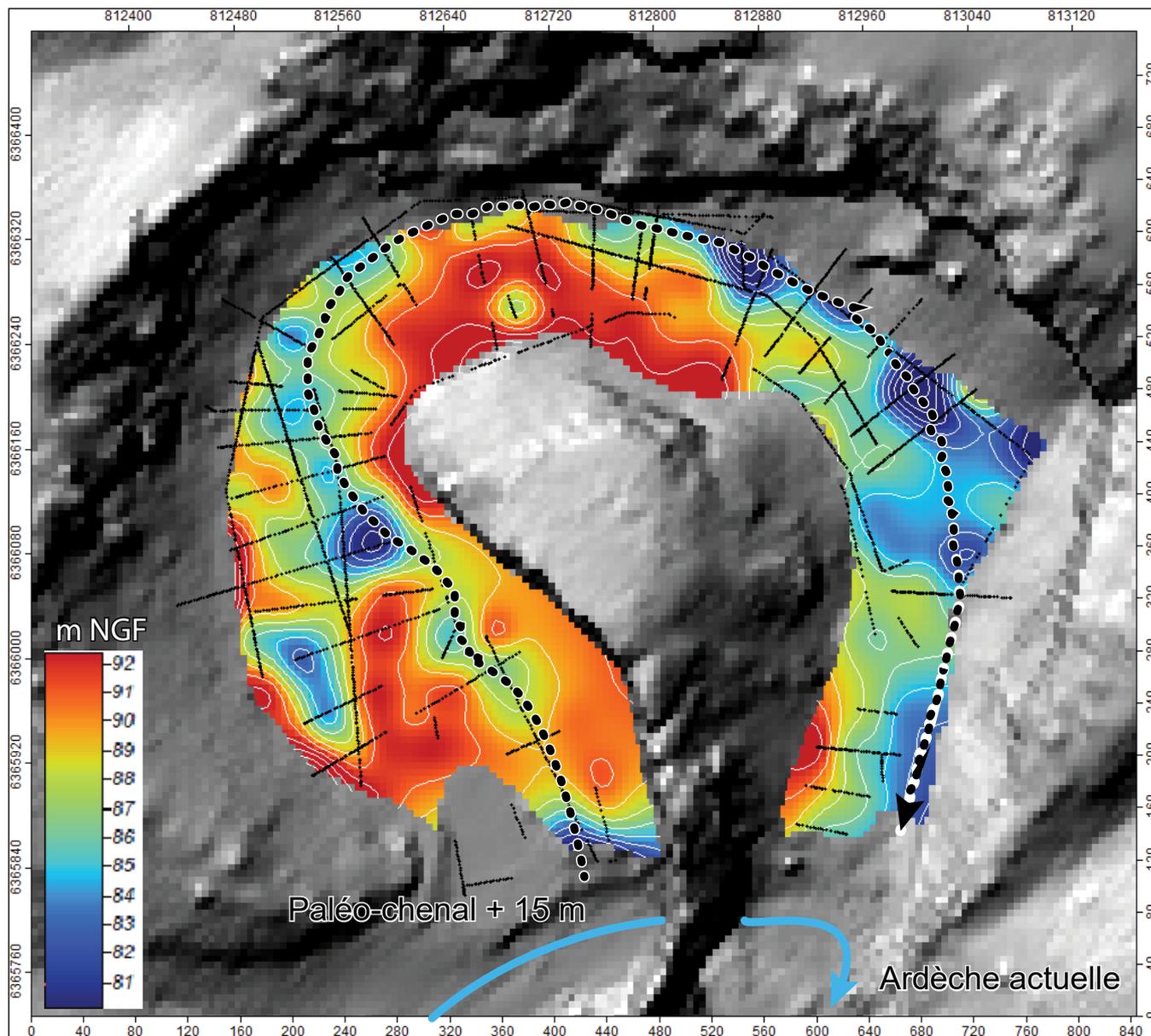


Figure 99 : Cartographie des altitudes (en m NGF) correspondant à l'iso-valeur 250 ohm m. Ce niveau oscille en moyenne entre 85 et 87 m NGF et présente des morphologies de replat caractéristiques de dépôts en convexité de méandre qui poussent à l'associer à un dépôt de galets. Une chenalisation est clairement visible entre les concavités de méandre et suggère l'ancien passage de l'Ardèche dans le méandre pour ce niveau de galets. *Mapping of the altitudes. The 250 ohm m iso-value, pictured blue and green (see scale on the left) corresponds to pebble sediments inside the Combe d'Arc meander. Pebbles seem to be located between 85 m and 87 m A.S.L. Flat morphologies are visible inside the meander convex parts, generating a channel which suggests the ancient river passage on the pebble level.*

Nous avons ainsi pu visualiser des morphologies en chenaux au sein des sédiments grossiers. Ces dernières sont notamment visibles sur les profils de l'acquisition 2019 qui laissent penser qu'un chenal préférentiel parcourt l'ensemble de la Combe d'Arc. Les iso-valeurs à 250 ohm m dessinent également des plateaux, légèrement plus hauts en altitude (environ + 5 m). Ces derniers, tant par leur morphologie que par leur emplacement dans le méandre, peuvent être interprétés comme des bancs de convexité, zones préférentielles de dépôts fluviaux.

Le chenal creusé dans les galets semble divaguer au sein de la Combe d'Arc, allant parfois saper les zones les plus escarpées du Cirque d'Estre. Ce constat est intéressant en termes d'emboîtement des formes car, en sapant les zones sous les escarpements, le chenal passe sous les tabliers d'éboullis plus récemment mis en place et qui sont actuellement visibles dans le méandre (sur la topographie LiDAR). Cette observation est également supportée par l'étude des profils géophysiques dont plusieurs présentent les mêmes caractéristiques (tabliers d'éboullis plongeant sous le niveau actuel de la Combe d'Arc et s'arrêtant sur un niveau entre 80 et 85 m NGF).

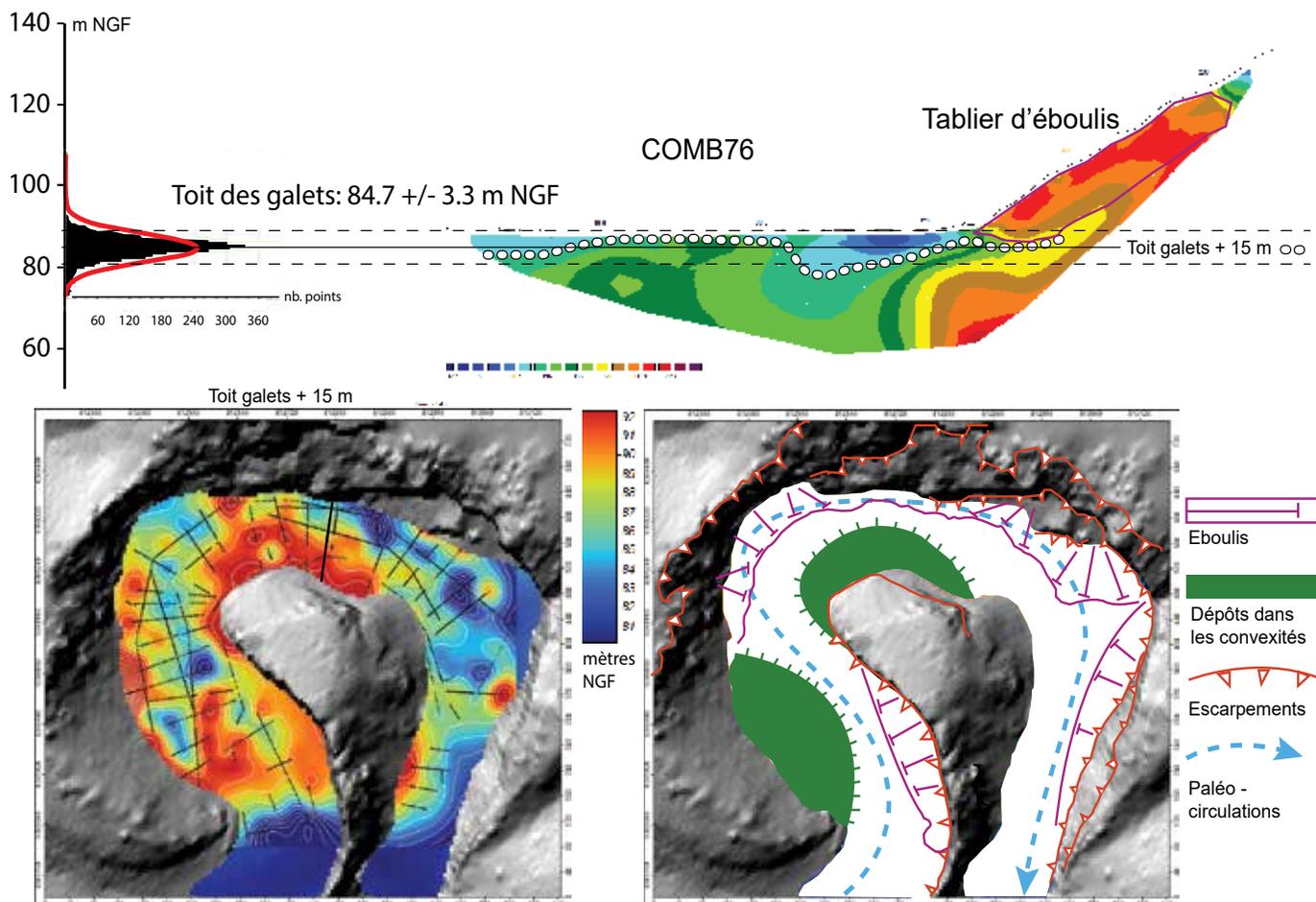


Figure 100 : Cartographie du niveau de galets à + 15 m de la Combe d'Arc, situé sous les sédiments fins des crues holocène. A gauche, cartographie de l'iso-valeur 250 ohm m et à droite, l'interprétation géomorphologique. Le chenal principal est bien visible au milieu du banc de galets. Ce dernier dessine des méandres accentués qui viennent saper l'escarpement en lieu et place de certains éboullis actuels. Ces morphologies sont caractéristiques d'une circulation active de la paléo- rivière dans la Combe d'Arc. Ce chenal est désormais fossilisé sous les sédiments fins et les tabliers d'éboullis.

The top of the pebbles burried under the thin sediments is located at + 15 m. The main river channel is clearly visible inside the pebbles deposit. The channel draws paleo-meanders which come right under the Cirque d'Estre cliffs, at the current location of slope deposits. Such morphologies suggest an active river process through the meander for the + 15 m alluvial level. The paleo-channel is now fossilized under clay sediments.

La cartographie d'un chenal fluviatile principal au sein de la terrasse à + 15 m enfouie sous les sédiments fins de la Combe d'Arc, met également en évidence la dynamique de mise en place des sédiments grossiers, fonctionnant non pas par à-coups (dynamiques de crues temporaires pour les sédiments fins holocènes (Sheffer et al., 2003)), mais bien par écoulement pérenne au sein du méandre. Cette dynamique démontre ainsi le fonctionnement de la Combe d'Arc comme axe principal des écoulements de la paléo-Ardèche.

4.2 Modélisation 3D des morphologies du talweg rocheux de la Combe d'Arc.

La cartographie du talweg rocheux de la Combe d'Arc a été obtenue par la même procédure d'interpolation. Elle a néanmoins été plus complexe à réaliser. Elle s'appuie notamment sur le grand profil COMB52, acquis par la méthode roll-along au milieu du méandre. L'image obtenue propose parfois des valeurs de résistivité très faibles, jusqu'à des profondeurs très largement au-delà du maximum théorique du bedrock.

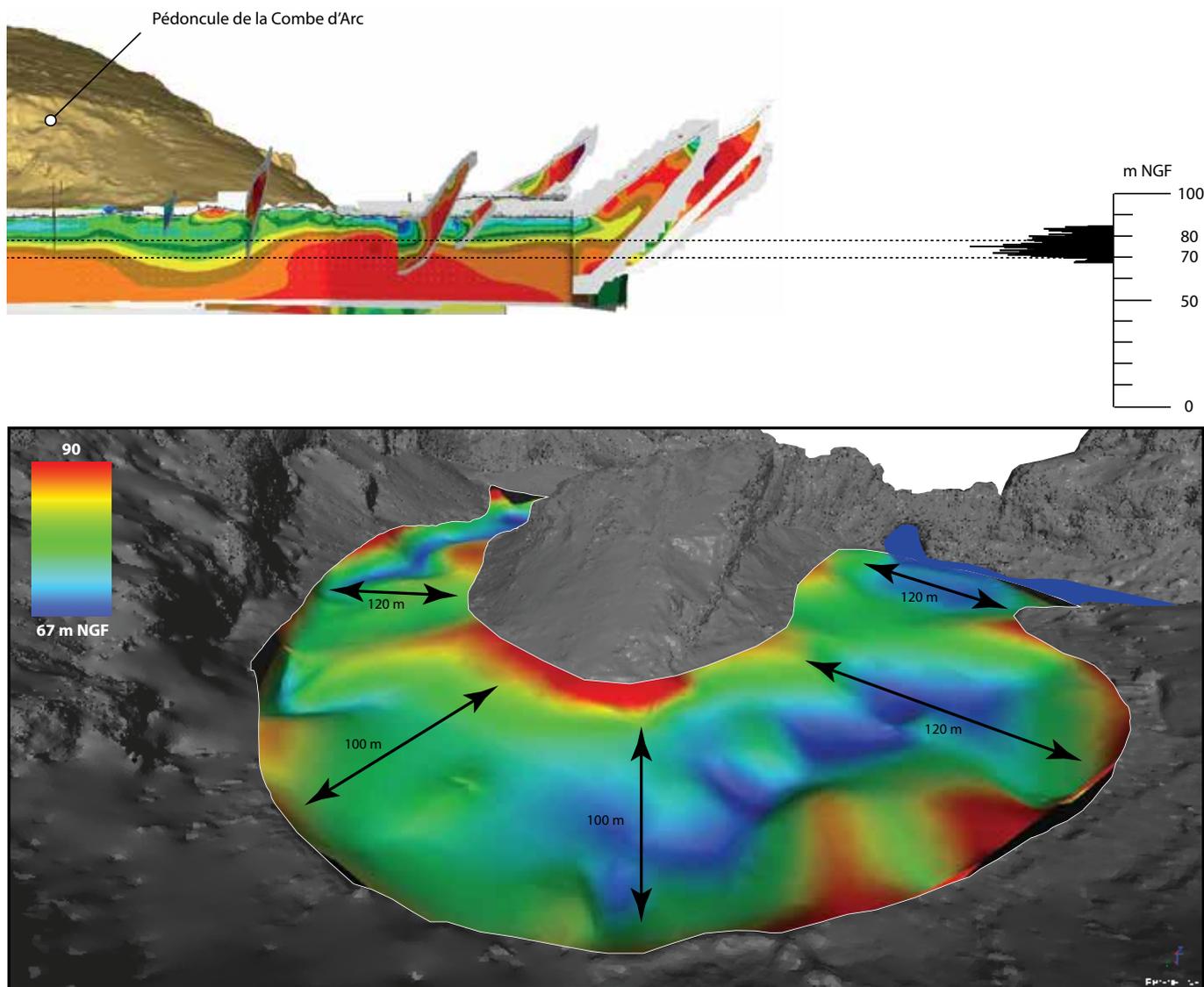


Figure 101 : Coupe des profils géophysiques 2D et interpolation (triangulation) du niveau de résistivité à 600 ohm m dans la Combe d'Arc. La majorité des points digitalisés représentant le niveau à 600 ohm m se trouvent compris entre 70 et 75 m NGF. La largeur du bedrock reconstitué correspond à celle du canyon actuel de l'Ardèche avec des valeurs entre 100 et 120 m NGF. Le niveau minimum du talweg rocheux est cohérent avec les observations extérieures, bien qu'une profondeur plus importante semble enregistrée dans la partie amont du méandre.

2D Cross sections and interpolation of the 600 ohm m resistivity values across the meander. Most of the points characterizing the 600 ohm m value stick around 70-75 m A.S.L, which is in good agreement with the observations conducted on the bedrock out of the meander although. However, low resistivity values have been recorded deeper, in the upper part of the meander. The Combe d'Arc bedrock width reaches between 100 and 120 m, which is comparable to the current Ardèche River width.

Ce dernier ne peut logiquement pas dépasser les 67 m NGF mesurés en aval du méandre par bathymétrie et vérifiés par plongée : les données enregistrées atteignent 40 NGF. Ces zones plus conductrices pourraient correspondre à des circulations karstiques plus profondes ou à des discontinuités tectoniques. L'augmentation des itérations d'inversion du profil fait tout de même ressortir un niveau plus résistif et assez clair, aux alentours de 70 m NGF, ce qui est cohérent avec les autres valeurs interprétées comme le niveau théorique de l'encaissant.

La cartographie du niveau interprété comme étant le bedrock de la Combe d'Arc, est basée sur l'isovaleur de résistivité à 600 ohm m par calage avec les morphologies extérieures (voir figures 95 et 96). La figure 101 décrit un chenal assez large (environ 100 à 120 m) qui s'étend sous la totalité du méandre abandonné. Cette largeur est comparable à celle de l'Ardèche actuelle (également entre 100 et 120 m en amont comme en aval du méandre de la Combe

d'Arc. L'altitude moyenne du talweg rocheux semble se répartir entre 70 et 80 m NGF, avec une majorité de points enregistrés autour de 70-75 m NGF, ce qui est très proche du niveau actuel de la rivière, notamment en amont du Pont d'Arc (talweg actuel à 70 m NGF). Les comparaisons entre les données géomorphologiques extérieures (cf. chapitre 3 et 4) et les représentations issues des données ERT (proportions, profondeur, morphologies) tendent donc vers un modèle cohérent du paléo-talweg de l'Ardèche enfoui sous les sédiments de la Combe d'Arc.

L'analyse morphologique du niveau interpolé révèle des replats autour de 75-80 m NGF. Ces derniers sont visibles de part et d'autre du chenal de bedrock, au sein de la Combe d'Arc. Ces replats sont en correspondance altitudinale avec les banquettes rocheuses visibles sur les deux rives actuelles de l'Ardèche (75-76 m NGF en amont du Pont d'Arc). L'inversion 3D montre également les mêmes morphologies (figure 102).

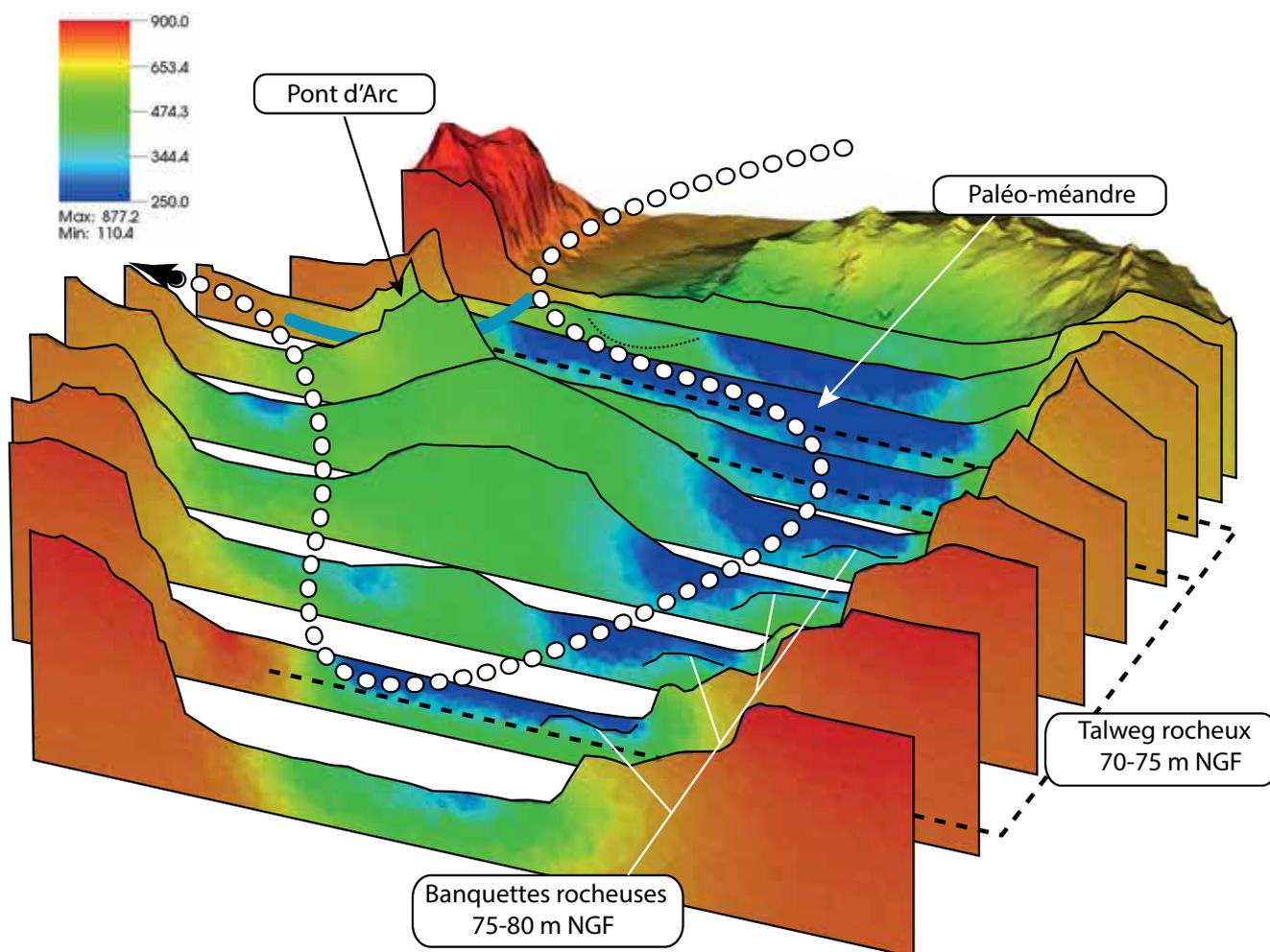
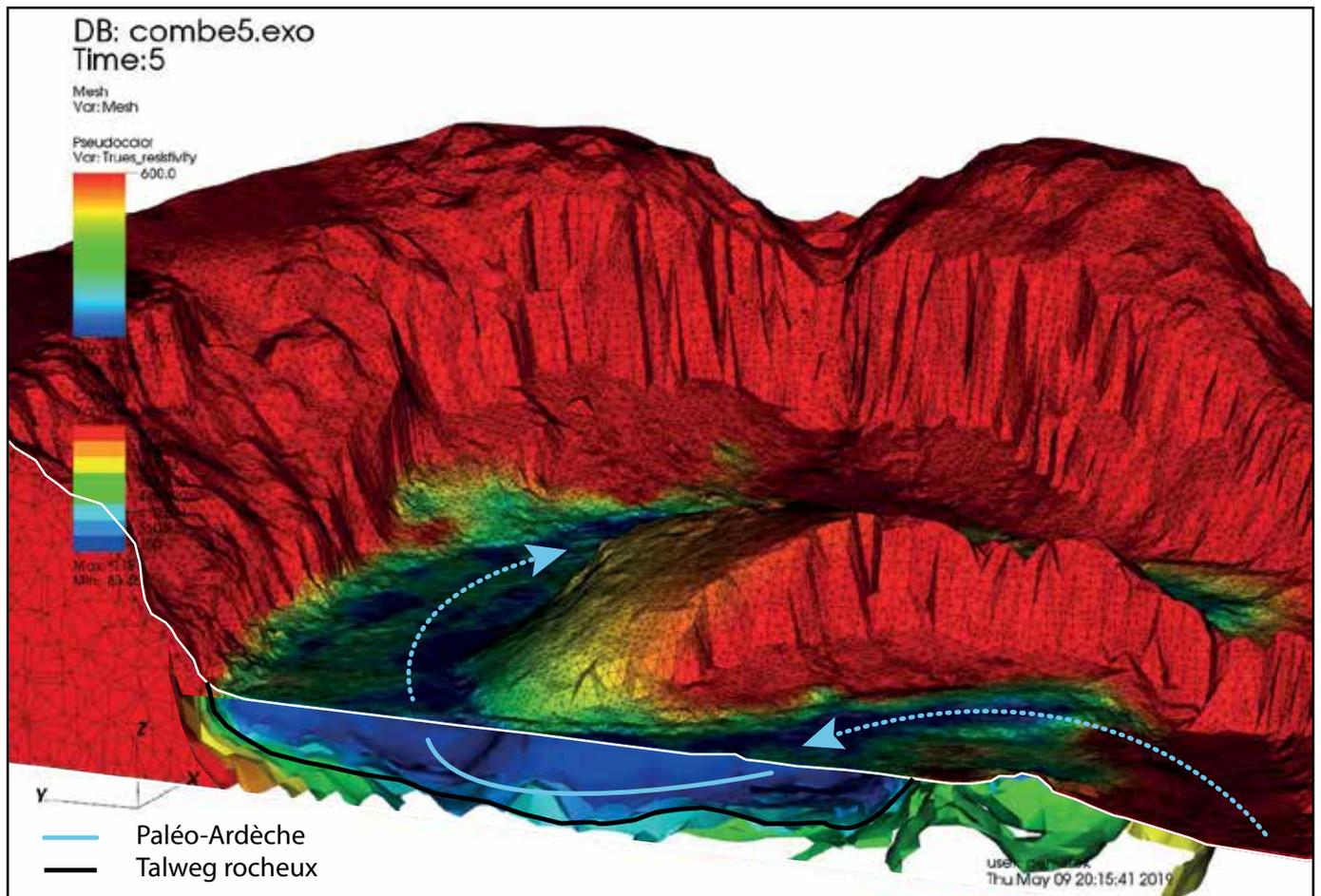


Figure 102 : Coupes et vue cavalière au sein de l'inversion 3D de la Combe d'Arc. Le chenal rempli de sédiments est bien imagé, notamment dans la partie amont du méandre. De replats plus résistifs (75-80 m NGF) peuvent être interprétés comme des banquettes rocheuses, témoins d'une phase d'incision de l'Ardèche lorsque cette dernière coulait encore dans son méandre.

Cross sections and perspective view of the 3D inversion of the Combe d'Arc meander. Sedimentary deposits are well constrained regarding bedrock morphologies. Some upper morphologies (75-80 m A.S.L) may correspond to limestone tables, a testimony of the ancient Ardèche River incision inside its meander.



D'autres replats pourraient être interprétés comme des banquettes, notamment sous l'escarpement nord-ouest et l'escarpement est du Cirque d'Estre mais demanderaient une plus grande densité de profils pour être correctement imagés (situation complexe car zone surplombée par les escarpements).

La prospection géophysique couplée à un relevé topographique extérieure haute - résolution a permis de contraindre les morphologies internes du sous-sol du méandre de la Combe d'Arc, de confirmer la présence du niveau de galets sur la totalité du méandre, ainsi que de restituer, sous forme de proposition géométrique, les morphologies du bedrock enfoui (figure 103). Les banquettes rocheuses, et particulièrement en domaine karstique, restent des objets complexes à rendre compte dans l'analyse des données ERT acquises, notamment à cause du pas de mesure qui a été employé pour la résistivité électrique (câbles avec take-out tous les 5 m). Néanmoins, ces replats sont visibles à plusieurs endroits, sur les inversions 2D et 3D des profils. Les synthèses de la figure 103 permettent de comprendre que, d'après l'interprétation des profils géophysiques, les banquettes à l'affleurement autour du Pont d'Arc sont aujourd'hui recouvertes par les sédiments. Sans même l'investigation géophysique, leur morphologie (avancée au-devant même de l'arche et continuité de quelques mètres en direction du méandre) plaide pour leur existence le long de la Combe d'Arc, ce que la prospection par résistivité électrique vient ici appuyer. L'établissement du niveau de galets à + 15 m au sein du méandre serait donc postérieur à la mise en place des banquettes dans ce même lieu.

5. Datation relative de l'ouverture du Pont d'Arc.

Les études conjointement menées en géomorphologie fluviale et karstique sur le méandre abandonné peuvent être mises en lien avec les apports des prospections géophysiques du sous-sol de la Combe d'Arc. Les résultats de l'ERT permettent d'apporter de nouvelles données au modèle d'emboîtement géomorphologique construit à partir des relevés de surface et de la topographie de la grotte des Châtaigniers (cf. chapitres 3 et 4).

5.1 L'exhaussement des banquettes à + 5m au sein du méandre : un marqueur de l'incision du talweg de l'Ardèche.

Les banquettes à + 5 m sont l'expression d'une phase d'incision dans l'ancien lit rocheux de la rivière. La continuité des banquettes à + 5 m sous le méandre abandonné, implique que la rivière passait alors par le méandre. La mise en place de ces banquettes suppose un processus d'érosion fluviale sur une temporalité relativement longue, nécessitant un travail constant de la rivière. Le recoupement du Pont d'Arc s'est donc forcément mis en place postérieurement à la sculpture des banquettes rocheuses, d'autant plus que des témoins de ces dernières, encore en cours d'érosion, s'avancent aujourd'hui au-devant même de l'arche. Ce constat d'emboîtement morphologique permet de discuter de nouvelles contraintes concernant la formation de l'arche.

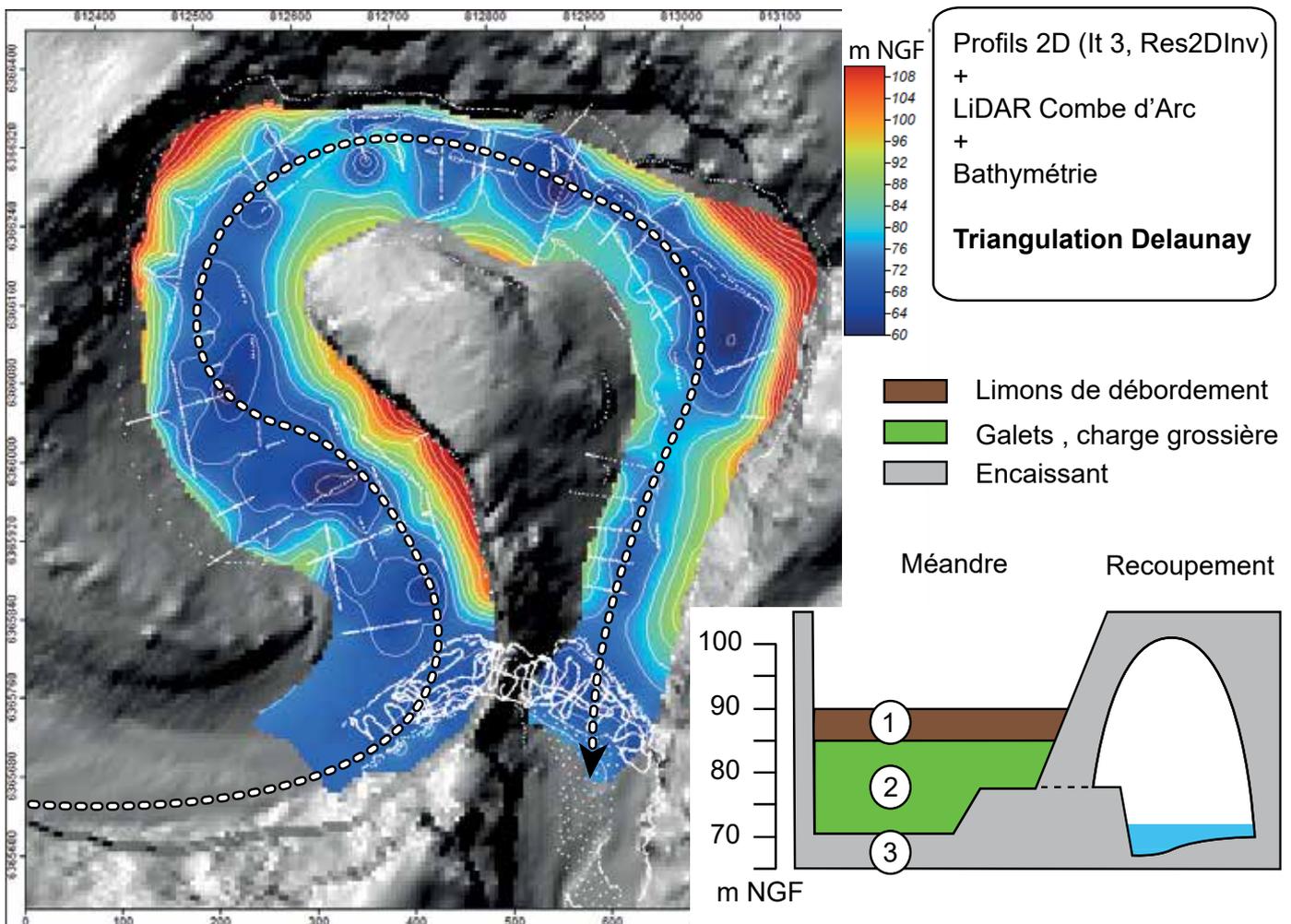
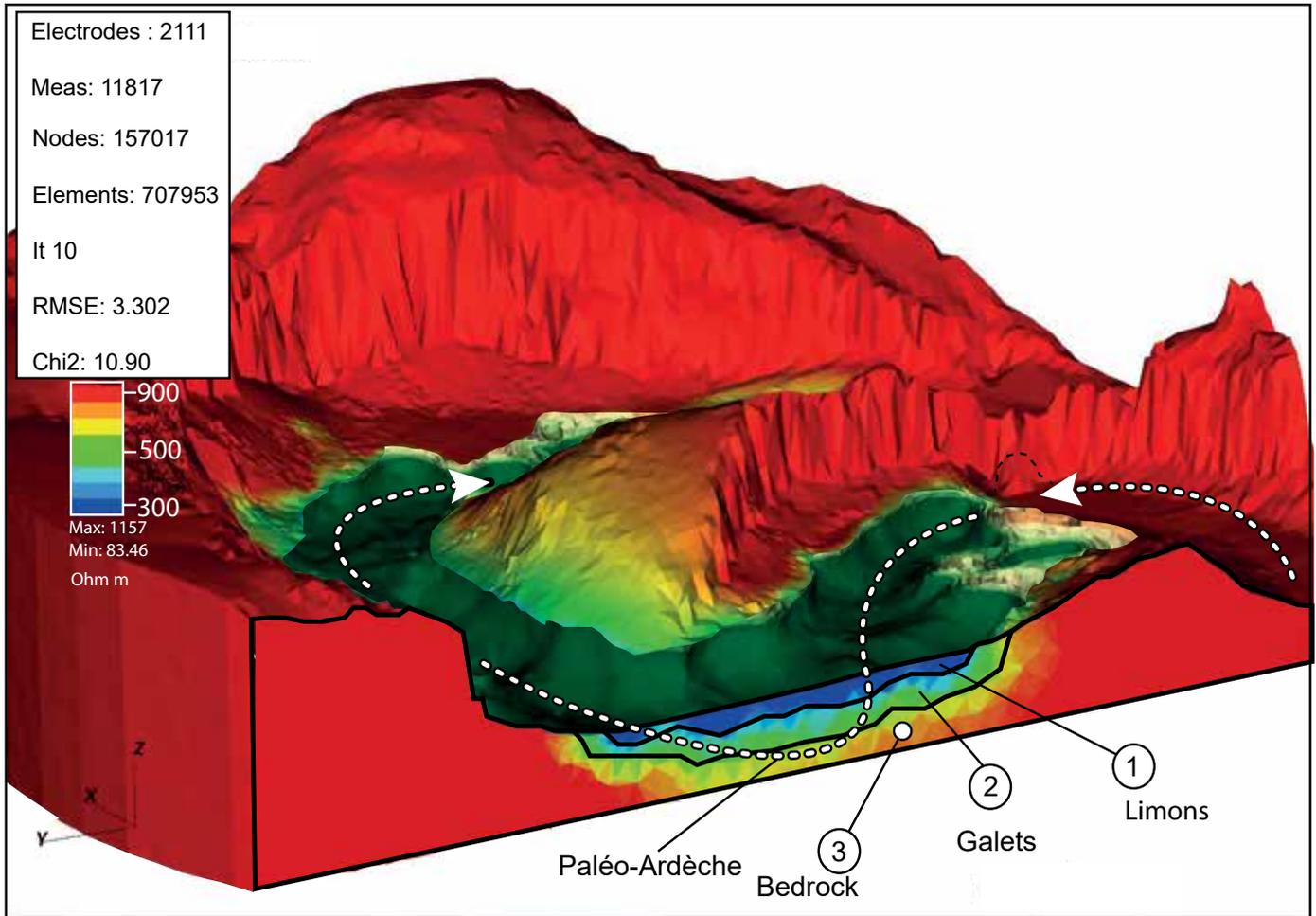


Figure 103 : Cartographie du bedrock sous la Combe d'Arc. La figure du dessus montre que le niveau de creusement sous le méandre semble assez proche le niveau de l'Ardèche actuelle. La figure du bas montre que les banquettes à + 5 m sont également visibles par endroit. Leur exhaussement est donc antérieur au dépôt de galets à + 15 m qui scelle le talweg rocheux.

The bedrock cartography of the Combe d'Arc meander reveals that the level of its talweg is almost the same as the current Ardèche River maximum incision. The + 5 m limestone water tables can also be seen inside the meander. The cartography also reveals that their creation process took place before the + 15 m upfilling.

La continuité des banquettes sous le méandre témoigne d'un stade de fonctionnement pérenne de ce dernier, où le talweg rocheux était en cours de creusement. La présence des banquettes s'avancant au-devant même de l'arche gêne le passage de l'eau sous le Pont d'Arc et témoigne d'une morphologie mise en place antérieurement au recoupement. Ce dernier n'a donc pu être effectif qu'après cette incision du talweg rocheux que les relevés géophysiques semblent permettre de replacer autour de 70-75 m NGF, soit des valeurs assez proches de celles du talweg rocheux actuel en amont du Pont d'Arc.

Une autre observation peut être faite à propos des fluctuations du niveau de la rivière. Le niveau + 30 m a été retrouvé dans le Combe d'Arc, mais uniquement sous forme de poudingues conservés en position d'abri à l'entrée et à la sortie du méandre (Génuite et al. 2018b). Ce constat pour la terrasse à + 30 m implique que cette dernière a été en partie érodée par la rivière et qu'elle est passée par le méandre (absence des sédiments). A l'inverse, la géophysique comme les observations de terrain ont confirmé l'existence du banc de galets à exactement + 15 m sous les dépôts fins de la Combe d'Arc. Ce niveau, encore en place, forme l'essentiel du volume sédimentaire du méandre abandonné et se positionne directement sur le talweg rocheux. Il n'a donc pas été déblayé lors de la ré-incision de la rivière, qui est, cette fois-ci, passée par le recoupement du pédoncule, c'est-à-dire par l'arche du Pont d'Arc. De ces observations, il ressort que le recoupement pérenne de la Combe d'Arc est postérieur au dépôt des galets à + 15 m ; ceux-ci peuvent donc être interprétés comme une terrasse d'abandon. Placée en situation d'abri par rapport à l'axe majeur d'érosion fluviale (passant désormais sous l'arche), la terrasse a ainsi pu être conservée. D'autres dynamiques morphogéniques ont alors pu se mettre en place comme la construction d'éboulis de versant et des mises en eau par à-coups liée aux crues holocènes (Sheffer et al., 2003).

5.2 Evolution paléo-géographique de la Combe d'Arc.

Sur la base de l'ensemble de ces données, il est possible de proposer un premier cadre précis de reconstitution des dynamiques sédimentaires de la Combe d'Arc et de leurs impacts dans la facture paysagère.

PHASE 1 : Aggradation à + 45 m.

Peu de témoins en place ont été conservés de la terrasse à + 45 m ; quelques lambeaux existent encore au niveau de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc, notamment au nord de la butte de Montingrand où un banc de convexité en forme de croissant est encore visible. Cette terrasse représente un stade ancien qui explique la faible conservation des témoins en place. Du fait de leur indigence, ils n'ont pu être correctement représentés sur le modèle 3D. Néanmoins, son altitude élevée par rapport au Pont d'Arc (110 m NGF, 10 m au-dessus de la voûte de l'arche) permet de considérer le recoupement du pédoncule lors de cette période de sédimentation alluviale comme très peu vraisemblable.

PHASE 2 : Incision dans les sédiments.

Après cette ancienne phase de remblaiement sédimentaire, la rivière incise le lit alluvial. Cette phase d'incision pourrait être éventuellement corrélée avec les observations menées dans plusieurs cavités des gorges de l'Ardèche où des galets à dominante granitique sont présents dans les réseaux souterrains. Les observations menées autour de la butte de Montingrand dans un contexte plus propice à la conservation des dépôts (plaine d'épandage) montrent que la terrasse à + 30 m semble emboîtée dans celle à + 45 m. Ce constat reste à considérer avec prudence étant donné que les dépôts au nord de la butte de Montingrand sont aujourd'hui protégés des flux érosifs. Une estimation du niveau potentiel du talweg rocheux peut néanmoins être tentée par l'analyse des niveaux de drains endokarstiques dans les gorges de l'Ardèche. En considérant que les niveaux de drain se calent sur un ancien niveau de base hydrographique (Ford et Ewers, 1978 ; Delannoy, 1997 ; Palmer et Audra, 2004) le développement important du niveau à + 10 m (par rapport à la rivière actuelle) pourrait ainsi être, soit une phase de karstification générée par une Ardèche coulant sur son talweg rocheux à + 10 m, soit un niveau réemprunté par le cours d'eau au cours de l'incision progressive de la rivière dans son encaissant.

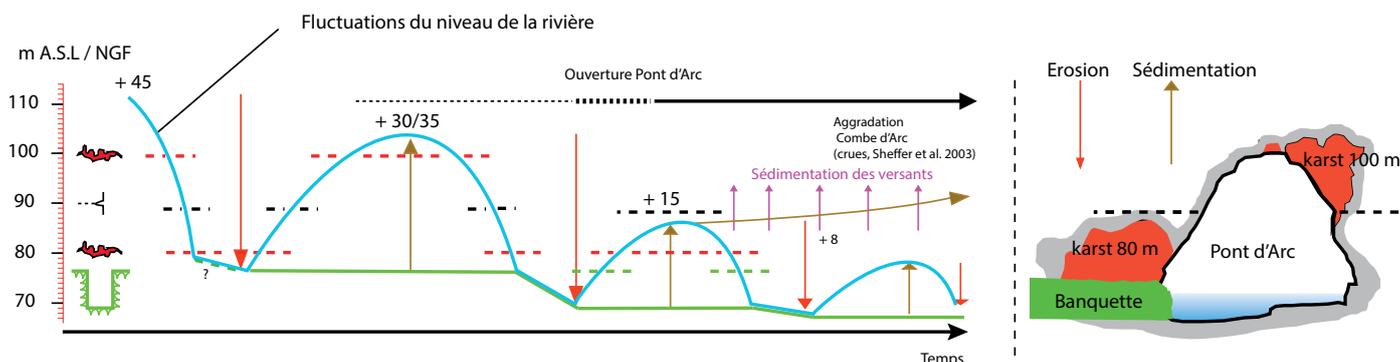


Figure 104 : Modèle d'évolution du recouplement de méandre amélioré par l'apport de la prospection géophysique ERT, qui remplace la terrasse de galets à + 15 m au cœur du processus de recouplement. Considéré ici comme une surface d'abandon fluviatile, ce niveau de galets caractérise la dernière phase de circulation pérenne dans le Cirque d'Estre. L'érosion du niveau de galets partout ailleurs dans les Gorges de l'Ardèche marque l'abandon définitif du méandre et le passage pérenne de l'Ardèche sous l'arche du Pont d'Arc.

Evolution model of the meander shortcut improved with the 3D geophysical prospection. The buried sediments cartography reveals that the pebble deposits can be considered as an abandonment surface which characterizes the final process of the meander shortcut.

PHASE 3 : Aggradation alluviale à + 30 m.

Cette phase, bien conservée dans la plaine de Vallon-Pont-d'Arc, a remblayé le cours de l'Ardèche avec 30 à 35 m de sédiments. Cette phase rapportée à une période froide du Pléistocène (Labrousse, 1977 ; Génuite et al., 2018b) représente également un stade de comblement important. Les coupes dans les sédiments de ce niveau ont montré des alternances de matériaux grossiers et fins, caractéristiques des morphologies de tressages d'aggradation.

Ce niveau passe au-dessus de la voûte de l'arche du Pont d'Arc qui ne devait donc pas exister, tout au moins dans le paysage contemporain de cette phase.

PHASE 4 : Incision des sédiments et du bedrock.

L'incision de la terrasse à + 30 m est un stade morphogénique important. L'érosion régressive déblaie progressivement le lit alluvial jusqu'à ce que le cours d'eau atteigne le bedrock. Durant cette phase, la rivière emprunte toujours le méandre de la Combe d'Arc. On rapporte à cette même dynamique l'incision du lit rocheux sur environ 5 m d'épaisseur : les banquettes rocheuses sont les témoins de cette phase érosive liée à une Ardèche empruntant encore la Combe d'Arc comme le suggèrent les relevés géophysiques qui ont montré la préservation des banquettes sous les dépôts. La phase terminale de l'incision du talweg rocheux sous la Combe pourrait alors représenter un moment possible où l'Ardèche commence à recouper son méandre.

PHASE 5 : Aggradation à + 15 m et recouplement.

Une nouvelle phase d'aggradation se met en place jusqu'à + 15 m (localement à 85 m NGF). Cette dernière correspond à l'invasion du méandre de la Combe d'Arc de galets, qui attestent d'une circulation pérenne au sein de ce dernier. L'éventuel recouplement hydrologique au niveau du talweg

rocheux (vers 70 m NGF) aurait alors été bloqué par l'aggradation sédimentaire, forçant l'eau à repasser dans le méandre. Cette phase d'aggradation est aujourd'hui toujours conservée au sein du méandre abandonné et constitue ainsi un marqueur clair de son recouplement. Après cette phase d'aggradation, l'érosion régressive ne repasse plus par le méandre mais bien par le recouplement du Pont d'Arc.

PHASE 6 : Abandon du méandre.

Le stade 6 représente l'abandon des circulations pérennes dans le méandre. La morphogénèse fluviatile diminue donc au sein de ce dernier et laisse la place à une sédimentation originaire des versants (tabliers d'éboulis) qui atteste également de la « fossilisation » du niveau à + 15 m et de l'arrêt quasiment total des dynamiques fluviatiles dans le méandre.

Les sédiments de versant ne sont donc pas remobilisés et progradent vers le centre de l'ancienne vallée.

PHASE 7 : Aggradation à + 8 m.

A l'échelle de la plaine de Vallon Pont d'Arc, un dernier niveau grossier a été repéré aux alentours de + 8 m (voir chapitres 3 et 4). Ce niveau sédimentaire est visible le long de la rivière, mais n'est pas présent dans le méandre. Il représente donc un stade d'aggradation de la rivière où cette dernière passe sous l'arche.

PHASE 8 : Situation actuelle.

Aujourd'hui, le méandre de la Combe d'Arc peut être considéré comme définitivement abandonné, hormis lors d'événements exceptionnels. Les premiers mètres de sédiments de la Combe d'Arc investigués par Sheffer et al. (2003) témoignent du passage occasionnel de l'eau lors de fortes crues.

Ces phénomènes puissants déposent alors les sédiments fins qui recouvrent aujourd'hui le toit des galets à 85 m NGF. La dernière crue Holocène enregistrée dans le méandre date maintenant de quasiment 130 ans (1890) et témoigne de conditions climatiques et biogéniques différentes (déforestation et péjoration climatique du Petit Age Glaciaire) qui rendent peu probable le retour du passage de l'eau dans le méandre. La rivière s'écoule désormais sous l'arche du Pont d'Arc et continue d'élargir sa structure naturelle.

6. Conclusion.

La tomographie électrique haute - densité a permis d'identifier des morphologies enfouies dans le méandre abandonné. La concordance des résultats avec ceux de deux approches méthodologiques (géomorphologie fluviale (Génuite et al., 2018b) et géomorphologie karstique (Génuite et al., 2019)) permet de proposer un modèle d'évolution du méandre et de contraindre le recoupement dans le cadre d'un scénario d'évolution par phases. Ainsi, le niveau de galets à + 15 m a pu être identifié comme une terrasse d'abandon représentant la dernière phase d'écoulement pérenne de l'Ardèche dans le méandre. Par la suite, le percement du Pont d'Arc peut être considéré comme l'axe privilégié des écoulements. Ces résultats, intégrés au sein de l'approche géomorphologique 3D, contribuent à la compréhension des dynamiques passées de l'Ardèche, et à la construction d'un modèle chronologique relatif détaillé replaçant clairement l'abandon du méandre juste après le maximum d'aggradation de la terrasse à + 15 m.

L'intégration de ces résultats dans un modèle 3D géomorphologique constitue un apport méthodologique nouveau dont l'intérêt, en termes de compréhension des processus, a été établi dans ce chapitre. L'utilisation de différentes approches (géomorphologie fluviale, karstique, ERT 3D) visait, dès le départ, à construire un modèle d'évolution géomorphologique du méandre et de son recoupement. La diversité de ces approches mobilisées autour d'un même référentiel géométrique en 3D a favorisé les recoupements d'informations topographiques et géomorphologiques.

Les méthodes développées dans ce chapitre et les précédents (3 et 4) ont donc permis de poser les jalons d'une chronologie relative basée sur l'étude de l'emboîtement des formes. Cette chronologie relative reste cependant à consolider et à caler dans le temps par l'apport de datations (cf. chapitres 6 et 7).

Figure 105 : Modèle simplifié des évolutions morphologiques du méandre de la Combe d'Arc depuis l'aggradation de la terrasse à + 30 m jusqu'à la situation actuelle. Ce modèle représente les 8 phases décrites précédemment.

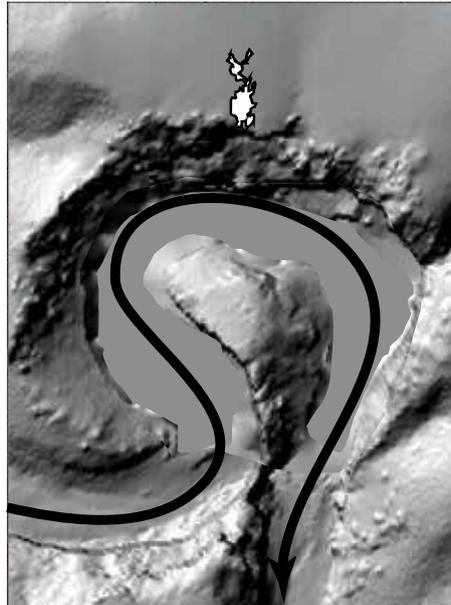
Landscape evolution of the Combe d'Arc meander from the + 30 m aggradation stage to its current state. This model is the interpretation of the 8 previously described stages.



PHASE 1



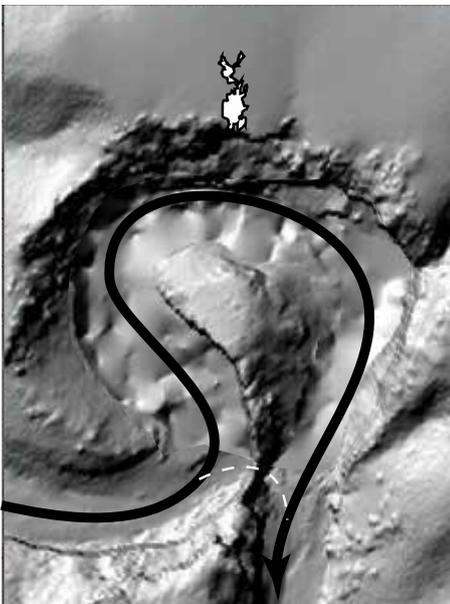
PHASE 2



PHASE 3



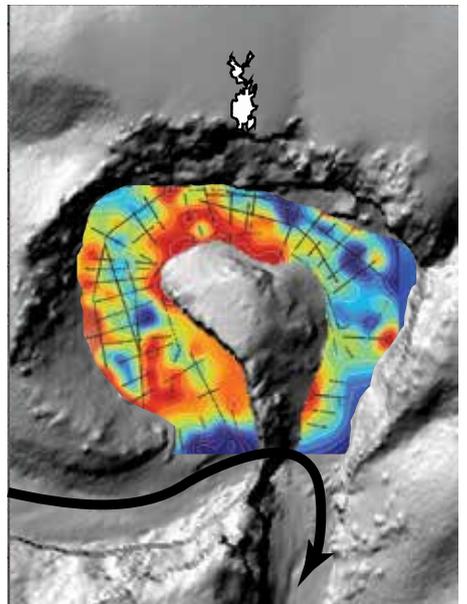
PHASE 4



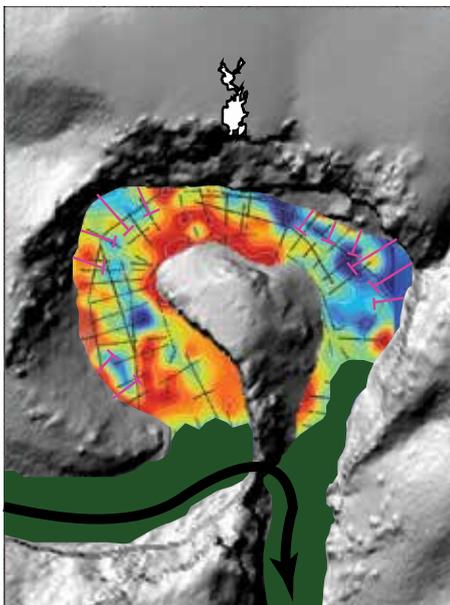
PHASE 5



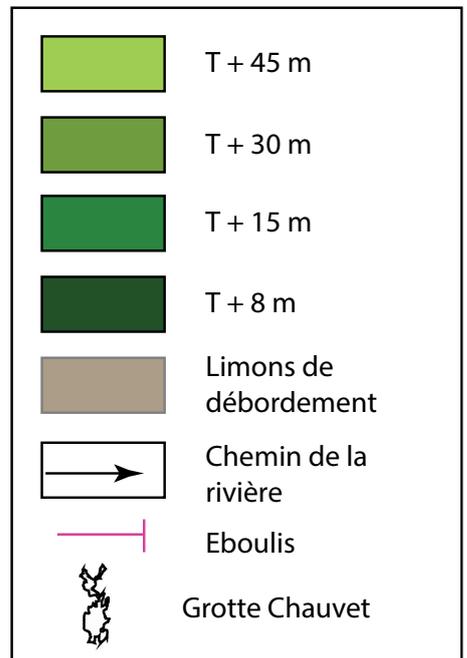
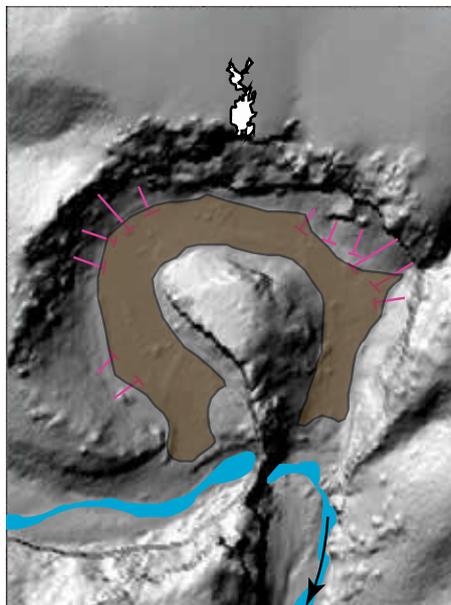
PHASE 6



PHASE 7



PHASE 8



Photographies de terrain



Photo 12 : Placement d'une électrode le long d'un câble, près d'un *take-out*. Campagne de géophysique 2017. Crédits : K. Génuite, 2017.



Photo 13 : Passage des bobines en forêt. Crédits : L. Ravanel, 2019.



Photo 14 : Outil de mesure de la résistivité électrique : ABEM SAS 4000. Crédits : L. Ravanel, 2019.



Photo 15 : Mise en place d'un profil proche de la rivière, à l'amont du Pont d'Arc. Crédits : L. Ravanel, 2019.



Photo 16 : Passage des cables et des électrodes sous les piquets de vigne. Crédits : A. Revil, 2019.

PARTIE III

CHRONOLOGIE ET 3D.

Les deux premières parties de ce travail de thèse ont porté sur la mise en relation des formes, leur emboîtement chronologique, afin de définir une stratigraphie détaillée des événements.

Ce modèle d'évolution s'est construit à partir des observations menées dans la vallée de l'Ardèche, les conduits endokarstiques des gorges ainsi que la prospection géophysique menée dans le méandre de la Combe d'Arc.

Cette troisième partie rassemble les résultats des travaux de chronologie absolue menés au sein de la vallée de l'Ardèche, et les interprétations qui en découlent:

Des campagnes de datation par Uranium/Thorium sur les spéléothèmes de la grotte des Châtaigniers (chapitre 6). Des datations par résonance de spin électronique (ESR) réalisées sur les terrasses alluviales de l'Ardèche (chapitre 7), et enfin, une étude des dynamiques d'érosion/dépôt suite à ces calages chronologiques (chapitre 8).

Cette dernière partie s'intéresse donc au Temps, relatif et absolu, comme outil de synthèse par rapport au modèle topographique. Ce dernier prend ici le rôle de passerelle entre les temporalités géologiques, climatiques, le temps des formes et celui des hommes.

CHAPITRE 6

LES SPÉLÉOTHEMES DE LA GROTTÉ DES CHATAIGNIERS

ARCHIVES CHRONOLOGIQUES ET INDICATEURS DE L'INCISION PLÉISTOCÈNE DE L'ARDÈCHE.

Dans l'objectif de caler chronologiquement les différents repères morphogéniques susceptibles de restituer l'évolution de l'incision de l'Ardèche et l'ouverture du Pont d'Arc, des campagnes de prélèvement ont été réalisées sur les terrasses de l'Ardèche (cf. infra Chapitre 7) et dans l'endokarst (ce chapitre). Entre 2017 et 2019, l'attention a été portée aux datations de spéléothèmes de la grotte des Châtaigniers afin de contraindre le modèle d'emboîtement établi précédemment (chapitres 4 et 5) dans une chronologie absolue. L'inscription des résultats obtenus dans le cadre topographique précédemment contraint tant altitudinalement que pour les emboitements de formes, autorise d'étendre les données acquises au-delà de la cavité, notamment en lien avec les surfaces alluviales repères. Deux approches différentes d'analyse des spéléothèmes ont été mobilisées pour créer des espaces de dialogue pertinent entre l'endokarst et les dynamiques alluviales de l'Ardèche (sédimentation et incision). Ces deux approches structurent les deux parties de ce chapitre :

- La première traite de l'apport de la méthode de datation géochronologique de spéléothèmes par mesures isotopiques par déséquilibre dans la famille de l'Uranium 238 (méthode U-Th) (Quinif, 1989 ; Pons-Branchu et Quinif, 2018). Cette méthode a été utilisée pour contraindre le modèle d'évolution géomorphologique Pléistocène de la basse Ardèche. La datation des spéléothèmes, en tant que terminaux ante quem et post quem (Desachy et al., 2012), peut permettre d'associer des altitudes de dépôt à des phases d'évolution de la rivière (Losson et Quinif, 2001 ; Jaillet, 2005). Ce chapitre présente les résultats des mesures réalisées par E. Pons-Branchu au LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement).

- La seconde partie traite de l'analyse haute-résolution par les méthodes combinées de fluorescence induite par excitation laser UV en phase solide (SPF) (Baker, 1997 ; Quiers et al., 2015), avec la fluorescence X (XRF) (Croudace et Rothwell, 2015) de la base de la concrétion CHAT-02 dont la période de croissance, datée nous le verrons, entre 50 et 30 ka par l'U-Th, pourrait être synchrone des périodes d'occupation humaine connues de la grotte Chauvet. Une étude sédimentologique plus détaillée a été menée sur la concrétion CHAT-02 en collaboration avec A-L. Develle et Y. Perrette du laboratoire EDYTEM. L'enregistrement géochimique de cette concrétion permet d'interroger les paramètres morphogéniques de la rivière sur le niveau altitudinal de la concrétion et offre l'opportunité de replacer son évolution dans une chronologie continue.

1. Du modèle chronologique par phases au modèle chronologique absolu.

1.1 Stratégie d'échantillonnage des concrétions.

L'étude géomorphologique des dépôts fluviaux dans les gorges de l'Ardèche, dans les conduits endokarstiques et dans les dépôts alluviaux du méandre abandonné, a permis de construire un cadre d'emboîtement théorique des morphologies observées et décrites par l'intermédiaire de la topographie haute-résolution et de la tomographie de la résistivité électrique. Néanmoins, ce modèle d'emboîtement permet seulement de raisonner selon une chronologie relative, organisée en phases (Génuite et al., 2019). Dans l'objectif de contraindre les dynamiques fluviales + 8 m, + 15 m et + 30 m dans une chronologie absolue, une série de datations U-Th a été réalisée dans le méandre recoupé, dans la grotte des Châtaigniers, sur 5 concrétions. Ces dernières ont été choisies pour cible de datation parce qu'elles se trouvent dans une tranche altitudinale en lien avec les terrasses + 8m, + 15 m et + 30 m de la rivière et qu'elles sont scellées par des dépôts argileux rythmés. Ceux-ci peuvent potentiellement correspondre aux niveaux fluviaux retrouvés à l'extérieur. L'intégralité des échantillons a été prélevée dans la partie terminale de la grotte des Châtaigniers, seule zone permettant une vision complète des morphologies sur l'ensemble des niveaux étagés (figure 106). Cette dernière partie se présente sous la forme d'un grand toboggan (dénivelé de 7 m) démarrant à partir du drain à + 100 m NGF et se terminant par une verticale de 13 m qui permet d'accéder au fond de la cavité, vers 80 m NGF. Tout en haut du Toboggan, vers 100 m NGF, on observe un important replat qui est le siège d'un dépôt argileux. Ce dernier est vraisemblablement contemporain de la mise en place des cristaux à dents de cochon, marqueurs potentiels d'un ancien niveau épiphréatique courant sur toute la longueur du drain à 100 m NGF. Le replat marquant le fond du puits (cf. infra, chapitre 4, figure 82) est occupé par un autre niveau argileux rythmé et localement soutiré en direction du siphon de la grotte des Châtaigniers, dont le niveau est sensiblement équivalent à celui de l'Ardèche actuelle. Des concrétions ont poussé sur ces différents niveaux argileux qui les ont parfois fossilisés par ces derniers. Dans le puits final de la grotte, les niveaux correspondant aux terrasses + 8 m et + 30 m ont été identifiés. L'absence de conservation d'éventuels dépôts argileux correspondant à la terrasse à +15 s'explique possiblement par la verticalité du puits qui ne l'a pas

permise. Les échantillons prélevés étaient à chaque fois assez proches des niveaux repères fluviaux + 8 m, +15 m et + 30 m dans l'objectif de renseigner ces derniers en tant que terminaux post quem et ante quem (Desachy, 2005), ce qui signifie que l'on ne date pas les dépôts fluviaux (représentés dans la cavité par les dépôts argileux rythmés), mais un événement qui scelle ces derniers ou qui a été scellé par eux. Ce concrétionnement de type stalagmite est généré par un mode d'alimentation goutte-à-goutte par gravité, et ne peut se mettre en place que lorsque la cavité est dénoyée donc que le niveau phréatique, lui-même contrôlé par la rivière, est descendu.

L'approche géomorphologique combinée aux résultats des datations peut constituer un moyen efficace pour déterminer la validité ou non d'un échantillon. Il paraissait donc indispensable que les concrétions prélevées soient cartographiées avec une précision élevée, notamment concernant leur position altitudinale (figures 106, 107 et 108). Des mesures de cheminement réalisées sous terre en aller-retour avec un DistoX ont permis de proposer des altitudes avec une incertitude de l'ordre de +/- 20 cm, compatible avec le projet d'une discrimination de terrasses alluviales séparées de quelques mètres et de crues de l'Ardèche, elle aussi plurimétriques.

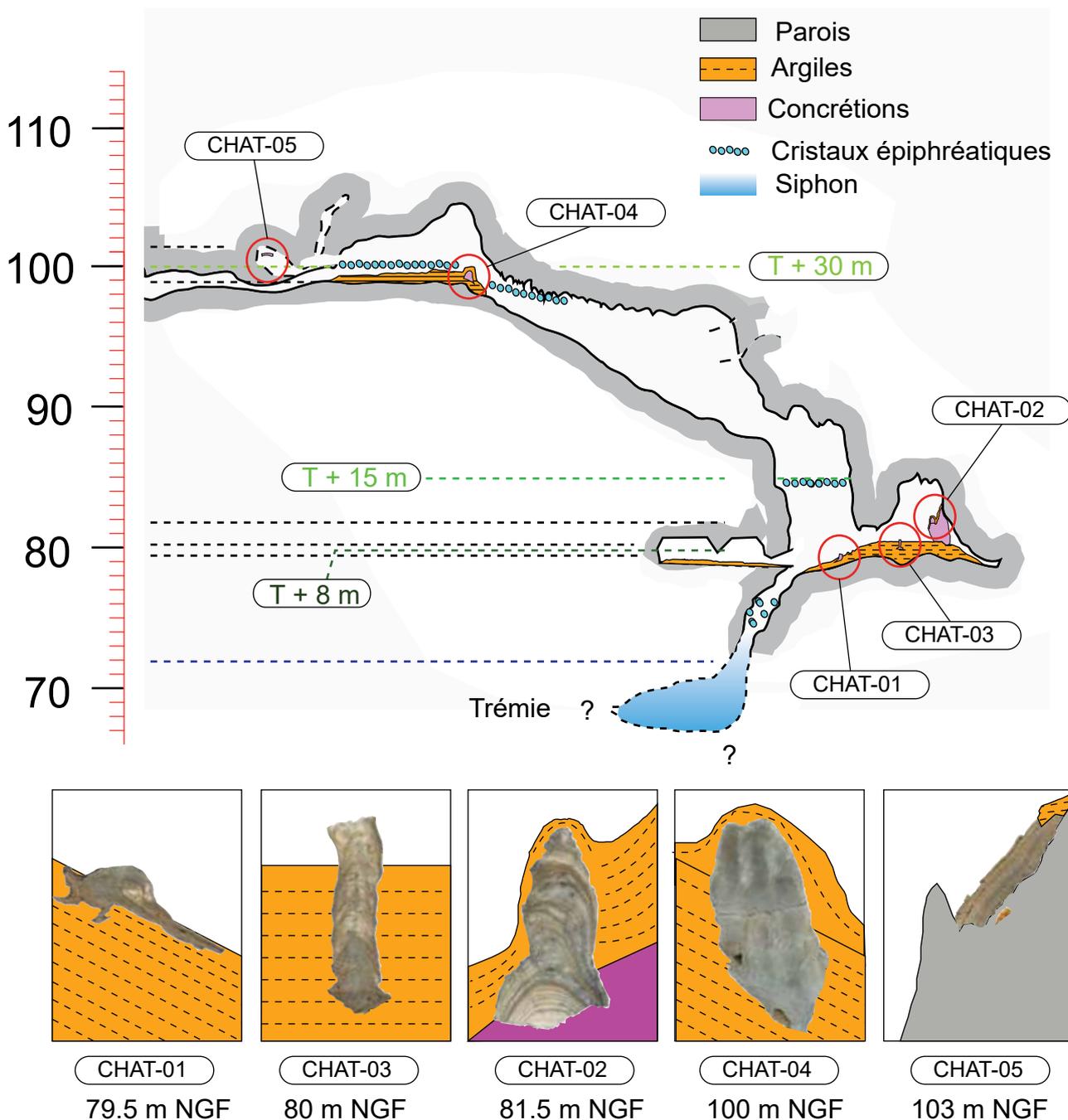
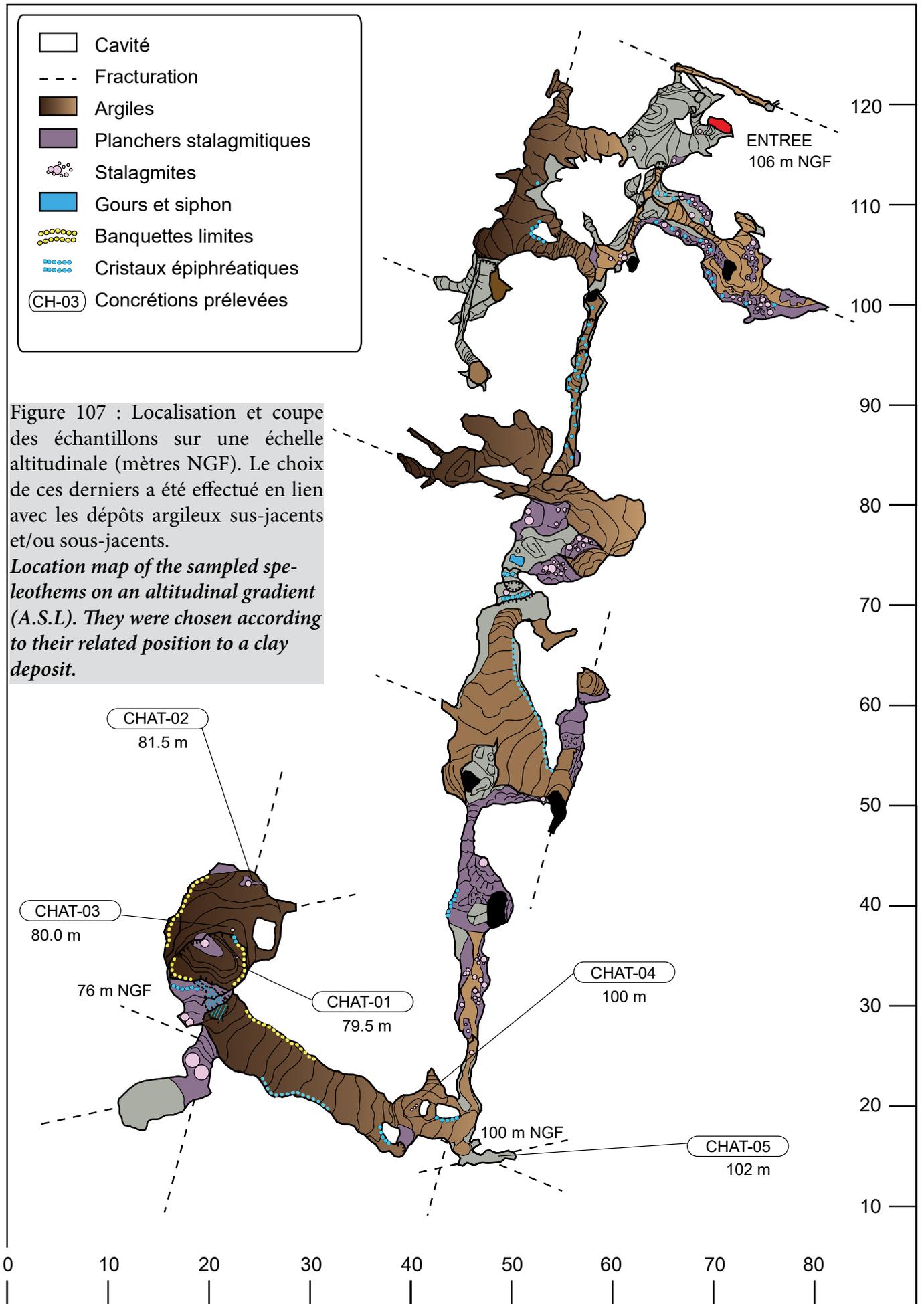


Figure 106 : Cartographie des prélèvements des stalagmites dans le puits final de la grotte des Châtaigniers. 5 concrétions ont été prélevées dont 4 stalagmites (CHAT-01,02,03 et 04) ainsi qu'un plancher stalagmitique (CHAT-05). L'échelle planimétrique est en mètre. Les altitudes de prélèvement sont en NGF.

Location map of the samples analysed. The 5 of them were taken from the final pit, including 4 speleothems (CHAT-01,02,03 and 04) and one stalagmitic floor (CHAT-05).



Les datations ont été effectuées par spectrométrie de masse avec la méthode MC-ICPMS décrite dans Pons-Branchu et al. (2014) et est couramment appliquée pour dater la croissance de concrétions carbonatées, souvent dans un objectif de recherche paléoclimatique : Plagnes et al. (2002) ; Genty et al. (2003) ; Wainer et al. (2011) ; Drysdale et al. (2006) ; Drysdale et al. (2007). Elles sont également utilisées sur des concrétions scellant des dépôts, dans l'objectif de mieux contraindre les relations d'étagement karst / rivière (Losson et Quinif, 2001) ou karst/glacier (Jaillet et al., 2018). Les stalagmites prélevées sur le terrain ont été tranchées dans le sens de la hauteur. La face a été polie en utilisant une succession de disques abrasifs (de P600 à P1200) et analysée pour identifier l'organisation stratigraphique (fabriques, hiatus) et la lamination, (Couchoud, 2006). Les secteurs les plus pertinents, offrant une calcite compacte et homogène et permettant de dater les pieds et sommets ont alors été prélevés en suivant au mieux les lamines de croissance sur quelques millimètres d'épaisseur. Ces échantillons de petite taille (entre 150 et 400 mg), ont été dissous à l'acide chlorhydrique dilué. La séparation des fractions uranium et thorium a été effectuée sur résines échangeuses d'ions (Pons-Branchu et al., 2014), puis analysés par MC-ICPMS de type Neptune +. Après analyse, les résultats sont obtenus selon le protocole décrit par ces mêmes auteurs. Globalement, l'ensemble des résultats (tableau 2) montre une relation entre l'âge de croissance des spéléothèmes et leur altitude : plus la concrétion est haute par rapport à la rivière, plus l'âge obtenu est ancien. L'ensemble des échantillons

couvre quasiment tout l'intervalle de validité de la méthode U/Th (Pons-Branchu et al., 2004 ; 2018) qui s'étend sur une période allant de l'Holocène récent pour CHAT-01 (environ 2 ka), pour remonter jusqu'au Pléistocène moyen pour CHAT-05 (> 400 ka).

En dépit d'une grande cohérence altitudinale globale, certains échantillons (notamment pour la concrétion CHAT-02) donnent des résultats en inversion stratigraphique. Sachant que l'utilisation des concrétions à des fins chronologiques dans des systèmes actifs - battements de nappe, rivières souterraines - pour dater des dépôts implique des risques de contamination pouvant engendrer des erreurs dans la méthode de datation (Geyh, 2001). En effet, une croissance perturbée de la concrétion (système cristallin ouvert) peut engendrer des phénomènes de migration de l'uranium ou du thorium au sein de la concrétion et ainsi fausser la datation. De même, l'apport extérieur des dépôts argileux peut générer une contamination par du thorium détritique qui rend l'âge apparent plus vieux que l'âge réel. Des corrections peuvent intervenir. Elles sont basées sur une estimation du rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ de la phase détritique et la mesure du ^{232}Th dans l'échantillon. Plus de rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ mesuré dans l'échantillon est bas, plus grande est l'influence supposée de l'apport de thorium détritique et plus la correction d'âge est importante. Néanmoins, quand la quantité de thorium détritique est très importante dans l'échantillon, comme cela peut être le cas dans un système fluvial épiphréatique actif, il peut être difficile de d'estimer la fiabilité d'un résultat comme cela a pu être reconnu, pour prendre un exemple local, à Foussoubie (Jaillet et al., 2012).

Labcode	^{238}U ppm	^{232}Th ppb	$d^{234}\text{U}_M$ (‰)	$(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U})$	$(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$	Age (ka)	$d^{234}\text{U}_T$ (‰)	Age corrigé (ka)								
CHAT 2017-1A	0,276	0,002	16,98	0,14	-147,89	0,91	0,0820	0,0004	4,04	0,02	11,07	0,07	-150,9	1,2	7,25	1,95
CHAT 2017-1B	0,117	0,001	5,65	0,05	-131,65	0,73	0,0410	0,0006	2,58	0,04	5,29	0,08	-132,5	0,9	2,34	1,54
CHAT 2017-5A	0,378	0,003	11,62	0,09	15,33	1,24	1,0444	0,0040	104,39	0,40	400,00				400,00	
CHAT 2017-5B	0,315	0,003	44,81	0,36	15,55	0,71	0,9997	0,0057	21,66	0,12	425,00				419,00	
CHAT 2017-4A	0,193	0,002	0,11	0,00	36,80	1,68	1,0120	0,0033	5660,17	18,21	364,27	15,14	103,0	6,4	364,24	15,15
CHAT 2017-4B	0,255	0,002	0,08	0,00	41,32	0,90	0,8123	0,0103	8407,01	107,08	162,47	5,05	65,4	1,7	162,46	5,06
CHAT 2019-4D	0,254	0,002	2,032	0,016	40,02	0,82	1,0123	0,0026	388,6	0,7	353,44	9,249	108,55	3,6	353,07	9,409
CHAT 2019-4H	0,088	0,001	0,718	0,006	24,75	1,81	0,9865	0,0044	371,0	1,3	339,49	15,41	64,535	5,5	339,11	15,561
CHAT 2019-4G	0,083	0,001	0,592	0,005	33,28	1,38	0,9822	0,0054	424,0	1,8	309,45	12,18	79,72	4,3	309,12	12,317
CHAT 2019-4E	0,292	0,002	2,773	0,022	41,10	0,84	1,0115	0,0021	326,0	0,5	348,11	7,478	109,79	3,3	347,66	7,6745
CHAT 2019-4F	0,126	0,001	0,585	0,005	39,64	1,22	1,0003	0,0037	659,0	1,4	328,14	10,57	100,14	4,3	327,92	10,659
CHAT 2017-3A	0,197	0,002	4,55	0,04	-291,42	1,00	0,0897	0,0013	11,92	0,17	14,92	0,26	-302,5	1,4	13,17	1,12
CHAT 2017-3B	0,192	0,002	14,11	0,11	-257,43	1,02	0,1277	0,0020	5,35	0,08	20,84	0,39	-269,1	2,5	15,66	2,91
CHAT 2017-2A	0,323	0,003	5,24	0,04	-62,67	1,47	0,3472	0,0008	66,22	0,15	50,83	0,26	-72,2	1,7	49,91	0,72
CHAT 2017-2B	0,603	0,005	59,26	0,48	-30,13	0,98	0,2699	0,0006	8,50	0,02	35,67	0,14	-32,8	1,1	30,46	2,69
CHAT 2017-2C	0,330	0,003	9,86	0,08	-54,03	1,35	0,3799	0,0013	39,31	0,14	56,40	0,38	-63,1	1,6	54,73	1,20
CHAT 2017-2D	0,255	0,002	20,75	0,17	-91,00	1,35	0,5809	0,0069	22,00	0,26	114,26	2,80	-124,0	2,6	109,52	5,03
CHAT 2018-2E	0,307	0,002	3,136	0,0256	-47,01	1,101	0,3651	0,0021	108,01	0,48	52,99	0,48	-54,5	1,3	52,40	0,77
CHAT 2018 2F	0,239	0,010	9,047	0,073	-88,7	3,521	0,5077	0,0017	40,54	0,11	90,58	1,12	-113,8	4,6	88,31	2,22

Tableau 2 : Synthèse des datations U-Th réalisées sur les échantillons de la grotte des Châtaigniers.
U-Th dating table of the 5 sampled speleothems of the Châtaigniers cave.

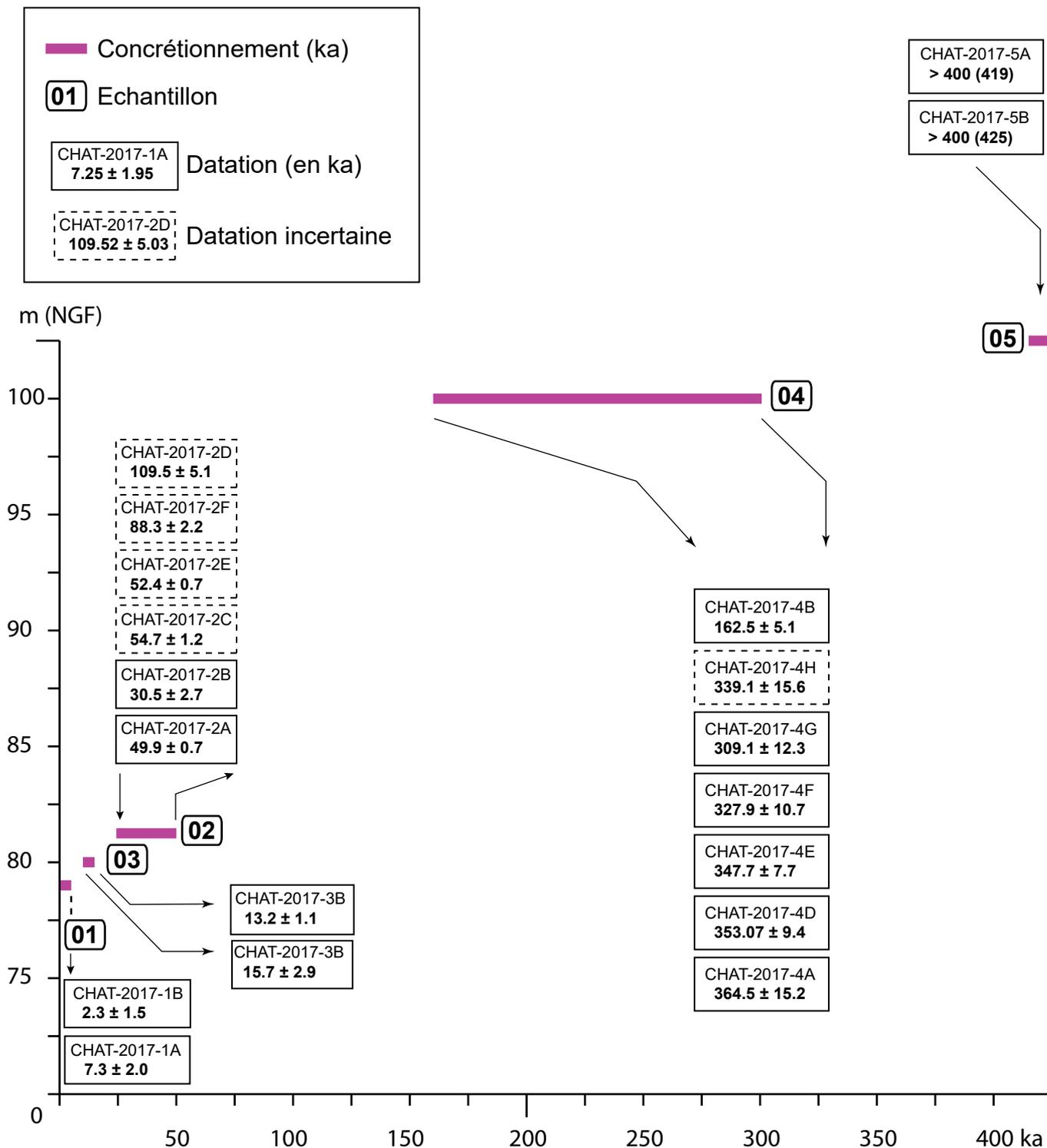


Figure 108 : Altitudes et phases de croissance des 5 concrétions échantillonnées dans la grotte des Châtaigniers. *Altitude and growth phase of the 5 sampled speleothems of the Châtaigniers cave.*

Les résultats et les ratios chimiques des datations (Tableau 2) seront discutées pour chaque concrétion dans la section qui suit. Des études sur stalagmites « sales », c'est-à-dire contenant une fraction importante de matériel détritique argileux, ont montré un enregistrement possible des fluctuations de niveaux d'eau souterrains (Lauritzen, 1996 ; Jaillot, 2005 ; Jaillot et al., 2012).

Dans la Combe d'Arc (91 m NGF), l'étude de Sheffer et al. (2003) a d'ailleurs montré un enregistrement des inondations de la plaine du méandre abandonné

lors des crues de la rivière Ardèche. Il paraît donc possible, qu'associées aux crues de l'Ardèche, des mises en charge du karst aient pu être enregistrées dans ces concrétions placées à la « bonne » altitude : au-dessus du niveau d'étiage, mais envoyées lors des crues de l'Ardèche.

1.2 Analyse des coupes des concrétions prélevées.

Nous présentons ici successivement les 5 prélèvements en décrivant la nature des dépôts et les dates obtenues. Les cinq stalagmites sont classées de bas en haut selon une grille altitudinale (différente du numéro d'ordre).

CHAT-01 :

La concrétion CHAT-01 a été prélevée au point altitudinal le plus bas de toute la série (79.5 m NGF). Cette stalagmite, datée ici entre environ 7 et 2 ka. Les âges obtenus sont en cohérence stratigraphique bien que présentant des taux de ^{232}Th relativement élevés et des rapports $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ faibles (4.04 et 2.58), surtout pour le haut de la concrétion. La concrétion a poussé sur le dépôt argileux du fond du puits qui est actuellement en phase de soutirage. L'organisation interne de la concrétion montre des racines se prolongeant vers l'aval, avec une base de la pousse formée directement dans le dépôt argileux. Cette configuration géométrique montre que la stalagmite, d'âge Holocène (7-2 ka), a commencé à croître alors que le remblaiement argileux était déjà en phase de soutirage. La quantité de ^{232}Th , moins élevée pour le haut de la concrétion, laisse penser que cette dernière a poursuivi sa croissance en étant de moins en moins impactée par d'éventuels ruissellements argileux issus du soutirage, laissant entendre que le remblaiement s'est relativement stabilisé.

CHAT-03:

La concrétion CHAT-03 a également poussé au sein du dépôt argileux du fond du puits, mais sur la zone non soutirée qui forme un replat à 80 m NGF (figure 110). La base de la pousse, bien formée, de cette dernière, atteste également d'une croissance sur les sédiments argileux. Ceux-ci la scellent sur 20 cm de haut depuis sa base montrant la poursuite des mises en charge après la croissance de la concrétion au moins sur cette portion. La pousse calcitique, mêlée aux sédiments argileux explique possiblement l'importance de la fraction de ^{232}Th dans cette dernière, ainsi que le faible rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (11.92 et 5.35). Malgré des barres d'erreur assez importantes, les deux dates (haut et bas) donnent un résultat stratigraphiquement cohérent (15-13 ka) et assez proches d'un point de vue temporel. Sachant que les concrétions datées dans la grotte Chauvet (Genty, 2012) suggèrent un arrêt du concrétionnement entre $22,10 \pm 0.4$ ka et 15.28 ± 0.25 ka, à cause du maximum du froid (global LGM) et considérant que ces résultats sont localement valables sur l'ensemble des systèmes endokarstiques du Cirque d'Estre compte-tenu de leur proximité (moins de 500 m), ces résultats confirment, à quelques centaines d'années près, le cadre climatique proposée par Genty (2012).

Figure 110 : Concrétion CHAT-03 (80 m NGF). Datée de l'Holocène, cette dernière a poussée directement sur le dépôt argileux à 80 m NGF comme le montre la base convexe de la pousse. Ensuite des mises en charge ont complété la pile argileuse scellant la stalagmite sur une vingtaine de centimètres de hauteur.

The CHAT-03 speleothem (80 m A.S.L) grew during the Holocene period inside the 80 m- clay deposit.

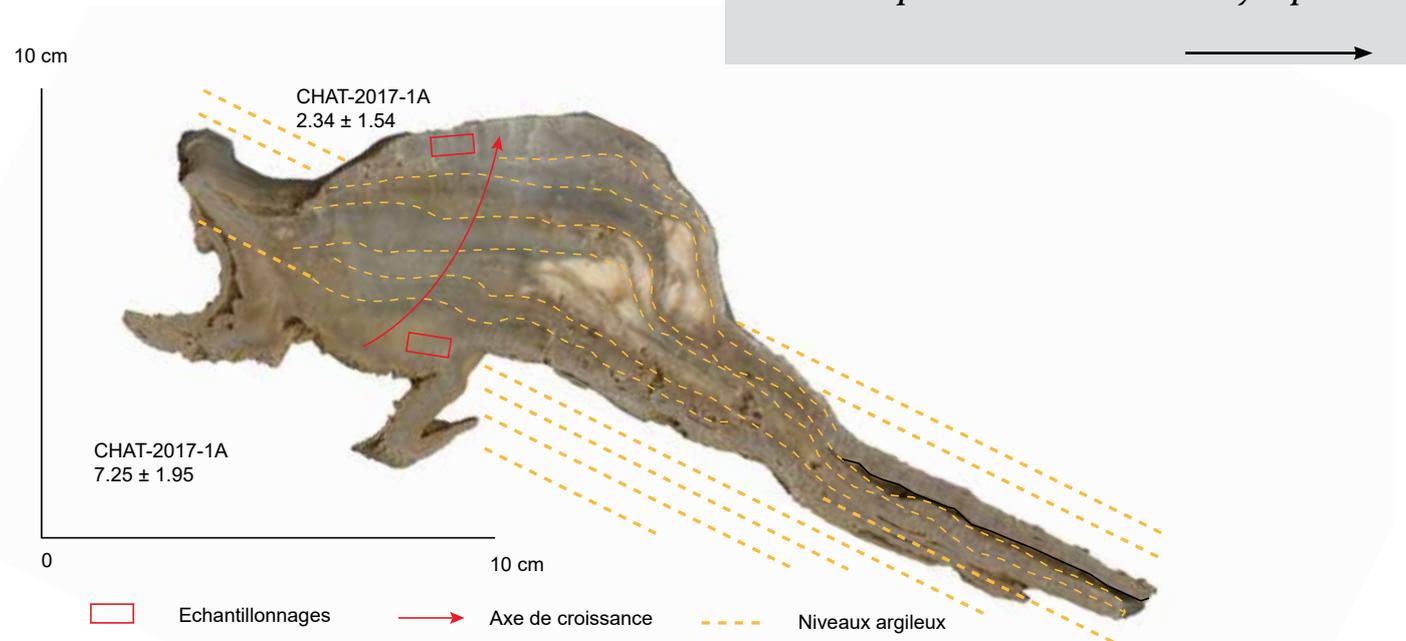


Figure 109 : La concrétion CHAT-01 (79.5 m NGF) pousse à l'intérieur d'un soutirage argileux. Ce dernier mène au siphon de la cavité. (dates en ka)

The CHAT-01 speleothem (79.5 m A.S.L.) grows inside a subsidence depression that leads to the cave sump. (results are given in kyrs).

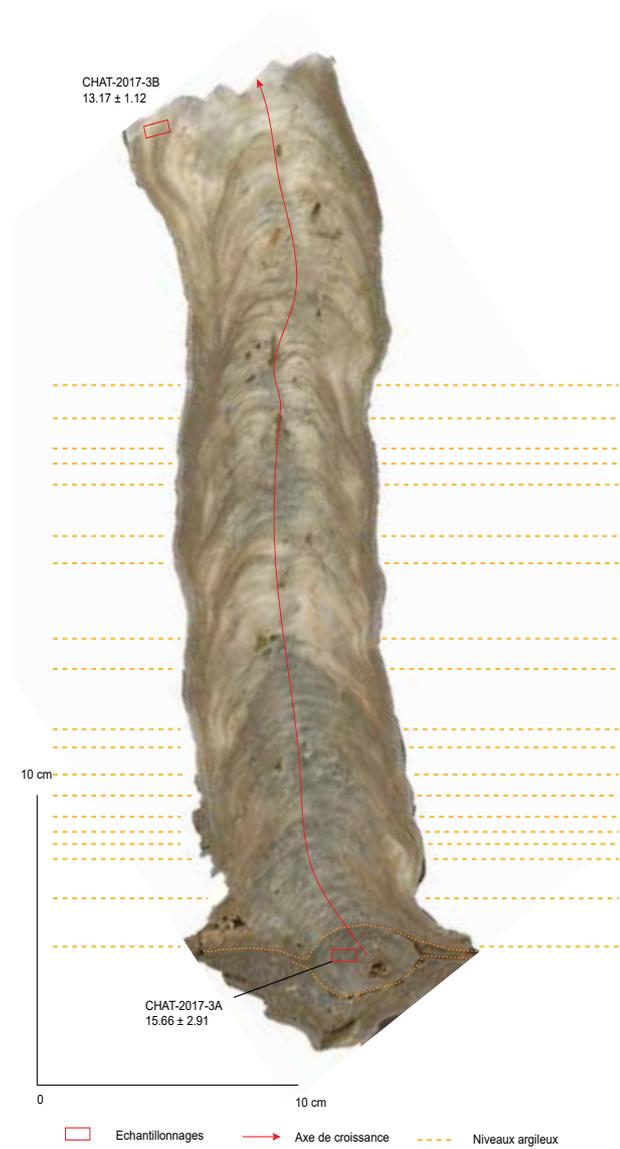
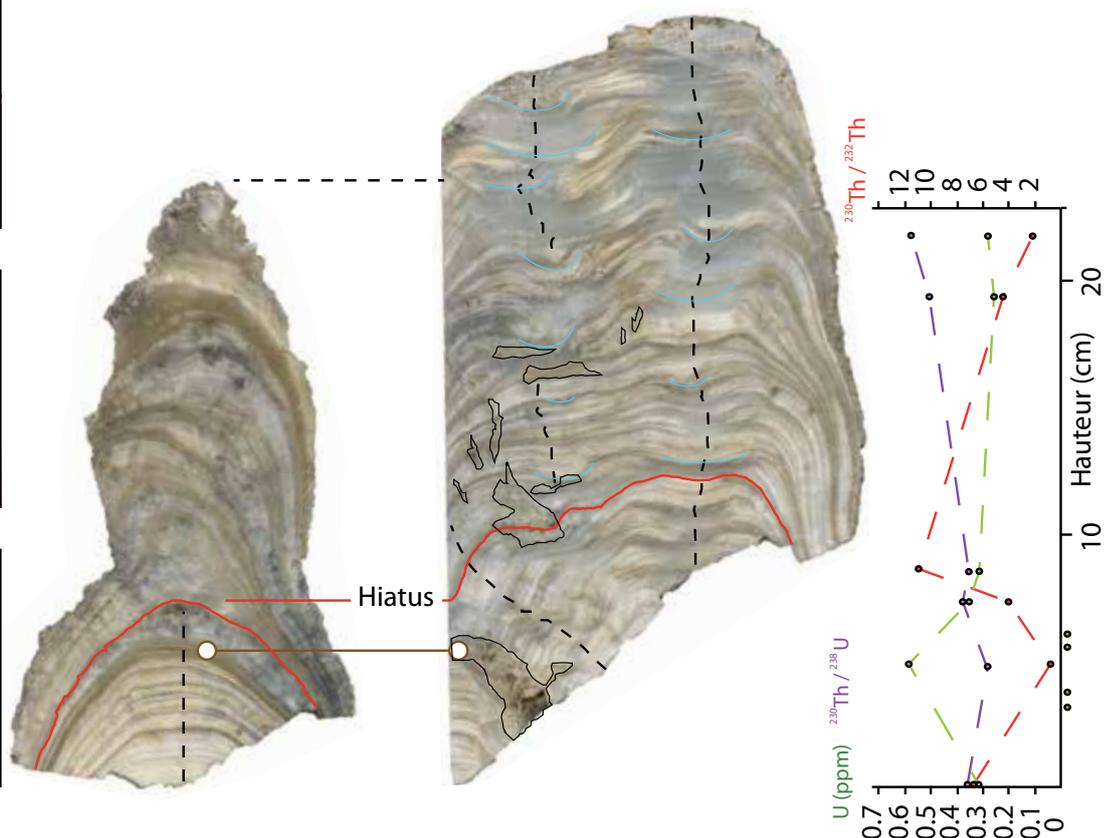
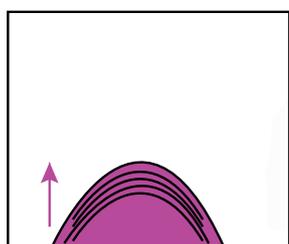
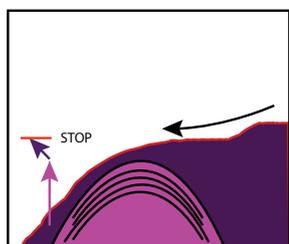
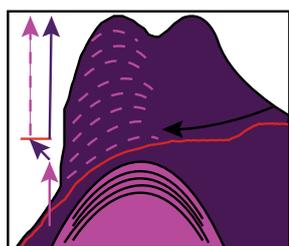


Figure 111 : Hypothèse de croissance et ratios isotopiques de la concrétion CHAT-02 : Après une croissance bien laminée et terminée par un hiatus argileux, la concrétion de droite finit par recouvrir la concrétion de gauche. Les zones ouvertes de la concrétion ont été entourées en noir tandis que les potentiels micro-gours ont été surlignés en bleu. Les deux grandissent ensuite ensemble, mais plus rapidement pour celle de droite. Les mesures U-Th ont été réalisées par spectrométrie de masse au LSCE. Les dates après le hiatus ont été rejetées car elles représentent des valeurs aberrantes tant au point de vue du reste du cortège de datations que du modèle géomorphologique. La vue présente deux sections polies à 90°.

Calcite growth model for CHAT-02: The calcite is well laminated in its early phase, then stops (hiatus) and is finally covered by another calcite deposit which grows faster on the right than on the left. Open areas are underlines in black and micro-pool areas in blue. CHAT-02 isotopic ratios and geochemical analysis were computed using MC-ICP mass spectrometer at LSCE laboratory. Dating results after the hiatus were considered as outliers, hence rejected, when compared to both the other datings and the geomorphological model.



CHAT-02 :

La concrétion CHAT-02, située à 81.5 m NGF, est également associée à un dépôt argileux la scellant partiellement. Néanmoins, il ne marque probablement pas un niveau de stabilité de la rivière. La faible épaisseur (quelques centimètres) et la stratigraphie en pente de ce dernier montrerait plutôt un dépôt issu du fluage des argiles sur le grand dôme concrétionné dont est issu ce prélèvement.

Cette concrétion, en elle-même, a fait l'objet d'une étude géochimique qui sera abordée dans la seconde partie de ce chapitre. La concrétion se compose de deux entités séparées par un hiatus bien marqué (figure 111). La seconde pousse stalagmitique semble être venue recouvrir la première et il semble qu'au-delà, les deux concrétions n'en forment plus qu'une seule (figure 111). Huit prélèvements pour datation ont été effectués. Les résultats des datations sont complexes à interpréter : parmi les huit prélèvements (Tableau 2), seuls 3 d'entre eux apparaissent en ordre stratigraphique (CHAT-2017-2A,2B, et 2G ; cf. supra, figure 107).

En dépit d'une calcite d'apparence opaque, la diversité de fabrique cristalline et l'alimentation sans doute complexe de cette concrétion ont pu perturber le dépôt stratigraphique, générant des incohérences notables, notamment dans la concentration en ^{234}U des prélèvements. En effet, malgré une concentration en ^{232}Th relativement faible (excepté pour CHAT-2017-2B) et des rapports $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ élevés, les âges de la concrétion semblent dépendants de la concentration en U qui va décroissante au fur et à mesure que l'on remonte vers le haut de cette dernière, au-dessus du hiatus de croissance. Cette perte en U au-dessus du hiatus de croissance pourrait être la marque de l'arrivée de la concrétion latérale. Cette dernière se comporterait alors comme un système ouvert (à noter les nombreux micro-gours visibles au sein des deux concrétions entremêlées), rendant indatable le haut de CHAT-02.

L'analyse des rapports isotopiques (tableau 2) permet néanmoins de constater que la quantité d'uranium ne chute pas dans la concrétion basale, seule zone où certaines dates sont en ordre stratigraphique. Cette observation permet de valider les dates basales, mais implique l'élimination de celles réalisées sur la seconde partie de la concrétion, au-dessus du hiatus de croissance.

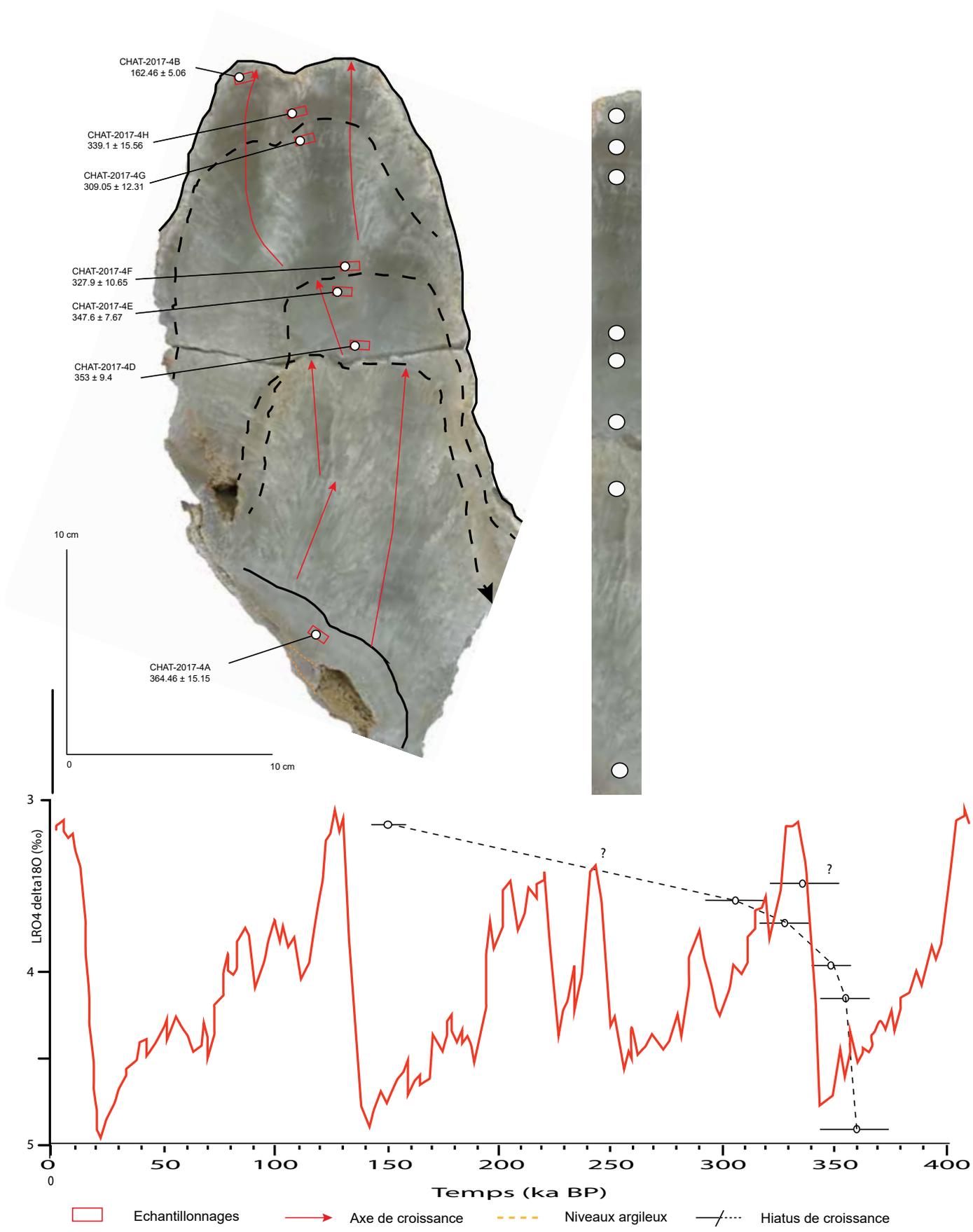
CHAT-04:

La concrétion CHAT-04 a été dégagée d'un banc argileux à 100 m NGF. Elle est datée entre $364,24 \pm 15,15$ ka (pied) et $162,46 \pm 5,05$ ka (sommets). La calcite est translucide, avec peu de thorium détritique, ce qui est confirmé par les rapports $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ très élevés. Plusieurs hiatus sont visibles sur cette stalagmite dont la croissance couvre une longue période allant de la fin du Pléistocène moyen MIS10, pour s'arrêter juste avant le maximum de l'avant-dernière période glaciaire (MIS6), d'après la datation la plus récente. La majorité des datations est en ordre stratigraphique et malgré un échantillonnage de part et d'autre des hiatus, cette stalagmite semble avoir presque entièrement poussée au cours du MIS9. La calcite translucide de la concrétion tranche avec les sédiments sur lesquels elle reposait, et qui la recouvraient. Ce contraste est à prendre en compte.

La concrétion a pu pousser pendant une très longue période sans qu'aucun apport argileux n'atteigne le niveau 100 m NGF pour finalement être recouverte par la suite. La datation la plus récente pose question car l'écart d'âge est très important par rapport à la majorité des âges plus anciens, sans qu'un hiatus ait été repéré visuellement en stratigraphie. Une explication possible pourrait être celle d'une mauvaise mesure à CHAT-2017-4H qui serait en fait plus récente, et replacerait donc le hiatus le plus récent au cours de l'avant-dernier interglaciaire. Etant donné le rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ très élevé de la date la plus récente et de rapports isotopiques cohérents avec les autres datations (voir figure 112), l'arrêt du concrétionnement à environ 160 ka nous semble cohérent.

Figure 112 : La concrétion CHAT-04 (100 m NGF) possède la plus longue plage de croissance de tous les échantillons de la grotte des Châtaigniers : elle s'étale du MIS10 au MIS6, bien que la majorité de la croissance intervienne au cours du MIS9. Les interruptions de croissance sont bien visibles au sein de la concrétion et pourraient potentiellement être marqueurs des alternances glaciaires/ interglaciaires, ainsi que d'éventuels interstades du Pléistocène moyen. La cassure aux 2/3 de la concrétion n'est pas naturelle et résulte de l'échantillonnage.

The CHAT-04 speleothem has the most extended growth period of the 5 Châtaigniers cave samples spanning from MIS10 to MIS6, but mainly growing during MIS9. The speleothem reveals well-marked growth breaks that may represent glacial-interglacial or interstadial cycles of Mid-Pleistocene. The speleothem was divided into two parts during sampling.



CHAT-05 :

Le plancher stalagmitique CHAT-05 donne des âges très anciens, supérieurs à 400 ka. Pratiquement en limite de la méthode, ces âges peuvent être considérés ici comme des valeurs minimales (au moins 400 ka). Très corrodé, ce plancher scelle la paroi même de la cavité. Il permet, néanmoins, de

repousser la genèse du drain 100 m (+ 30 m par rapport à la rivière) dans une période au moins plus ancienne que 400 ka. Ce résultat pousse à raccorder ce conduit au fonctionnement paragénétique à une très vieille croissance qui pourrait se développer durant le Pléistocène ancien voire être liée à la remontée pliocène du niveau de base (cf. le modèle Mocochain et al. 2009).

1.3 Apport des datations U-Th sur le modèle théorique d'évolution de la Combe d'Arc.

Les données acquises sur les concrétions de la grotte des Châtaigniers peuvent également être mises en lien avec les sédiments fluviatiles argileux de la grotte. La figure 113 replace les différents objets selon leur position altitudinale. Les spéleo-thèmes datés apportent des éléments de calage au modèle d'évolution de la rivière, proposé dans les chapitres précédents et permettent de le discuter dans une chronologie absolue. Bien que les concrétions représentent des terminaux ante quem et post quem vis-à-vis des dépôts fluviatiles, elles permettent d'ores et déjà de positionner les trois oscillations sédimentaires + 30, + 15 m et + 8 m dans une temporalité pléistocène.

L'aggradation alluviale à + 30 m :

Un niveau argileux à + 30 m recouvre la concrétion CHAT-04 dont la croissance est stoppée à 162.46 +/- 15.06 Ka. Cette phase d'aggradation arriverait donc postérieurement à cet âge. Cette seule concrétion n'est pas suffisante pour caractériser correctement le niveau sédimentaire à + 30 m, néanmoins ce dernier semble être positionné dans une chronologie Pléistocène supérieur.

L'aggradation alluviale à + 15 m :

Le niveau à + 15 m est également complexe à recaler dans une chronologie absolue. La concrétion s'en rapprochant le plus altitudinalement est CHAT-02, mais cette dernière ne cèle pas un dépôt argileux rythmé pouvant correspondre à un apport de l'Ardèche.

Elle témoigne simplement d'une période (environ de 30 à 50 ka) durant laquelle le niveau moyen de la rivière est en-dessous de 81.5 m NGF. Cette concrétion peut donc s'être développée avant ou après l'aggradation de la terrasse à + 15 m.

Cependant, la proximité chronologique avec la concrétion CHAT-03 datée d'environ 15 ka et développée 1.5 m plus bas à 80 m NGF plaide pour repositionner la croissance de CHAT-02 après l'aggradation à + 15 m. Sa proximité temporelle avec les occupations de Chauvet et son altitude en lien direct avec T+15 fait de la partie basale de CHAT-02 une clé importante justifiant l'analyse détaillée qui suit (*infra* 2 de ce chapitre).

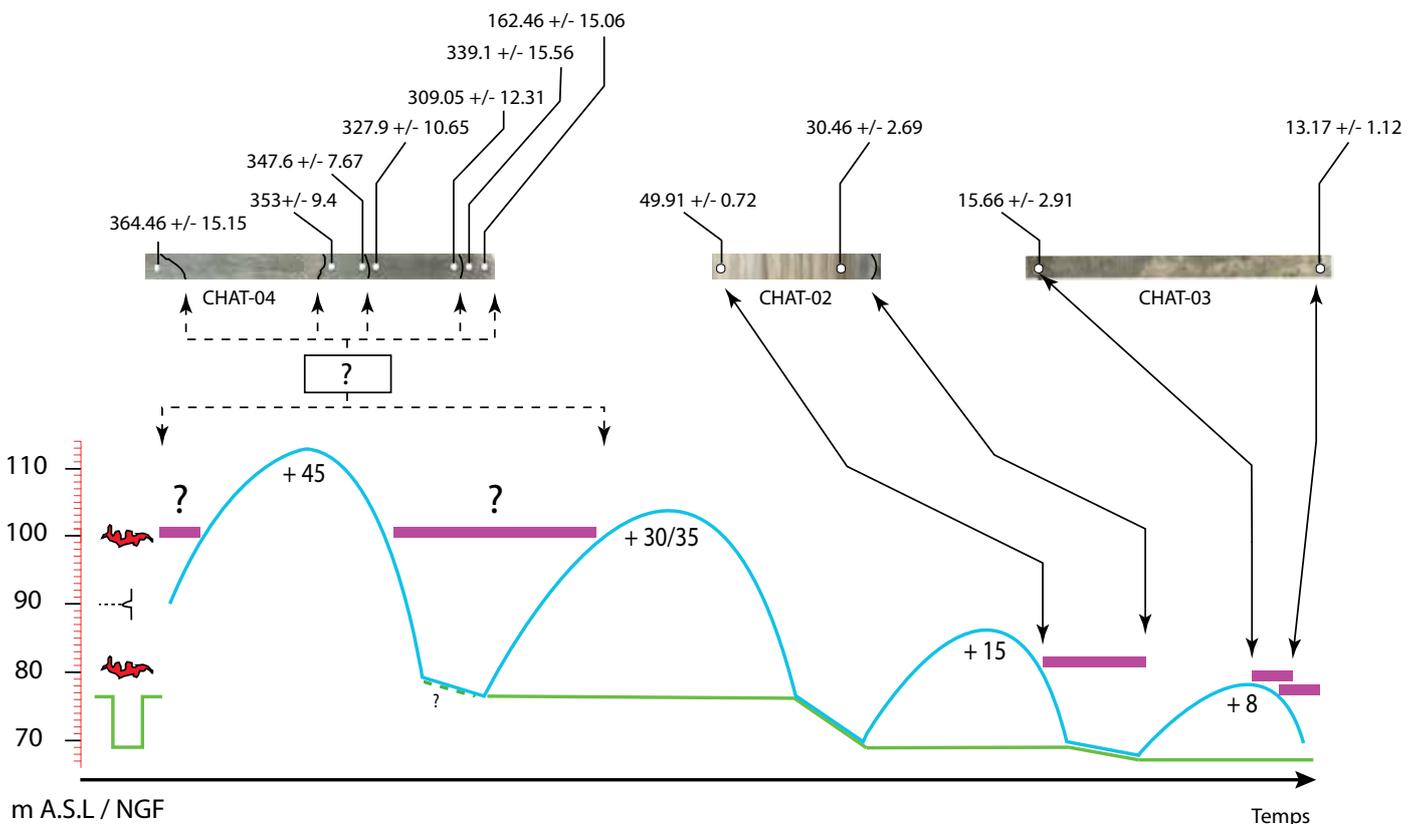


Figure 113 : Hypothèse chronologique construite à partir des datations U-Th et du modèle d'évolution de la rivière. Les datations replacent les oscillations sédimentaires à + 30 / + 15 et + 8 m dans la période du Pléistocène supérieur, de même que le recoupement de méandre.

Chronological reconstruction of the river evolution regarding the U-Th samples. The + 30/+15 and + 8 m alluvial levels of the river go back to the Upper-Pleistocene and so does the Pont d'Arc shortcut.

L'aggradation alluviale à + 8 m :

Ce niveau est calé a minima par la fin de la concrétion CHAT-02 (30.46 +/- 2.69 ka) et par le début de CHAT-03 (15.66 +/- 2.91 ka) qui se développe directement sur le replat sédimentaire correspondant au niveau à + 8 m. Ces éléments chronologiques replacent l'oscillation + 8 m à la fin du Pléistocène supérieur et éventuellement au début du Tardiglaciaire. Enfin, la croissance de la concrétion CHAT-01 entre 7.25 +/- 1.95 et 2.34 +/- 1.54 ka au sein du soutirage du niveau à + 8 m pourrait marquer l'érosion du niveau de base au cours de l'Holocène.

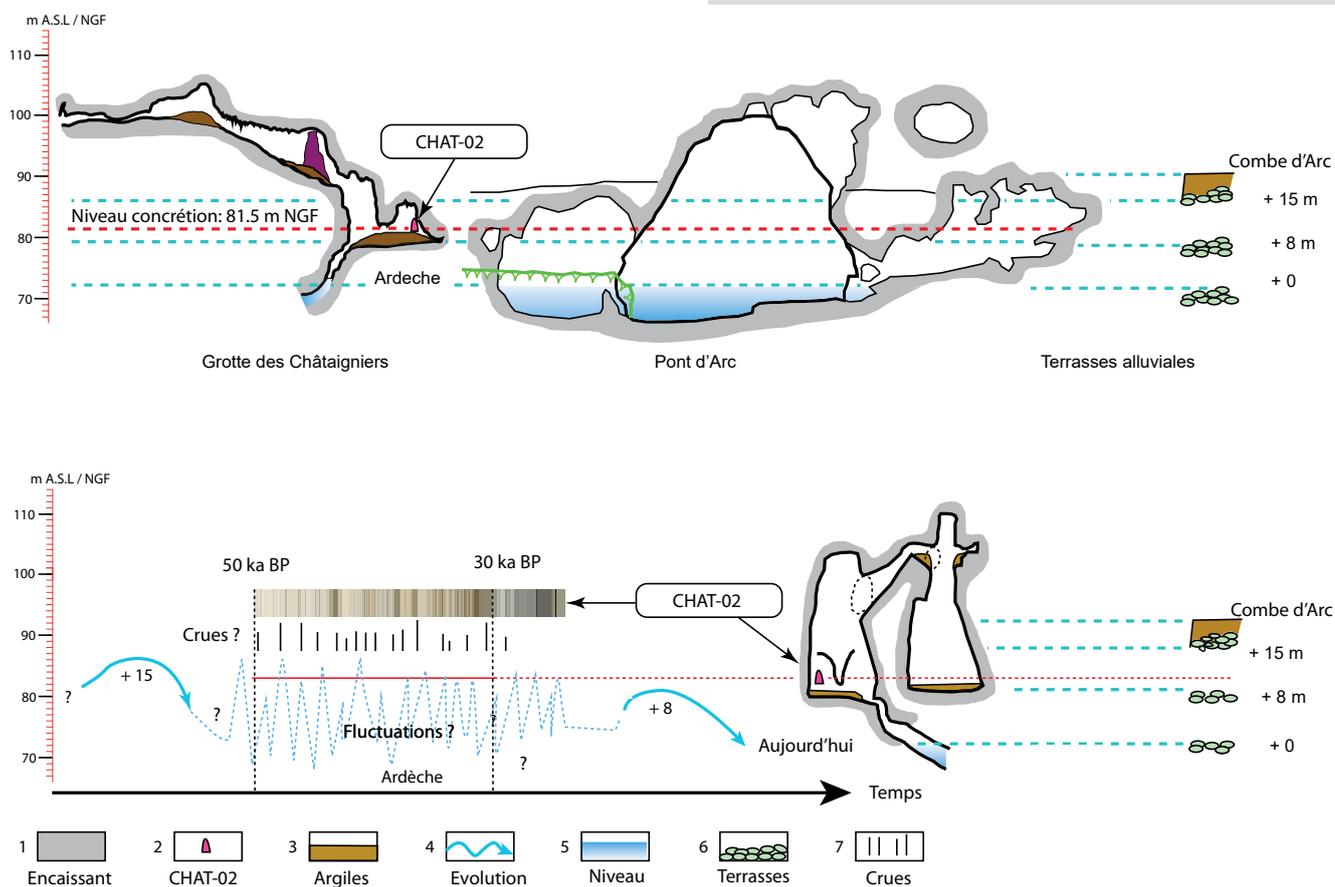
L'apport des méthodes de datations U-Th au modèle d'évolution de la rivière permet en première approximation de placer l'ouverture du Pont d'Arc dans une fenêtre temporelle resserrée sur le Pléistocène supérieur. Un couplage avec d'autres méthodes de datation directement sur les sédiments fluviaux reste néanmoins nécessaire pour mieux dater l'âge des phases d'aggradation sédimentaire et par corollaire, le recoupement pérenne du méandre (cf. infra Chapitre 7). L'investigation des niveaux à + 30 m et à + 15 m par l'intermédiaire de la méthode de l'ESR (Yokoyama et al., 1985) sur les grains de quartz déposés par la rivière est la solution envisagée. En l'état, l'étude des concrétions de la grotte des Châtaigniers permet d'affiner la compréhension de l'évolution de la rivière au Pléistocène moyen et supérieur. Les spéléothèmes en eux-mêmes peuvent cependant apporter plus que de simples jalons chronologiques à la compréhension de l'évolution géomorphologique d'un environnement naturel. Ils peuvent être le support de véritables analyses paléo-environnementales (Hill et al., 1997).

2. Etude géochimique de la concrétion CHAT-02.

En dehors de leurs apports chronologiques, les spéléothèmes constituent des archives sédimentaires en tant que telles. Elles peuvent enregistrer des informations pertinentes sur l'évolution des climats passés (Quinif et al., 1994) et représentent aujourd'hui les enregistrements paléo-climatiques parmi les plus fiables sur des temporalités quaternaires (Genty et al., 2003 ; Pons-Branchu et al., 2010 ; Wainer et al., 2011 ; Green, 2013) ; ainsi que plus récentes (Genty et al., 2001 ; Pons-Branchu et al., 2014). Les concrétions peuvent également enregistrer d'autres phénomènes régionaux tels que des évolutions tectoniques (Bini et al., 1992 ; Quinif, 1997 ; Pons-Branchu et al., 2004) ou des évolutions plus locales comme les mises en charge d'une rivière (Jaillet et al., 2006 ; Jaillet et al., 2012), ou la diffusion de polluants dans un bassin versant (Fairchild et Treble, 2009 ; Pons-Branchu et al., 2015).

Figure 114 : Schéma théorique de la concrétion CHAT-02 confrontée au fonctionnement de la rivière. Cette dernière, positionnée entre la T+15 et la T+8, représente une archive stratégique pour étudier les variations de la rivière au cours du MIS3.

Theoretical concept of the CHAT-02 speleothem registration of the river evolution during its growth. The speleothem position and growth period is ideal to investigate the river evolution during OIS3.



2.1 CHAT-02, un spéléothème enregistrant des niveaux de la rivière à 81.5 m NGF.

La base de la concrétion CHAT-02 représente un enregistrement sédimentaire qui est intéressant dans le cadre d'une reconstruction environnementale. Les datations U-Th replacent sa période de croissance au cours du MIS-3 (50 ka-30 ka), ainsi que pendant les temporalités d'occupation actuellement connues de la grotte Chauvet (Tableau 1 et figure 111). Par sa grande proximité avec la rivière, quelques mètres seulement au-dessus du niveau actuel de l'Ardèche, (CHAT-02 à 81.5 m NGF alors que la rivière est à 71 m NGF), elle a pu enregistrer les variations de cette dernière au cours des occupations humaines de la grotte Chauvet et représente donc une archive environnementale de choix pour décrire les évolutions de la rivière sur cette période de temps.

2.2 Fluorescence X (XRF).

L'analyse réalisée est focalisée sur la partie basale de CHAT-02. Une section (longueur : 65 mm) a été extraite, sciée et polie. La méthode des isotopes stables de l'oxygène ou du carbone n'a pas été retenue ici. L'objectif n'était pas de reconstituer un enregistrement paléo-climatique contemporain des fréquentations de Chauvet ; d'autres stalagmites de meilleure qualité pouvant répondre à cet enjeu. L'objectif était ici de cibler un enregistrement potentiel de la rivière Ardèche donc des phases de mises en charge associées possiblement à des apports détritiques. D'autres méthodes, par ailleurs non destructives, ont donc été mobilisées, afin d'obtenir une information à haute- résolution de la pile sédimentaire de cette concrétion.

L'étude élémentaire par la fluorescence X (X Ray Fluorescence / XRF) est une méthode bien développée sur les séquences sédimentaires des lacs (Tierney et al., 2005 ; Croudace et Rothwell, 2015) ou les carottes marines (Richter et al., 2006). Elle permet de détecter des éléments par excitation de la matière par rayonnement en bande X. Le niveau d'énergie renvoyé au capteur peut être décomposé en un spectre dont les différents pics représentent des niveaux d'énergie, pouvant être associés à la concentration massique en éléments. Cette méthode est cependant beaucoup moins utilisée sur les spéléothèmes car la composition chimique des concrétions peut être influencée par l'évolution même des conditions environnementales à l'intérieur de la cavité. Ces conditions peuvent être différentes en plusieurs points dans l'espace endokarstique. Une autre raison de sa moindre fréquence d'utilisation est celle des caractéristiques pétrographiques de la calcite, très concentrée en calcium, ce qui peut fausser les mesures XRF. C'est notamment le cas pour l'étude des concrétions à des fins paléoclimatiques.

Cependant, la concrétion CHAT-02 est très opaque et présente de nombreuses lamines sombres pouvant potentiellement indiquer des variations élémentaires dans la calcite ainsi que de ses caractéristiques cristallographiques. La composition élémentaire

d'une concrétion dépend de nombreuses variables locales comme le climat, le pH de l'eau, le type de sols ou l'organisation de l'épikarst que des évolutions régionales (Scropton et al., 2018). Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux relations entre les évolutions de la rivière et la concrétion. Ces interactions locales ont peut-être affecté la croissance de la concrétion et sont potentiellement décelables par la méthode XRF (Quiers et al., 2013).

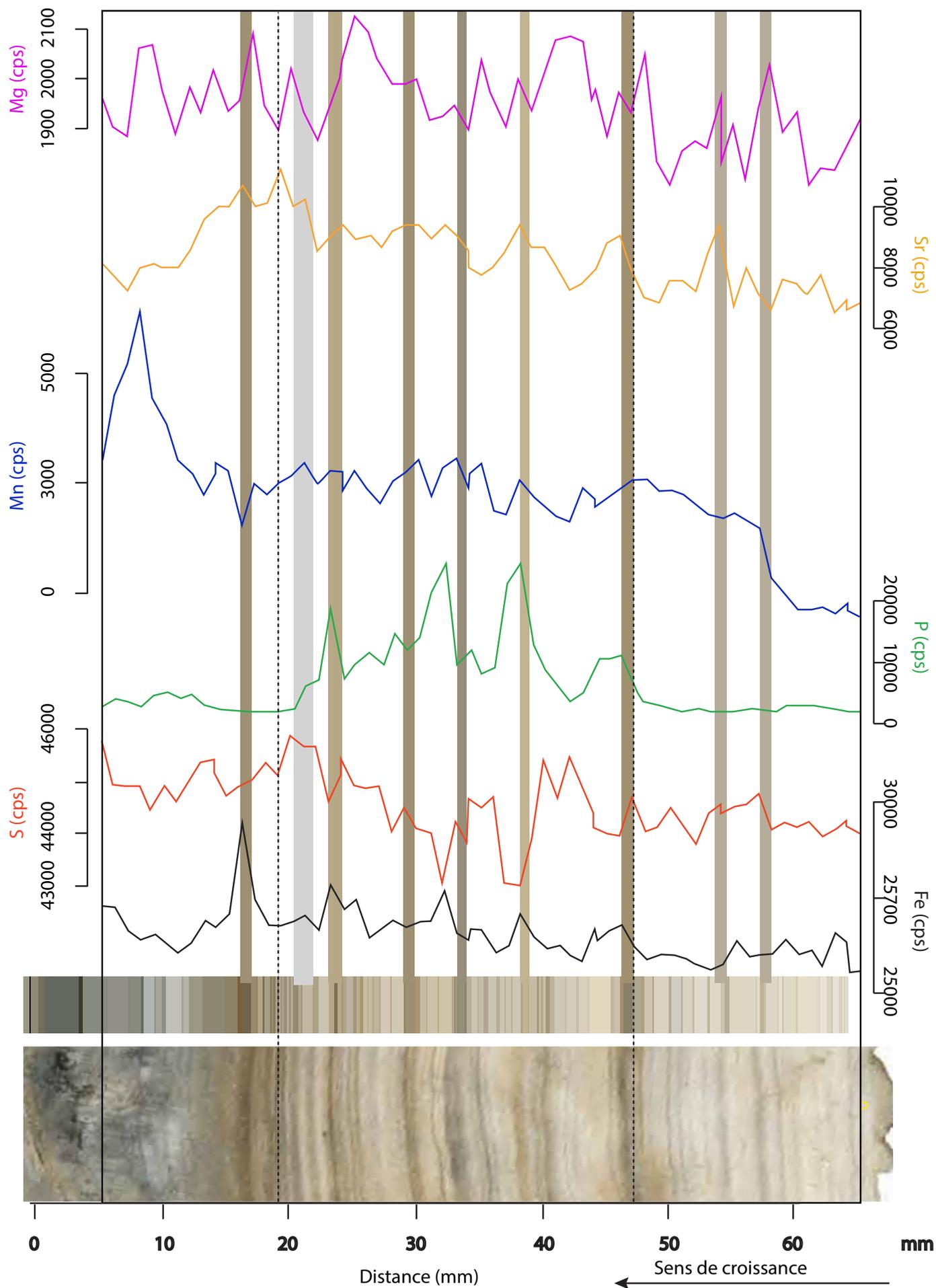
La concrétion CHAT-02 a été analysée au moyen du scanner XRF du laboratoire EDYTEM de marque Avaatech sur une fenêtre de résolution 1x6 mm. Trois valeurs d'intensité ont été appliquées. La première à 10kV / 0.3 mA afin de détecter les éléments comme l'aluminium (Al), le silicium (Si), le potassium (K), le calcium (Ca), le titane (Ti), le manganèse (Mn) et le fer (Fe). Une deuxième à 30 kV/ 0.8 mA pour des éléments plus lourds comme le brome (Br), le rubidium (Rb), le strontium (Sr), et le zirconium (Zr). Enfin l'excitation maximale effectuée à 50 kV / 1.5 mA permet de détecter des éléments encore plus lourds tels que le baryum (Ba).

Les résultats se présentent sous forme de pics d'intensité par coups (peak intensities countings, ou « cps ») et sont des mesures semi-quantitatives de la concentration des éléments chimiques (dans le sens où ils ne sont pas calibrés par des mesures effectives de concentration) (Croudace et Rothwell, 2015).

L'étude par XRF, plus complexe à interpréter en termes de signal environnemental, est assez peu répandue comparée à celle à partir d'isotopes stables. Néanmoins, certains éléments-traces ont été classiquement utilisés pour l'étude par XRF des spéléothèmes (Fairchild et Treble, 2009). L'utilisation du strontium (Sr) et du magnésium (Mg) comme marqueurs paléo-environnementaux étant donné leur solubilité différentielle avec la calcite. Ces éléments, placés en substitution au calcium, peuvent être corrélés positivement ou négativement avec le rôle des sols, de la dolomite, ou encore être mis en relation avec des variations de précipitations (Tooth et Fairchild 2003 ; Treble et al., 2003 ; McDonald et al., 2004). Ces deux éléments ont parfois fait l'objet de tentatives de corrélation avec les études par les isotopes de l'oxygène, une fois normalisés par le signal du calcium. (Treble et al., 2003 ; Cruz et al., 2015 ; Ban et al., 2018).

Figure 115 : Les variations élémentaires de la concrétion CHAT-02 montrent une bonne relation avec les lamines les plus sombres pour Mn, Mg et Fe, tandis que S et P sont surtout associés au tiers central de la concrétion, avec des pics mieux marqués et plus localisés. Les éléments-traces sont exprimés en nombre de coups par mesure (cps).

Elements of the CHAT-02 speleothem show good relationship with dark laminae for Mn, Mg and Fe, while S and P thrive especially well in the central part of the speleothem, but are clearly anti-correlated signals. Trace elements are expressed in peak counting intensities (cps).



Le baryum (Ba) est également un élément couramment employé comme marqueur paléo-climatique (Treble et al., 2003). Son évolution est régulièrement mise en lien avec les variations saisonnières inter-annuelles mais également avec les variations globales, sur des échelles multi-millénaires (Hellstrom et McCulloch, 2000). D'autres éléments-traces comme le phosphore (P) ont été décrits comme marqueurs biogéniques de productivité des sols (Huang et al., 2001), parfois en association avec des minéraux plus lourds : plomb (Pb), cuivre (Cu), zinc (Z) ou encore brome (Br) (Borsato et al., 2007).

Le problème majeur de ce type d'analyse reste la difficulté à identifier l'origine de provenance des éléments. Dans le cas de CHAT-02, sa grande proximité avec le niveau de base de la rivière et sa capacité de piège potentiel posent une difficulté supplémentaire dans la compréhension de l'origine de certains éléments-traces. En effet, la provenance peut venir de l'atmosphère, de l'encaissant (sols/bedrock) ou de la rivière.

Si on étudie les spectres élémentaires bruts, le magnésium (Mg) montre une bonne relation avec les lamines les plus sombres, sur les deux derniers tiers de la concrétion. Le fer (Fe) montre également des relations avec ces laminations sombres. Même chose pour le manganèse (Mn) qui réagit à chaque lamine sombre, et croît dans le dernier tiers, pour passer de 3000 cps en moyenne à plus de 6000 cps dans la partie terminale de la concrétion.

Le manganèse (Mn) est intéressant dans cette concrétion car c'est un des seuls indicateurs investigués qui augmente progressivement sur toute la longueur de la concrétion (de 0 à quasiment 6000 cps). Le dernier tiers est le plus chargé en Mn ; peut-être à cause de la rivière, ou bien de la concrétion adjacente qui prend le pas sur CHAT-02, et engendrerait un ruissellement sur cette dernière (cf. figure 115).

Le magnésium (Mg) et le strontium (Sr) ne montrent pas de co-évolutions notables, mais semblent néanmoins tous deux régulièrement associés aux laminations sombres.

Le phosphore (P) est bien visible et se démarque de la plupart des autres éléments en étant surtout présent dans le tiers central de la concrétion où les 4 principaux pics de phosphore sont tous localisés et associés à de la calcite blanche. Il en va de même pour le soufre (S), autre élément qui se démarque par un spectre qui semble anti-corrélé à celui du phosphore. La relation visuelle est suffisante pour déceler les associations régulières de certains éléments chimiques avec les lamines claires et sombres. Pour mieux caractériser la composition et l'origine de ces rythmites, le jeu de données XRF a été couplé à une autre méthode d'analyse : la spectrofluorescence UV en phase solide.

2.3 Fluorescence en phase solide (SPF).

Pour tenter de pallier ce problème, l'étude de la concrétion par XRF a donc été couplée à une analyse par fluorescence UV en phase solide (SPF). Cette méthode permet d'identifier les apports de matière organique au sein de la concrétion (Perrette et al., 2000 ; 2005), mais également de déterminer les évolutions cristallographiques dans la croissance de la calcite. Ces dernières peuvent être associées à des changements de condition environnementale ou même, à des évolutions phréatiques (Immenhauser et al., 2007).

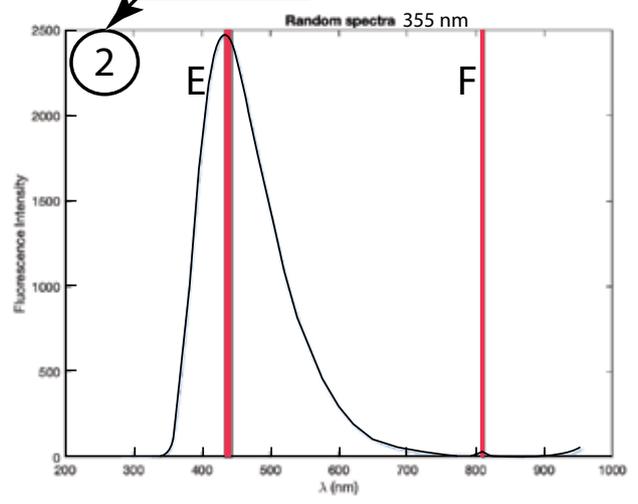
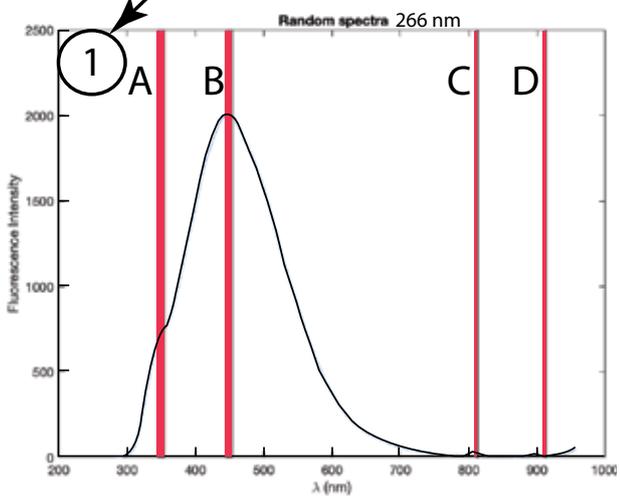
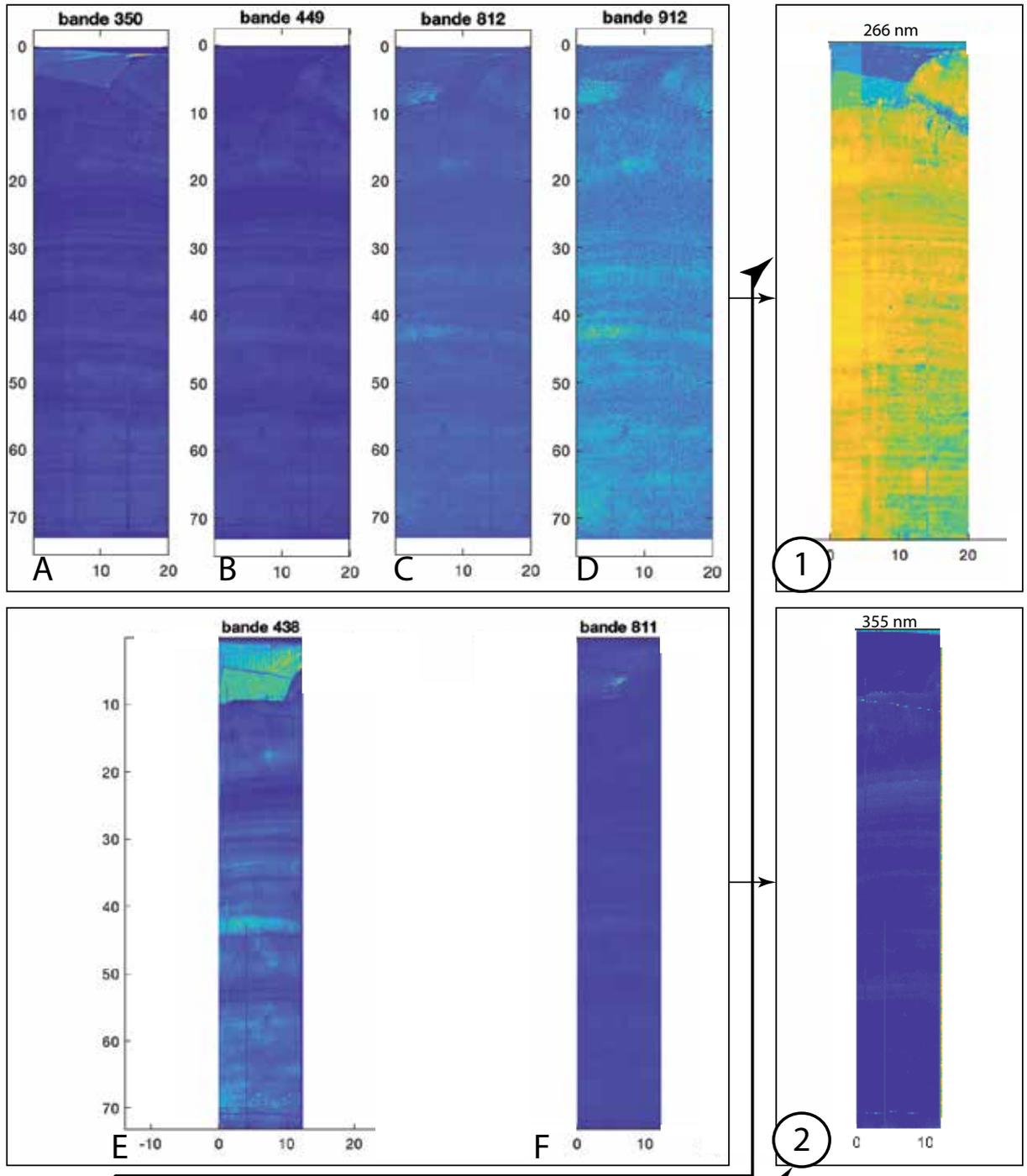
L'analyse a été menée sur la palteforme Museli (Multi Excitation Spectroscopy for Long core Imaging) développée par laboratoire EDYTEM (Chalmin et al., 2013). Le pas de mesure a été fixé à 2.5 microns sur toute la concrétion. Deux lasers YAG ont été utilisés pour mesurer la fluorescence de l'échantillon à une longueur d'onde de 266 nm et de 355 nm. Les spectres sont obtenus par un monochromateur et détectés par un CCD optimisé pour détecter les émissions dans l'UV (Jobin Yvon MicroHR, réseau de 300 traits centré à 650 nm, détection Syncerity JY, BUV). On obtient alors des images hyperspectrales à une résolution de 2.5 microns. Pour l'analyse, nous présenterons pour chaque excitation l'intensité de fluorescence maximale (ici à 450 nm). Nous utiliserons la fluorescence totale (somme des intensités aux deux excitations) qui peut être interprétée comme un indicateur de la quantité de matière organique présente dans l'échantillon si la densité optique ne varie pas, et le ratio des deux excitations qui peut être interprété comme une évolution qualitative de cette matière organique.

Pour obtenir des informations sur la matière organique contenue dans la concrétion, on fait la somme des cartographies à 266 nm et à 355 nm pour obtenir une estimation du total de fluorescence (Quiers et al., 2015).

Le ratio des émissions avec les excitations à 266 nm/355 nm peut également être utilisé pour exprimer l'intensité de fluorescence, qui peut être un indicateur de la taille des chaînes carbonées. Un ratio 266/355 faible (*red shift*) est associé à des composés de plus grosse masse moléculaire et/ou plus aromatiques

Figure 116 : Résultats des analyses de CHAT-02 par SPF et cartographie pour plusieurs longueurs d'onde. Les analyses 1 et 2 n'ont pas la même extension spatiale en latéral mais couvrent la même distance en hauteur. Les bandes à 266 nm et 355 nm (1 et 2) sont ici considérées comme les deux résultats centrés à 450 nm et associés aux spectres prenant en compte l'ensemble des longueurs d'onde investiguées (A, B, C, D, E, F).

CHAT-02 was analyzed for SPF mapping. The analyses do not have the same lateral spatial extend but cover the entire growth period of interest of the speleothem.



(Quiers et al., 2015). Au contraire, un ratio élevé (*blue shift*) est potentiellement représentatif d'éléments de petite taille, (voir *infra*, figure 116).

La cartographie à 950 nm correspond à la réflectance infra rouge qui est acquise simultanément. Il s'agit d'une émission "parasite" des lasers YAG qui est donc ici utilisée pour refléter la densité optique de la calcite, informant notamment sur la cristallinité de cette dernière.

Enfin, la qualité de l'émission est obtenue en normalisant les cartographies à 449 nm (A) et 350 nm (B) par l'équation $(A-B)/(A+B)$.

3. Analyse des résultats.

3.1. Cartographie de la matière organique.

La concrétion CHAT-02 (fig. 117) possède des lamines bien visibles avec des couleurs brunes et marron qui contrastent avec la calcite. Le tiers supérieur de la concrétion voit les lamines passer du brun au gris foncé. Certaines sont beaucoup plus ténues car de taille inframillimétrique. Ces lamines sont présentes sur la totalité de la base de CHAT-02 et sont le plus souvent peu perceptibles à l'œil nu.

La concrétion en-dessous du hiatus de croissance (partie haute fig. 117) peut être scindée en au moins deux phases de croissance, caractérisées par des changements importants dans la matière organique de la concrétion. Cette scission est bien visible avec la cartographie de la fluorescence totale sur la figure 117. La première unité sédimentaire (S1) se distingue visuellement de la première par une quantité plus importante de matière organique. Elle peut être scindée en deux faciès. Le premier (0 mm ; 27 mm) se distingue par un nombre assez faible de lamines sombres. Ce dernier ressort donc en clair.

Le second (27 mm ; 64 mm) présente de nombreuses lamines sombres, de couleur marron intercalées dans des phases de calcite plus blanche. La cartographie de l'intensité de fluorescence (Qualité de l'intensité, fig. 117) montre que la plupart des lamines sombres sont associées à des « *blue shifts* », qui pourraient représenter des chaînes carbonées peu dégradées (Quiers et al., 2014).

Nous associons néanmoins ces deux faciès à une même phase de croissance dans le sens où aucun hiatus ne semble visible au sein de la concrétion.

La dernière phase de croissance (S2) (64 mm ; 70 mm) est caractérisée par une calcite très foncée, de couleur grise, contenant très peu de matière organique.

Au-delà du Hiatus, une forme de calcite encore différente semble s'établir, avec des valeurs relativement faibles en fluorescence. La cartographie de la matière organique par fluorescence UV fait ressortir plusieurs pôles qui se distinguent nettement au sein de la concrétion. Dans une lecture de bas en haut : Les phases les plus anciennes contenant de la matière organique sont relativement peu marquées,

elles ressortent à environ à 10, 13 et 21, mm. Le second faciès est caractérisé par des pôles sombres (27, 29, 32, 35, 37, 39, 41, 43, 48, 50, 53 et 56 mm) qui semblent plus marqués par la présence de matière organique. Les valeurs de fluorescence sont importantes et un haut plateau semble se dégager entre 27 et 43 mm.

Enfin, pour l'unité sédimentaire S2, un pic est visible exactement au niveau de la transition entre les deux unités sédimentaires. Il représente la plus haute valeur de fluorescence obtenue sur la concrétion. Néanmoins, ce pic de matière organique semble spatialement confiné sur la concrétion et pourrait être un artefact, ou ne pas être représentatif des conditions de sédimentation.

La cartographie SPF a permis d'identifier plusieurs phases marquées par des flux de matière organique. Ces dernières semblent de plus en plus importantes au fur et à mesure de la croissance de la concrétion pour atteindre les valeurs maximales à la fin de l'unité sédimentaire S1, au niveau de la transition avec l'unité sédimentaire S2. La sédimentation post-hiatus semble très différente en termes de composition. Dans cette partie, la cartographie SPF ne fait quasiment pas ressortir de signal pouvant être associé à un flux de matière organique. Désormais identifiées, ces phases peuvent maintenant être confrontées à l'approche XRF également appliquée sur la concrétion.

3.2 Etude des variations élémentaires par PCA.

Les éléments chimiques couramment utilisés en sédimentologie des spéléothèmes ont été analysés par l'XRF, notamment Mg et Sr, parfois caractérisés comme traceurs des conditions climatiques (températures et précipitations, Hellstrom et McCulloch, 2000) ainsi que des minéraux lourds, habituellement traceurs environnementaux de crues, beaucoup utilisés dans les sédiments lacustres (Fe, Ti, Al, Si). D'autres éléments comme le brome (Br), utilisés comme traceur de matière organique (Br et P) pour tracer une activité pédologique (Frisia et al., 2012) ont également été analysés. Ces éléments-traces ont été étudiés *via* une analyse de la composante principale (ACP).

Cette dernière a été réalisée sous R avec le plugin *FactomineR* dans l'objectif de caractériser les éléments majeurs ainsi que les corrélations entre ces derniers (Lê et al., 2008 ; Sabatier et al., 2010). Cette analyse a été conduite pour les éléments-traces suivants : magnésium (Mg), aluminium (Al), silicium (Si), phosphore (P), soufre (S), potassium (K), titane (Ti), manganèse (Mn), fer (Fe), et enfin sur le strontium (Sr).

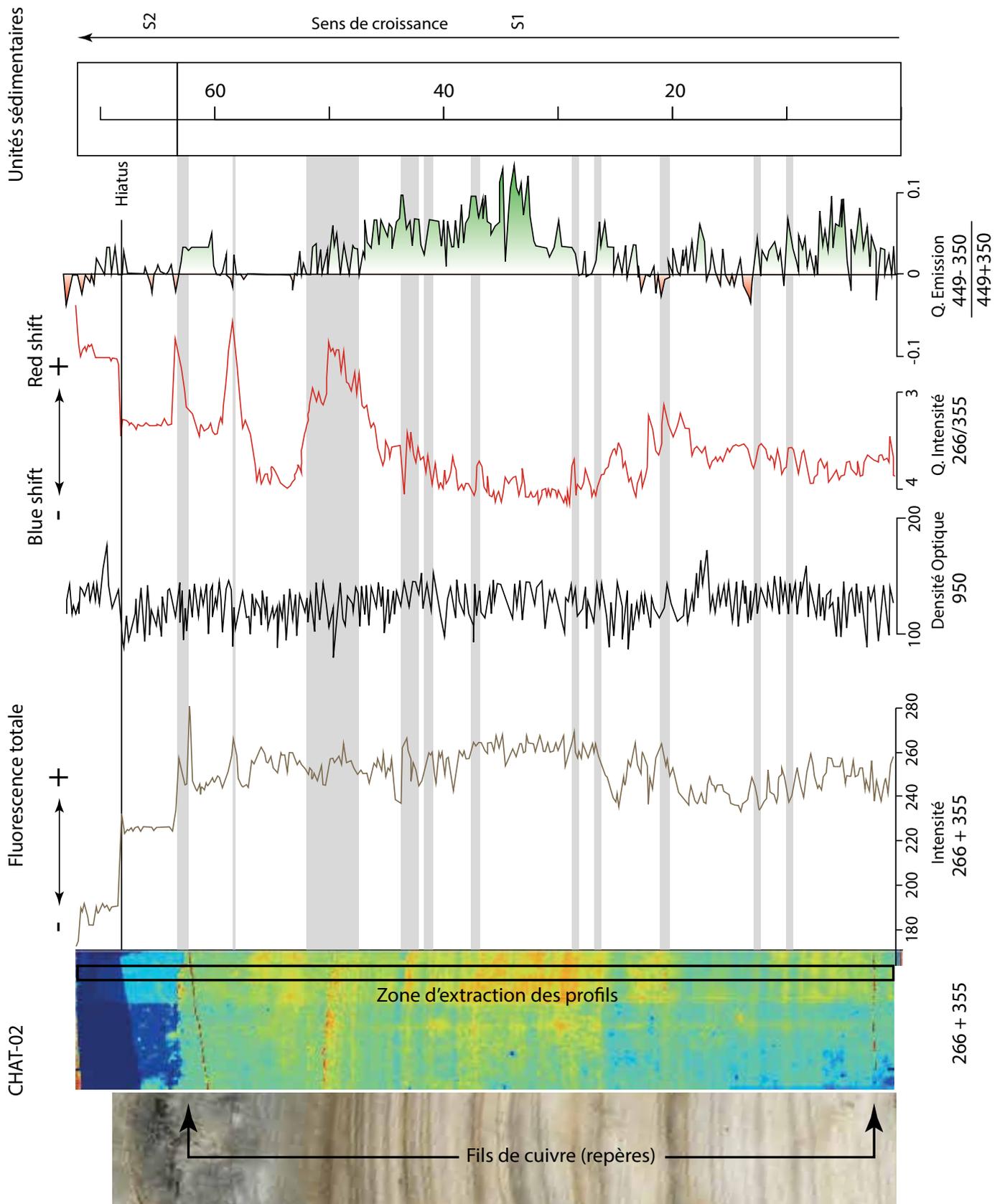


Figure 117 : Cartographie par fluorescence de CHAT-02 et extraction des spectres issus des cartographies SPF. Les profils d'élévation représentant ces derniers ont été extraits de manière linéaire. La fluorescence totale et la taille des particules composant cette dernière (Qualité de l'intensité). Ce dernier révèle au sein de la concrétion plusieurs phases distinctes que l'on peut corréliser aux phases sombres de la lamination de CHAT-02 (bandes grisées).

Fluorescence index of the CHAT-02 speleothem issued form SPF map combination. Elevation profiles have been linearly extracted. The induced spectra seem to be well correlated with dark laminae (grey layers).

L'ACP en figure 118 représente les éléments concernés en deux dimensions (dimension 1 en abscisses et dimension 2 en ordonnées). Elle a été effectuée à partir du signal normalisé par le calcium de chaque élément (Ca-élément)/(Ca+élément). Elle permet de distinguer 3 ensembles qui sont bien séparés. Un premier pôle se distingue des autres car uniquement composé d'un élément : le phosphore. Ce pôle est bien séparé des autres éléments-traces analysés par l'ACP. Le phosphore a déjà été considéré comme un marqueur biogénique d'activité des sols (Huang et al., 2001). Le phosphore montre des pics rares mais bien définis au milieu de la concrétion (25 000 cps) par rapport aux deux autres tiers qui l'encadrent (5000 cps).

Un second pôle composé de potassium (K), Strontium (Sr) et Manganèse (Mn) se démarque également. Ces trois éléments font partie de la famille des cations solubles. Leur co-présence au sein de la concrétion pourrait être associée à une origine détritique provenant de l'activité des sols. Enfin, le dernier pôle regroupe les éléments restants. Il est nettement caractérisé par les minéraux associés classiquement aux flux terrigènes (Al, Si, Fe, Ti). Cette association claire au sein d'un même pôle tend à confirmer l'hypothèse de l'impact des battements de nappe de la rivière sur la concrétion CHAT-02.

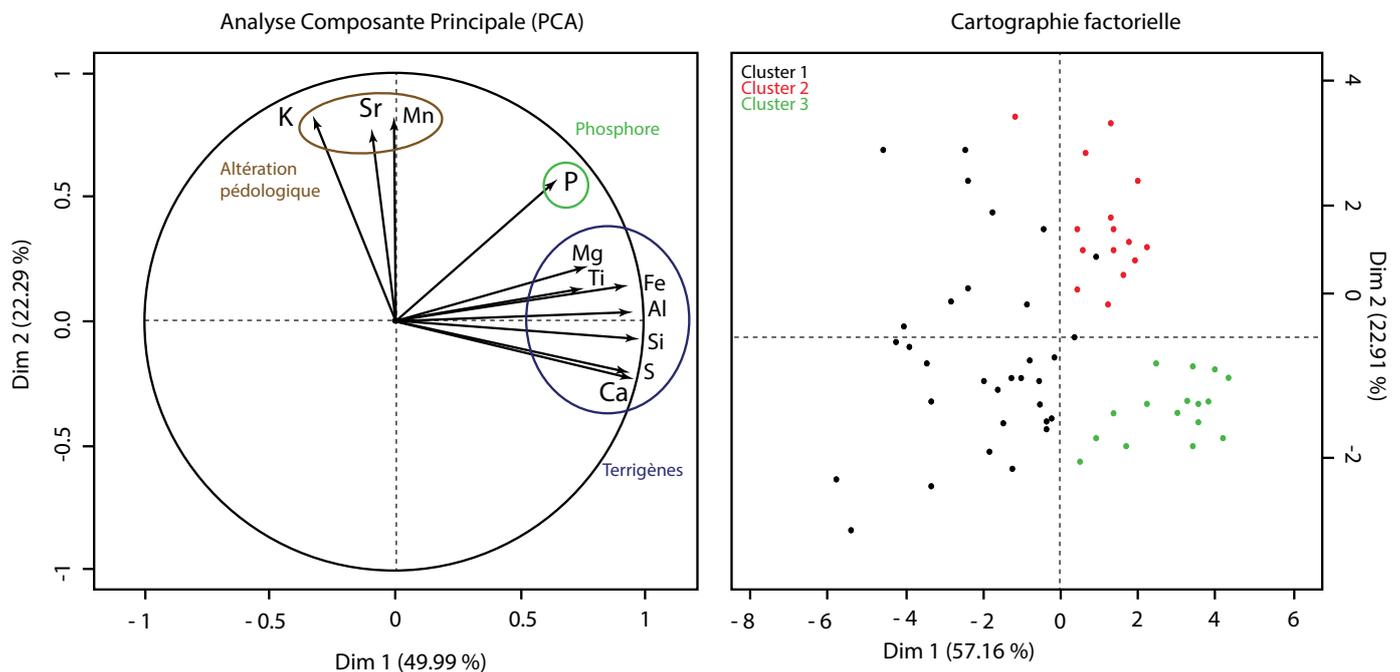
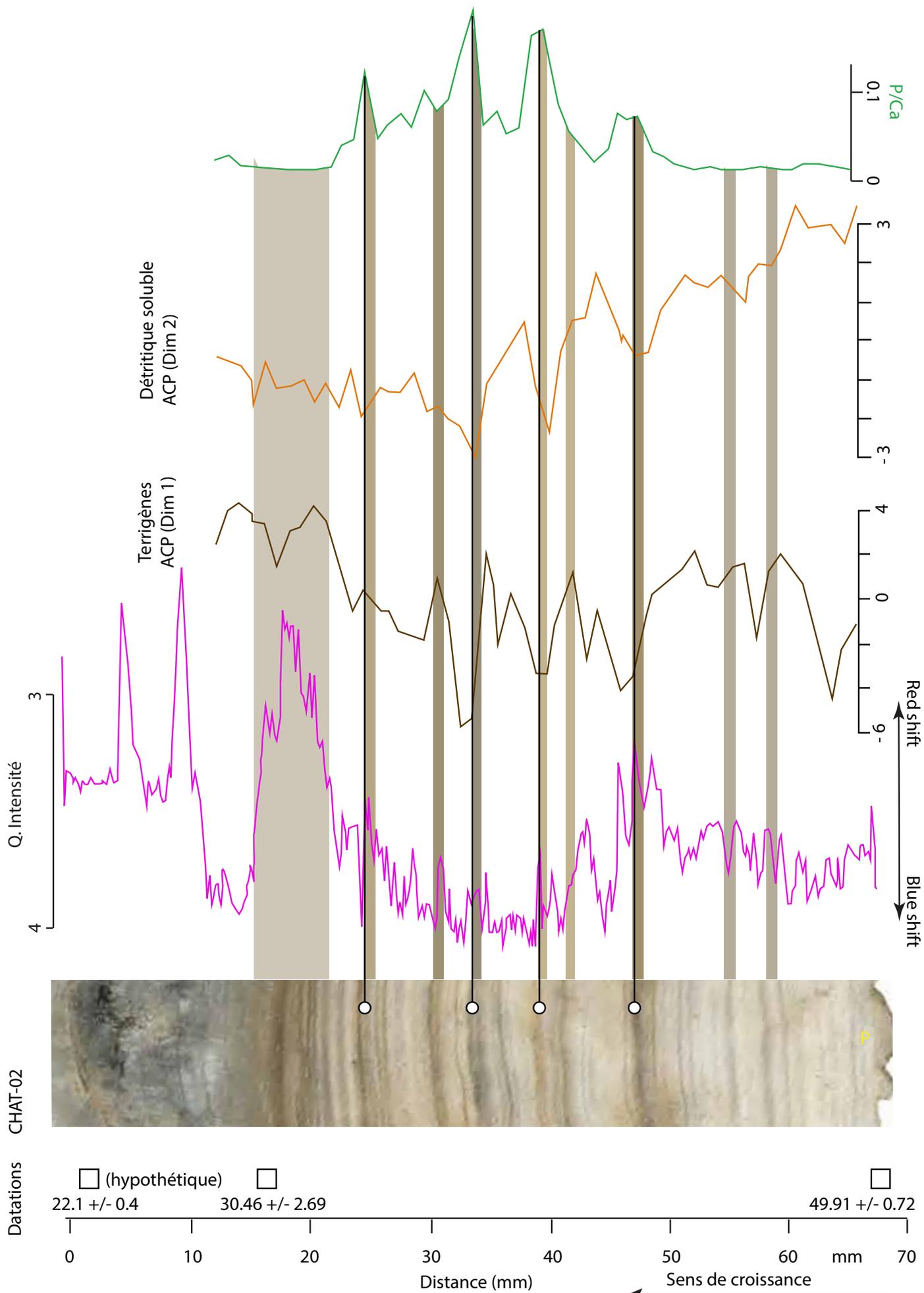


Figure 118 : Analyse PCA et cartographie factorielle réalisées sur les principaux éléments chimiques utilisés en sédimentologie des concrétions (Fairchild et Treble, 2009) ainsi que sur les traceurs terrigènes plus classiquement utilisés en analyse XRF sur des sédiments marins et lacustres, ces traceurs pouvant potentiellement représenter les apports de la rivière. Les éléments ont été préalablement normalisés par le calcium.

PCA and Factor map of the analysis of the main chemical elements studied in concretion sedimentology (Fairchild and Treble, 2009). The analysis includes terrigenous elements which are traditionally XRF analyzed in marine and lacustrine sediments because that kind of tracer may be related with the riverine inputs on the speleothem. All elements were normalized with calcium.

Figure 119 : Corrélation du pôle terrigène avec la qualité de l'intensité. Ces deux informations sont bien corrélées ensemble, ainsi qu'avec les lamines sombres de la concrétion. Cette co-variance questionne le rôle de la rivière qui pourrait être à l'origine de ces phases sombres.

Both terrigenous fluxes and organic matter ones seem to be correlated with the dark laminae of CHAT-02. Riverine inputs and fluctuations may explain such relationships.



4. Discussions.

4.1. L'enregistrement des variations du niveau de base au cours du MIS3 par CHAT-02.

Les différentes méthodes d'investigation menées sur la concrétion CHAT-02 ont permis de mettre en évidence la présence de matière organique en certains points de la concrétion, et la présence de plusieurs pôles élémentaires dont le principal semble être gouverné par les apports terrigènes. La comparaison de l'ensemble de ces informations entre elles permet de les discuter.

Nous avons déjà précisé que les flux de matière organique semblaient être en lien avec les lamines sombres de la concrétion. Le pôle terrigène issu de l'ACP fait ressortir des tendances similaires. Le pôle de matière organique et le pôle terrigène semblent donc liés (figure 119). Ce constat pousse à rechercher une hypothèse pouvant expliquer le lien entre ces éléments. Dans notre cas, le pôle terrigène co-varie avec le *red shift*. Ce dernier pouvant potentiellement représenter des composés carbonés de masse moléculaire importante. Cette corrélation dans les lamines sombres pourrait être la marque de processus dynamiques à l'échelle de la croissance de la concrétion. Dans le cas de la grotte des Châtaigniers, les fluctuations du niveau de base de la rivière semblent l'explication la plus logique à cette relation.

Ces résultats en regard de la période de croissance de CHAT-02 sont à discuter. La figure 120 replace ceux-ci dans une chronologie absolue. Cependant l'incertitude entourant les résultats des datations U-Th sur cette concrétion nécessite de rester prudent vis-à-vis des interprétations envisagées. C'est pourquoi nous présentons avec beaucoup de réserve les corrélations effectuées vis-à-vis des courbes d'évolution isotopique de l'Oxygène (NGRIP members, 2004) et des paléo-précipitations régionales (Cheddadi et al., 2005) qui constituent des forçages susceptibles d'impacter le niveau de la rivière, un des éléments possiblement enregistré ici.

Les hypothèses présentées dans la figure 120 considèrent le lien potentiel entre le hiatus de CHAT-02 et l'entrée dans le maximum glaciaire du MIS2. Rappelons ici que Genty (2012) identifie une interruption de croissance dans Chauvet, associé à un maximum du froid entre 22.1 +/- 0.4 et 15.28 +/- 0.5 ka. La repousse post-hiatus de la concrétion est marquée par une très faible quantité de matière organique, ce qui est en accord avec des conditions climatiques du pléniglaciaire et un bassin versant de la concrétion peu ou pas végétalisé, dominé par des processus périglaciaires. Dans cette logique, le hiatus est ici présenté dans une hypothèse chronologique à 22.1 +/- 0.4 ka.

Les variations "*blue shift*" / "*red shift*" dans la concrétion CHAT-02 semblent en bonne adéquation avec les augmentations des taux de précipitation du Velay décrites par Cheddadi et al. (2005) et correspondant aux oscillations climatiques rapides du Dansgaard-Oeschger (D-O), (Dansgaard et al., 1993). Les points bleus numérotés de 1 à 14 sur la figure 120 illustrent cette relation potentielle. Au cours du MIS3, presque chaque pic de matière organique grossière peut en effet être associé à une oscillation climatique. Ces pics deviennent moins nombreux à partir du début du MIS2, ce qui est également en bonne adéquation avec l'évolution paléoclimatique régionale (refroidissement).

La majorité des phases présentant des matières organiques de plus gros poids moléculaire ou plus aromatique ("*red shifts*") est également couplée au pôle terrigène (ACP dimension 1). Dans la partie basale de la concrétion (environ 50 ka BP), ce dernier est présent. Il reste ensuite très peu représenté sur les deux tiers de la concrétion jusqu'à 43 mm. Cette période de faible apport terrigène est celle de la première occupation connue de la grotte Chauvet autour de 36 000 ans cal. BP (Quiles et al., 2016). Le faible signal terrigène pourrait traduire un niveau de rivière bien en dessous de la concrétion et un ré-ennoiement occasionnel avec des temporalités très courtes, peut-être sous forme de crues. Le pôle terrigène réapparaît ensuite avec plus d'intensité (environ 30 ka BP) jusqu'à la fin de cette première phase de croissance interrompue par un hiatus. Le début de la ré-augmentation du pôle terrigène est également celui de la seconde phase d'occupation connue de la grotte Chauvet et suppose un niveau de rivière beaucoup plus proche de la concrétion que pour la première phase. Cette augmentation du pôle terrigène apparaît directement corrélable avec l'entrée en glaciation du MIS 2. Nous interprétons cette augmentation terrigène au cours du MIS 2 comme une possible remontée progressive du niveau de la rivière qui viendrait plus fréquemment envoyer la concrétion durant la transition vers des conditions climatiques pléniglaciaires.

Ces éléments nous poussent à appuyer l'hypothèse d'une augmentation des crues de l'Ardèche reliée à celle des précipitations sur son bassin versant au cours du MIS3, lors des stades plus chauds du D-O. Ensuite, au cours du MIS 2, l'aggradation sédimentaire de la rivière se traduit par une remontée du niveau alluvial qui entrainerait alors la mise en place du niveau argileux à + 8 m à 80 m NGF, seulement 1,5 m sous la concrétion (cf. *supra*, figures 108 et 114).

4.2 Les pôles phosphore et cations solubles

La normalisation du phosphore par le calcium semble annuler complètement les effets de ce dernier, qui pourrait être alors une conséquence de la proximité du pic d'échappement du calcium avec celui du phosphore dans le spectre élémentaire XRF (Subercaze, 2017). Une étude plus poussée de cet élément serait nécessaire pour mieux discriminer l'apport quantitatif réel du phosphore de celui du pic d'échappement dans la concrétion.

Le pôle représenté par K, Sr et Mn est décrit sur les figures 119 et 120 par la dimension 2 de l'ACP. Ces éléments, caractérisés par leur solubilité, sont notamment présents entre 50 et 35 ka environ, et suivent une tendance décroissante sur l'ensemble de la concrétion, pour devenir mineurs (ACP < 0) de 35 à 20 ka. Ce pôle pourrait alors être l'expression de l'apport des sols (bassin versant de la concrétion), qui diminuerait progressivement avec l'entrée en glaciation au cours du MIS 2. Il est possible que certains pic du pôle cations solubles soient également corrélés avec certaines améliorations climatiques du Dansgaard-Oeschgers (D-O), notamment pour les oscillations les plus anciennes où une relation semble se dessiner pour les oscillations les plus importantes (les plus longues). Ces essais de corrélation restent à l'état d'hypothèses et mériteraient une analyse XRF à plus haute résolution qui pourrait apporter des informations complémentaires et ainsi pouvoir mieux discuter de cette relation entre la croissance de la concrétion et les évolutions climatiques.

4.3 Le paléo-paysage de la grotte Chauvet

En l'état, ces premières observations offrent des perspectives nouvelles pour de meilleures contraintes sur les paléo-paysages du cirque d'Estre et ici tout particulièrement au niveau du pédoncule du Pont d'Arc. La diminution du pôle des cations solubles (ACP dimension 2) pourrait traduire un paysage assez peu végétalisé au cours des occupations humaines connues de la grotte Chauvet. De même, l'augmentation de la composante 1 (pôle terrigène) au cours de la transition vers le MIS 2 traduirait un niveau de rivière à l'étiage relativement proche de celui de la concrétion, ce qui est cohérent avec les observations réalisées sur la concrétion CHAT-03, si l'on prend en compte la niveau à + 80 m NGF daté à environ 15 ka pour le maximum d'aggradation.

La concrétion CHAT-02, analysée au départ pour mieux caler la chronologie des paléo-niveaux de la rivière Ardèche s'est révélée un enregistreur pertinent des évolutions climatiques, environnementales et paysagères sur la fenêtre temporelle des fréquentations humaines de la grotte Chauvet. Nul doute que cet échantillon mériterait des analyses complémentaires, un modèle d'âge plus robuste et précis, ainsi qu'une valorisation à la hauteur de cet enjeu.

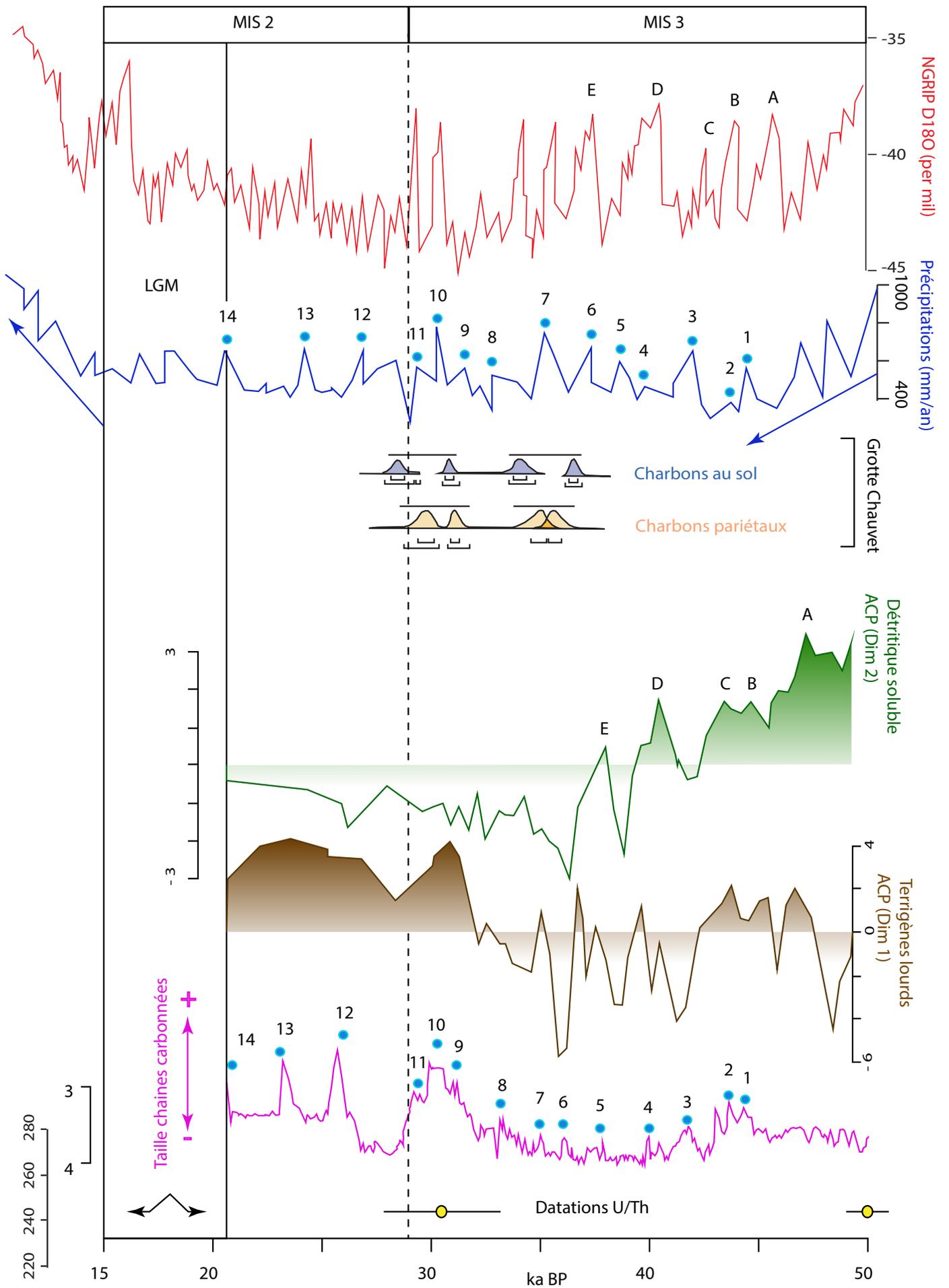
5. Conclusion

L'étude des spéléothèmes de la grotte des Châtaigniers a permis d'affiner le modèle chrono-relatif construit dans les chapitres 3,4 et 5 à partir des données morphologiques et des emboîtements de formes. Les résultats des datations U-Th mettent en lumière la corrélation possible entre les objets de la grotte des Châtaigniers et les variations du niveau de base de l'Ardèche, notamment en lien avec les terrasses alluviales. Les datations permettent de replacer ces anciens niveaux de rivière dans un cadre chronologique pléistocène, et dans le cas du niveau à + 8 m, de dater ce dernier du dernier maximum glaciaire (LGM) avec la concrétion CHAT-03. La suite de ce travail a pour objet d'affiner le modèle par l'analyse des dépôts alluviaux.

L'étude sédimentologique multi-méthodes expérimentée sur la partie basale de la concrétion CHAT-02 a produit de nouvelles informations sur la période climatique du MIS3 qui coïncide avec les occupations datées de la grotte Chauvet. Le croisement des méthodes a offert de nouvelles possibilités d'utilisation du couplage méthodologique XRF / SPF sur des concrétions enregistrant des informations en lien avec la rivière et présentant une cristallisation très opaque. Il a été possible de relier certaines lamines sombres avec les flux terrigènes issus de remontées rapides du niveau de base de l'Ardèche qui semblent s'intensifier avec l'entrée en glaciation du MIS2, témoignant ainsi d'une aggradation sédimentaire de la rivière.

Figure 120 : Synthèse et corrélation des analyses XRF et SPF avec les recherches précédentes effectuées en Ardèche et autour du Cirque d'Estre pour la même période. Les points bleus permettent de visualiser la correspondance pic à pic entre la matière organique grossière de CHAT-02 et la courbe des paléo-précipitations du Velay (cheddadi et al., 2005). La corrélation entre la matière organique grossière et le pôle terrigène est également bien visible et tend à confirmer le rôle de la rivière dans l'enregistrement sédimentaire de CHAT-02. Datation du LGM : Genty 2012. Volcanisme : Nomade et al. 2016. Occupation Chauvet: Quilès et al. 2016. D180 Groënland: NGRIP members, 2004.

XRF and SPF analysis correlated with other local parameters (volcanism, Chauvet cave occupancy) and paleoclimate data (rainfalls and temperature). Blue dots indicate the peak- to- peak correlation between organic matter size and paleo-rainfall data (Cheddadi et al., 2005). Organic matter size and terrigenous infillings seem to be well correlated too, which suggests the potential role of the Ardèche River in the CHAT-02 records. Datation du LGM : Genty 2012. Volcanisme : Nomade et al. 2016. Occupation Chauvet : Quilès et al. 2016. D180 Groënland: NGRIP members, 2004.



L'utilisation d'une méthode de datation alternative à l'U-Th, qui témoigne ici d'un comportement en système ouvert, sera nécessaire pour établir une chronologie robuste sur la concrétion CHAT-02 et effectuer des corrélations plus fines avec les paramètres paléoclimatiques et ainsi pourraient mieux caractériser les flux de phosphore et de soufre. En l'état, les relations « pics à pics » proposées montrent l'intérêt d'aller plus loin sur cette piste et ouvrent des perspectives de recherche.

Cette étude des concrétions vient compléter l'apport de l'étude des systèmes karstiques dans la compréhension de l'évolution de la rivière au cours du Pléistocène. Cependant, les datations réalisées en U-Th ne caractérisent pas directement les paléoniveaux fluviatiles. Les stalagmites doivent être interprétées comme des terminaux *post-quem* et *ante-quem* vis-à-vis de ces niveaux alluviaux. Il convenait donc de travailler directement sur les nappes de galets et c'est l'objet du chapitre suivant que de s'intéresser à la chronologie absolue directe des terrasses alluviales de l'Ardèche, ceci par spectrométrie ESR.

Photographies de terrain



Photo 17 : Exploration et recherche de cibles pour datation dans la grotte des Châtaigniers. Crédits : S. Jaillet, 2017.



Photo 18 : La concrétion CHAT-02 est dégagée de sa couverture argileuse. Crédits : S. Jaillet, 2017.



Photo 19 : La concrétion CHAT-02, une fois extraite. Crédits : P. Génuite, 2017.

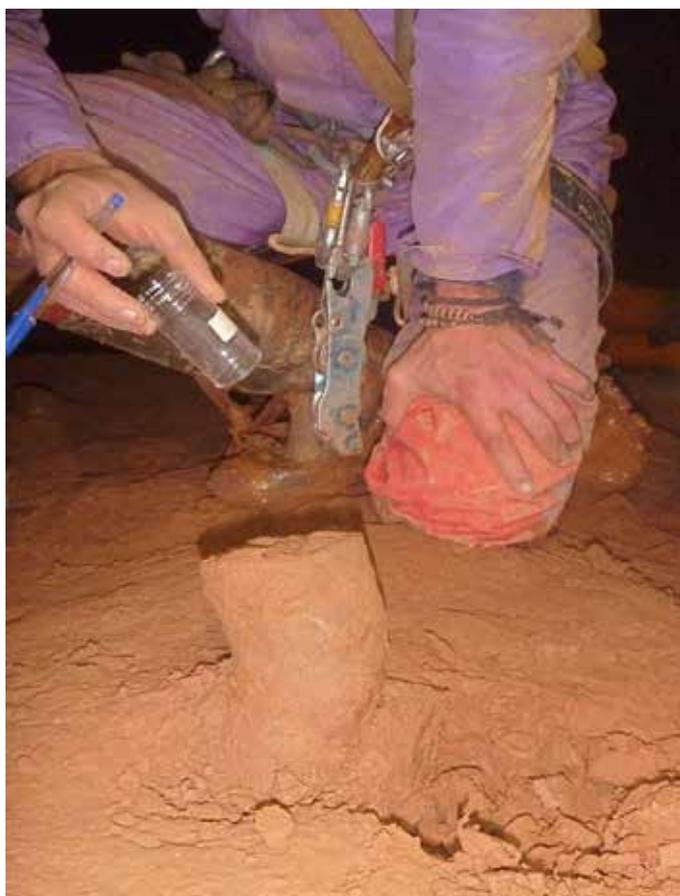


Photo 20 : La concrétion CHAT-03, est partiellement enfouie sous les sédiments argileux. Elle dépasse de quelques centimètres seulement.

Crédits : P. Génuite, 2017.

CHAPITRE 7

DATATIONS ESR SUR QUARTZ DES TERRASSES ALLUVIALES + 15 M, + 30 M ET + 45 M DE L'ARDECHE.

Avant-propos.

Les précédentes données se sont focalisées sur la caractérisation des différentes formes du relief et les différents niveaux d'emboîtement afin de contraindre au mieux spatialement les étapes morphogéniques qui ont marqué la mise en place du Pont d'Arc et son évolution. Les datations U/Th dans la grotte des Châtaigniers ont permis d'apporter des calages chronologiques dans le modèle morphogénique et de le replacer dans le Pléistocène supérieur.

Ce chapitre a pour objet de présenter les résultats de datations sur les dépôts fluviatiles de l'Ardèche. La méthode utilisée a été la spectrométrie ESR et une attention particulière a été portée aux terrasses + 15 m, + 30 m et + 45 m. Ces datations ont été réalisées en partenariat avec le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN) en étroite collaboration avec Pierre Voinchet et Jean-Jacques Bahain, tant lors des prélèvements sur le terrain que dans l'acquisition méthodologique et l'interprétation des résultats.

La première partie de ce chapitre s'attache à décrire le protocole de la datation par spectrométrie ESR et les résultats obtenus. Ceux-ci sont discutés au regard des observations de terrain et des contraintes de prélèvement.

La seconde partie discute des résultats obtenus avec ceux issus des analyses U/Th sur spéléothèmes. Ce double apport permet de proposer un cadre chronologique pour la mise en place des nappes sédimentaires de l'Ardèche. Celui-ci est ensuite décliné à l'échelle du bassin versant vis-à-vis des cycles climatiques du Pléistocène, puis à l'échelle de la Combe d'Arc pour essayer de contraindre au mieux le recouplement du méandre et la genèse de l'arche du Pont d'Arc.

1. La méthode de datation ESR.

Fondée à partir des recherches sur les propriétés de résonance paramagnétique électronique des grains de quartz, la datation ESR (Electron Spin Resonance), ou RPE (Résonance Paramagnétique électronique) est une méthode dite paléo-dosimétrique, qui a été essentiellement utilisée pour dater l'enfouissement des sédiments quartzeux de rivière (Wintle et Huntley, 1982 ; Yokoyama et al., 1985 ; Voinchet et al., 2004 ; Bahain et al., 2007). La méthode de datation par spectrométrie ESR est basée sur l'accumulation au cours du temps d'électrons dans les pièges constitués par les défauts ou les impuretés du réseau cristallin d'un minéral ; en l'occurrence, les grains de quartz.

Découverte en 1945 par Zavoisky, elle a été pour la première fois appliquée en géochronologie avec les travaux de Zeller, Levy et Mattern sur apatite minérale en 1967 (Zeller et al., 1967). Des synthèses des différentes applications de la méthode ont été publiées par Grün (1989) ; Ikeya (1993) ; Rink (1997). La description qui suit, repose en grande partie sur les travaux de Voinchet (2002) qui présentaient l'application de la méthode à la datation des grains de quartz issus de dépôts fluviatiles.

Les grains de quartz, lorsqu'ils sont transportés dans le lit de la rivière, sont exposés à la lumière du soleil qui les blanchit optiquement, c'est-à-dire libère les électrons piégés dans les défauts du minéral. Lorsque ces grains se déposent, ils sont recouverts par les sédiments et sont partiellement protégés de ces rayonnements lumineux, mais sont soumis aux radiations provenant des éléments radioactifs contenus dans les minéraux de l'encaissant et au sein-même des sédiments (séries de désintégration uranium, thorium, potassium, radon...) et des cosmiques. L'influence de ces derniers s'atténue avec la profondeur d'enfouissement des sédiments. Ces rayonnements vont ioniser les atomes des minéraux composant les sédiments en brisant les paires d'électrons. Les électrons ainsi libérés, éjectés hors de leur niveau d'énergie, sont alors parfois capturés dans des défauts énergétiques de la structure cristalline des grains de quartz. On appelle ces derniers centres paramagnétiques. La quantité d'électrons piégés est alors fonction du débit de dose naturelle (en $\mu\text{Gy/a}$) en provenance des sédiments autour des grains de quartz et il est donc possible de dater le temps d'enfouissement des échantillons à partir d'une mesure de dosimétrie intrinsèque sur le terrain en déterminant par spectrométrie ESR le nombre total d'électrons piégés, c'est-à-dire la dose totale de radiations reçue par le minéral au cours du temps.

1.1 Préparation des échantillons.

L'échantillon brut est préparé pour ne conserver que les grains de quartz. Le protocole est présenté dans Yokoyama et al. (1985) et comporte une séparation par tamisage de la fraction des grains à 100-200 microns. Le filtrat est ensuite attaqué à l'HCl pour dissoudre les carbonates, puis lavé à l'eau et à l'acétone, séché à 60°C, pour finalement être réattaqué à l'acide fluorhydrique (40%). Les minéraux lourds ont ensuite été éliminés par liqueur dense. Pour finir, un aimant a été utilisé pour l'élimination des minéraux magnétiques. Les grains de quartz obtenus sont

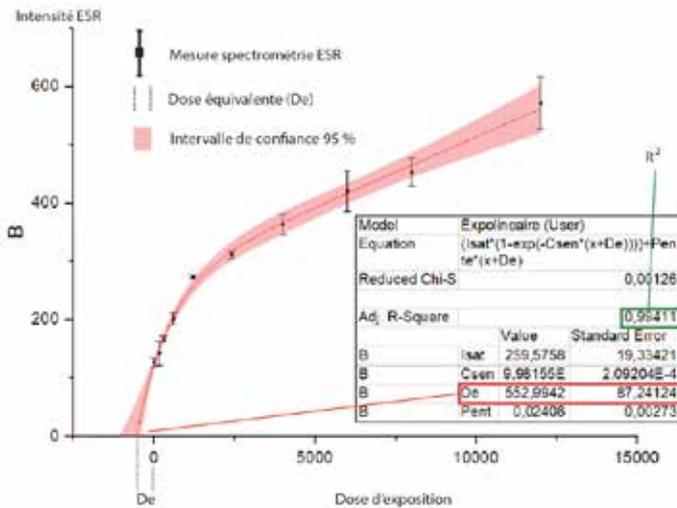


Figure 121 : Courbe de régression exponentielle + linéaire permettant le calcul de la dose équivalente, c'est-à-dire la quantité d'irradiation reçue par l'échantillon depuis son enfouissement et qui permet de calculer un âge. Les erreurs sont données à 2 sigma (2σ).

Regression curve using an exponential function combined with a linear one. It allows the determination of the equivalent dose which represents the total irradiation received by the sample. This value is used for the burial dating. Errors are given at 2σ.

ensuite séparés en 11 parts de même poids appelées « aliquotes ». Une de ces aliquotes est exposée à des rayons lumineux dans un simulateur solaire. Parmi les aliquotes restantes, l'une d'entre elles est conservée telle quelle et représente l'intensité naturelle du sédiment. Les 9 autres sont exposées à des doses d'irradiation gamma d'intensité croissante qui permettent par la suite d'extrapoler à l'origine la dose équivalente, c'est-à-dire la quantité d'irradiation reçue par l'échantillon depuis son enfouissement. Pour le quartz, la fonction mathématique utilisée pour ce calcul est une fonction exponentielle + linéaire (Duval, 2012).

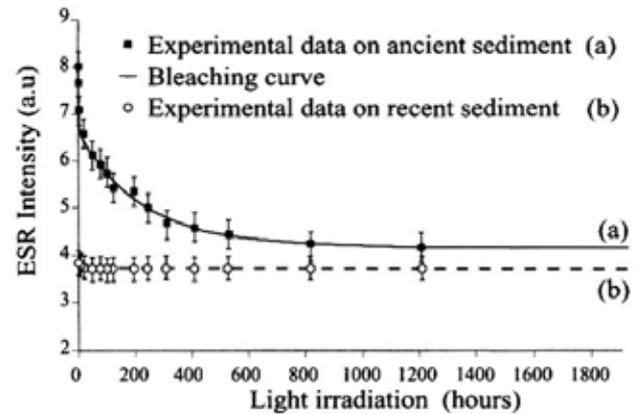


Figure 122 : Courbe de blanchiment optique du centre ESR aluminium pour des quartz extraits de sédiments fossiles (a) et actuels (b). D'après Voinchet et al. (2003). Le temps de blanchiment optique par lampe UV nécessite un temps d'exposition d'environ 1000 heures.

Optical bleaching curves of the ESR Al-center for quartz extracted from fossil (a) and recent (b) sediments. From : Voinchet et al. (2004). Optical bleaching with UV lamp requires at least 1000 hours of exposure time.

1.2 Dose totale, dose résiduelle et dose archéologique.

Pour rappel, la dose équivalente peut être considérée comme une quantité d'irradiation depuis une remise à zéro des centres paramagnétiques. L'exposition des grains de quartz à la lumière du soleil a en effet pour conséquence de vider les pièges (ou centres), mais pour l'un des deux centres paramagnétiques existants et utilisés dans le quartz (appelé : centre aluminium), le blanchiment total n'est pas atteint à l'état naturel. Une opération de blanchiment par lampe UV, présentée en figure 122, est donc nécessaire sur une des aliquotes afin de disposer d'un blanc de référence, ceci afin de déterminer la portion résiduelle de ces centres non blanchis pour chaque échantillon (Toyoda et al., 2000).

Le calcul du taux de blanchiment peut être représenté comme suit :

$$Bl. \% = (I_{nat} - I_{bl}) / I_{nat}$$

Equation 3

I_{nat} et I_{bl} correspondent respectivement à l'intensité ESR naturelle et à celle du sédiment optiquement blanchi, et où Bl. % correspond au taux de blanchiment du sédiment

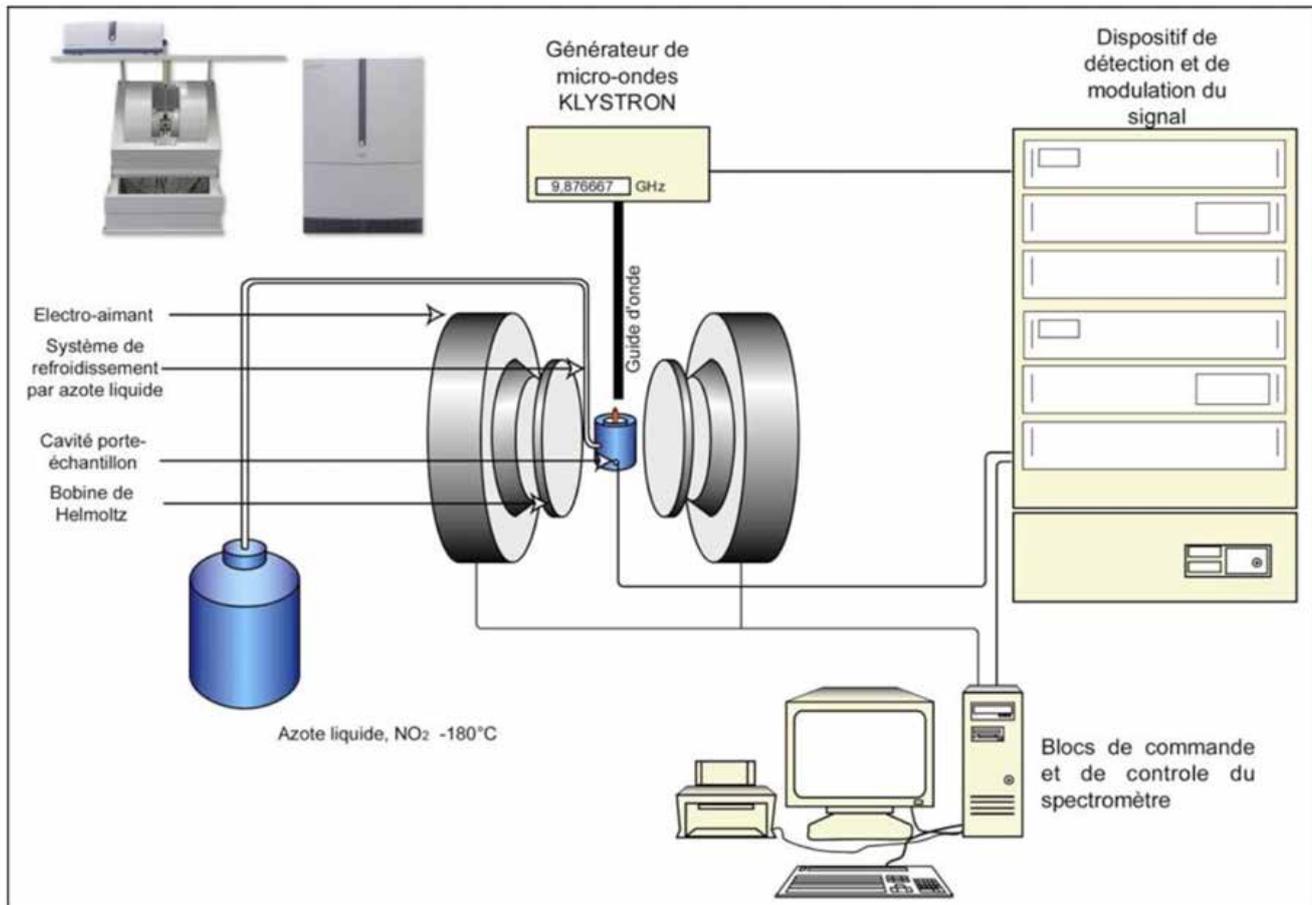


Figure 123 : Système et fonctionnement d'un Spectromètre ESR EMXplus Bruker. La mesure des centres paramagnétiques est permise par l'utilisation d'Azote liquide qui maintient les échantillons à très basse température. Figure extraite de Voinchet (2002).

EMXplus Bruker ESR Spectrometer organization. The system needs to be maintained at very low temperature for accurate measurements using liquid nitrogen. Figure from Voinchet (2002).

La connaissance de la dose totale reçue par l'échantillon et de la dose résiduelle déduite du blanchiment d'une partie de ce dernier permet d'en déduire la dose archéologique : c'est-à-dire ce que l'échantillon a réellement reçu depuis son enfouissement. En comparant la dose archéologique avec une mesure de terrain par spectromètre portable de l'intensité des sédiments ramenée à une dose moyenne annuelle, il est possible d'en déduire un âge et de dater ainsi l'enfouissement des sédiments.

1.3 Détermination de la paléo-dose par spectrométrie ESR.

Les 11 aliquotes ainsi préparées sont ensuite étudiées avec le spectromètre ESR EMXplus Bruker du MNHN (figure 123).

La méthode ESR est basée sur la résonance des centres paramagnétiques au passage d'une micro-onde, conformément à l'effet Zeeman (Zeeman, 1896) qui inverse le spin des électrons non appariés et permet leur détection. Le fonctionnement détaillé est décrit dans Voinchet (2002).

L'application d'un champ magnétique externe par l'intermédiaire du spectromètre ESR permet d'obtenir un spectre d'absorption pour chaque aliquote (figure 124). Les échantillons sont refroidis

sous azote liquide pour être analysés à environ 110 K (Yokoyama et al., 1985 ; Duval et Guilarte, 2012) Une fois normalisés, ces spectres servent à déterminer la dose d'irradiation reçue en fonction de l'échantillon et de la structure minérale observée.

Les trois principaux centres paramagnétiques couramment utilisés en datation ont été mesurés sur les spectres des échantillons ardéchois : le centre Aluminium (Voinchet, 2004 ; Duval, 2012) et les centres Titane (Tissoux et al., 2007 ; Duval et Guilarte, 2015), respectivement avec leurs liaisons spécifiques Titane-Lithium (Ti-Li) et Titane-Hydrogène (Ti-H).

A) Le centre Aluminium

Dans le quartz naturel, l'aluminium est localisé en substitution d'un atome de silicium (Si). Sa présence est compensée localement par un cation interstitiel de type M⁺ (Na⁺, H⁺, Li⁺) (Weil, 1984 ; Halliburton, 1989).

Le centre aluminium s'observe à des températures d'environ 100 K (Yokoyama et al., 1985 ; Voinchet, 2002). Du fait de la photosensibilité d'une partie des centres aluminium présents dans les grains de quartz, il peut être partiellement blanchi ou vidangé lors d'une exposition à la lumière, la partie non photosensible devant être éliminée pour une utilisation en datation. On la détermine en soumettant l'échantillon à une source de lumière solaire en laboratoire.

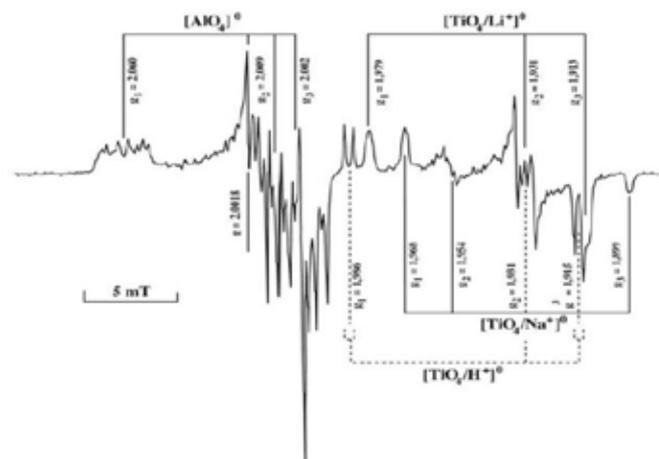
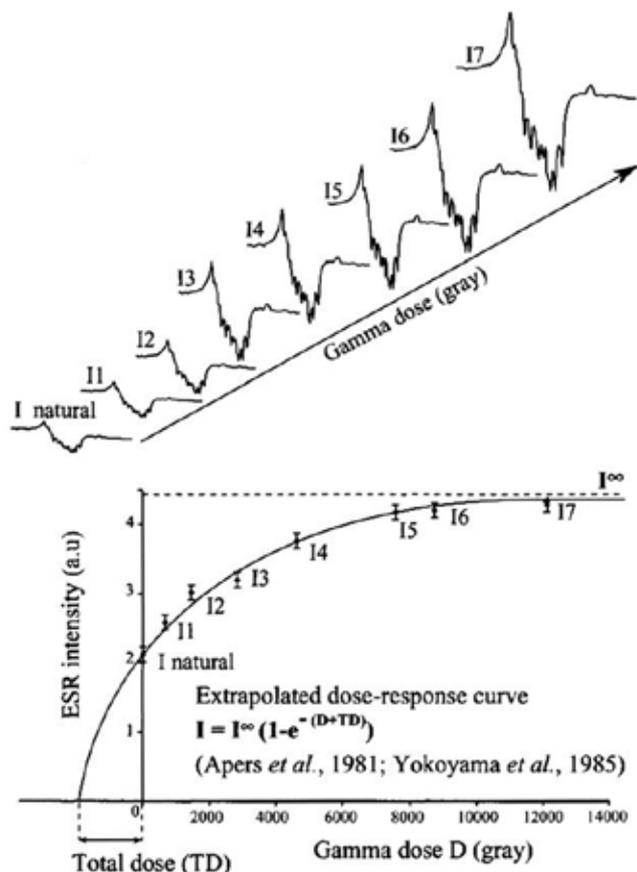


Figure 125 : Spectre ESR des centres paramagnétiques Al et Ti (H, Na et Li) d'un échantillon de quartz à 77 k. D'après : Toyoda et al., 2000.

ESR spectrum of the Al and Ti (H, Na and Li) of a quartz sample measured at 77 k. From: Toyoda et al., 2000.

Figure 124 : Calcul de la dose totale à partir de l'extrapolation à l'origine des intensités ESR des différentes aliquotes de grains de quartz.

Total dose calculation is issued from a dose-response curve extrapolation from the ESR intensities of the quartz samples.

Le rapport de l'intensité ESR de l'échantillon illuminé à l'échantillon naturel est appelé taux de blanchiment de l'échantillon (Voinchet et al., 2004)

Par ailleurs, du fait de sa radiosensibilité et de sa grande durée de vie, ce centre aluminium peut être utilisé pour dater des sédiments d'âge pléistocène moyen à pliocène (Voinchet et al., 2004). Le centre aluminium réagit en fonction de l'interaction entre spin nucléaire et spin électronique qui génère un spectre ESR complexe appelé : structure hyperfine (cf. *infra*, figure 125).

Le blanchiment optique de ce dernier est incomplet et des électrons restent piégés même après un long temps d'exposition. La détermination de la dose résiduelle nécessite donc un blanchiment optique par lampes UV (Voinchet et al., 2004).

B) Les centres Titane (Ti-Li et Ti-H)

Les centres paramagnétiques associés au Titane peuvent être observés dans des conditions de température proches de celle de l'aluminium (Voinchet, 2002) et peuvent également être utilisés pour dater l'enfouissement des différents sédiments échantillonnés. Les centres titane proviennent de la

substitution de l'atome de silicium, cette fois par un atome de titane soit suite à une irradiation par des rayonnements ionisants pour former un centre TiO_5^- , soit par compensation par un atome de type M^+ (H^+ , Na^+ , Li^+) pour créer des centres $[TiO_4(M)]^+$.

Les spectres obtenus sont fonction de l'interaction entre les mouvements du noyau, de l'électron en gravitation, mais également de l'interaction avec l'environnement du grain de quartz lui-même. Ces spectres possèdent une structure super-hyperfine. Une grande photosensibilité de ces pièges fait qu'ils sont totalement vidangés lors de l'exposition à la lumière. Leur grande radiosensibilité fait qu'ils se remplissent plus vite que les centres aluminium et vont avoir tendance à être saturés dans les échantillons anciens : Plio-Pléistocène pour le centre Ti-Li et dès le Pléistocène moyen pour le centre Ti-H. Les spectres obtenus sont fonction de l'interaction entre les mouvements du noyau, de l'électron en gravitation, mais également de l'interaction avec l'environnement du grain de quartz lui-même. Ces spectres possèdent une structure super-hyperfine. Pour finir, la méthode apparaît comme pertinente en regard des fenêtres temporelles recherchées et elle a été retenue pour une série d'échantillonnages sur les basses terrasses de l'Ardèche.

2. Prélèvement de sédiments sur les basses terrasses de l'Ardèche.

2.1 Le choix des sites de prélèvement pour datation ESR.

Neuf prélèvements ont été effectués sur les deux basses terrasses principales de l'Ardèche, en amont et au début des gorges de l'Ardèche : les niveaux à + 15 m et à + 30-35 m (figure 126).

Six des prélèvements proviennent du niveau à + 30 m. Les échantillons ARD 1801 et ARD 1802 ont été prélevés sur les affleurements de la Combe d'Arc, ARD 1809 à la confluence Ibie-Ardèche, ARD 1805 au niveau de Vallon-Pont-d'Arc, et ARD 1808 au début de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc. Enfin, l'échantillon ARD 1806 a été prélevé bien plus en amont, avant le village de Balazuc. L'accessibilité de nombreux affleurements dans le niveau + 30 a permis de mener à bien l'ensemble de ces prélèvements. La quantité d'échantillons obtenus était importante pour pondérer

les résultats du fait de la forte proportion de galets de granite arénisés en gore. Le cortex d'altération atteint parfois la totalité du galet, ce dernier représente alors une masse de grains de quartz qui n'ont (peut-être) jamais été blanchis par la lumière solaire, et donc pouvant générer de grosses erreurs dans la mesure du taux de blanchiment, et par suite, de la dose archéologique (Moreno et al., 2017).

Trois échantillons ont été prélevés sur la terrasse à + 15 m, dont deux au sein même de la Combe d'Arc (ARD 1803 et ARD 1804) ; le troisième provient du méandre de Sampzon (ARD 1807).

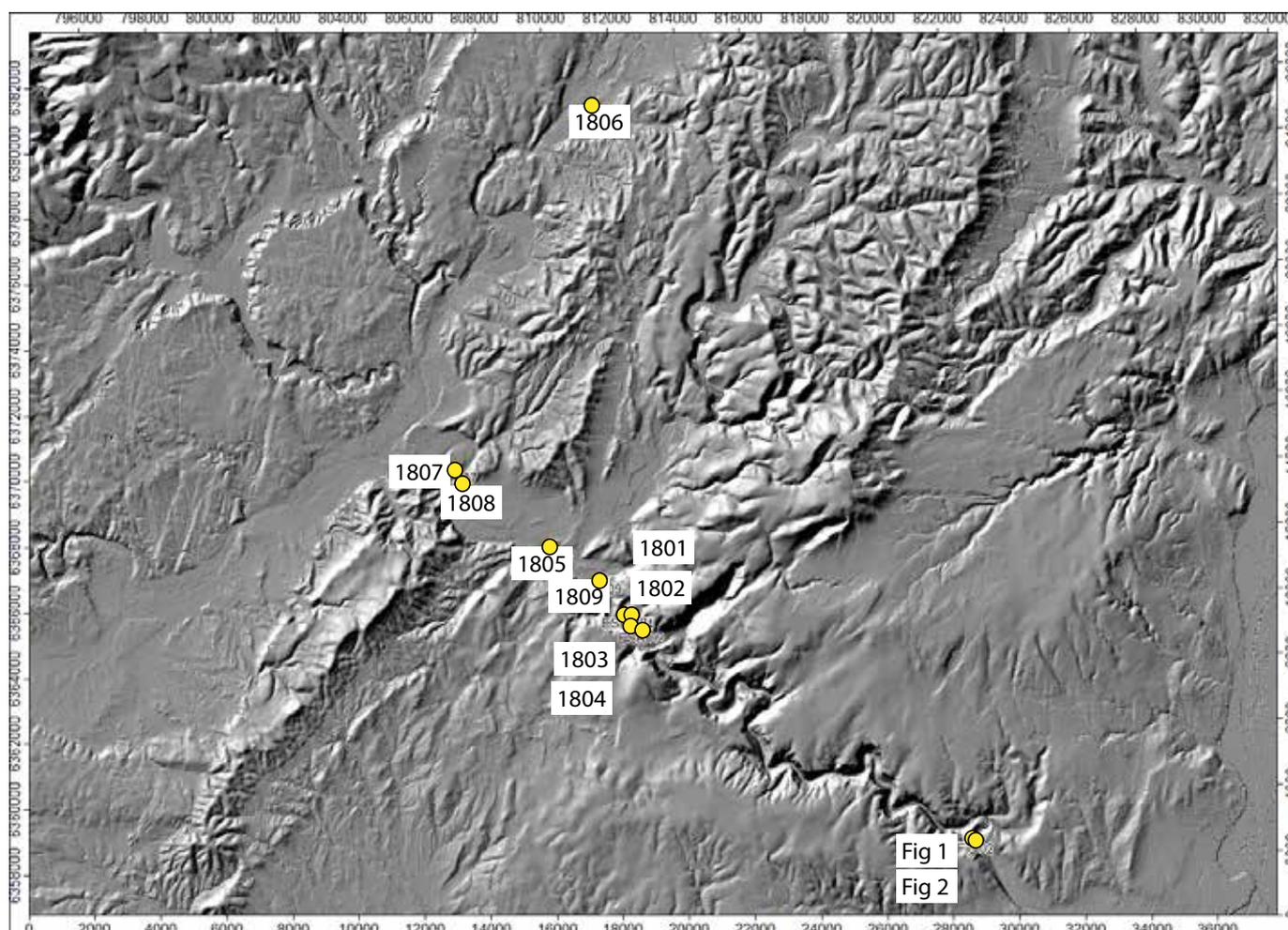


Figure 126 : Localisation des prélèvements pour datation ESR le long du cours de l'Ardèche. 9 échantillons ont été prélevés en 2018 à l'amont et à l'entrée des gorges de l'Ardèche, sur la terrasse à + 15 m et à + 30 m. Les 2 échantillons de la grotte du Figuier ont été prélevés quelques années plus tôt dans le cadre des fouilles archéologiques organisées par Marie-Hélène Moncel (Moncel et al., 2010 ; 2012).

Location map of ESR samplings inside the Ardèche river watershed. 9 samples were taken during 2018 autumn fieldwork on the + 15 m and + 30 m alluvial banks. The Figuier cave samples were taken earlier during the archeological fieldwork directed by Marie-Hélène Moncel (Moncel et al., 2010 ; 2012).

2.2 Description site par site.

A) Les échantillons prélevés dans la Combe d'Arc.

La cartographie présentée figure 127-A contextualise les quatre échantillons provenant de l'ancien méandre de la Combe d'Arc et de ses abords. Une vue des différents affleurements échantillonnés est également présentée figure 127-B, C, D et E :

L'échantillon ARD 1801 a été prélevé au pied d'un affleurement sur le rebord de la route, 400 m en aval de la Combe d'Arc. Le niveau fluviatile (figure 127-B), fortement composé de galets de granite arénisés, est encastré dans ce qui semble être une ancienne anfractuosités karstique. L'échantillon a été prélevé à la base du dépôt, environ 4 m sous le niveau maximum de la terrasse + 30.

L'échantillon ARD 1802 a été prélevé à l'entrée de la Combe d'Arc, juste derrière l'Auberge du Pont d'Arc. Comme pour le prélèvement précédent, les galets de granite sont fortement altérés (figure 127-C), présentant un risque important de contamination de l'échantillon. Le prélèvement se situe à environ 4 m sous le niveau maximum de la terrasse.

L'échantillon ARD 1803 provient d'un ravinement de 5 m de profondeur qui a été généré par les orages de l'été 2018 au cours des aménagements de l'OGS (Opération Grand Site). Il se situe juste en amont de la Combe d'Arc (figure 127-D). Le niveau de galets à + 15 m était à l'affleurement. Le prélèvement a été effectué dans une lentille de sable environ 20 cm sous le toit des galets, à environ 4 m de la surface. Ces derniers ne présentaient pas de cortex d'altération sur les granites.

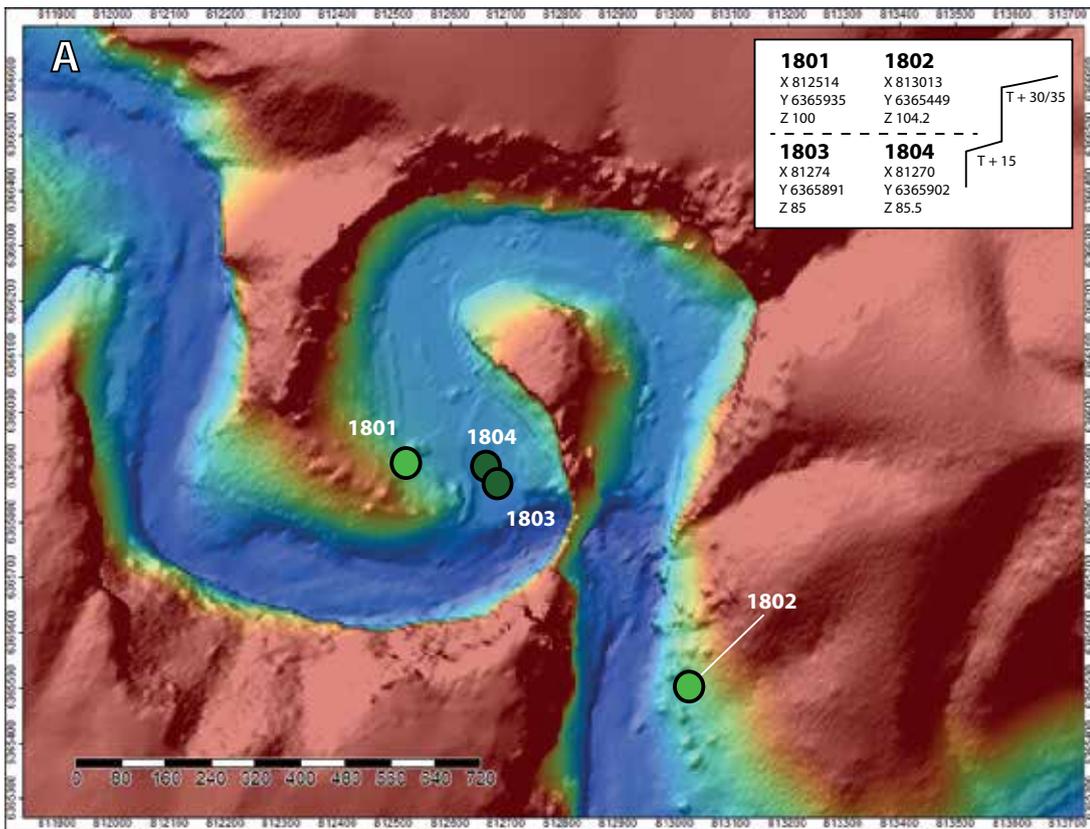


Figure 127 : Localisation des prélèvements (cercles blancs) pour datation ESR dans l'environnement de la Combe d'Arc sur les affleurements des terrasses à + 15 m et à + 30 m.

Location map of the samplings for ESR dating near the Combe d'Arc meander. White circles represent the sampling location.



Le dernier échantillon, ARD 1804, a également été prélevé dans le ravinement mais à 50 cm au-dessus du toit des galets dans une matrice uniquement sableuse (Figure 127-E).

Ces deux échantillons (ARD 1803 et 1804) ont été prélevés dans l'objectif de contraindre l'âge de la surface d'abandon à + 15 m de la Combe d'Arc.

B) Les échantillons prélevés en amont des gorges de l'Ardèche.

Cinq échantillons ont été prélevés en amont des gorges. Une vue des différents affleurements échantillonnés est aussi présentée en figure 128-A.

L'échantillon ARD 1805 provient de la matrice argilo-sableuse au sommet de la terrasse à + 30 m, près du Pont de Salavas, juste au-dessus des galets. L'argile était très indurée, rendant complexe l'échantillonnage (figure 128-B). Ce dernier a été effectué en bord de route, assez proche du sommet de la surface théorique de la terrasse à + 30 m (environ - 2 m).

L'échantillon ARD 1806 a été prélevé dans la terrasse à + 30 m en amont de Balazuc, à la faveur d'un affleurement lié à des travaux sur l'ancienne voie ferrée du Sud-Ardèche (figure 128-C). Le prélèvement a été effectué environ 50 cm sous la surface actuelle (qui a vraisemblablement été un peu rabotée lors des travaux) à la faveur d'une grosse lentille de sable.

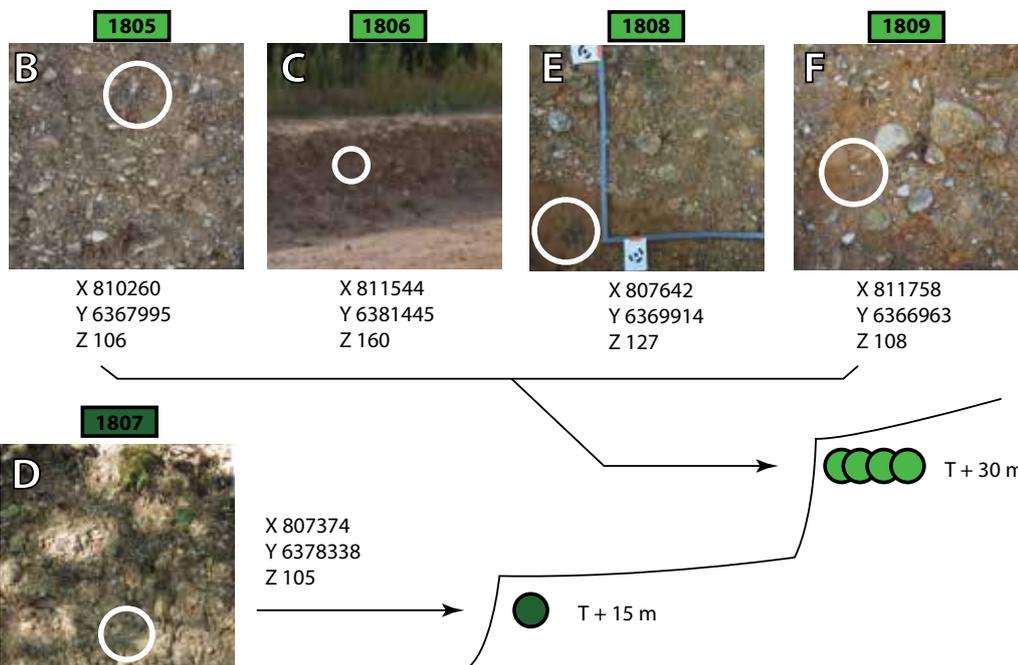
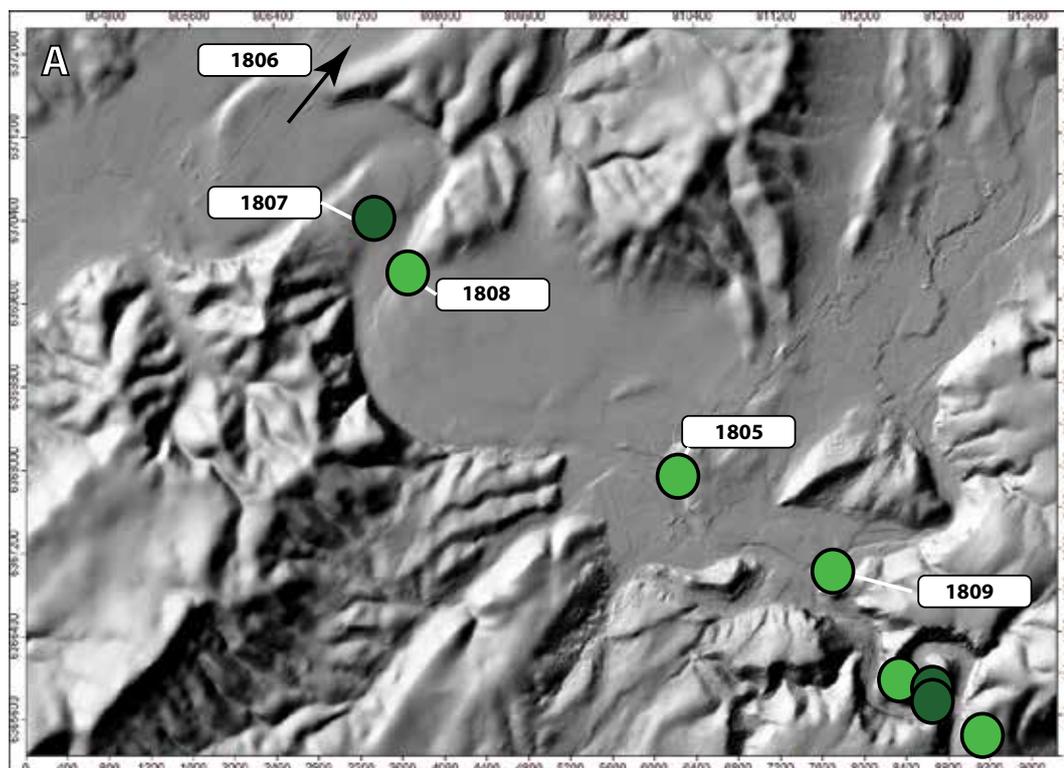


Figure 128 : Carte de localisation des échantillons prélevés en amont des gorges de l'Ardèche. Les coordonnées sont en RGF93/L93.

Location map of the samplings done up to the Ardèche canyon. Sampling coordinates are given in RGF93/L93.

Ce niveau présentait également des galets de granite arénisés, mais le prélèvement dans la lentille sableuse laisse présager une meilleure fiabilité du résultat vis-à-vis du blanchiment des grains de quartz.

Le prélèvement ARD 1807 a été réalisé dans la terrasse à +15 m à l’affleurement, près du camping de Sampzon (figure 128-D). Il représente le seul échantillon de la terrasse à + 15 m prélevé hors du méandre abandonné. Comme pour ARD 1803 et ARD 1804, les galets de granite n’étaient pas altérés. Le prélèvement a été effectué environ 50 cm sous la surface actuelle.

L’échantillon ARD 1808 a été prélevé à l’entrée de la plaine de Vallon-Pont-d’Arc, près du hameau des Blaches, à 126 m NGF, proche du sommet de la terrasse à + 30 m, environ 1 m sous la surface, dans une lentille sableuse sans galets. La matrice semble rubéfiée et affiche des tons très orangés (Figure 128- E).

Le dernier échantillon, ARD 1809, a été complexe à prélever. Localisé en amont (côté Ibie) de la confluence Ibie–Ardèche, ce cortège cévenol de la terrasse à + 30 m est représentatif d’une époque où l’Ardèche passait encore par le méandre de Montingrand (Menneron, 2003 ; Saison, 2017).

Localisé en bord de route, l’échantillonnage a été réalisé environ 1.5 m sous le niveau maximum de la terrasse (figure 128-F). Il est néanmoins entouré par de nombreux galets de granite très altérés, qui laissent présager des incertitudes dans les résultats de la datation. La matrice sableuse est également rubéfiée.

C) Les échantillons prélevés en aval des gorges de l’Ardèche.

Deux échantillons provenant de la grotte du Figuier (située dans le méandre du Ranc Pointu, dernier méandre des gorges de l’Ardèche, figure 129) ont également été analysés par spectrométrie ESR. Ces derniers ont été prélevés dans le cadre des fouilles archéologiques, et sédimentologiques de l’UMR7194 dans la cavité (Moncel et al., 2010 ; 2012, études en cours). Ces prélèvements proviennent de la base des sondages archéologiques dans un dépôt de nature fluviatile. Ce dernier, à environ + 41 m au-dessus de la rivière, pourrait être rapporté à la terrasse à + 45 m.

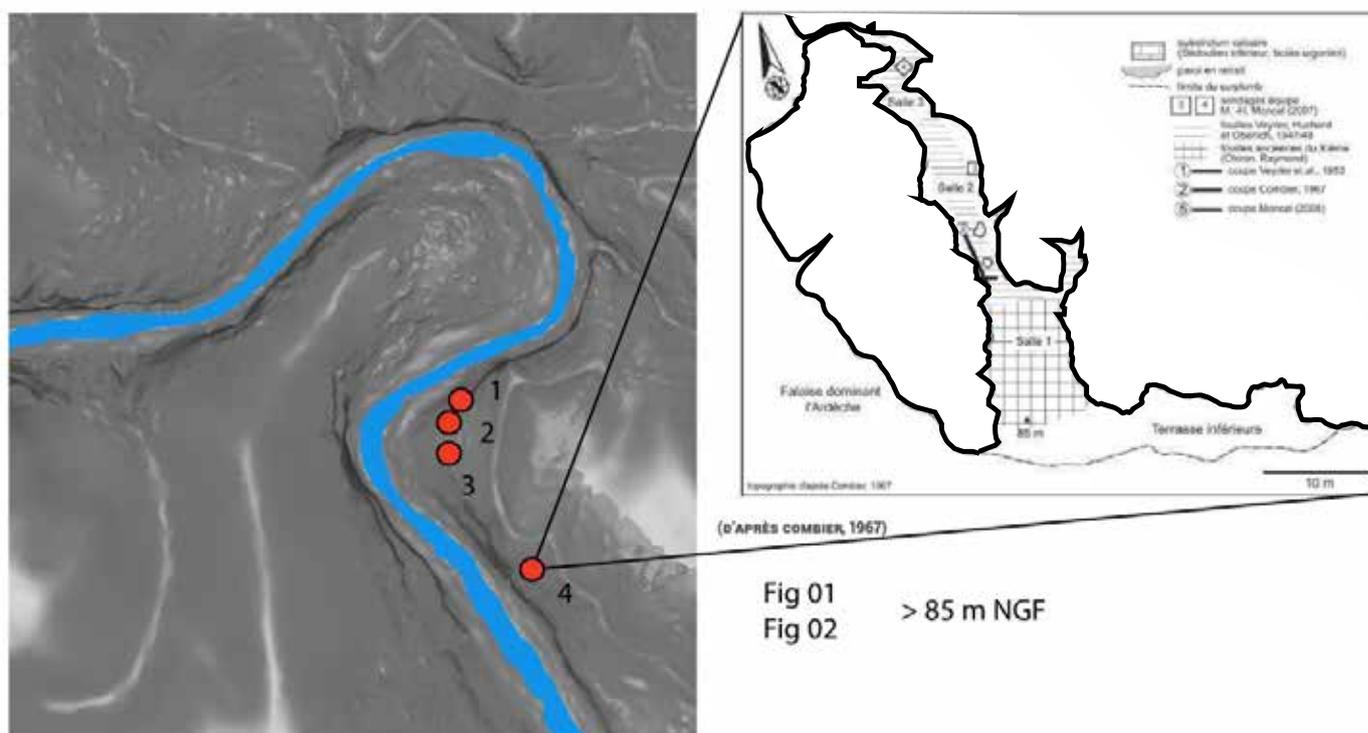


Figure 129 : Le Ranc Pointu, dernier méandre des gorges de l’Ardèche avant la vallée du Rhône, abrite l’une des zones les plus concentrées en cavités ornées avec le cirque d’Estre. 1 : Grotte des 2 ouvertures, 2 : Baume des Cloches, 3 : Grotte du Ranc Pointu 2, 4 : Grotte du Figuier.

Topo grotte du Figuier : d’après (Combar, 1967).

The Ranc Pointu is the last meander of the Ardèche canyon and leads the mid Rhône valley. It is one of the richest areas of the Ardèche river for archaeological remains equally with the Cirque d’Estre (Combe d’Arc meander). 1 : Deux ouvertures cave, 2 : Ranc Pointu 2 cave, 3 : Baume des Cloches cave, 4 : Figuier cave. Grotte du Figuier topography : from Combar (1967).

3. Datation ESR des sédiments de la vallée de l'Ardèche.

3.1 Spectres ESR.

Après préparations, les aliquotes ont été mesurées sur des angles différents jusqu'à 9 fois : 3 fois par jour et ce pendant 3 jours (3x3). En effet, les quartz composant une même aliquote n'étant pas strictement identiques, quatre mesures sont faites par tube, avec trois angles différents dans la cavité, pour tenir compte d'une possible dépendance angulaire. Ensuite, chaque échantillon est mesuré trois fois sur trois journées différentes, pour observer la reproductibilité de la mesure et la constance des intensités des aliquotes, ainsi que pour prendre en compte des variations du spectromètre lors d'une série de mesures. La dose archéologique obtenue par régression exponentielle-linéaire à partir des mesures d'intensité ESR des échantillons en fonction de la dose d'irradiation reçue en laboratoire (ainsi que l'aliquote contenant l'échantillon naturel, à l'origine des abscisses). La distance entre la fonction et l'origine sur l'axe des abscisses permet d'obtenir la dose équivalente d'irradiation qui, confrontée à la mesure de dosimétrie in situ (en $\mu\text{Gy/a}$), donne un âge pour le dépôt.

Ces résultats sont obtenus par l'intermédiaire du logiciel *Origin Pro* pour chaque centre paramagnétique (Al, Ti-Li et Ti-H) et pour chaque passage au spectromètre. Un lissage statistique est parfois nécessaire pour pouvoir construire une courbe exponentielle linéaire significative. Certaines mesures peuvent donc être rejetées, soit au sein de la moyenne pondérée des 3 mesures (différence importante – plus de 10% – par rapport aux deux autres mesures), ce qui permet d'améliorer le coefficient de corrélation de la fonction en réduisant les barres d'erreur. Parfois certaines aliquotes ont pu être rejetées entièrement à cause de problèmes lors des mesures au spectromètre ; celles-ci pouvant être liées à une trop faible quantité de matière dans le tube de mesure entraînant une instabilité systématique du spectromètre lors de la mesure.

Cette partie du travail de datation est cruciale car influe directement sur l'extrapolation à l'origine de la dose équivalente. Les âges ESR sont donnés à 1 *sigma*.

3.2 Tableaux des résultats.

Sur les échantillons de l'Ardèche, nous avons fait le choix d'une utilisation combinée des centres paramagnétiques Al et Ti-Li (Tissoux et al., 2007) Pour la terrasse T3, étant donné le fort taux de blanchiment, seuls les centres Ti-Li sont pris en compte. Le centre Ti-H dont l'instabilité a rendu son utilisation difficile a seulement été utilisé ponctuellement pour les échantillons ARD 1801 et ARD1809.

Les résultats ont été pondérés afin obtenir un seul âge par échantillon avec le logiciel *IsoplotR* (Vermeesch,

2018). Lors de ce calcul, certains *runs*, trop différents des autres, ont dû être éliminés ; soit manuellement (Ex : Ard 1808 TiLi m3), soit au moment du calcul des moyennes pondérées. Lors de résultats discordants, l'utilisation de la fonction *random effect model* permet une bonne identification des *outlayers* par rapport à l'ensemble des résultats. Les moyennes pondérées sont données comme des âges finaux, les détails pour chaque centre mesuré sont accessibles en annexe 2, les résultats présentés ci-après sont les valeurs d'irradiation des échantillons (tableau 3), les dégradés de vert représentent les niveaux sédimentaires dans lesquels les échantillons ont été prélevés (T + 45, T + 30, T + 15).

On peut noter que les échantillons affichent tous

Lab code	Da	D β	D γ	D γ in situ	cosm.	Eau
FIG 1	35 ± 1	876 ± 17	526 ± 14		37,8 ± 1,9	15
FIG 2	62 ± 2	2839 ± 29	1380 ± 21		37,8 ± 1,9	15
ARD 1801	115 ± 2	2786 ± 26	1723 ± 20	1397 ± 70	102,8 ± 5,1	15
ARD 1802	52 ± 2	2703 ± 26	1266 ± 19	1190 ± 60	102,8 ± 5,1	15
ARD 1805	96 ± 2	2134 ± 29	1383 ± 23	1290 ± 65	165,7 ± 8,3	15
ARD 1806	50 ± 2	2708 ± 28	1251 ± 20	760 ± 38	180,5 ± 9,0	15
ARD 1808	62 ± 2	2732 ± 30	1345 ± 22	1247 ± 62	152,5 ± 7,6	15
ARD 1809	62 ± 2	2839 ± 29	1380 ± 21	1239 ± 62	140,4 ± 7,0	15
ARD 1803	88 ± 2	2770 ± 29	1391 ± 21	1526 ± 76	116,1 ± 5,8	15
ARD 1804	84 ± 2	2957 ± 30	1620 ± 23	1775 ± 89	102,8 ± 5,1	15
ARD 1807	73 ± 2	2488 ± 31	1333 ± 23	1550 ± 78	102,8 ± 5,1	15

Lab code	U($\mu\text{gms/g}$)	Ra	Rn	Th	K (%)	Prof. (cm)
FIG 1	1.11 ± 0.06	1.18 ± 0.12	1.08 ± 0.02	1.05 ± 0.02	1.04 ± 0.01	1200
FIG 2	1.728 ± 0.08	1.74 ± 0.145	1.653 ± 0.02	2.1 ± 0	3.956 ± 0.03	1200
ARD 1801	3.015 ± 0.08	3.18 ± 0.145	3.114 ± 0.03	3.98 ± 0	3.343 ± 0.02	400
ARD 1802	1.365 ± 0.07	1.76 ± 0.132	1.396 ± 0.02	1.81 ± 0	3.853 ± 0.02	400
ARD 1805	2.395 ± 0.09	2.73 ± 0.171	2.515 ± 0.03	3.45 ± 0	2.491 ± 0.02	100
ARD 1806	1.419 ± 0.07	1.44 ± 0.14	1.413 ± 0.02	1.65 ± 0	3.869 ± 0.03	50
ARD 1808	1.582 ± 0.08	1.7 ± 0.15	1.379 ± 0.02	2.19 ± 0	3.804 ± 0.03	150
ARD 1809	1.728 ± 0.08	1.74 ± 0.145	1.653 ± 0.02	2.1 ± 0	3.956 ± 0.03	200
ARD 1803	1.933 ± 0.08	2.37 ± 0.15	2.001 ± 0.03	2.24 ± 0	3.78 ± 0.03	320
ARD 1804	2.875 ± 0.09	2.92 ± 0.161	2.76 ± 0.03	2.9 ± 0	3.789 ± 0.02	400
ARD 1807	2.116 ± 0.09	2.34 ± 0.164	2.086 ± 0.03	2.39 ± 0	3.282 ± 0.03	400

Lab code	Da ($\mu\text{Gy/a}$)	BI%	Sédimentation	ages (ka)
FIG 1	1437 ± 22	39	T4	305 ± 36
FIG 2	1480 ± 45	56	sable	378 ± 30
ARD 1801	4400 ± 77	77	T3	489 ± 26
ARD 1802	4047 ± 68	66	matrices intertilliques	185 ± 27
ARD 1805	3686 ± 75	70	et lentilles sableuses	202 ± 19
ARD 1806	3699 ± 52	87		231 ± 31
ARD 1808	4193 ± 72	66		179 ± 44
ARD 1809	4281 ± 72	81		372 ± 28
ARD 1803	4480 ± 84	54	T2 sables	156 ± 11
ARD 1804	4929 ± 97	50		121 ± 13
ARD 1807	4214 ± 87	47		121 ± 13

Tableau 3 : Récapitulatif des datations ESR réalisées. Les doses annuelles ont été calculées par une mesure de terrain au spectromètre portable, sauf pour Fig 1 et 2. La sédimentologie est indiquée, ainsi que les taux de blanchiment des sédiments. Pour la T2, les ages Al et Ti-Li sont donnés.

Recap table of the ESR datings. Irradiation factors are indicated, so as the bleaching part for each sample. Annual dose rates were calculated with a portable spectrometer, except for Fig 1 and 2. Sedimentology is given as an indicator. For T2 deposit, both Al and Ti-Li centers are given.

des valeurs d'irradiation élevées, notamment ARD 01 avec les concentrations en éléments les plus importantes, de même que la dose alpha ($D\alpha$) qui tranche nettement avec les autres échantillons. La quantité d'eau (%) pour chaque échantillon a été estimée car les mesures n'ont pas pu être réalisées. Une valeur de 15 % a donc été attribuée pour l'ensemble des échantillons.

Les résultats obtenus donnent une distribution restreinte pour le niveau à + 45 m (Figuiers 1 et 2), ainsi que pour la terrasse à + 15 m (ARD0 1803, ARD 184, ARD 1807)

En revanche, la distribution est plus importante pour le niveau à + 30 m, avec certaines dates pouvant être identifiées comme des *outlayers* à presque 500 ka pour l'échantillon ARD 1801.

Le premier échantillon (ARD 1801) a vraisemblablement été contaminé par le cortex d'altération des granites de la terrasse à + 30 m. Pour rappel, cet échantillon a été complexe à prélever et présentait déjà des risques de contamination au moment de l'échantillonnage. Le vieillissement artificiel de l'âge pourrait en être la conséquence.

Le même processus affecte vraisemblablement les échantillons ARD 1802 et ARD 1809 qui montrent des taux de blanchiment très élevés (> 80 %). Les centres Al de ces 3 derniers n'ont pas été considérés comme viables pour la datation. Ce défaut pourrait également être dû à leur trop faible quantité de matière (aliquotes inégales du fait du trop peu de matière en quartz, et de la difficulté de lecture d'une si petite quantité par le spectromètre ESR). Cette interprétation s'appuie notamment sur le passage délicat de l'échantillon ARD 1809 au spectromètre, qui a donné des spectres très instables pour les aliquotes les moins irradiées.

Au final, les âges pondérés pour chaque niveau fluviatile avec IsoplotR donnent donc les résultats suivants :

- pour les échantillons à + 41 m (assimilation à la T + 45 m) : **353 +/- 23 ka**
- pour la terrasse +30 m : une moyenne pondérée de : **202 +/- 13 ka**
- pour la terrasse +15 m, la moyenne pondérée donne un âge de **122 +/- 8 ka**

Plusieurs indicateurs nous poussent à annoncer ces résultats avec une certaine confiance :

- en premier lieu, ces valeurs pondérées sont cohérentes entre elles : elles ne présentent pas d'inversion stratigraphique.

- en second lieu, ces résultats sont cohérents avec les datations U/Th sur les concrétions scellant les niveaux à + 8 m et à + 30 m de la grotte des Châtaigniers.

Enfin, la distribution à 1 sigma est tout à fait acceptable pour la terrasse à + 15 m dans le cadre de notre étude. C'est moins le cas pour la terrasse + 30 qui est

peut-être à comparer avec un âge plus jeune (Ranc Pointu II). L'âge pondéré de cette terrasse la replace au début du MIS 6. La confrontation de cet âge avec des contraintes extérieures comme les datations U/Th peut permettre d'affiner ce résultat.

3.3 Essai de corrélation des datations ESR et U/Th à l'aide du modèle d'emboîtement relatif.

Les datations ESR ont permis d'apporter une contrainte chronologique forte sur trois des principaux niveaux fluviatiles du Pléistocène supérieur : les terrasses à + 15, à + 30 m et à + 45 m. La cohérence stratigraphique des âges obtenus confirme la robustesse du modèle d'emboîtement issu des travaux d'analyses précédemment présentés.

Dans l'objectif d'affiner cet emboîtement chronologique, une modélisation statistique bayésienne a été menée sur l'ensemble du *corpus* de dates obtenues, en contraignant ce dernier à l'aide du modèle stratigraphique relatif tiré de l'étude géomorphologique ainsi qu'avec les données chronologiques extérieures existantes. Cette opération est possible car les concrétions (U/Th) et les niveaux fluviatiles (ESR) peuvent être considérés comme des formations naturelles représentant, à un niveau de base donné, des terminaux *ante-quem* et *post-quem* l'un pour l'autre. En effet, la croissance des concrétions implique la disparition de la zone noyée souterraine. À l'inverse, la construction sédimentaire alluviale implique une remontée du niveau de la nappe phréatique. Les deux types d'objets datés ici sont unitairement calés en altitude ce qui autorise la confrontation dans un modèle temps / altitude unifié.

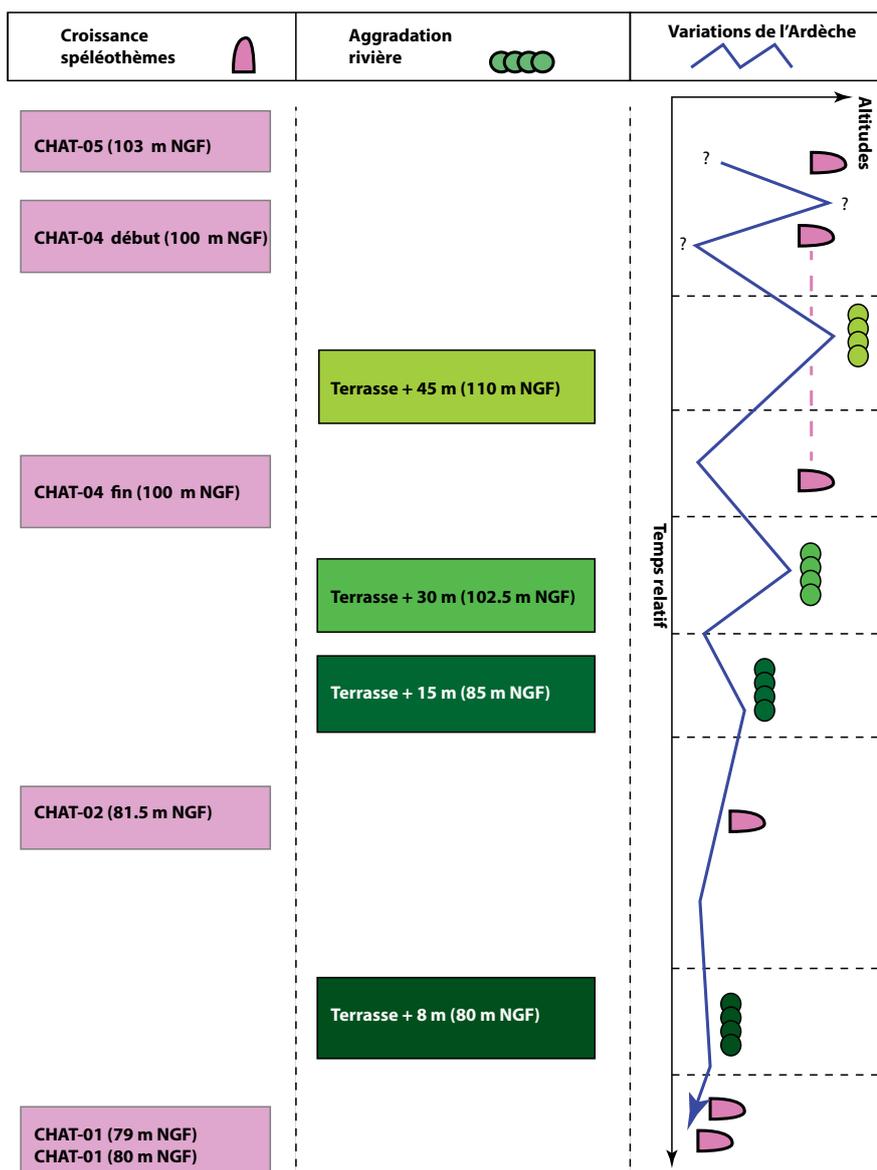
La modélisation bayésienne a été conduite avec le logiciel *Chronomodel* (Lanos et Philippe, 2015 ; Lanos et al., 2016) qui peut réaliser des ajustements statistiques bayésiens en fonction de contraintes stratigraphiques (i.e modèle chrono-relatif). En ce sens, les âges sont recalculés les uns par rapport aux autres, mais également par rapport au modèle d'emboîtement relatif des événements. Le logiciel a été pensé comme un outil interdisciplinaire et permet l'utilisation de plusieurs méthodes de datation. Il est couramment utilisé par la communauté des archéologues (Banks, 2015 ; Quiles et al., 2016)

En plus des âges ESR et U/Th, d'autres données chronologiques et stratigraphiques ont été mobilisées afin de contraindre au mieux le modèle chronologique. Il s'agit des données suivantes : le hiatus de croissance rapporté au dernier maximum glaciaire (LGM) sur la concrétion STM-CHAU-6 de la grotte Chauvet et mis en évidence par Genty et al. (2004) a été défini par datation U-Th entre 15.28 +/- 0.25 ka BP et 22.1 +/- 0.4 ka BP, soit un arrêt de croissance de 6.82 +/- 0.5 ka. Ce hiatus concerne nombre de spéléothèmes de la grotte Chauvet ; il est attribué au maximum du

froid au MIS 2 (Genty, 2012). Considérant la distance très faible séparant la grotte Chauvet de celle des Châtaigniers, nous faisons ici l'hypothèse que cet arrêt du concrétionnement est également valable pour les spéléothèmes des Châtaigniers. Une autre datation a également été prise en compte : dans le dernier méandre des gorges de l'Ardèche, l'équipe du MNHN a daté des sédiments fluviaux sableux de la grotte du Ranc Pointu 2 par OSL à $145,2 \pm 9,2$ ka (Moncel et al., 2014). cette grotte est située au bord de l'Ardèche. La coupe sédimentaire de Moncel et al. (2014) décrit également des galets situés un peu plus bas et attestant d'une origine fluviale du matériel. Ce prélèvement étant localisé à 76 m NGF, il correspondrait donc au maximum de l'aggradation théorique de la terrasse + 30 m. Malgré une divergence d'âge des datations (145 ± 9.2 et 203 ± 13 ka), les caractéristiques d'altitude relative généralisables des terrasses alluviales à l'échelle du bassin versant ardéchois plaident également pour utiliser cette date comme une contrainte supplémentaire.

A) Modèle chrono-relatif.

Les relations altitudinales entre les éléments étudiés (concrétions et niveaux de rivière) ont été utilisées pour créer des contraintes relatives dans le logiciel



chronomodel. Ces contraintes représentent les phases décrites dans le modèle d'emboîtement. Ces dernières sont assimilées dans *chronomodel* comme des événements qui peuvent contenir – ou pas – des objets datés. Ces phases peuvent être considérées comme la stratigraphie relative des événements. La logique du modèle d'emboîtement relatif que l'on va construire prime sur les âges absolus obtenus en datant certains objets. Ce modèle stratigraphique *a priori* est donc considéré comme le paramètre principal. Les datations absolues peuvent être ajoutées *a posteriori* au sein de ces différentes phases et vont faire l'objet d'une analyse statistique bayésienne en fonction du modèle stratigraphique, présenté en figure 130.

Les distributions des dates avec leurs incertitudes à 1 et 2 sigma ont été entrées dans *Chronomodel* avec les deux options suivantes : nous avons opté pour l'option TL/OSL, en prenant en compte cette distribution a priori. Plusieurs âges ESR entrés dans le modèle correspondent à un événement (T2, T3...).

Figure 130 : Modèle chrono-relatif des événements issu de l'étude géomorphologique. Les concrétions et les niveaux de terrasse alluviale sont considérés comme anti-corrélés pour un même niveau altitudinal. Le hiatus de croissance correspondant au LGM n'est pas une véritable phase stratigraphique, mais il définit néanmoins une période durant laquelle les concrétions ne poussent pas. À ce titre, il est intégré au modèle pour contraindre l'âge à la base de CHAT-03. Les cotes altitudinales sont prises au droit du Pont d'Arc.

Relative chronological model of the Ardèche river evolution based on the 3D geomorphological study. Calcite growth and river base level are considered as anti-correlated factors because of the aerial growth characteristics of the Châtaigniers cave speleothems. LGM hiatus is also included because it relates to a non-growing calcite phase which can be used to better constraint the beginning of the growing phase of CHAT-03. Altitudes are valuable at the pont d'Arc.

4. Résultats et discussion.

L'analyse statistique bayésienne des dates obtenues conforte le modèle stratigraphique élaboré à partir des indices topographiques et morphogéniques ; quelques recouvrements d'incertitudes existent néanmoins (figure 131). Pour la T+30, La succession des âges U-Th > ESR > OSL modélise un âge 160 +/- 9 ka (distribution entre 140 et 176 ka à 2 sigma).

La modélisation permet également de bien distinguer les terrasses + 30 m et + 15 m comme appartenant à deux phases distinctes malgré leur relative proximité chronologique (séparation d'environ 30 à 40 ka).

Un premier constat peut être établi à propos du niveau à + 45 m. Les deux âges étant assez éloignés, la moyenne pondérée n'est pas forcément représentative. Cette dernière, à 353 +/- 23 ka, remplace cependant le dépôt entre le début et la fin de la période de croissance de la concrétion CHAT-04. Cette observation n'est pas forcément incohérente dans le sens où la croissance de la concrétion est entrecoupée par des hiatus et des niveaux argileux (cf. *supra* chapitre 6). Le principal hiatus argileux de CHAT-04 s'étend entre 330 et 350 ka. Le suivant commence après 300 ka mais la partie supérieure est mal datée et il présente un faciès beaucoup moins argileux. C'est ce dernier hiatus qui correspondrait le mieux aux données ESR de la grotte du Figuier.

La terrasse à + 8 m n'a pas fait l'objet de prélèvements pour l'ESR. Étant donné la correspondance observée entre niveaux argileux et niveaux de terrasse (correspondance validée par la continuité temporelle des dates U/Th et ESR au niveau à + 30 m), la corrélation altitudinale avec le niveau argileux de la grotte des Châtaigniers également à + 8 m (80 m NGF) milite pour l'utilisation des dates U/Th sur ce niveau. La concrétion CHAT-03 qui pousse 20 cm sous le niveau argileux actuel est datée entre 15.66 +/- 2.91 et 13.17 +/- 1.12. L'intervalle entre ces deux âges placerait donc la fin d'aggradation du niveau à + 8 m à la fin du MIS 2, juste après le maximum du froid.

4.1 Les terrasses alluviales de l'Ardèche et cycles glaciaires pléistocènes.

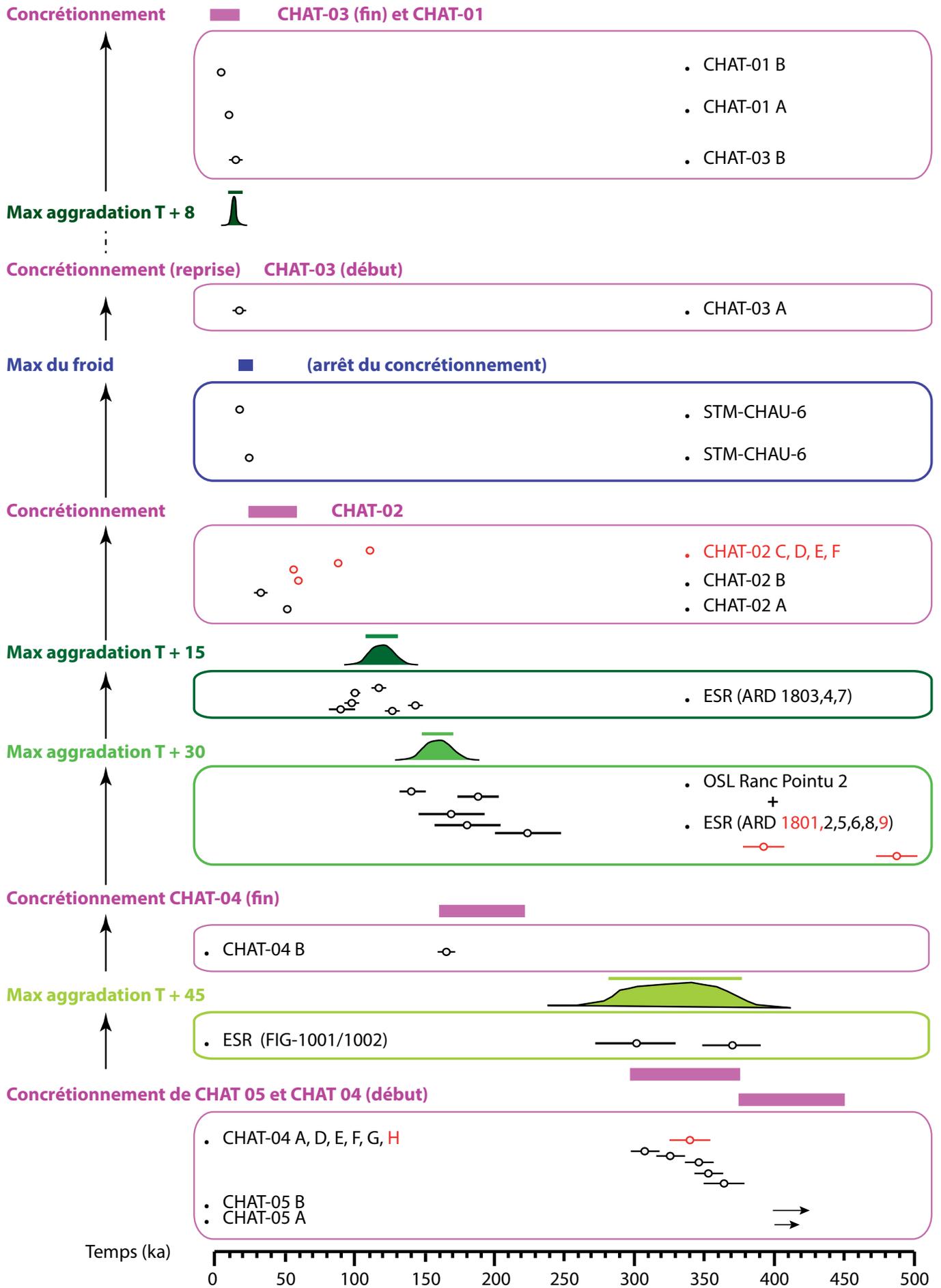
Le *corpus* obtenu de datations se répartit sur une plage temporelle de quasiment 500 000 ans, ce qui représente l'essentiel du Pléistocène moyen et supérieur. Les études menées sur les terrasses alluviales + 8, + 15, + 30 et + 45 m se sont attelées à établir leur chronologie absolue en essayant de se rapprocher des *maximas* d'aggradation de ces niveaux. La bonne cohérence interne entre les datations U/Th et ESR ainsi que la fiabilité du modèle stratigraphique relatif, invitent à discuter ces résultats à l'aune des cycles climatiques glaciaires / interglaciaires du Pléistocène moyen et supérieur.

A) Des niveaux d'aggradation calés sur les cycles de 100 ka.

Sur les quatre niveaux de terrasse étudiées (+ 45, + 30, + 15 et + 8 m), trois d'entre eux se calent aux stades les plus froids des trois dernières phases froides du Pléistocène, respectivement au MIS 2 pour la T + 8 m (15.66 +/- 2.91 ka), MIS 6 pour la T + 30 m (145 +/- 9.2 ka) et MIS 8 pour la T + 45 m (353 +/- 23 ka). Ce constat tend à associer la construction des formations alluviales et leur encaissement en terrasse aux alternances climatiques glaciaire / interglaciaire du Pléistocène moyen/ supérieur (figure 132). Les résultats obtenus sur ces trois niveaux représentent la phase terminale de l'aggradation sédimentaire de la rivière. Les liens entre terrasses alluviales et cycles climatiques sont connus dans la littérature (Bridgland et al., 2009) mais restent peu étudiés pour le sud de la France au Pléistocène. Ceci représente donc la première caractérisation chronologique absolue de l'étagement des terrasses fluviales pléistocènes pour la bordure orientale du Massif Central dépendant du bassin versant rhodanien. La correspondance des *maximas* d'aggradation avec les maximums du froid des phases de glaciation semble robuste : il conforte le modèle déjà posé de dynamique alluviale (dépôt) en période froide. Ces observations peuvent potentiellement rapprocher le système fluvial de l'Ardèche du modèle « A » décrit par Bridgland (2000) qui place les phases d'incision des rivières en période de transition interglaciaire/ glaciaire, et les phases de remplissage en période glaciaire.

Un niveau d'aggradation sort cependant de cette logique cyclique de 100 ka : la terrasse à + 15 m. Cette dernière est datée à 122 +/- 8 ka, ce qui la place hors de la phase glaciaire du MIS 6 mais au début de l'entrée en glaciation du Würm. La contrainte chronologique de cette terrasse est à considérer car elle se distingue chronologiquement et altitudinalement de la terrasse à + 30 m qui est également bien contrainte chronologiquement par l'approche multi-indicateurs. La transition MIS 5e / MIS 5d correspond cependant aux cycles d'obliquité, plus discrets, de 41 ka, qui ont déjà pu être interprétés comme des forçages potentiels des cycles d'aggradation des rivières (Westaway et al., 2006 ; Maddy et al., 2012). À l'échelle du Pléistocène supérieur, quatre cycles de 41 ka sont identifiables : les cycles du MIS 2 et 6 - qui sont confondus avec Figure 131 Modélisation bayésienne des datations effectuées sur les concrétions et les sédiments de rivière avec *Chronomodel*. La grande cohérence stratigraphique et le faible nombre d'outliers (en rouge) reflètent la cohérence du modèle stratigraphique relatif. La modélisation statistique change peu les résultats.

Bayesian modeling on speleothems and alluvial sediments of the Ardèche river. Datings are very coherent with the stratigraphical units, regardless of the bayesian modeling. →



les cycles de 100 ka - et les cycles MIS 4 et MIS5d. L'intervalle temporel séparant les deux phases d'aggradation est d'environ 30-40 ka, ce qui rend possible le calage de la terrasse à + 15 m sur un cycle de 41 ka. On ne connaît pas d'autres témoins à ce jour d'autres cycles de 41 ka à l'échelle du Pléistocène supérieur en Ardèche. Le MIS 4 n'a, par exemple, pas été mis en évidence par une terrasse alluviale (la terrasse à + 8 m date vraisemblablement du MIS 2), alors que ce cycle est majeur à l'échelle des Pyrénées (Delmas et al., 2012) et semble peut-être également impacter l'englacement des Alpes françaises (Montjuvent, 1973 ; 1978 ; Brocard et al., 2003 ; Jaillet et al., 2018). Une des hypothèses avancées pour expliquer cette absence est la suivante : les niveaux d'aggradation sédimentaire correspondant à ces petits cycles de 41 ka sont peut-être détruits lors de phases d'aggradation sédimentaire plus importantes comme par exemple celles correspondant aux cycles de 100 ka. Ces derniers seraient en revanche mieux conservés car ils correspondraient à des cycles climatiques majeurs ayant débouché sur des aggradations conséquentes de la rivière. Les cycles de 100 ka coïncident en effet avec des extrêmes climatiques à l'échelle mondiale (maximums du froid, maximums d'englacement) et sont donc susceptibles d'être mieux représentés dans les structures sédimentaires (Antoine, 1994 ;

Kukla, 2005). Par ailleurs, la fréquence de récurrence des événements (en l'occurrence, maximums du froid) laisse du temps à la rivière pour inciser son talweg rocheux, ce qui place peut-être les dépôts en situation de protection relative face à l'érosion. Dans le cas de l'Ardèche, la structure semi-emboîtée des terrasses alluviales implique des phases d'érosion du talweg rocheux qui s'établissent peut-être lors des transitions interglaciaire/glaciaire (Antoine, 1994), et lors des interglaciaires.

B) Chrono séquence de l'évolution morphologique de l'Ardèche au Pléistocène moyen et supérieur.

Les morphologies étudiées précédemment par emboîtement des formes peuvent désormais être contraintes dans une chronologie absolue. Le scénario d'évolution de l'Ardèche au cours du Pléistocène moyen et supérieur proposé ici, constitue la synthèse de l'ensemble des observations menées au cours de ce travail. Dans ce modèle d'évolution, les côtes altitudinales de référence sont données soit en valeur relative par rapport à l'étiage actuel, soit en altitude NGF au niveau du Pont d'Arc (figure 133). Sur les deux figures précédentes, les informations ont été présentées suivant une logique stratigraphique des événements avec une lecture du temps du

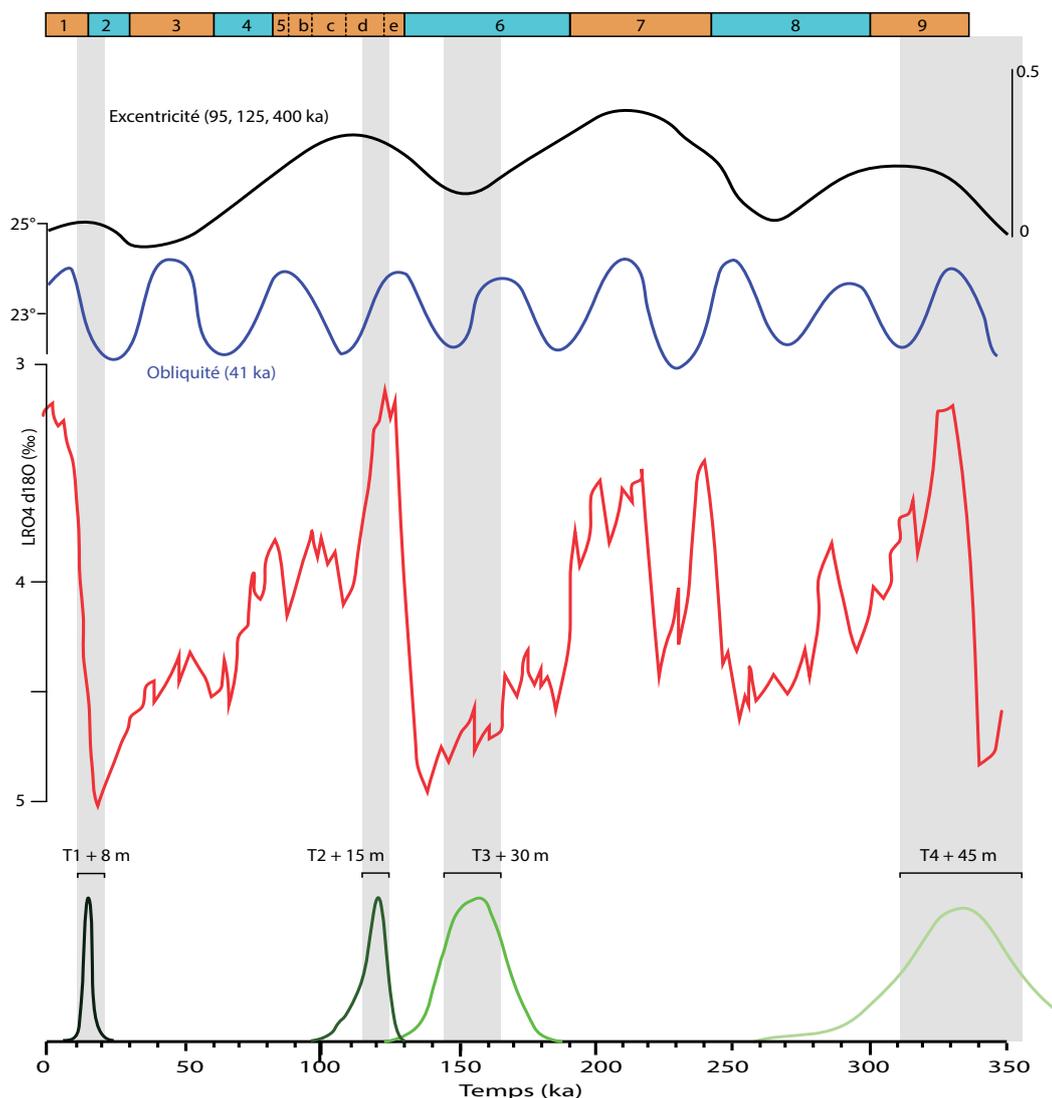


Figure 132 : Chronologie absolue des terrasses alluviales de l'Ardèche mise en relation avec les cycles climatiques et orbitaux du Pléistocène moyen et supérieur (Milankovitch, 1941 ; Lisiecki & Raymo, 2005). La correspondance entre terrasses alluviales et cycles de 100 ka peut être établie pour les niveaux + 8, + 30, et + 45 m. En revanche, la terrasse à + 15 m semble plutôt liée à un cycle de 41 ka. *Absolute chronology provides links between alluvial banks formation and Pleistocene 100 ka obliquity cycles for the + 8, + 30, and + 45 m levels. The + 15 m level may be correlated with a 41 kyr cycle.*

récent vers le plus ancien. Les 3 dernières figures de ce chapitre correspondent aux interprétations des résultats sur l'étagement de la vallée de l'Ardèche et se lisent avec une progression temporelle de gauche à droite (déroulement chronologique), et du haut vers le bas (incision de la vallée).

Avant de décrire ces dix phases, rappelons que la concrétion CHAT-05 témoigne d'une phase de concrétionnement au-delà de 400 ka. Nous ne discutons pas ici de ses implications, mais sa croissance sur les parois calcaires témoigne de la préexistence du drain endokarstique à 100 m NGF (+ 30 m) et milite donc pour une certaine ancienneté des formes paragenétiques. Ce constat n'est pas représenté dans notre modèle mais montre un « stade zéro » de nos connaissances, avec des conduits endokarstiques déjà formés à l'échelle du Pléistocène moyen et supérieur.

PHASE 1 : MIS 11 ou plus ancien : point de départ.

La concrétion CHAT-04 scelle un niveau argileux à sa base. Ce dernier préexiste à la pousse de la concrétion avant 364 +/- 15 ka. La présence des argiles témoigne peut-être des fluctuations de la rivière mais nous ne possédons pas d'information extérieure sur les variations de la rivière pour cette période. Prenons donc cette information comme un point de départ dans le scénario de reconstitution de l'évolution de la rivière. À ce stade, le niveau sédimentaire de la rivière et l'altitude du fond rocheux ne nous sont pas connus.

PHASE 2 : MIS 11-10, Incision de la rivière.

La croissance du spéléothème CHAT-04 n'a pu débuter que suite à l'abaissement du niveau de la rivière en dessous de l'altitude de la concrétion et au fonctionnement vadose de la cavité au moins sur le lieu de la concrétion. Cette incision dont nous ne connaissons pas l'importance en termes de profondeur, serait l'expression d'une phase d'amélioration climatique, elle-même favorable à la croissance des concrétions. Nous attribuons cette phase au MIS 9.

PHASE 3 : MIS 10 : d'aggradation de la terrasse + 45 m.

L'entrée de la péjoration climatique du MIS 8 a pu être à l'origine d'une phase d'aggradation alluviale qui exhausse le lit de l'Ardèche jusqu'à atteindre l'altitude de 115 m NGF (+ 45 m/talweg) au niveau de la Combe d'Arc en fin de glaciation. Cette phase d'aggradation pourrait être à l'origine du dernier hiatus argileux au sein de la concrétion CHAT-04. Elle se traduit également par l'invasion de galets de l'Ardèche dans les vides souterrains préexistants vers + 45 m. Les exemples de l'aven Spectaclan, de la grotte du Figuier et de la Beaume des Cloches illustrent particulièrement ce phénomène. La

pénétration des galets dans les conduits souterrains d'un même niveau s'effectue au moment maximal de l'aggradation d'une rivière (Harmand et al., 2017). On suppose en effet que les conduits sont déjà préalablement vidés pour que du matériel puisse s'y déposer. Le phénomène de soutirage lié à l'abaissement du niveau de base se propage plus rapidement dans les conduits karstiques que dans la rivière. Autrement dit, les galets se déposent dans l'endokarst lorsque la rivière est déjà en phase d'érosion plus en aval. La datation à 353 +/- 23 ka représente donc le maximum d'aggradation de la T + 45 à l'aval des gorges de l'Ardèche.

PHASE 4 : MIS 9-7 Incision de la rivière jusqu'à la côte 75 m.

Le réchauffement engendré par la transition interglaciaire - glaciaire du MIS 10-9 permet la reprise de la pousse de la concrétion CHAT-04 ; l'incision de la terrasse à + 45 m peut être également rapportée à cette phase qui a pu se poursuivre jusqu'au *bedrock*. Les banquettes rocheuses à + 5 m courant le long des gorges de l'Ardèche pourraient être les témoins de cet ancien plancher rocheux aujourd'hui défoncé par l'érosion.

PHASE 5 : MIS 6, Etablissement de la terrasse à + 30 m.

L'entrée en glaciation au MIS 6 a pu générer une nouvelle phase d'aggradation sédimentaire du lit de l'Ardèche qui finit par atteindre 100 m NGF au droit du Pont d'Arc. Ce niveau à + 30 m représente un épisode majeur à l'échelle de la vallée de l'Ardèche, comme le montrent les témoins d'aggradation visibles autour de Montingrand et le long de la route de Pradon. Vers le cirque de Chauzon, l'aggradation de l'Ardèche a généré un recoupement temporaire par avulsion. L'Ardèche délaisse alors son cours topographique principal (Cirque de Chauzon, confluence Ardèche - Ligne) pour emprunter un chemin plus direct vers la plaine de Ruoms. Le maximum d'aggradation de ce niveau a été daté à 203 +/- 13 ka mais est contraint par la fin de la croissance de CHAT-04 à 162 +/- 5 ka, ainsi que par datation directe dans la grotte du Ranc Pointu 2 à 145 +/- 9.2 ka, ce qui correspond au maximum du froid du MIS6, qui est également un *maxima* glaciaire.

PHASE 6 : MIS5e : Ré-encaissement de la rivière et incision du talweg rocheux (côte + 2 m).

La transition interglaciaire – glaciaire Eemien MIS 5e engendre l'érosion de la terrasse du MIS 6. Celle-ci est vraisemblablement à l'origine de l'incision du *bedrock* et des banquettes rocheuses visibles tout au long des gorges ; on les retrouve également sous le remplissage sédimentaire du méandre de la Combe d'Arc. En comparant avec les relevés topographiques issus du LiDAR, de la bathymétrie et de la géophysique, nous estimons l'importance de cette érosion comme ayant atteint une cote légèrement supérieure à l'actuelle (environ 70 m NGF).

PHASE 7 : (122 +/- 8 ka) : Nouvelle phase

d'aggradation : le niveau à + 15 m.

Suite à la phase érosive de l'interglaciaire Eemien MIS 5e, l'entrée en glaciation coïncide avec une nouvelle phase d'aggradation jusqu'à la côte de 85m NGF (+ 15 m) au droit du Pont d'Arc. C'est ce niveau que l'on retrouve dans la Combe d'Arc, enfoui sous des sédiments argilo-sableux plus fins, et qui a été prospecté par tomographie électrique (cf. *infra*, chapitre 5). Cette phase d'aggradation est encore bien conservée à l'échelle du bassin de l'Ardèche et aurait atteint son maximum autour de 122 +/- 8 ka. Elle se distingue dans le paysage par de grands replats sédimentaires en place dans les bassins d'Aubenas, de Ruoms et de Vallon-Pont d'Arc.

PHASE 8 : MIS 3, Erosion et déblaiement du niveau à + 15 m.

L'aggradation à + 15 m est suivie d'une phase d'érosion généralisée de la rivière qui plonge plus bas que 81.5 m NGF au droit du Pont d'Arc. Nous ne possédons pas d'information sur le niveau fluvial de l'Ardèche au cours du MIS 4, mais une phase d'incision est confirmée au moins entre 50 et 30 ka par la pousse de la base de la concrétion CHAT-02 à 81.5 m NGF, soit environ 3 ou 4 mètres plus bas que le niveau à + 15 m.

Sur la période 49.9 +/- 0.72 ka > < 30.46 +/- 2.69 ka, la concrétion CHAT-02 a enregistré plusieurs fois des taux d'éléments que nous avons attribués à des apports détritiques par la rivière (cf. *infra*, chapitre 6). Cet enregistrement témoigne peut-être des ré-invasions occasionnelles de la grotte des Châtaigniers lors des crues, peut-être lors de phases d'amélioration climatique.

PHASE 9 : MIS 2: Aggradation de la terrasse à + 8m.

La pousse de la concrétion CHAT-03 quasiment à la fin de l'aggradation argileuse à +8 m de la grotte des Châtaigniers permet de dater le maximum d'aggradation d'une nouvelle phase de sédimentation de la rivière, qui se termine donc potentiellement entre 15.66 +/- 2.91 et 13.17 +/- 1.12 ka. Cette dernière phase d'aggradation enregistrée par les spéléothèmes de la grotte des Châtaigniers correspond au dernier maximum glaciaire mondial (Global LGM) rapporté au MIS 2.

PHASE 10 : MIS 1 : (15.66 +/- 2.91 ka > < Actuel), Erosion jusqu'à la côte 0 m NGF, situation actuelle.

L'Ardèche actuelle correspond à la dernière phase d'évolution de la rivière dans le cadre de ce modèle d'évolution. La rivière incise aujourd'hui son lit rocheux à 67 m NGF et montre un fonctionnement en *step-pool system* sur la totalité de son talweg, ce qui est caractéristique des rivières en phase d'incision (Maxwell et Papanicolaou, 2001).

4.2 Datation des recoupements des méandres de l'Ardèche.

Ces contraintes chronologiques des dynamiques fluviales de l'Ardèche permettent de rediscuter des recoupements des méandres, notamment ceux de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc où les dépôts sont bien conservés, et évidemment celui de la Combe d'Arc.

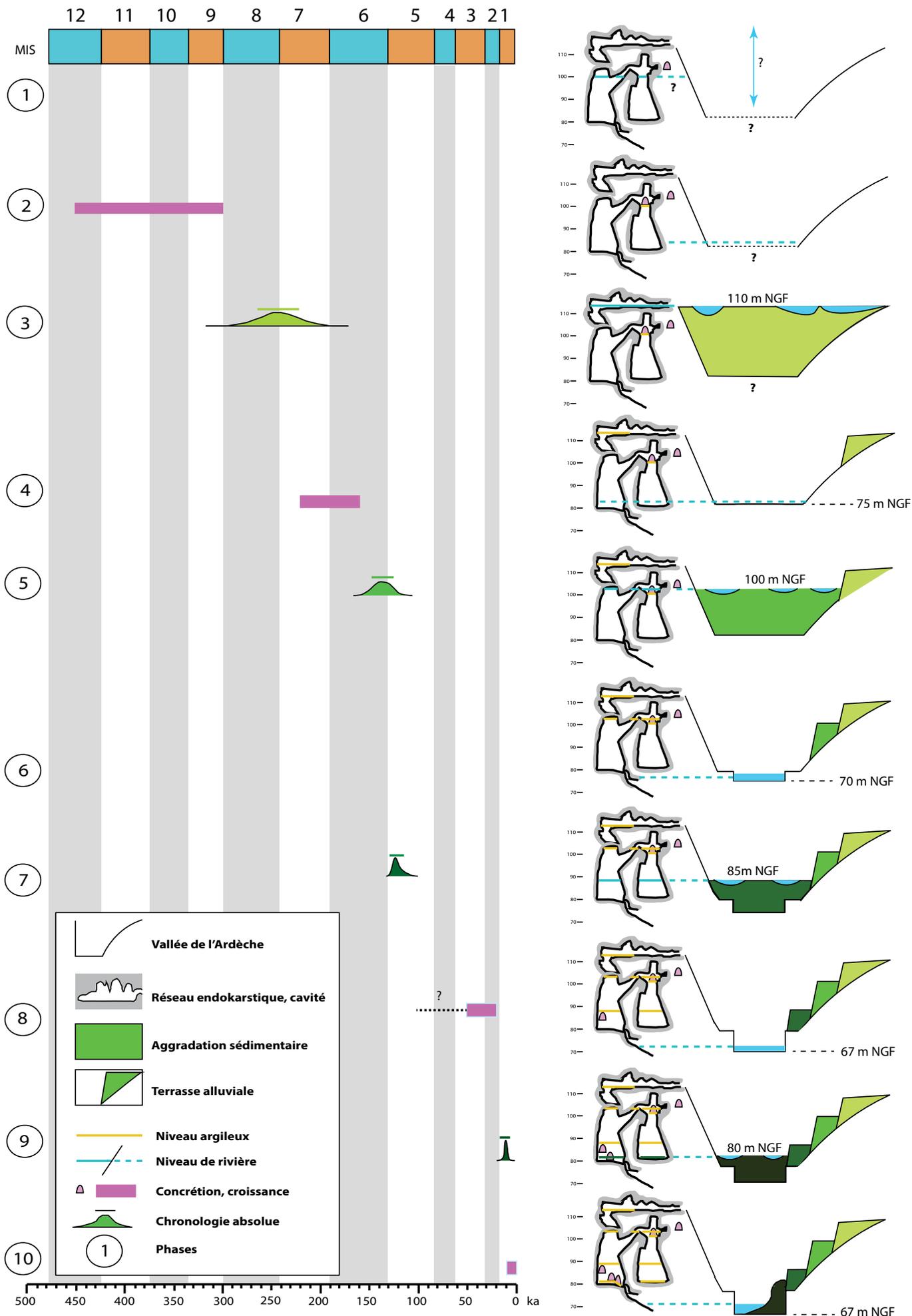
A) Le recoupement du méandre de Montingrand.

Deux niveaux de galets appartenant aux cortèges cévenols observés autour de la butte de Montingrand sont particulièrement intéressants : les niveaux à +30 m et à + 45 m (localement à respectivement 116 m et 101 m NGF). Le plus haut niveau atteste du passage de l'Ardèche par la conservation des galets en forme de croissant au nord de la butte de Montingrand. Considérant les nouvelles contraintes chronologiques, le méandre de Montingrand était donc actif à 353 +/- 23 ka.

Le niveau des galets ardéchois à + 30 m a été retrouvé enfoui sous environ 1,8 m de colluvions lors de fouilles d'archéologie préventive ; il témoigne également du passage de la rivière au nord de Montingrand

Figure 133 : Synthèse de l'évolution morphologique de l'Ardèche au cours du Pléistocène moyen et supérieur. Les cotes altitudinales sont prises au niveau du Pont d'Arc. Les réseaux karstiques représentés sont ceux de la grotte des Châtaigniers ainsi que de l'Aven Spectaclan pour le drain à + 45 m. Les temps du concrétionnement sont représentés en hypothèse maximale (lignes roses) tandis que les lignes vertes ne représentent que les intervalles temporels pouvant correspondre aux maximums d'aggradation et non le temps d'aggradation en lui-même. L'établissement des remblaiements sédimentaires de la rivière prend vraisemblablement beaucoup plus de temps et pourrait commencer au cours de périodes où les concrétions peuvent également croître.

Morphological evolution synthesis of the Ardèche river during the middle and upper Pleistocene period. The Pont d'Arc location serves as the altitudinal reference. Endokarstic synthesis is made with both the Châtaigniers cave and the Spectaclan cave. Calcite growth is represented with the pink lines as are considered as the maximal hypothesis. On the opposite, sedimentation period representation (green lines) only highlight the maximum of the fluvial infillings because we lack the data of river sedimentation below the speleothems. It should be made clear that river sedimentation takes obviously much more time than represented here, and probably also during the end of warm periods when speleothems are still allowed to grow.



(Saison et al., 2017). Cependant ce niveau possède d'autres caractéristiques morphologiques : c'est également le niveau qui se loge dans l'arc de cercle formé dans les versants de part et d'autre de la confluence de l'Ibie (voir *infra*, chapitre 3, figure 74, phase 4). Cette morphologie témoigne également d'une courbure de la rivière pour le niveau à + 30 m, mais pour un tracé de rivière qui nécessiterait de traverser le paléo-méandre de Montingrand (cf. *infra*, chapitre 3). On peut émettre l'hypothèse que l'aggradation sédimentaire importante du niveau à + 30 m engendre un phénomène d'avulsion au niveau de la partie la plus étroite du pédoncule du paléo-méandre de Montingrand. La rivière passe alors par ce chemin plus direct et vient buter sur les versants topographiques de ce qui est aujourd'hui la confluence Ibie-Ardèche. Cette hypothèse caractériserait le niveau de galets enfouis au nord de Montingrand comme une terrasse d'abandon dont la phase d'aggradation terminale estimée par ESR à 154 +/- 28 ka marquerait le début du recouplement du méandre de Montingrand.

B) Datation du stade final du recouplement de la Combe d'Arc.

L'analyse géomorphologique des reliefs extérieurs du Pont d'Arc et celle des morphologies de la grotte des Châtaigniers ont permis de mettre en évidence le recouplement relativement rapide, avec un potentiel d'ouverture maximal centré autour du niveau de la terrasse à + 15 m (Génuite et al., 2019). Le niveau de galets enfouis à 85 m NGF dans la Combe d'Arc correspond à la terrasse à + 15 m ; il a également pu être identifié tout au long du méandre abandonné par la tomographie électrique, et validé par la présence d'affleurements (cf. chapitre 5). Ce niveau de galets à + 15 m témoigne de fait d'écoulements compétents et pérennes. Il représente donc une des dernières phases, sinon la dernière d'écoulement pérenne de la rivière dans le méandre, ce qui en ferait une terrasse d'abandon. Après la phase d'aggradation de la rivière jusqu'à la côte de 85 m NGF, la ré-incision du cours d'eau engage un nouveau parcours : le cours de l'Ardèche pérenne finit par dégager un passage suffisant au niveau de l'arche pour couler définitivement sous cette dernière, marquant ainsi le stade final du recouplement du méandre, tel qu'on peut l'observer aujourd'hui. La figure 134 résume les différentes étapes d'évolution de la Combe d'Arc : lors de la phase d'aggradation finale du niveau alluvial + 30 m, la rivière coule à une altitude supérieure au sommet actuel de la voûte de l'arche. Le Pont d'Arc n'existe donc pas dans le paysage à 168 +/- 25 ka BP. L'érosion régressive agissant sur la terrasse à + 30 m passe par le méandre ce qui sous-tend que l'arche n'existe pas ou du moins pas dans une physionomie permettant de drainer l'ensemble de la rivière. Si l'amorce de l'arche existe, elle se réduit au mieux à une ouverture de quelques mètres, similaire aux conduits souterrains présents dans le pédoncule. Il est cependant vraisemblable que l'érosion incisant la terrasse + 30 m accélère le processus de sape de la rivière et agrandisse l'ouverture, déjà préparée par la

préexistence des conduits endokarstiques (Génuite et al., 2019).

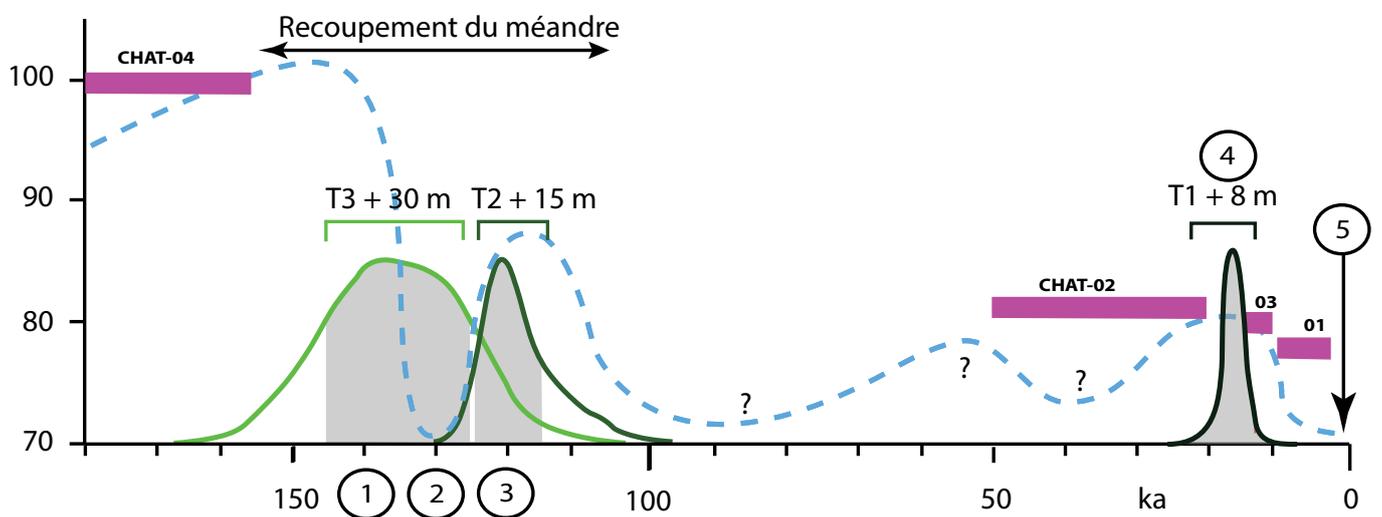
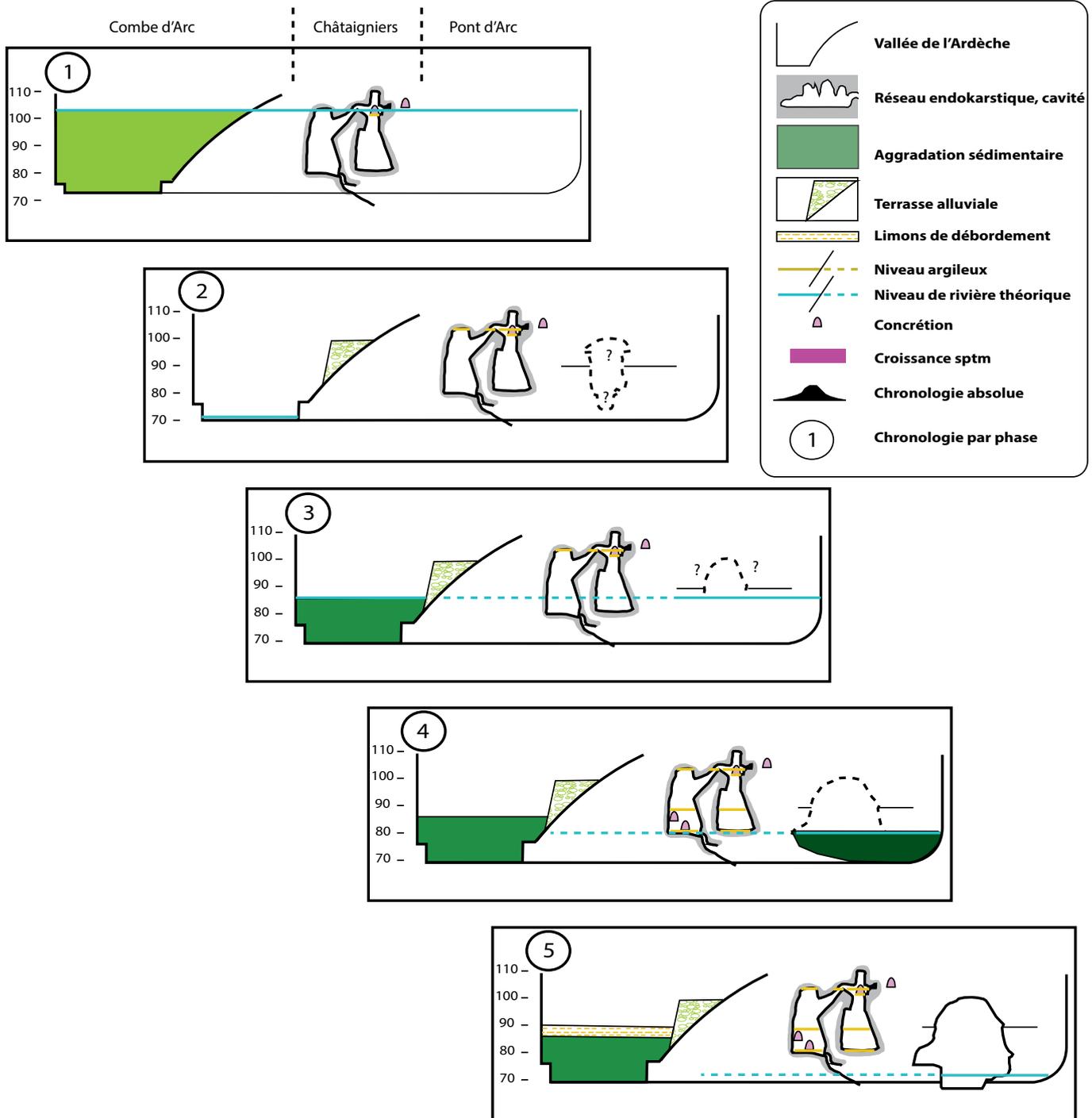
Il est très probable que le recouplement commence à se mettre en place lors de cette phase d'incision, qui descend potentiellement jusqu'au bedrock. La nouvelle phase d'aggradation qui suit remonte à + 15 m (85 m NGF) et continue d'élargir l'ouverture, jusqu'à générer un espace hydrologiquement suffisant pour la rivière. La datation ESR du niveau maximal d'aggradation à + 15 m avec deux prélèvements au niveau du toit des galets de la Combe d'Arc livre un âge pondéré de 128 +/- 5 ka. L'incision de ce niveau qui suit immédiatement la fin de l'aggradation marque le stade final du recouplement du méandre de la Combe d'Arc et la genèse de l'arche du Pont d'Arc. Après 128 ka, durant la phase d'incision, le cours pérenne de l'Ardèche passe sous l'arche.

L'arche présentait néanmoins alors des morphologies différentes de celles d'aujourd'hui. L'érosion a poursuivi son travail depuis cette ouverture ; la dissolution estimée à environ 10 mm/ka (Stone et al., 1994 ; Inkpen et al., 2012) combinée à l'érosion mécanique ainsi qu'aux processus de détente mécanique (effondrement) ont contribué à l'élargissement et à l'agrandissement de l'arche.

Les contraintes chronologiques permettent de discuter du temps de creusement de l'arche jusqu'à offrir un passage pérenne pour l'Ardèche. Nous faisons ici l'hypothèse que la cavité qui précède l'arche commence son élargissement par l'action de la rivière après 145-200 ka, et que le stade de recouplement pérenne est atteint à 128 +/- 5 ka. La différence entre deux âges nous donne une durée d'environ 30 à 40 ka. Cette durée relativement courte s'explique vraisemblablement par la présence des conduits endokarstiques qui ont facilité et accéléré le recouplement (Génuite et al., 2019).

Figure 134 : Synthèse chronologique des étapes de l'ouverture de l'arche et du recouplement du méandre de la Combe d'Arc. Le recouplement se produit sur une temporalité relativement courte. La courbe d'évolution de l'Ardèche est présentée ici à titre théorique car nous n'avons pas connaissance de son évolution précise entre la T+15 m et la T+8m. Néanmoins, sur la période 50 – 30 ka BP, les flux détritiques enregistrés dans la concrétion CHAT-02 permettent de penser que le niveau de l'Ardèche, bien qu'en dessous de 81.5 m NGF, devait être assez proche.

Chronological synthesis of the Combe d'Arc shortcut. The Pont d'Arc was shaped relatively fast. The river evolution curve (dashed blue line) should be considered with caution between the + 15 m and + 8 m sediment levels because we lack data of that period. However, detrital fluxes registered in the CHAT-02 speleothem at 81.5 m A.S.L allows to say that water level was just a bit lower than the speleothem between 50 and 30 kyrs.



C) Implication paléogéographique

et archéologique du Pont d'Arc.

Au-delà des implications de ce travail sur l'histoire de l'évolution des paléo-reliefs associés aux gorges de l'Ardèche, la datation du recoupement final du méandre de la Combe d'Arc à 128 +/- 5 ka a des implications sur les travaux associant les occupations humaines de la grotte Chauvet au relief et aux paysages extérieurs.

Les phases d'occupation actuellement connues de la grotte Chauvet remontent à plus de 36000 ans cal. BP (Quilès et al., 2016). **L'âge du stade final du recoupement plus ancien d'environ 90 000 ans permet de confirmer que les communautés humaines qui fréquentaient l'environnement de la grotte ont bien vu l'arche** (figure 135), sans doute avec une morphologie un peu moins érodée, mais bien réelle et proche de l'actuelle. Le niveau de

la rivière contemporain des occupations de Chauvet coulait en dessous de 81.5 m NGF (concrétion CHAT-02). Ce niveau reste relativement proche du toit des galets de la Combe d'Arc, il est donc vraisemblable que l'Ardèche continuait à emprunter épisodiquement le méandre lors d'épisodes de crue suffisamment intenses, comme ce fut le cas une dernière fois en 1890. La présence du Pont d'Arc dans le paysage de Chauvet pousse maintenant vers des questionnements centrés sur la grotte et son art pariétal. Il n'existe pas de représentation graphique des paysages par les Hommes du Paléolithique supérieur, dans aucune grotte. Chauvet ne fait pas exception à ce constat, mais cette cavité présente l'intérêt d'avoir fait l'objet de plusieurs théories, notamment avec l'hypothèse, de représentation du volcanisme du bas Vivarais évoquée par Nomade et al. (2016), mais également pour le Pont d'Arc lui-même avec la théorie d'André et Chabaud (2000) sur le lien entre la morphologie d'arche du Pont d'Arc

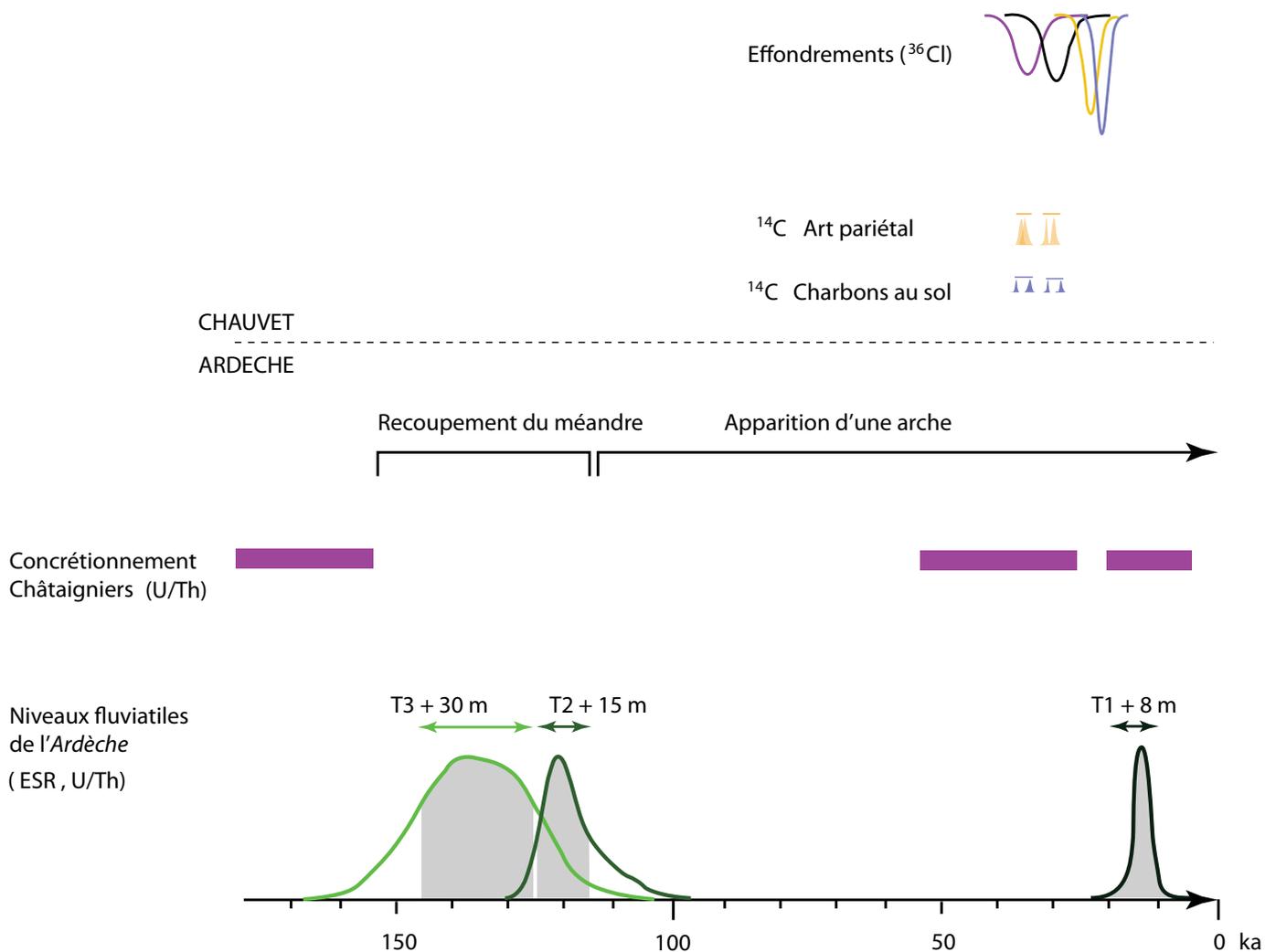


Figure 135 : Comparaison des dates du recoupement par rapport aux périodes d'occupation connues de la grotte Chauvet. Le recoupement est clairement antérieur. Contraintes de l'effondrement de Chauvet : Sadier et al., 2012 ; Datations ¹⁴C Chauvet : Valladas et al. 2005 ; Cuzange et al. 2007 ; Quilès et al., 2012 ; 2016. Concrétionnement dans Chauvet : Genty et al., 2004. Dans les cavités en lien avec la rivière : ce travail. Datation OSL : Moncel et al., 2014 ; Datations ESR : ce travail.

Dating comparison between Chauvet cave occupation phases and the meander shortcut process. Chauvet cave 36Cl constraints : Sadier et al., 2012 ; Chauvet 14C datings : Valladas et al., 2005 ; Cuzange et al., 2007 ; Quilès et al., 2012 ; 2016. Near river calcite growth and ESR dating : this work. OSL dating : Moncel et al., 2014

et l'arche ventrale des mammouths de Chauvet, également représentés avec la forme d'une arche. Il nous est impossible d'accéder aux pensées des Préhistoriques, à leurs émotions, si ce n'est par l'héritage pariétal qu'ils nous ont légué et qui nous fait également ressentir à nous, êtres humains du 21^{ème} siècle, des émotions. Le Pont d'Arc en lui-même pourrait-il donc être, comme se questionnent d'ailleurs André et Chabaud (2000), le « plus grand mammouth totémique de la Préhistoire » ? Nous ne pouvons répondre à cette question.

Étant donné les nombreuses traces d'occupation relevées dans le Cirque d'Estre, non seulement dans Chauvet mais également dans la grotte du Planchard, de la Vacheresse, ou encore la Bergerie du Charmasson, la présence du Pont d'Arc nous pousse ici à aborder la notion de *complexe de sites* (Gunn, 1997) qui amène à prendre en compte non pas le site ou la grotte ornée, mais un ensemble de sites faisant partie d'un même espace, plus vaste. Ce complexe de sites est évident à l'échelle du Cirque d'Estre (Monney, 2012), et la présence visible de l'arche du Pont d'Arc depuis environ 116 ka renforce encore son caractère particulier.

Ces résultats amènent à reconsidérer la notion de paysage en archéologie, plébiscitée par les théories de la *Landscape Archeology*, l'archéologie des paysages (Wagstaff, 1987 ; David et Thomas, 2016). La présence synchrone du Pont d'arc et des occupations du Paléolithique supérieur, adossée à la notion de complexe de sites, justifient ici pleinement l'intégration de l'étude de l'environnement extérieur des sites du Paléolithique supérieur européen dans les chantiers archéologiques. La présence du Pont d'Arc au moment des occupations de la grotte Chauvet confirme, enfin, que le caractère exceptionnel et unique du Cirque d'Estre, tant par la présence de la grotte Chauvet que par ses caractéristiques paysagères, n'est pas seulement basé sur notre perception actuelle, mais avait également une valeur au Paléolithique supérieur. Au moment des fréquentations humaines, le complexe du cirque d'Estre était déjà rendu remarquable par la présence du Pont d'Arc. L'inscription de la grotte Chauvet dans cette facture paysagère il y a 36000 ans affirme sa singularité pour le Paléolithique supérieur.

5. Conclusion.

La datation des terrasses alluviales a permis de mettre en évidence leur lien avec les cycles climatiques pléistocènes de 100 ka pour la majorité d'entre elles. Un niveau de remblaiement fluvial semble régulièrement pouvoir être associé avec la phase terminale d'une glaciation du Pléistocène moyen et supérieur.

Ces niveaux fluviaux, plus que des composantes paysagères, peuvent également servir de niveaux chronologiques repères pour l'archéologie du Paléolithique moyen et supérieur sur l'ensemble du bassin versant de l'Ardèche. Leur datation et leur reconstitution topographique formalisent en effet des terminaux *ante quem* et *post quem* pour les grottes et sites d'occupation paléolithique des abords de la rivière, si l'on raisonne sur une échelle altitudinale. Les recherches en archéologie dans les gorges de l'Ardèche pourraient maintenant être confrontées à ces nouvelles contraintes chronologiques et topographiques.

Enfin, la datation du recoupement de la Combe d'Arc et de la formation du Pont d'Arc bien avant les occupations actuellement connues de la grotte Chauvet, confirme que l'arche faisait partie du paysage des Hommes du Paléolithique supérieur et permet de reconsidérer les occupations de la cavité non plus à l'échelle de la grotte, mais dans le cadre du complexe de sites de l'ensemble du Cirque d'Estre et de la Combe d'Arc.

La datation du recoupement de la Combe d'Arc prouve l'existence d'un espace déjà remarquable pendant l'occupation des hommes de Chauvet, pousse à s'interroger sur l'importance du paysage dans la vie des Hommes du Paléolithique supérieur.

Photographies de terrain



Photo 21 : Tranchée artificielle à l'amont de la Combe d'Arc réalisée lors de l'Opération Grand Site. Des galets étaient visibles à la base de la tranchée, environ 5 m sous le niveau de la route. Crédits : K. Génuite, 2018.

Photo 22 : Tranchée naturelle formée lors des fortes pluies de l'été 2018 dans la Combe d'Arc. Les galets affleurent également à la base de la tranchée, environ 4 m sous le niveau du sol. L'érosion a également partiellement affectée certaines infrastructures (enrochements) mises en place pour l'Opération Grand Site.

Crédits : K. Génuite, 2018.





Photo 23 : sédiments séparés en aliquotes avant d'être analysés au spectromètre ESR.

Crédits : K. Génuite, Institut de Paléontologie Humaine, 2019.



Photo 24 : Spectromètre de terrain permettant d'évaluer la dose d'irradiation in situ des sédiments, un paramètre majeur dans le calcul de l'âge d'enfouissement par spectrométrie ESR. Crédits: K. Génuite, 2018.



Photo 26 : Cavité de mesure du spectromètre ESR.

Les aliquotes sont placées à l'intérieur de la cavité, l'azote liquide refroidit l'échantillon et permet la mesure.

Crédits : K. Génuite, 2018.

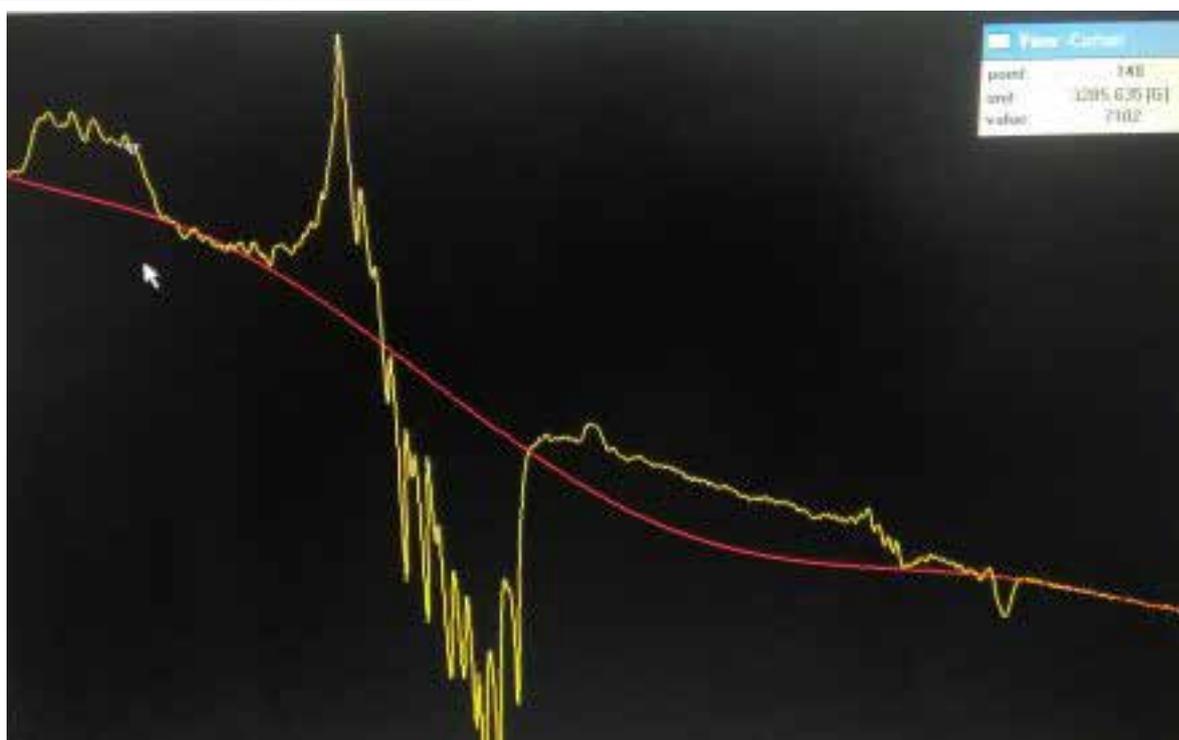


Photo 27 : Spectre ESR avant normalisation.

Crédits : K. Génuite, 2018.

CHAPITRE 8

ETUDE MORPHOMETRIQUE ET VOLUMETRIQUE DES NIVEAUX A + 15 M ET + 30 M.

Dans les précédents chapitres, nous nous sommes attachés à confronter les apports de l'approche spatiale et de l'approche chronologique sur des objets géomorphologiques majeurs dans la reconstitution paléogéographique de la Combe d'Arc et du Pont d'Arc. Le présent chapitre synthétise l'ensemble des données acquises en se centrant sur l'évolution morphogénique des gorges de l'Ardèche. Une attention sera également portée aux apports des données quantitatives pour une meilleure connaissance de cette région au cours du Quaternaire. Cette synthèse repose à la fois sur les résultats des modèles topographiques reconstitués en 3D des paléo-reliefs, et sur leur analyse avec les modèles numériques de terrain raster à l'échelle du bassin versant. L'objectif est ici de se replacer dans une perspective plus globale et de discuter les dynamiques d'érosion à l'échelle régionale.

L'étude géomorphologique des terrasses alluviales de la basse Ardèche (plaine de Vallon-Pont-d'Arc et gorges) a mis en lumière l'importance des dynamiques fluviales dans les variations des paléogéographies de la vallée et plus particulièrement du fond de la vallée. Les anciens niveaux successifs de rivière ont aujourd'hui quasiment disparu, démantelés par l'érosion régressive. Quelques rares anciens niveaux d'aggradation, replats locaux, ou affleurements épars rendent compte des dynamiques morpho-fluviales passées. La restitution visuelle des anciennes topographies fluviales (de la terrasse + 45 m au talweg actuel) permet de mieux appréhender les dynamiques morphogéniques de la rivière au cours du Pléistocène moyen et supérieur et, par ailleurs, de réinterroger les modalités d'érosion et de remplissage alluvial, notamment au cours du Pléistocène supérieur. En d'autres termes, comment s'est organisée la dynamique sédimentaire de la rivière au cours du dernier cycle glaciaire et comment quantifier l'érosion à l'échelle du bassin versant ? Quels sont les forçages à l'œuvre dans le bassin versant de l'Ardèche ?

Ce chapitre, d'approche très géométrique, présente les analyses diachroniques et les calculs de volume conduits sur les reconstitutions des paléogéographies fluviales. Ces reconstitutions des paléo-morphologies visent à estimer l'évolution du relief et à la quantifier.

Après une introduction méthodologique, les calculs sont menés dans la Combe d'Arc, sur le dépôt fluvial ainsi que sur les éboulis et les escarpements rocheux afin de proposer des taux de recul des parois. A plus large échelle (Plaine de Vallon Pont d'Arc puis bassin versant de l'Ardèche), nous avons mené un travail de quantification des stocks sédimentaires fluviales correspondant aux anciens niveaux à + 15 m et + 30 m qui permet de réfléchir aux processus mis en œuvre lors des phénomènes d'aggradation et d'érosion du cours d'eau durant le Pléistocène supérieur. L'étude de la topographie à l'échelle du bassin versant renseigne également sur les dynamiques observées dans la rivière. La caractérisation de ses morphologies sous forme d'indices topographiques est utilisée ici pour mettre en évidence la prépondérance du haut bassin versant dans le contrôle de la dynamique sédimentaire de la rivière.

1. Calcul des volumes disparus par analyse diachronique.

1.1 Utiliser les reconstitutions des paléotopographies.

L'étude de l'érosion passée demeure complexe car elle représente ce qui, par essence, disparaît. Le modèle 3D haute- résolution ayant été le support de reconstitution des formes fluviales plus anciennes (cf. chapitres 3 et 7), il permet de discuter des dynamiques d'érosion sur une temporalité qui est ici celle du Pléistocène supérieur. Les niveaux à + 15 m et à + 30 m reconstitués par interpolation dans le modèle 3D des gorges de l'Ardèche et de la plaine de Vallon Pont d'Arc avaient un objectif visuel (prise en considération de l'importance de la rivière dans le paysage pléistocène), et chrono-stratigraphique (modèle chronologique relatif), mais il reste possible de les exploiter dans une approche quantitative. Pour cela, les calculs de volume ont été réalisés sur les reconstitutions des paléo-niveaux de la rivière dont les mailles ont été converties en MNT raster à 25x25 m.

A) Les calculs raster.

A l'échelle d'un bassin versant, la topographie d'une rivière présente l'avantage d'être assimilable à un objet 2.5D raster. Paradoxalement, ce n'est pas le cas pour l'Ardèche au niveau du recoupement du Pont d'Arc et pour les circulations endokarstiques. Ces deux derniers environnements ne sont donc pas pris en compte dans ce chapitre, car ils peuvent être considérés comme négligeables à l'échelle d'analyse du bassin versant de l'Ardèche. La construction des modèles paléogéographiques à + 15m et + 30 m a nécessité une conversion des modèles 3D des niveaux fluviaux et du relief en MNT rasters unifiés comprenant la topographie des versants prolongée dans la plaine par la topographie des paléo-niveaux fluviaux.

La figure 136 montre comment des modèles 3D (topographie et niveaux +15m/+30m) ont été reconvertis en nuage de points afin d'être rasterisés selon une maille régulière et sans trous. Cette méthode se base sur la fusion de deux nuages de points aux morphologies différentes (topographie actuelle et niveau interpolé). Ces deux nuages ainsi rassemblés ont ensuite été rasterisés en Z par le haut (méthode « *maximum height cells* » sur *CloudCompare*), à un pas d'échantillonnage correspondant à la densité d'information du raster original du bassin versant de l'Ardèche (25 m), pour obtenir un MNT raster continu et sans trous comprenant le MNT original et la surface interpolée + 15 m ou + 30 m. Le choix du pas d'échantillonnage de 25 m a pour objectif de rester fidèle à la résolution originale du modèle à l'échelle du bassin versant (MNT25 m de l'IGN). Le protocole a été conduit sous 2 logiciels : *3DReshaper* pour le ré-échantillonnage des modèles TIN en nuages de points et *Cloud Compare* (Girardeau, 2018) pour l'assemblage des nuages. Dans le cas de l'étude de la Combe d'Arc seule (présentée ci-après), la rasterisation a été effectuée avec un pas d'échantillonnage de 1x1 m.

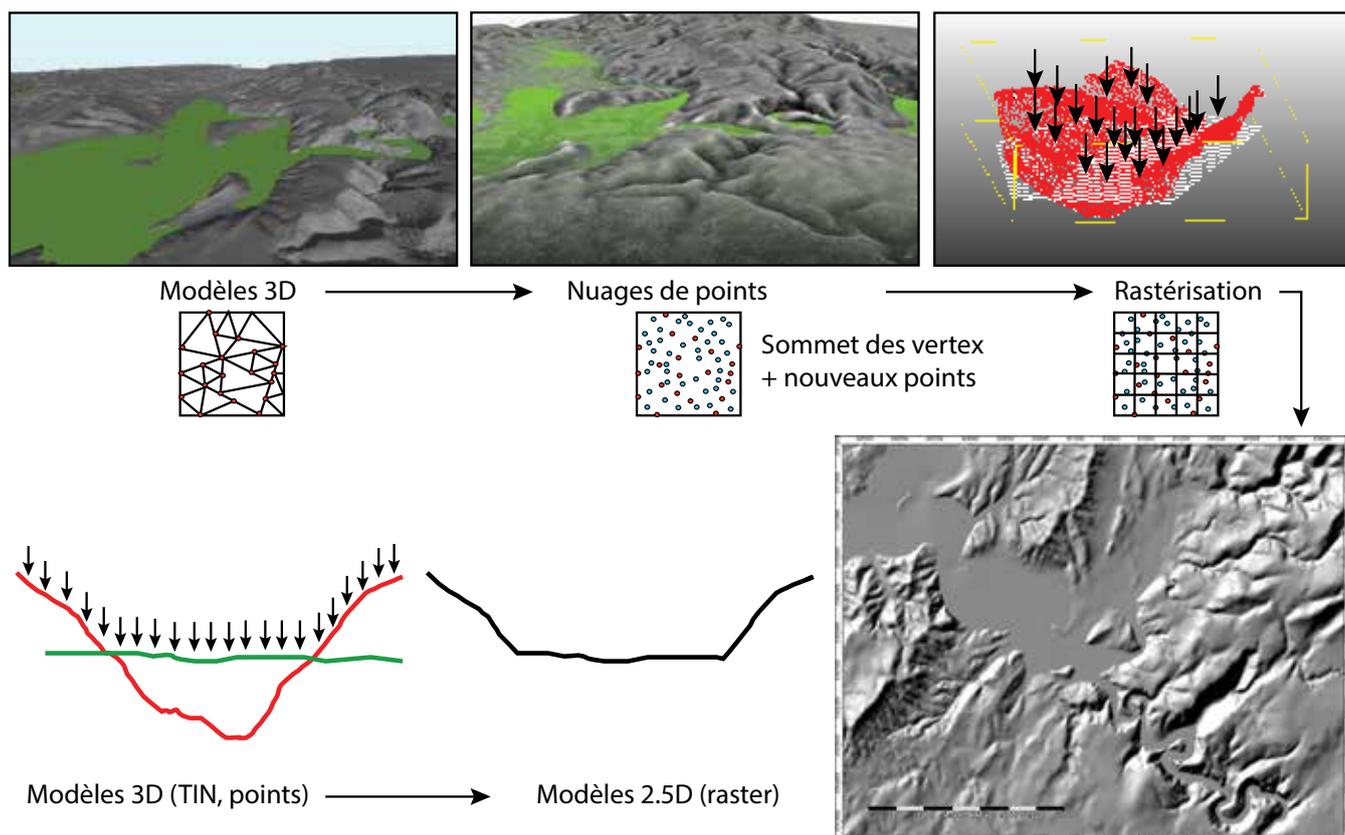


Figure 136 : Méthodologie de création d'un MNT des paléo-reliefs à partir des modèles 3D. La méthode consiste à ne garder que les sommets des triangles (3DReshaper) puis de rasteriser « par le haut » (CloudCompare) pour obtenir une surface unifiée comprenant la topographie rehaussée du niveau reconstitué de la rivière.

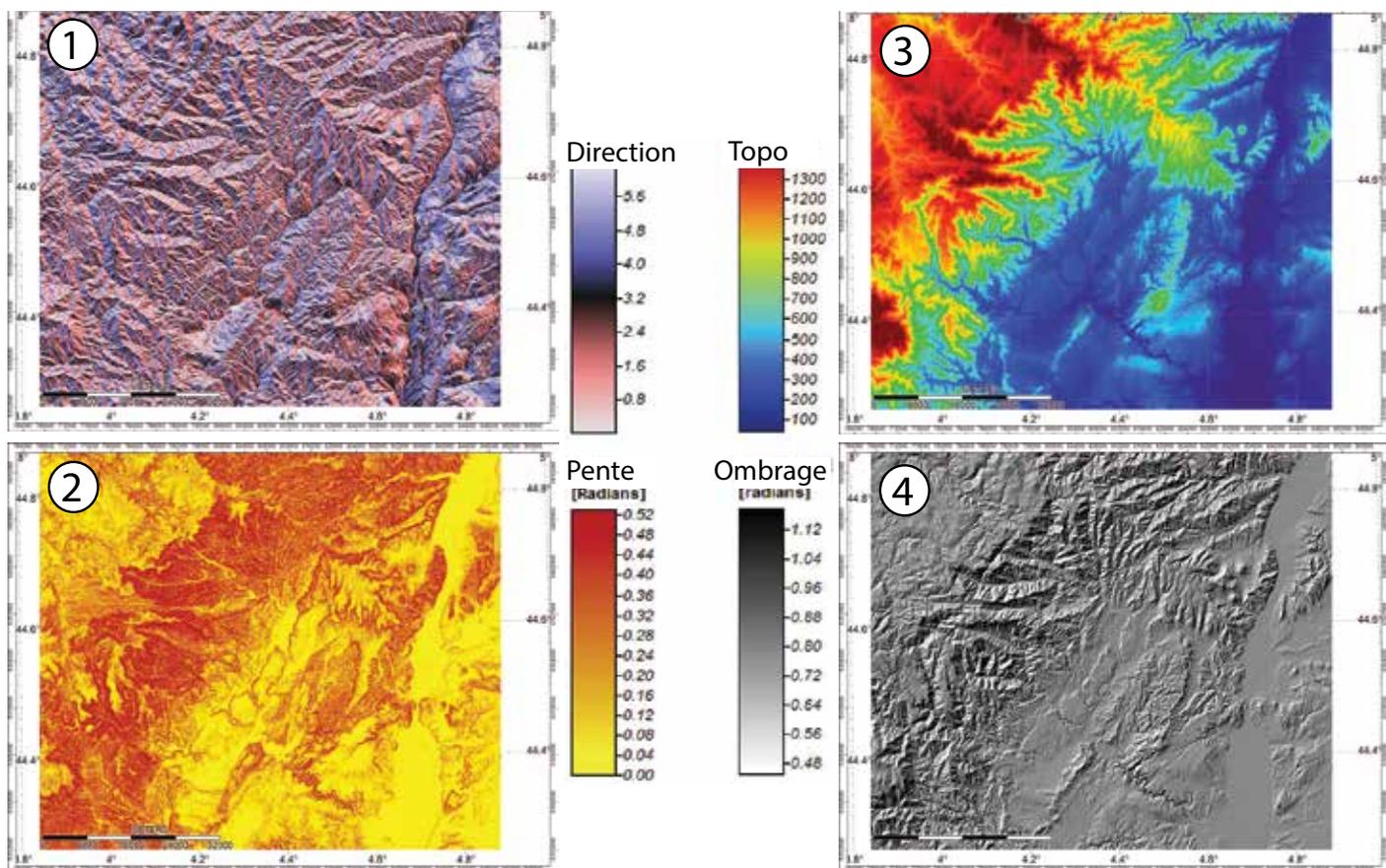
Paleo-DEM generation method (from 3D point cloud data). The "upper sided" rasterization process offered by CloudCompare provides a unified raster representing the current topography with the ancient levels of the river.

Générer des MNT raster permet de profiter de la richesse de calcul, d'analyse et d'interopérabilité offerte par les SIG. Le programme SAGA-GIS (Conrad et al., 2015) a été utilisé ici pour mener à bien les calculs géostatistiques sur les reconstitutions de l'Ardèche. Il permet de calculer de nombreux indices topographiques, morphométriques et volumétriques couramment utilisés en géomorphologie. Ceux-ci permettent de classer les données topographiques en générant des cartes d'ombrage, de pente, d'orientation topographique, de profondeur relative, ou encore d'organisation du réseau hydrographique (figure 139). Ces informations constituent des apports conséquents dans l'interprétation géomorphologique, mais aussi dans le cadre des simulations et modélisations numériques des processus environnementaux dont ces index représentent un des fondements (Pike et al., 2009).

B) Stockage sédimentaire dans la Combe d'Arc.

A l'échelle de la Combe d'Arc, la prospection par tomographie électrique a permis d'obtenir suffisamment de données pour contraindre le remplissage du méandre et distinguer les tabliers d'éboulis de la charge fluviatile (cf. *infra*, chapitre 5). Les chapitres précédents ont étudié l'évolution morphologique de la Combe d'Arc au cours du Pléistocène supérieur. Nous proposons ici de quantifier certaines de ces évolutions pour estimer leur vitesse, ou simplement pour tenter de mieux les caractériser.

Les apports de versant de la Combe d'Arc semblent terminer leur course sur les galets de la terrasse à + 15 m, après l'abandon du méandre. L'analyse issue des campagnes de tomographie électrique a permis de circonscrire la géométrie du corps sédimentaire



Pour obtenir des volumes, on utilise la comparaison raster/raster. Deux MNT sont géoréférencés l'un sur l'autre en X Y. Les valeurs de chaque cellule (Z) sont ensuite comparées selon une grille commune aux deux MNT. Il est parfois nécessaire de ré-échantillonner un des deux MNT par rapport à l'autre afin d'obtenir exactement la même grille raster, et pouvoir donc les comparer (exemple en figure 138).

Figure 137 : Quelques exemples d'analyses morphométriques réalisées à partir des MNT raster. Pour ces 4 indices topographiques, le MNT à 25 m de l'Ardèche a été utilisé (IGN BDAlti 25 m). 1.Direction, 2. Pentes, 3. Altitudes, 4. MNT ombré.

Geomorphometrical analysis on the 25m Ardèche DEM. 1. Direction, 2. Slopes, 3. Altitudes, 4. Hillshade.

de la terrasse. Des calculs de volume ont donc été conduits sur les morphologies reconstituées de ces tabliers d'éboulis. *CloudCompare* et *SAGA-GIS* ont été utilisés avec les méthodes décrites ci-dessus.

Trois zones de tabliers d'ébouilis associées à trois escarpements rocheux les surplombant ont pu être identifiées par le couplage 3D/ERT et par le travail géomorphologique de terrain (cf. carte géomorphologique du Cirque d'Estre, *infra*, chapitre 3, figure 58). La zone 1 correspond à l'escarpement orienté plein sud, surplombant la vire d'accès avant la grotte Chauvet. La deuxième zone correspond à l'autre moitié de la concavité du Cirque d'Estre, dans sa partie aval. L'escarpement est entaillé par le vallon de Combe Longue et les ébouilis en pied de paroi sont

Figure 138 : méthode de comparaison de MNT. La différence entre les deux couches est utilisée pour calculer un volume. Ici: l'exemple de la Combe d'Arc. *DEM comparison methodology applied on the Combe d'Arc area.*

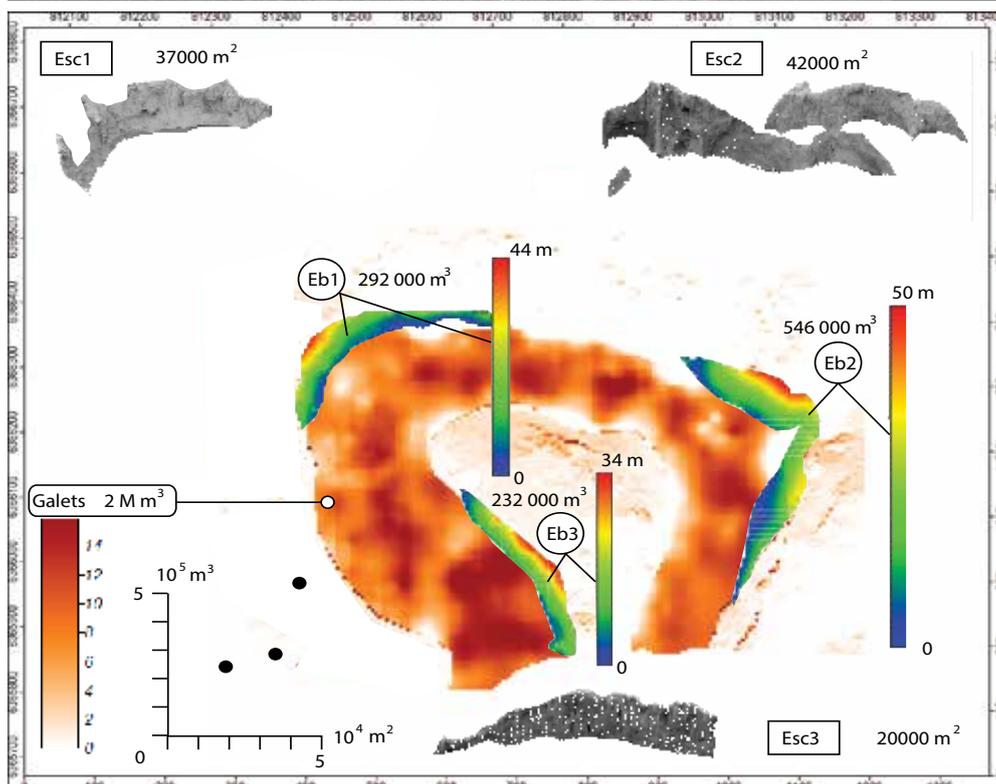
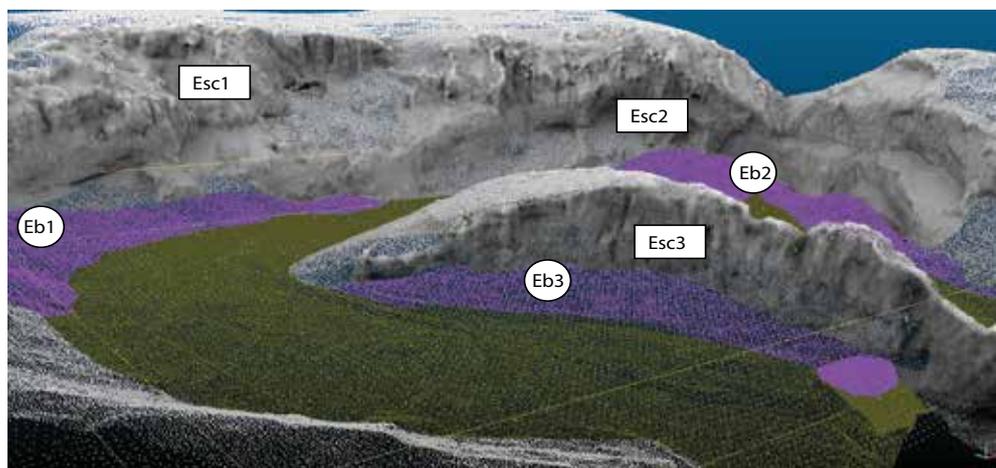
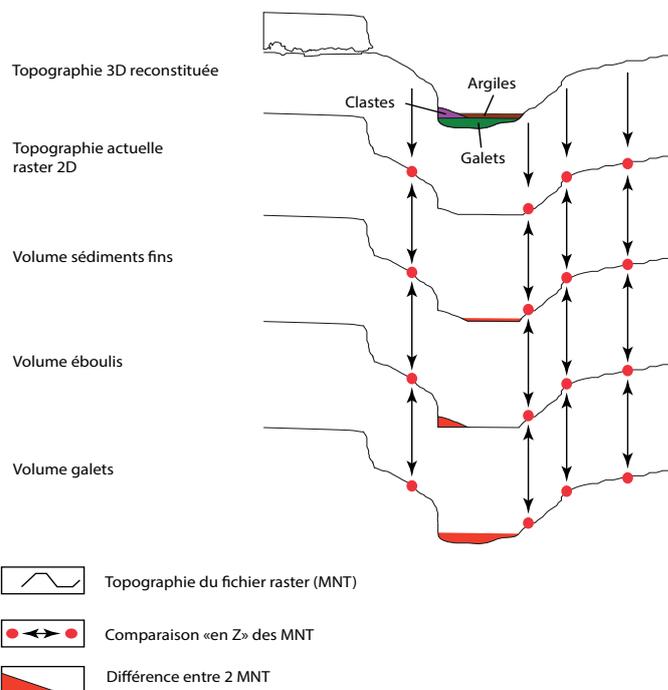


Figure 139 : Calcul des volumes des tabliers d'ébouilis de la Combe d'Arc par interpolation des résultats de l'approche ERT/LiDAR (cf. chapitre 5). Ces derniers sont rapportés à la surface des escarpements subverticaux qui les surplombent. Les tabliers d'ébouilis constituent un apport de volume substantiel (plusieurs centaines de milliers de m³) qui représente une importante évolution paysagère en termes de relief depuis l'abandon de la Combe d'Arc par les eaux pérennes de l'Ardèche.

Volume calculation of the Combe d'Arc slope deposits using the ERT/LiDAR approach (eg. chapter 5). Deposits are related to the subvertical canyon walls above them. Their important volume has been a major change in the Combe d'Arc topography since the meander abandonment.

les plus importants du Cirque d'Estre. La dernière zone, correspond à l'escarpement subvertical qui caractérise la partie amont du pédoncule du méandre. La figure 139 présente ces résultats et les éboulis (marqués Eb1, Eb2 et Eb3) localisés en contrebas de leur zone d'alimentation (les parties subverticales des escarpements rocheux marquées Esc1, Esc2 et Esc3).

Ces volumes issus des apports de versants correspondent aux apports locaux du Cirque d'Estre depuis l'abandon du méandre de la Combe d'Arc il y a environ 128 +/- 5 ka. Ramenés à la surface d'érosion qui les surplombe, ils permettent de calculer des taux de dénudation des escarpements urgoniens au cours de cette période. Avec les âges ESR, on obtient des taux de dénudation de 7.8, 11.6 et 13 cm/ka pour E1, E2 et E3, ce qui nous donne en moyenne 8.4 cm/ka. En considérant une porosité moyenne de 0.8 (Menneron, 2003) pour les éboulis (phénomène clairement visible sur les tomographies électriques), on obtient un taux d'ablation final de 6.7 cm/ka. Ce taux d'ablation est proche de celui utilisé par Sadier et al. (2012) pour déterminer, à l'aide de la technique des isotopes cosmogéniques du ³⁶Cl, la part d'héritage dans le calcul des âges de l'effondrement rocheux de la grotte Chauvet. Notre résultat, obtenu avec une méthode différente, conforte donc les âges obtenus par Sadier et al. (2012) sur l'effondrement du porche de la grotte Chauvet. Ils traduisent des dynamiques d'érosion des versants du Cirque d'Estre marquées par des tendances à la dissolution et à la cryoclastie, ce qui est observable par les groises (et les grèzes) qui forment l'essentiel des éboulis. L'intégration temporelle de ce taux d'ablation sur une période de 128 +/- 5 ka laisse également à penser que les effondrements rocheux ayant pu affecter les escarpements rocheux du Cirque d'Estre ont dû rester relativement rares et ne forment pas la majorité du remplissage sédimentaire. Cette hypothèse est appuyée par la rareté visuelle des gros blocs seulement présents de façon ponctuelle à l'échelle du Cirque d'Estre.

C) Cartographie des pentes des sédiments de la plaine de Vallon Pont d'Arc.

Les calculs de volume peuvent également s'appliquer à plus large échelle : pour la plaine de Vallon Pont d'Arc et l'ensemble du bassin versant de l'Ardèche. Le MNT 25 de l'IGN qui a été utilisé pour l'étude de ce bassin versant, présente une extension spatiale de 70 * 60 * 1.7 km, soit environ 6720 000 cellules raster de 25 x 25 m, ce qui correspond à un fichier de taille modérée.

Une analyse de la carte des pentes a été conduite sur les niveaux de terrasse reconstitués dans la plaine de Vallon Pont d'Arc à l'entrée des gorges de l'Ardèche, dans l'objectif de mieux comprendre l'impact du resserrement topographique généré par la transition plaine-canyon sur les anciens niveaux fluviaux (Cartes des pentes générées sous SAGA GIS avec l'algorithme développé par Travis et al.

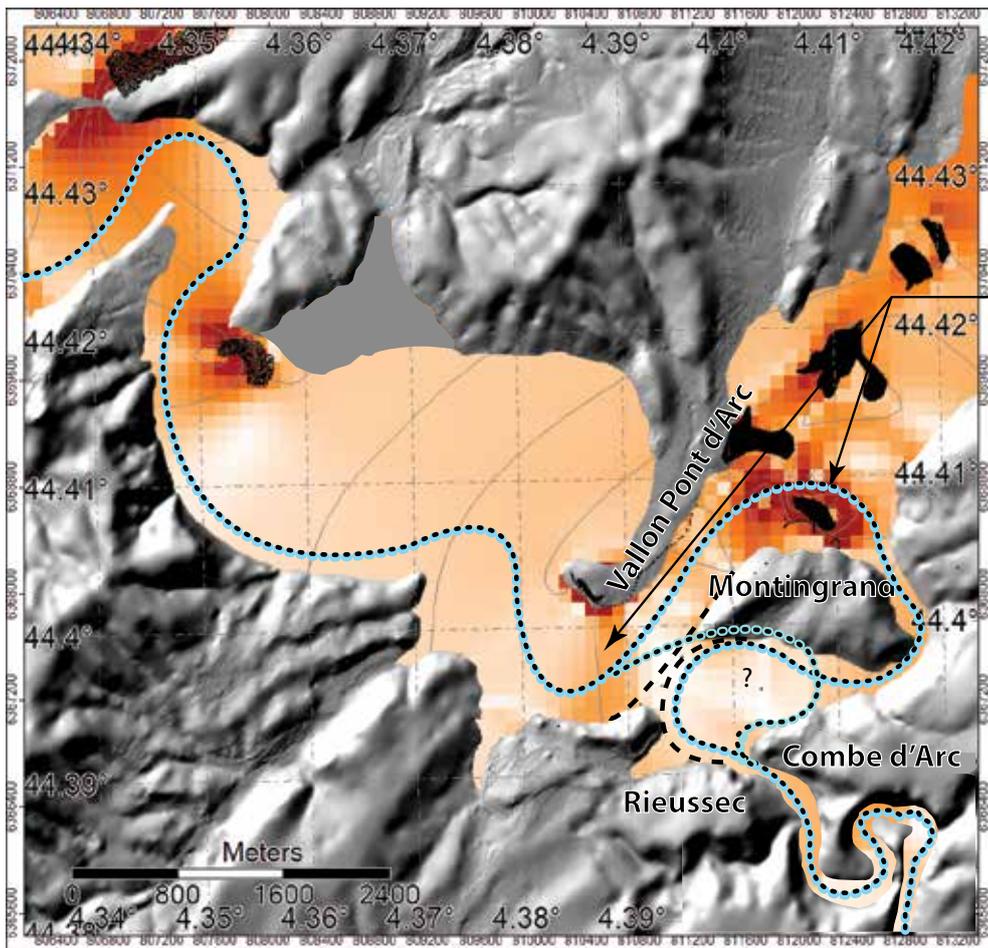
(1975)). Les cartes obtenues montrent des gradients de pente au sein de la plaine de Vallon Pont d'Arc et à l'entrée des gorges pour les deux niveaux investigués (+ 15 m et + 30 m). L'étude de ces cartes pour les niveaux de rivière reconstitués fait ressortir des tendances différentes pour les niveaux à + 15 m et + 30 m (figure 142). Le niveau à + 15 m, semble posséder un pendage assez peu homogène (entre 0.4% et 1%) dans la plaine de Vallon Pont d'Arc ; puis il est plus marqué à l'entrée immédiate du canyon (1.8%) et se poursuit jusqu'au méandre de la Combe d'Arc. Ces données sont à prendre avec du recul car elles peuvent être affectées par des effets de bord issus de l'interpolation des points. Néanmoins, la forte pente alluviale observée à l'entrée du canyon concorde assez bien avec les données mesurées sur le terrain (cf. *supra* chapitre 3).

Le niveau alluvial à + 30 m présente des pentes plus homogènes. La pente est très faible dans la plaine de Vallon Pont d'Arc (0.1 à 0.34%) à deux nuances près : une première rupture de pente, autour de 0.6°, est visible au niveau de la butte du Moulin à Vent (milieu de la ville de Vallon Pont d'Arc) ; la seconde se situe au nord de la butte de Montingrand avec des valeurs proches de 2°. En revanche, l'entrée dans le canyon semble beaucoup plus douce avec des pentes entre 0° et 0.2° et n'affiche une pente de 0.4° qu'en aval de la confluence avec le vallon du Rieussec. Ces observations diffèrent donc des pentes de la terrasse à + 15 m qui sont plus marquées à l'entrée des gorges de l'Ardèche (> 1.8° en moyenne).

Cette évolution de la pente entre les deux niveaux interroge sur les éventuels facteurs ayant conduit à transformer la géographie du profil en long des deux phases de remplissage sédimentaire de la rivière. Ces constats sont également à comparer avec les observations menées par Bravard (1993) qui décrit une pente moyenne relativement élevée du talweg rocheux de l'Ardèche dans la plaine de Vallon Pont d'Arc (1.8 %, Bravard 1993), comparée à celle des gorges de l'Ardèche (1.25 %, Bravard, 1993). Cette configuration qui n'est pas en adéquation avec les faibles pentes enregistrées pour les phases d'aggradation de la rivière, interroge sur les facteurs

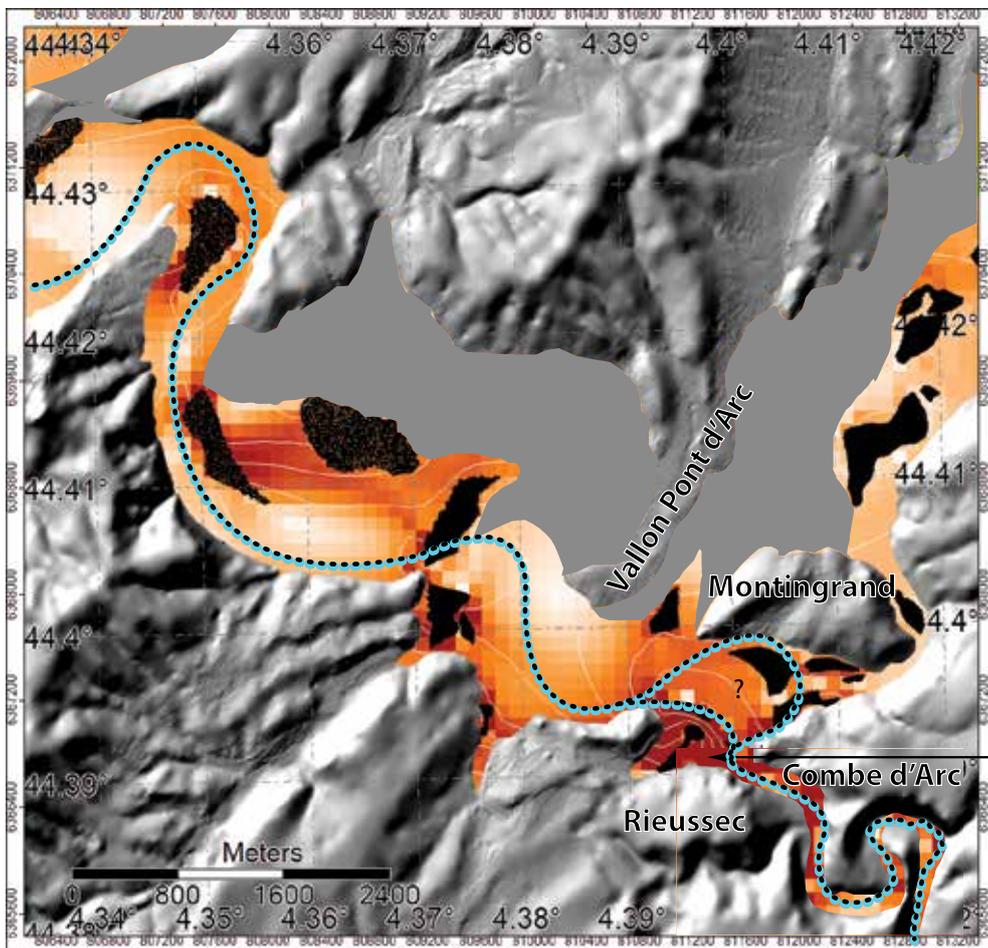
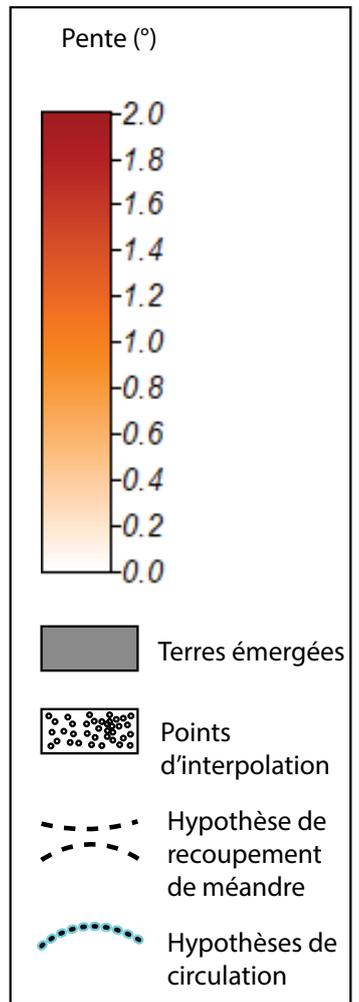
Figure 140 : Modélisation des toits des terrasses + 15 m et + 30 m ainsi que leur carte des pentes associées. Pour la terrasse à + 15m, une rupture de pente est visible à l'entrée du canyon des gorges de l'Ardèche. Le niveau à +30 m montre des ruptures de pente au niveau du recouplement du méandre de Montingrand et au nord de la butte éponyme.

Modeling of the + 15 m and + 30 m maximums of the upfilling stages of the river Ardèche and their associated slope maps. The + 15 m alluvial level shows slope evolution at the entrance of the Ardèche canyon, while the + 30 m one reveals slopes at the Montingrand meander shortcut location and in the north of the Montingrand paleo-meander. —>



Ruptures de pente

Terrasse à + 30 m



Rupture de pente

Terrasse à + 15 m

agissant sur la dynamique sédimentaire. Le cours actuel de l'Ardèche est celui d'une rivière en régime d'incision (Bravard, 1993), coulant directement sur son bedrock (Debard, 1988). Ce n'est évidemment plus le cas en phase d'aggradation où d'autres paramètres comme la topographie des versants, pourraient avoir un impact plus important.

Les cartes des pentes (cf. figure 140) permettent de constater que l'effet de goulot d'étranglement généré par la réduction du conduit hydrologique de la rivière à l'entrée des gorges ne fonctionne pas de la même manière pour les deux niveaux fluviaux +15 et +30. La confrontation des cartes des pentes avec les hypothèses de recoupement du méandre apporte un éclairage sur la géométrie passée potentielle du cours d'eau (cf. figure 142). Si on considère le méandre de Montingrand comme encore fonctionnel lors de la mise en place du niveau alluvial + 30 m, alors les pentes se localisent au niveau du premier rétrécissement morphologique, c'est à dire la butte du Moulin à Vent/Vallon-Pont-d'Arc. La confluence Ibie/Ardèche était alors localisée au nord de la butte de Montingrand. Ce cadre potentiel conforterait l'hypothèse d'un méandre de Montingrand en fonctionnement au niveau à + 30 m (cf. chapitre 3). Dans cette même logique, la rupture de pente visible pour le niveau alluvial + 15 se positionne également au niveau du premier rétrécissement topographique important qui était alors l'entrée des gorges de l'Ardèche. Ces observations mettent en avant les liens potentiels entre reconstitution topographique et paléo-dynamiques morpho-fluviales. Elles restent, néanmoins, cantonnées à l'échelle de la plaine de Vallon Pont d'Arc. La compréhension fine de la morphogénèse sédimentaire de la rivière nécessite d'étudier plus largement le bassin versant et donc de changer d'échelle.

D) Reconstitution du talweg rocheux des niveaux +15 et +30 m.

Les niveaux à + 15 m et + 30 m représentent des corps sédimentaires importants dont les volumes sont considérables à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche. La reconstitution de ces paléo-surfaces peut renseigner sur les volumes en transit dans le bassin versant. Le calcul des volumes transportés nécessite cependant de pouvoir comparer les modèles 3D des terrasses alluviales avec une reconstitution de la topographie de la base de ces terrasses (bedrock). En effet, le relief du talweg rocheux nous reste caché au niveau des stocks sédimentaires encore en place et non déblayés par le cours d'eau, ou simplement remis en mouvement et déposés plus loin dans le bassin versant. Ces zones de bedrock enfouies peuvent générer des incertitudes conséquentes dans le cadre du calcul des volumes sédimentaires. Afin qu'elles soient intégrées, une modélisation du bedrock par interpolation a été menée sur la zone d'accumulation sédimentaire du bassin versant. Ces données sont délicates à obtenir car elles sont tirées, la plupart du temps, d'informations ponctuelles (forages) extrapolées sur l'ensemble du cours d'eau.

Certaines informations sur les forages et sondages sont mises à disposition par le BRGM à partir de la banque des données du sous-sol (BSS), via le site du BRGM Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr/>). Ces dernières ont été recensées sur l'ensemble du bassin versant de l'Ardèche, pour toutes les zones de replat topographique où la rivière dépose ses alluvions et recouvre le substratum rocheux. Au final, ce sont 45 forages et sondages qui ont été retenus. L'Ardèche actuelle étant, comme le plus grand nombre de rivières françaises, en phase d'érosion marquée, son talweg présente des seuils rocheux. Ces derniers ont été considérés et compilés avec les forages au sein d'un même fichier topographique XYZ.

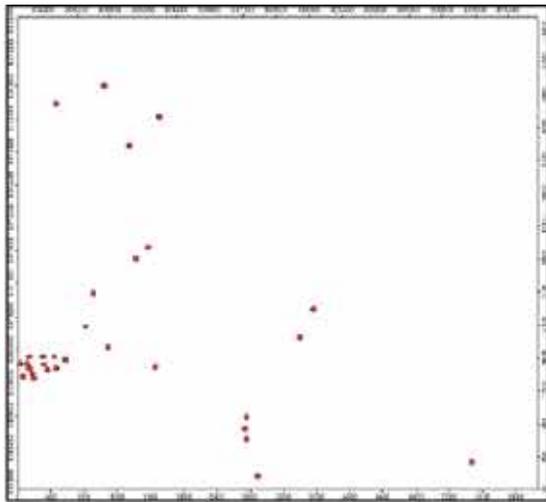
Il existe différentes méthodes pour imager le substratum rocheux. Pour un jeu de données spatialement bien réparti, deux méthodes d'interpolation de bedrock enfoui sont notamment discutées par Chung et Rogers (2012) : la technique dite « *Depth to Bedrock* » (DTB) et celle du « *Bedrock Surface Model* » (BSE) qui utilisent la méthode géostatistique du krigeage, chacune avec deux variantes (*ordinary kriging* et *cokriging*). L'interpolation géostatistique est privilégiée par ces auteurs car elle permet d'adapter le jeu de données à une fonction représentant le modèle théorique géomorphologique (en l'occurrence, un semi-variogramme sphérique).

Toutes les méthodes d'interpolation restent néanmoins très dépendantes de la quantité et de la qualité des données disponibles, ainsi que de leur répartition spatiale. Les méthodes d'interpolation utilisées pour représenter le substratum rocheux dépendent grandement de la quantité d'informations disponibles (forages) mais également du modèle théorique morphologique que l'on souhaite corréliser aux données. Le choix des méthodes employées est donc toujours un enjeu important car leur choix impacte fortement les résultats. La méthode d'interpolation linéaire des voisins naturels a été utilisée (Sibson et Barnett, 1981).

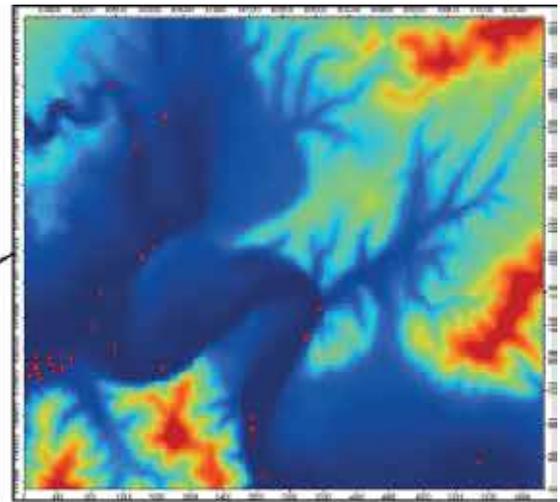
Cette méthode est une interpolation exacte (elle passe en tous les points du modèle) et elle permet

Figure 141 : Méthode d'interpolation du bedrock à partir des données ponctuelles de géophysique, de forages géologiques (BSS - BRGM) et d'affleurements rocheux (MNT 5 m IGN - RGE Alti) auxquelles on a rajouté des informations sur la topographie extérieure pour contraindre l'interpolation (méthode des voisins naturels). Les informations géologiques ainsi que la carte des pentes ont permis de délimiter l'interface topographie extérieure/sédiments fluviaux.

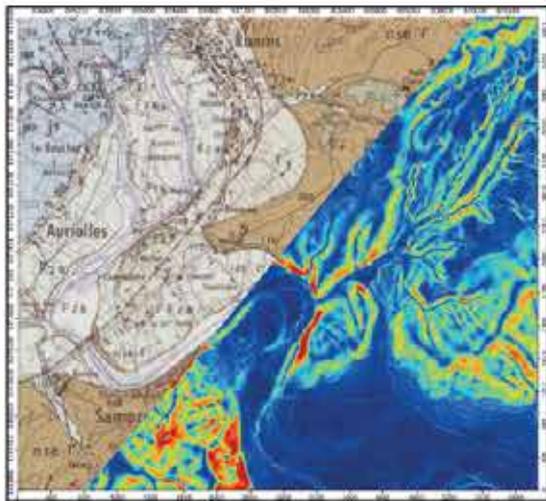
Bedrock interpolation workflow is based on data from drillings, geophysics (BSS- BRGM) and high-resolution topography (IGN - RGE Alti 5m DEM). Additional topographic data based on slope map and geological map were added in order to constraint the interpolation with the alluvial deposits (which bury the bedrock).



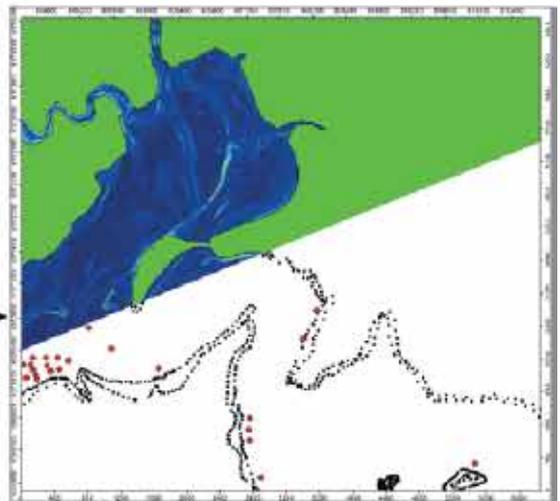
Points Bedrock (Forages / sondages)



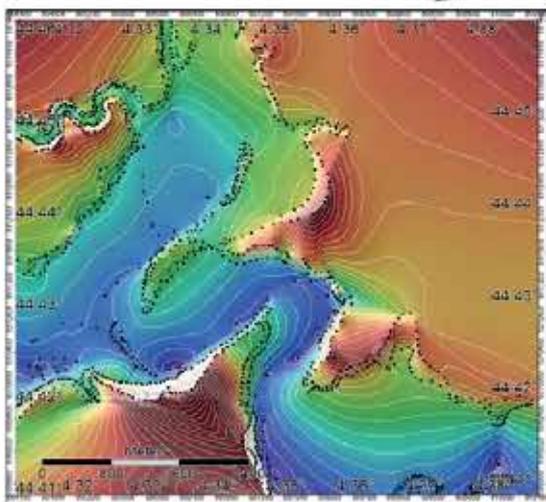
MNT actuel



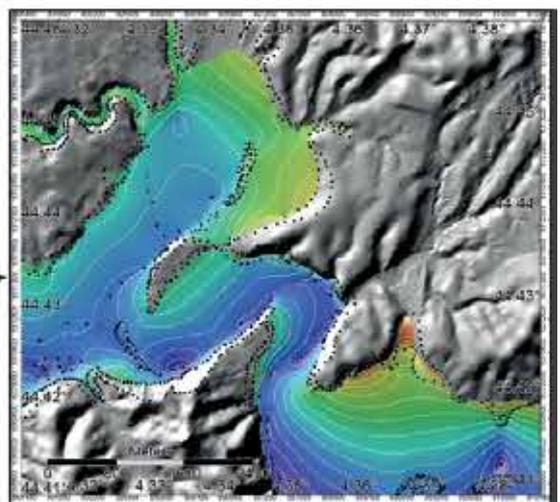
Carte géologique / pentes



Digitalisation/Projection



Interpolation



Habillage et interprétation

de maintenir une relation linéaire entre les points, ce qui signifie que nous ne faisons aucun a priori sur la forme du substratum rocheux (contrairement aux méthodes de krigeage).

L'interpolation des voisins naturels offre également des résultats plus lissés que la triangulation de Delaunay dans les zones faiblement couvertes par les données de forage. La figure 141 présente les étapes de reconstitution du talweg rocheux, en partant des morphologies extérieures utilisées comme contraintes des morphologies de bedrock enfouies.

Les breaklines (lignes de brisure, zones de changement morphologique majeures) ont été digitalisées autour du cours d'eau à partir du MNT à 5m de l'IGN en se basant sur la cartographie des pentes issue de ce même MNT ainsi que de la carte géologique pour le détournement des versants et de l'interface bedrock/sédiments fluviaux (Pascal et al., 1989). Les polygones ainsi générés sous SIG ont été convertis en coordonnées XY (bords des segments) auxquelles les données altitudinales (Z) du MNT ont été rajoutées par projection sur le MNT 5 m. 276 points représentant le bedrock de la rivière (forages + sondages + affleurements de rivière) ont donc été interpolés par la méthode des voisins naturels avec les 10130 points digitalisés sur le bedrock apparent extérieur et utilisés comme contraintes morphologiques pour la bordure des objets.

La carte d'interpolation par voisins naturels permet d'obtenir des morphologies cohérentes de la nappe alluviale avec les profondeurs attendues selon les données issues des forages et des sondages. Néanmoins, une trop faible quantité de données peut entraîner localement des résultats incohérents (principalement sur les versants. Pour éviter cet écueil, le résultat a été corrigé en ré-utilisant le MNT de la topographie actuelle lorsque ce dernier représente la valeur altitudinale la plus basse. Les résultats d'interpolation ont été fusionnés avec la topographie actuelle (dont les limites spatiales, représentées par les breaklines, sont issues). Il suffit alors de rasteriser les nuages par le bas, en « -Z » avec une maille supérieure au nuage de points (l'interpolation a été suréchantillonnée (20x20 m) pour pouvoir toujours rasteriser les résultats à 25x25 m).

La cartographie du bedrock actuel est donc présentée ici avec réserve car il est particulièrement délicat d'estimer l'erreur induite par le manque de données.

La figure 142 peut être considérée comme une cartographie du bedrock maximum théorique actuel. Cette dernière constituant un « maximum altitudinal », la réalité est potentiellement plus basse en altitude que la carte proposée ici. C'est notamment le cas autour de la butte de Montingrand où l'absence de données concernant la profondeur du talweg rocheux n'a pas permis de reconstruire cette zone, bien que les traces du passage de l'Ardèche (et donc d'un talweg rocheux potentiellement assez profond) aient été retrouvées par sondage archéologique (Saison

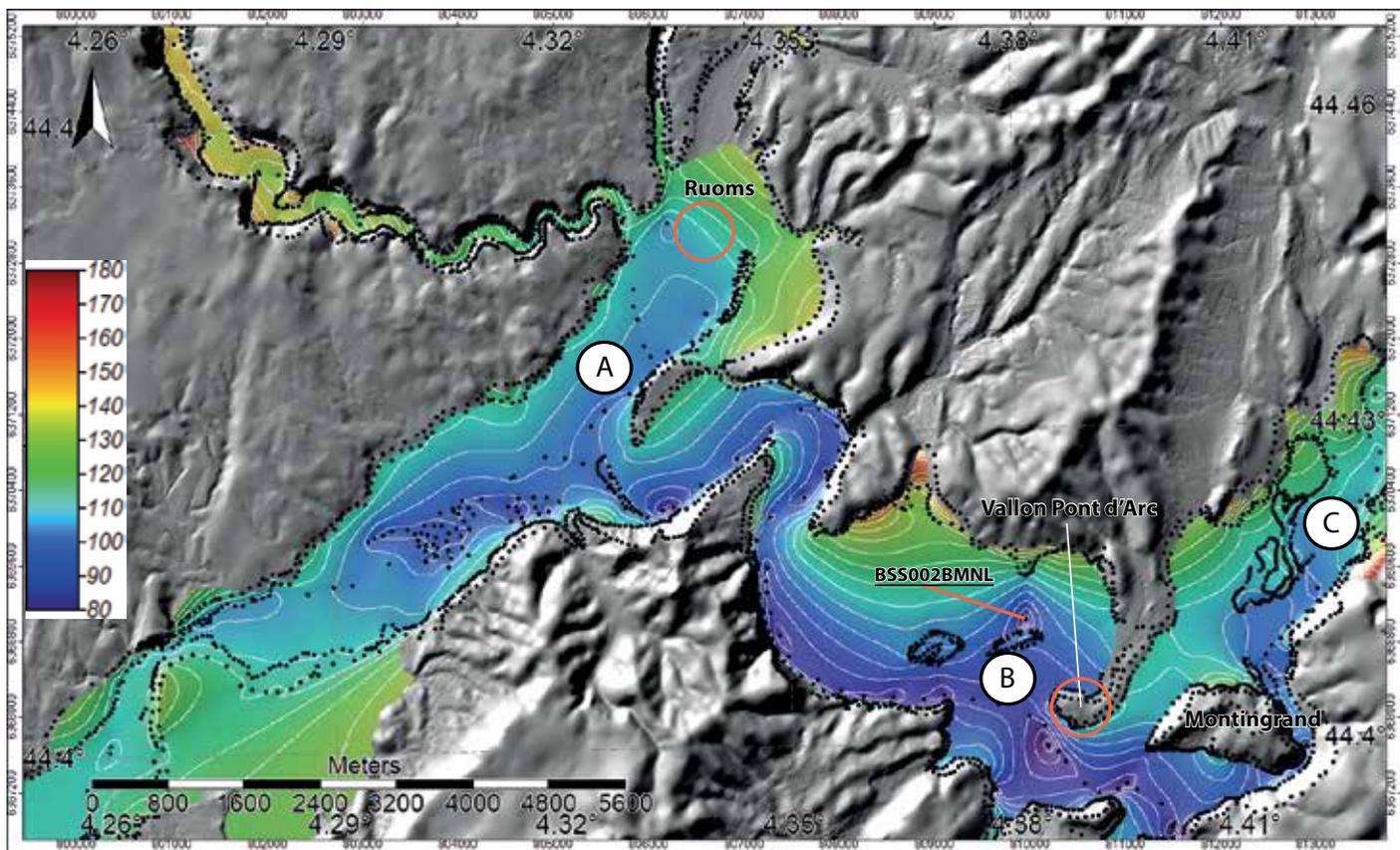
Figure 142 : Interpolation du talweg rocheux actuel avec le réseau hydrographique actuel et les breaklines de la topographie extérieure. Ce résultat doit être interprété comme un niveau maximal théorique (le talweg rocheux peut donc être plus profond à certains endroits où il manque des données de forage). L'interpolation de l'unique forage profond de la Plaine de Vallon Pont d'Arc (BSS002BMNL) fait ressortir un talweg rocheux potentiellement beaucoup plus profond que ce que cette cartographie laisse apparaître ici, ce qui laisse également penser que cette zone, affouillée aux niveaux à + 30 m et + 45 m, a pu être le siège d'anciens méandres (voir chapitres 3 et 7). A : plaine de Ruoms ; B, plaine de Vallon-Pont-d'Arc ; C, plaine de l'Ibie.

Bedrock interpolation with hydrographical network and external topography as additional parameters. This map should be interpreted with caution and as a "theoretical maximum" because the bedrock can be deeper, especially in locations without borehole data. The single deep borehole of the Vallon Pont d'Arc plain (BSS002BMNL) suggests a much deeper bedrock than the one represented on the map, which gives some weight to the hypothesis of ancient alluvial passages (maybe ancient shortcut meanders?) in the Vallon Pont d'Arc plain. A : Ruoms plain; B, Vallon-Pont-d'Arc plain ; C, Ibie plain. —————>

et al., 2017). Les volumes déduits à la suite de cette étude seront donc toujours des volumes minimaux.

Pour les zones de plaine, la largeur importante de ces dernières en fait des objets comportant plus d'incertitudes étant donné la quantité relativement faible de données par forage et le fait que les points de mesure topographique restent cantonnés au cheminement actuel de la rivière. Plusieurs plaines sédimentaires ont fait l'objet de l'interpolation : la plaine de Ruoms (confluence du Trident) qui fait un peu plus de 10 km², la plaine d'Aubenas, la plaine de Vallon Pont d'Arc (10 km²) et la partie terminale du cours de l'Ibie (7 km²). Le grand nombre de données géophysiques assez bien réparties (sondages verticaux) a permis d'obtenir une meilleure image au niveau de la confluence du trident, mais pas sur les autres plaines où les sondages sont circonscrits à quelques zones de faible ampleur spatiale. Des erreurs d'interpolation liées au manque de données ou à la mauvaise répartition de ces dernières sont donc probables au niveau des trois autres plaines sédimentaires.

Au final, la cartographie de l'altitude théorique maximale du bedrock révèle des zones de dépression



bien marquées dans la plaine de Ruoms et au niveau de la confluence du Trident (figure 142). A cet endroit, l'interpolation est basée sur de nombreux sondages géophysiques. Cette morphologie peut être interprétée comme un graben, zone d'effondrement tectonique, ce qui est corroboré par le modèle d'effondrement décrit dans la littérature scientifique pour la plaine de Ruoms (terminaisons septentrionales du fossé tectonique d'Alès : Labrousse, 1977 ; Sanchis et Séranne, 2000). L'organisation en touches de piano de la structure jurassique à l'aval du cours du Chassezac est également cohérente avec la cartographie d'une zone d'effondrement au centre de la plaine (Pascal et al., 1989).

1.2 Calcul des volumes érodés par comparaison de MNT.

On compare la topographie supposée du *bedrock* avec le relief actuel, et les reconstitutions à + 15 m et + 30 m. Cette approche pose cependant un problème car elle ne prend pas en compte l'incision du *bedrock* lors du dernier interglaciaire (MIS 5e) (les données topographiques et géologiques actuellement disponibles à l'échelle du bassin versant sont trop peu nombreuses pour atteindre ce niveau de précision). Par exemple, une comparaison du *bedrock* actuel avec le niveau à + 30 m comporterait un biais. Nous manquons d'information pour mieux caractériser cette incision que nous estimons à environ 3 mètres à l'interglaciaire MIS 5e (cf. *infra*, chapitres 5 et 7). Cette dernière semble cependant bornée au talweg actuel, ce que les banquettes rocheuses visibles dans les gorges et dans la plaine de Vallon-Pont-d'Arc semblent attester. Nous avons donc réalisé un

calcul simplifié du volume érodé potentiel en prenant en compte l'érosion verticale (environ 3 m), la largeur moyenne du talweg de l'Ardèche actuelle (environ 40 m) et la distance parcourue par les principaux affluents dans la zone de calcul (environ 80 km), ce qui nous donne un volume de 24 millions de m³. Cette valeur sera donc retranchée du calcul des volumes pour le niveau à + 30 m.

La même procédure a été appliquée pour les 2 mètres d'érosion potentielle du talweg depuis l'établissement de la T + 15 m (16 millions de m³).

La méthode mise en place à l'échelle de la plaine de Vallon Pont d'Arc dans le chapitre 3 a été étendue aux amonts du bassin versant de l'Ardèche à l'aide de plusieurs outils : le MNT à 25 m de l'IGN, des observations géomorphologiques de terrain, ainsi que d'anciens levés cartographiques de Labrousse (1977). La reconstitution des paléo-niveaux d'aggradation à + 15 m et à + 30 m a globalement pu être conduite jusqu'à l'interface domaine cristallin / domaine sédimentaire du bassin versant (Lalevade d'Ardèche pour la rivière éponyme, Largentière pour la Ligne, Ribes pour la Beauce, et les Salelles pour le Chassezac). Au-delà de ce niveau, les éventuels replats sédimentaires ne sont plus visibles sur le MNT. Cette absence de bancs alluviaux est liée à la fois à l'éroitesse et la forte pente du haut bassin versant qui présente des sections de gorges en V, propices à l'érosion plutôt qu'à l'accumulation sédimentaire. Ces niveaux correspondent également à l'arrêt de la représentation des dépôts quaternaires étagés dans le haut bassin versant sur la carte géologique (Pascal et al., 1989).

Dans l'objectif de comparer les différents paléo-

niveaux fluviaux reconstitués et de pouvoir réaliser des calculs de volume par comparaison de MNT, nous avons effectué, une uniformisation des données. A cet effet, les MNT ont été rééchantillonnés sous SAGA-GIS en fonction du MNT de référence (MNT 25 m actuel de l'IGN). Il a ainsi été possible de comparer les remplissages, entre les niveaux + 15 m et + 30 m par rapport à la topographie actuelle du cours d'eau et à celle supposée du talweg rocheux. Ces données ont été comparées entre elles et les cartes de différences présentées en figure 143 ont permis d'obtenir des résultats volumétriques.

A) Cartographie des différences.

La première carte est un essai de représentation des variations entre la morphologie actuelle de la rivière et la topographie supposée du bedrock. Ces dernières sont très localisées à cause de la méthode elle-même qui, par manque de données, n'a pas permis de générer une cartographie en continu des affleurements rocheux.

La seconde cartographie (niveau à + 15 m / bedrock) suggère que l'aggradation sédimentaire est à son maximum dans les plaines d'Aubenas et de Vallon-Pont-d'Arc.

Enfin, la cartographie des variations entre le niveau à + 30 m et le bedrock supposé met en lumière le rôle des trois plaines principales (Aubenas, Ruoms et Vallon-Pont-d'Arc) dans le stockage des sédiments de la rivière par rapport au reste du réseau hydrographique. L'aggradation sédimentaire dépasserait localement les 40 m à partir de la confluence du Trident.

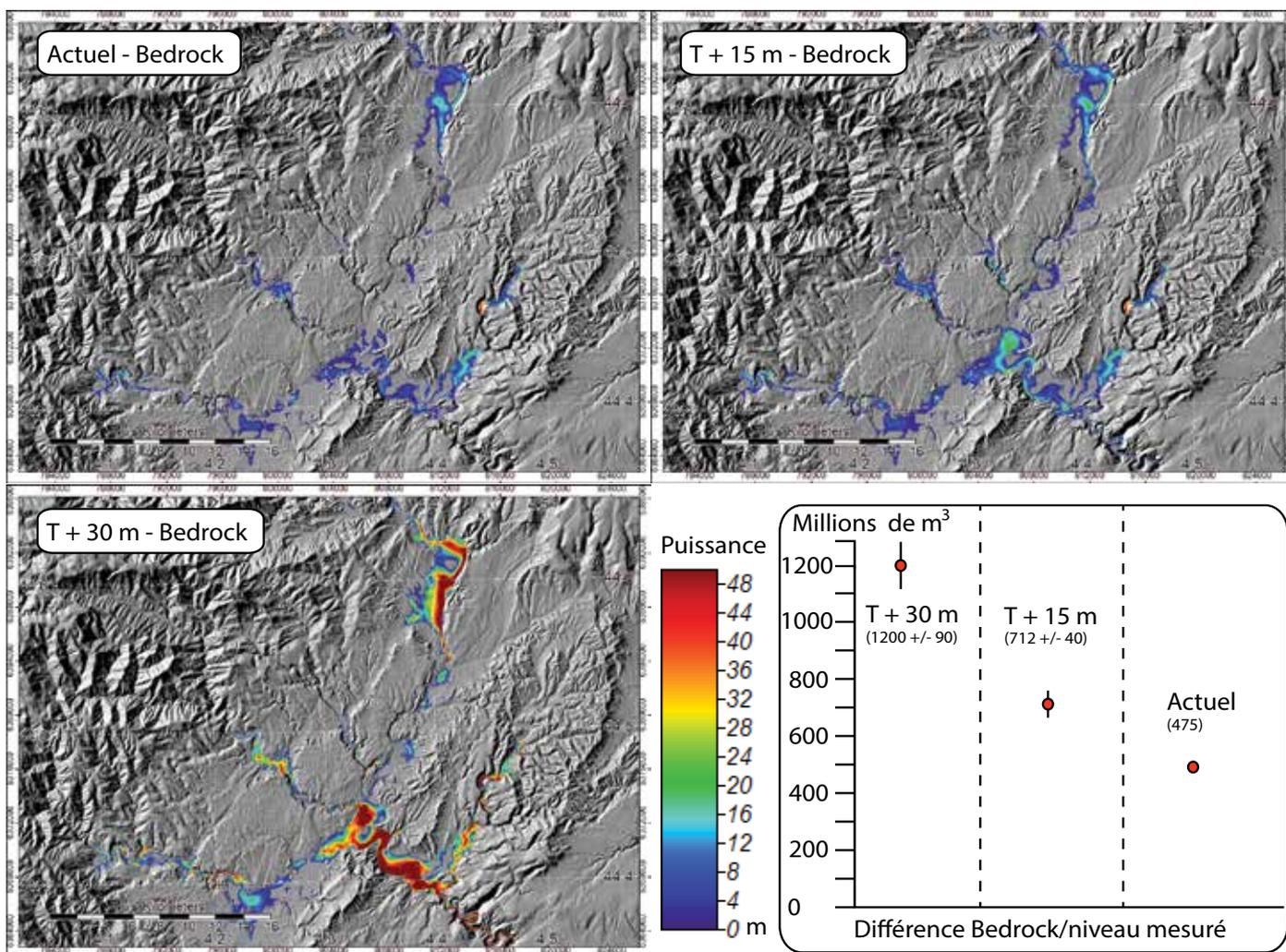


Figure 143 : Comparaison des niveaux de rivière avec la topographie supposée du bedrock. L'importance de la charge alluviale que représentaient les trois plaines d'alluvionnement principales (Aubenas, Ruoms et Vallon Pont d'Arc) ressort nettement pour les niveaux à + 15 m et + 30 m.

Comparison of the different levels of the river with the supposed bedrock topography. The potential alluvial deposits are clearly visible in the three main alluvial plains (Aubenas, Ruoms and Vallon Pont d'Arc) for the + 15 m and + 30 m levels.

La cartographie des différences + 30 m et + 15 m et actuel par rapport au bedrock fait ressortir la géographie des volumes sédimentaires des deux phases d'aggradation de la rivière. Les volumes se chiffrent à plusieurs centaines de millions de m³, ce qui montre que les volumes érodés du talweg rocheux peuvent être considérés comme négligeables.

Un maximum d'érosion est observé dans la plaine de Ruoms pour le niveau à + 15 m (environ 25 m de différence d'altitude). L'érosion enregistrée est globalement plus importante pour le niveau à + 30 m, avec des différences notables à partir de la plaine de Ruoms jusqu'à la sortie des gorges de l'Ardèche (plus de 40 m par endroits). La carte des différences 0/+ 30 m permet également de constater que l'épaisseur du remblaiement est de moins en moins importante au fur et à mesure que l'on remonte dans les amonts du cours d'eau. Le résultat final approche donc les 1088 +/- 90 M m³ (T+30) ; 702 +/- 40 M m³ (T+15) ; et 475 M m³ (actuel) de sédiments déposés dans le bassin versant pour chaque période de remblaiement.

Il est possible d'estimer la quantité de matériel érodé dans les plaines sédimentaires en comparant les modèles représentant les *maximas* d'aggradation avec la topographie actuelle (comprenant encore 475 millions de m³ de sédiments d'après nos calculs). Le calcul donne des volumes érodés de 802 millions de m³ pour la terrasse à + 30 m et 280 millions de m³ pour le niveau à + 15 m. Les différences de calcul des sédiments ont été utilisées pour moyenniser les résultats et estimer une incertitude dans le calcul des volumes visibles dans le tableau 4.

Phase	Stade isotopique	Volumes (millions de m ³)
T + 30 dépôt	MIS 6	1088 ± 90
T + 30 érosion	MIS 6 à 1	802 ± 75
T + 15 dépôt	MIS 5d	702 ± 40
T + 15 érosion	MIS 5d à 1	280 ± 43
Dépôt actuel	MIS 1	475
Erosion talweg rocheux	MIS 5e	24
Erosion talweg rocheux	MIS 1	16

Tableau 4 : Calcul des volumes de dépôts alluviaux issus des reconstitutions topographiques et des estimations moyennées sur l'ensemble des plaines sédimentaires de l'Ardèche.

Volume calculation of alluvial sediments.

B) Répartition du stockage sédimentaire dans les plaines d'alluvionnement.

Ces calculs des volumes sédimentaires ont été effectués sur la partie aval du bassin versant, où les alluvions peuvent se déposer car la pente décroît de manière importante à la sortie du domaine granitique. La comparaison des niveaux sédimentaires avec la carte des pentes fait également ressortir la limite globale entre érosion et accumulation moyenne à l'échelle du bassin versant. En effet, la pente

importante du haut bassin versant de gneiss et de granites marque une limite nette avec les plaines d'alluvionnement, toutes situées plus en aval et organisées en fonction de la faille des Cévennes (cf. *supra*, figure 148). L'influence de ce haut bassin versant est illustrée par la prépondérance des granites dans le cortège sédimentaire des terrasses alluviales (cf. figure 62, chapitre 3).

Les cartographies des différences permettent aussi de raisonner sur les dynamiques sédimentaires de l'Ardèche, notamment depuis l'abandon de la terrasse à + 30 m. Afin d'évaluer la variabilité des volumes le long du profil en long de la rivière, nous avons échantillonné le modèle avec un pas longitudinal de 2 km. A l'intérieur de chaque tronçon, nous avons calculé les volumes de sédiments pour chacun des niveaux de terrasse. Leur report sous forme d'histogramme des volumes le long du cours principal de l'Ardèche met en évidence des caractéristiques d'érosion très différentes entre les deux niveaux de remblaiement principaux (figure 144). Aujourd'hui, l'absence quasi systématique de replats caractéristiques du niveau à + 30 m le long du cours d'eau témoigne en effet d'un stade avancé de déblaiement : cette terrasse a presque été entièrement érodée, d'où l'importance des volumes calculés (802 millions de m³ par rapport à la topographie actuelle), et ce tout le long du cours d'eau. Elle est visible sous forme de replats marqués seulement au niveau de la plaine d'Aubenas, conséquence logique de l'érosion régressive, qui déblaie d'abord les sédiments depuis l'aval et préserve ceux de l'amont.

Ces observations sont à confronter avec la carte des différences à + 15 m qui montre une autre tendance (cf. figure 143). En effet, contrairement à la terrasse à + 30 m, le niveau à + 15 m présente des replats topographiques de grande extension tout le long de la rivière. La carte des différences (figure 145) par rapport à la situation actuelle donne donc des volumes érodés beaucoup plus faibles (702 +/- 40 M m³ par rapport au *bedrock* actuel mais seulement 280 M m³ par rapport au relief actuel), signe d'une érosion moins marquée.

Ce constat concerne notamment les trois plaines de stockage sédimentaire de l'Ardèche : Aubenas, Ruoms et Vallon-Pont-d'Arc. Il est encore plus visible sur cette dernière où le niveau à + 15 m s'étend sur une surface importante.

La répartition des volumes dans la plaine de Vallon-Pont-d'Arc est visible sur la figure 145, elle a été calculée avec un pas d'échantillonnage cette fois de 1km pour une caractérisation plus fine sur cette zone. On constate la différence importante des volumes déblayés pour les niveaux + 15 m et + 30 m, avec un volume disparu très important dans la plaine de Vallon-Pont-d'Arc au niveau + 30 m (plusieurs dizaines de millions de m³). A l'inverse, la conservation des replats fluviatiles à + 15 m tend à confirmer l'hypothèse formulée précédemment par Bravard (1993) et Jacob et al. (2008) d'une

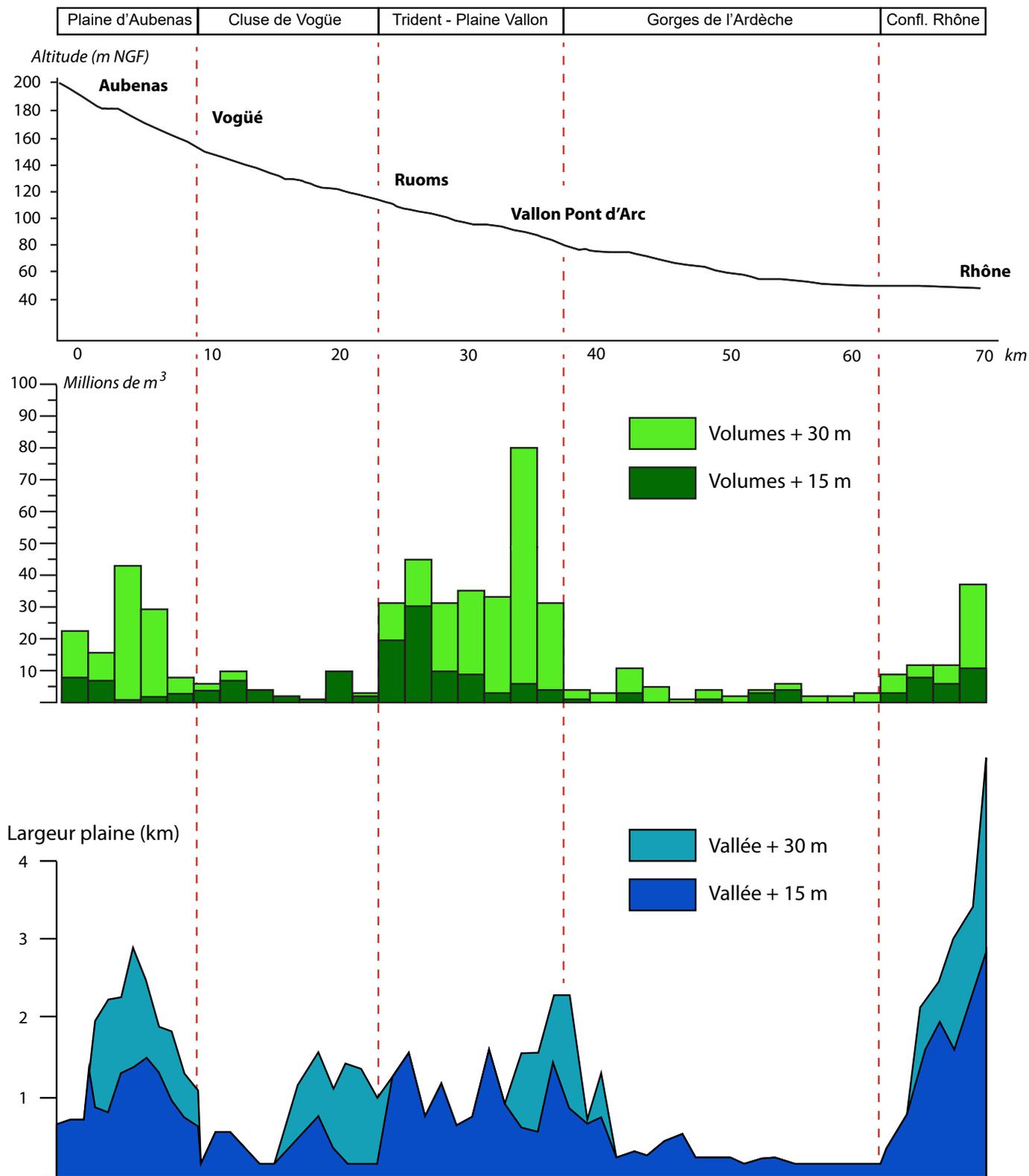


Figure 144 : Profil longitudinal bassin versant de l'Ardèche depuis la plaine d'Aubenas. Calcul des volumes érodés des deux niveaux + 15 et + 30 m, sur cette partie. Le niveau de déblaiement plus avancé de la terrasse à + 30 m contraste avec le niveau à + 15 m, beaucoup moins déblayé, qui comporte de grands lambeaux de terrasse encore en place.

Erosion volume calculation for the + 15 m and + 30 m alluvial levels. Erosion is visibly more advanced for the + 30 m deposit than for the + 15m deposit which shows little erosion and is in a better state of conservation.

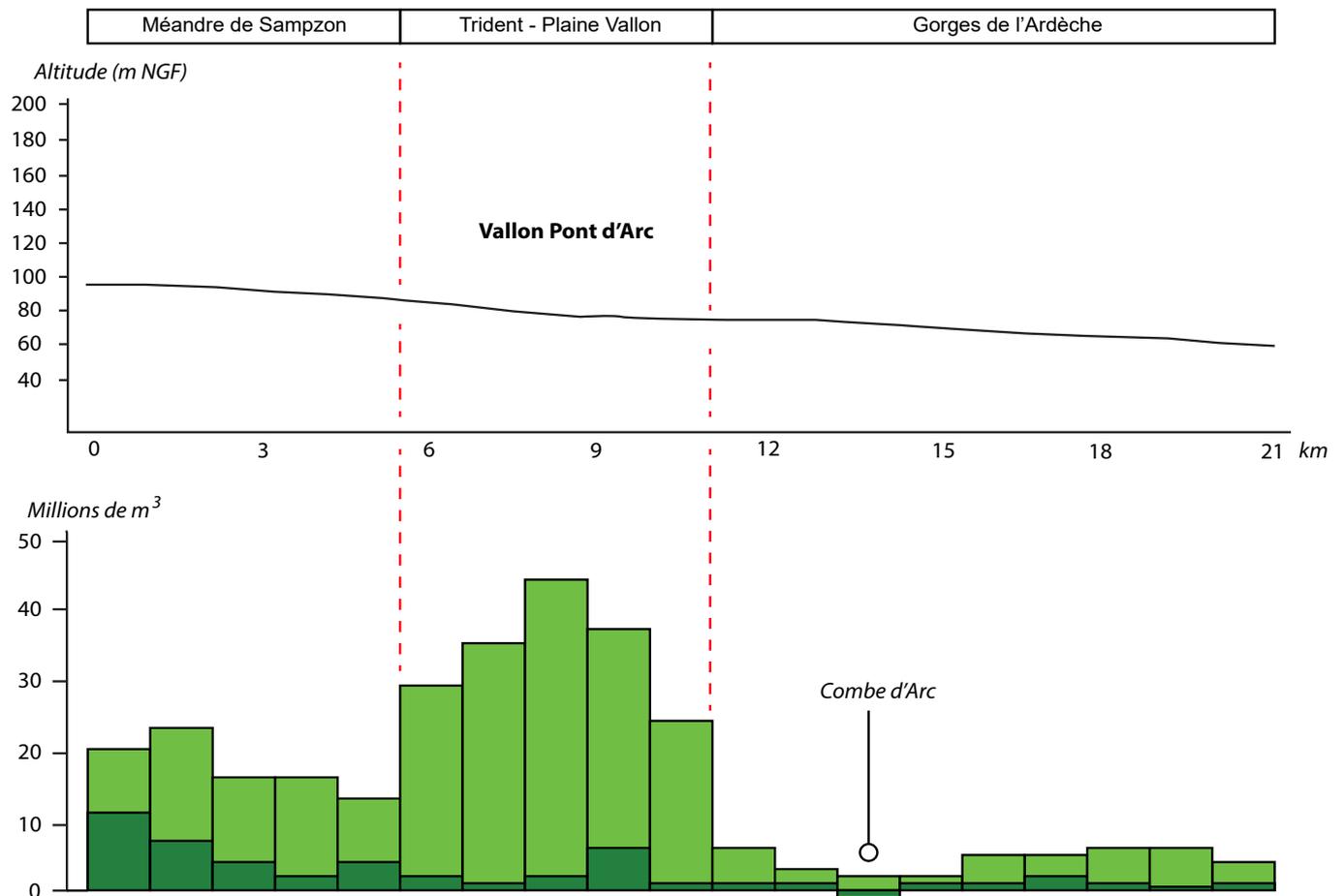


Figure 145 : Profil en long et estimation du volume érodé dans la plaine de Vallon Pont d'Arc pour les niveaux + 15 m et + 30 m avec un échantillonnage raster de 25 x 25 m. Les calculs de volume ont été réalisés avec un pas d'échantillonnage de 1 km.

Upfilling volumes in the Vallon Pont d'Arc plain for the + 15 m and + 30 m levels (25 x 25 m rasters). Volume calculation were proceeded with a sampling stage of 1 km.

phase d'érosion qui n'est pas terminée et qui affecte aujourd'hui encore la terrasse à + 15 m.

Le diagramme de répartition longitudinale des volumes érodés fait également ressortir l'impact du resserrement topographique des zones en canyon sur la dynamique sédimentaire de la rivière. La configuration géométrique en goulot d'étranglement a pu favoriser le stockage de sédiments à l'entrée des gorges et générer ces accumulations sur parfois plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. L'étréoussure relative des gorges de l'Ardèche limite aussi possiblement le transit sédimentaire. Cette géométrie en « conduit forcé » empêche peut-être les vagues d'érosion régressive de s'exprimer pleinement en amont des gorges (situation visible sur la carte des pentes de la terrasse à + 15 m). Ce premier effet pourrait être exacerbé en période d'accumulation sédimentaire car l'étréoussure topographique ne permet pas non plus aux dépôts de pénétrer correctement dans le canyon. La pente marquée à l'entrée des gorges pour la terrasse à + 15 m serait alors possiblement un front de progradation sédimentaire (cf. figure 140).

2. Une analyse du bassin versant par les index topographiques érosion/sédimentation.

La méthode présentée ci-dessus a pris en compte l'érosion en privilégiant non pas les zones de disparition des matériaux, mais leurs lieux de stockages (plaines alluviales), comme conséquence du phénomène d'érosion ayant lieu en amont du bassin versant. Cette méthode est robuste car elle permet une approche quantitative des phénomènes, ici à l'échelle d'un cycle séparant deux terrasses alluviales. Cependant, modéliser les paléo-surfaces pré-érosion reste complexe et la difficulté croît au fur et à mesure que l'on remonte le bassin versant : les dynamiques d'érosion prennent progressivement le pas sur les dynamiques de dépôt, faisant disparaître les témoins des paléo-topographies de plus en plus rapidement.

Des méthodes morphométriques peuvent néanmoins être utilisées pour caractériser les dynamiques de la rivière à l'échelle du bassin versant. En effet, l'organisation spatiale du drainage des rivières, la pente moyenne des talwegs, la structure géologique

de l'encaissant, la connectivité sédimentaire de la rivière, l'orogénèse ou encore le climat et la répartition de la végétation exercent une action sur la morphogénèse d'une rivière (Bridgland et al., 2009). Une partie de ces différents forçages peut être analysée par l'intermédiaire de la topographie. Son étude par des traitements morphométriques SIG peut renseigner sur l'évolution du relief, sur le temps court comme sur le temps long. Par exemple, à long terme, l'étude des *knickpoints* dans les talwegs a permis de mettre en lien des réajustements des cours d'eau à des *uplifts* tectoniques (Montgomery et Brandon, 2002 ; Olivetti et al., 2016). L'étude de l'organisation des réseaux hydrographiques peut être menée par leur décomposition en nombres de Strahler (Strahler, 1957), ou encore en fonction d'indices de sinuosité (Perron et Royden, 2013). Ces indices ont par exemple permis d'associer l'organisation, l'amplitude et les formes de certains réseaux hydrographiques avec des paramètres climatiques globaux comme les précipitations (Stark et al., 2010) et parfois avec des informations bioclimatiques de végétation (Brocard et al., 2016).

2.1 Caractériser l'érosion par des indices topographiques : traitements SIG.

A) Les indices topographiques d'érosion : « Stream Power Index » et « Sediment Transport index ».

L'utilisation des MNT au sein des logiciels SIG permet de décomposer les paramètres topographiques tels que l'altitude, la pente, l'incurvation des talwegs ou encore la géométrie des bassins versants, pour en extraire des informations utiles à la compréhension des dynamiques régissant le système, voire même en inférer des plus globales aux échelles de temps les plus longues (parfois plusieurs millions d'années). Il est quasiment impossible de reconstruire avec cohérence les paléo-topographies de tout un bassin versant, notamment les parties érodées. Ce problème est bien connu et a été discuté de nombreuses fois dans des études de géomorphologie (Odoni, 2007 ; Peeters et al., 2006). Néanmoins, si une profonde modification du relief du bassin versant est à considérer sur des temporalités géologiques (plusieurs millions d'années), la période de temps envisagée ici (Pléistocène moyen à supérieur) autorise une analyse sur une même topographie (Peeters et al., 2006). En partant d'une approximation du relief actuel, des indices topographiques ont été calculés sur le bassin versant de l'Ardèche à partir du MNT à 25 m de l'IGN.

Plusieurs de ces indices ont été développés autour de l'érosion et des flux (Murphy et al., 2009 ; Bannari et al. 2017). Certains d'entre eux sont aujourd'hui bien établis et peuvent servir à comprendre l'évolution des rivières. Ces approches ont largement bénéficié de l'essor des développements informatiques et des ressources de calcul pour les SIG et les traitements

d'images (Moore et al., 1991 ; Moore, 1996 ; Murphy et al., 2009). Ces indices topographiques sont cependant semi-empiriques : ils offrent une bonne représentativité spatiale de la répartition potentielle d'un phénomène à l'échelle du bassin versant, mais ne représentent pas le phénomène à proprement parler. Ils nécessitent tous des pré-requis de base pour être calculés correctement :

- Un MNT hydrologiquement continu : le MNT à 25 m de l'IGN a été utilisé sur tout le département de l'Ardèche. Les dépressions locales ont été remblayées numériquement au moyen de l'algorithme développé par Planchon et Darboux (2001).
- Des calculs de premier ordre à partir du MNT : un raster de pente et d'accumulation de flux.

Ces opérations ont toutes été conduites sous le logiciel SAGA-GIS (Conrad et al., 2015)

Parmi les différents indices d'érosion / sédimentation disponibles dans la littérature scientifique, le Stream Power Index (SPI), a été conçu pour décrire la capacité d'un bassin versant à transférer les sédiments dans les rivières, dans l'objectif d'estimer des taux de sédimentation et de mieux caractériser les risques d'inondation.

Bannari et al. (2017) décrivent le Stream Power Index par l'équation suivante :

$$SPI = [\ln((A_s + 0.001) \cdot ((\beta/100) + 0.001))]$$

Equation 4 : Stream Power Index (SPI). "As" représente l'accumulation des flux depuis les aires contributives plus haut en altitude par rapport à un point donné (flow accumulation). Il a été calculé sur SAGA GIS à partir du module « recursive flow accumulation » (Tarboton 1997). "β" représente la pente locale (en radians).

As is the flow accumulation, "β" is the slope (in radians). "As" determines how much water is accumulating from upstream areas. As was calculated with the SAGA "recursive flow accumulation" module (Tarboton, 1997).

Le SPI a notamment été utilisé pour cartographier les mouvements de versant potentiels en Himalaya, au Népal (Poudyal et al., 2010). Pour l'Ardèche (figure 146), le haut bassin versant ressort fortement sur la cartographie avec des valeurs d'indice presque 5 fois plus élevées qu'en plaine sédimentaire. L'indice est exprimé sans unité : plus les valeurs sont hautes, plus la capacité de transport par les flux est considérée comme importante.

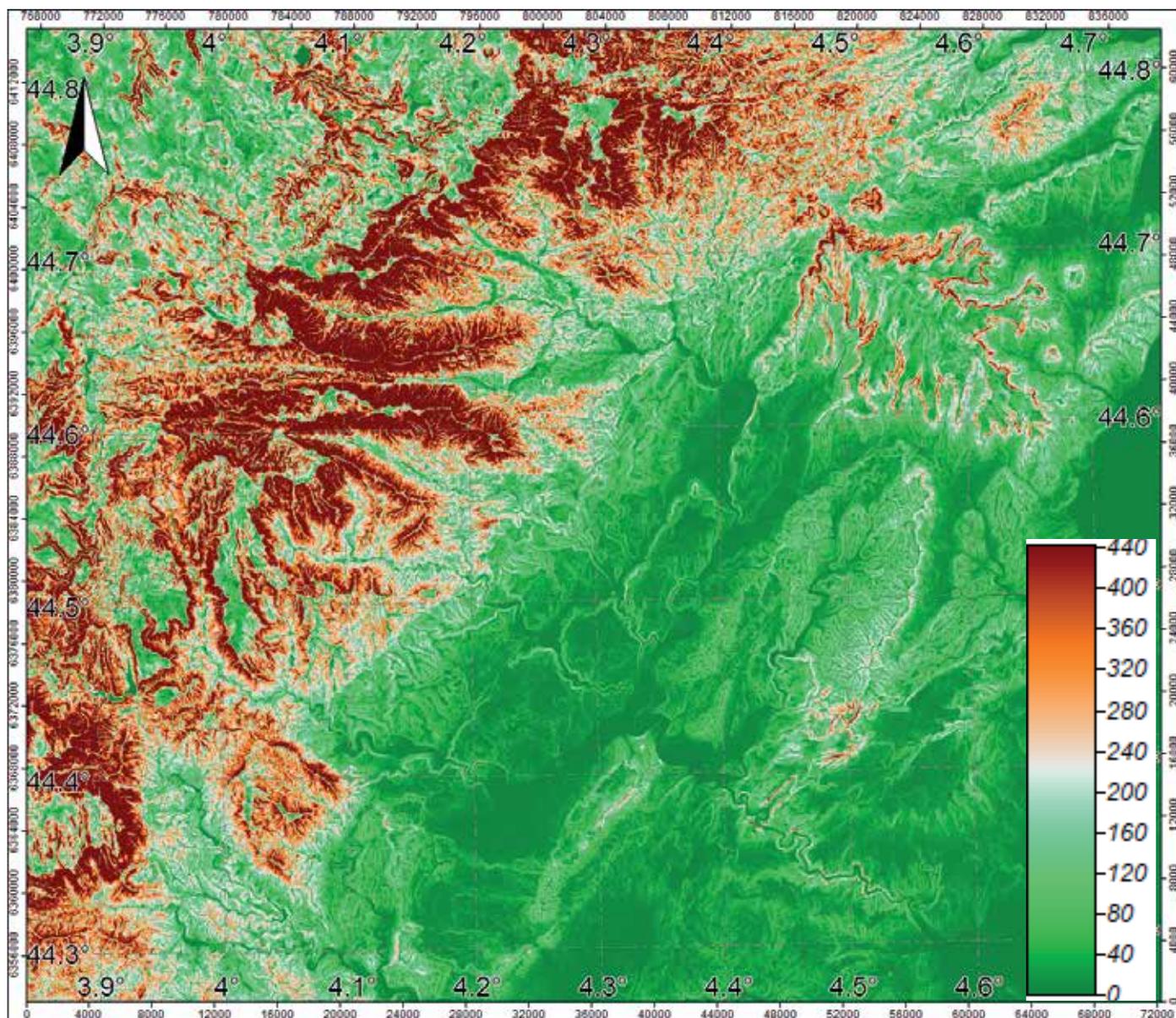


Figure 146 : Le Stream Power Index (SPI) dépend de la pente locale. Sur le bassin versant de l'Ardèche, il fait ressortir la pente importante du haut bassin versant par rapport à la seconde partie, plus plate, des bassins carbonatés. Il donne également du poids au réseau hydrographique qui continue à être vecteur de transport (stream power), même dans des zones assez plates comme la plaine de Vallon Pont d'Arc.

SPI is a highly local-slope related index. It emphasizes the steep slopes of the high watershed of the River Ardèche, contrary to the lowest part of the river. Hydrographical network is also an important parameter of SPI.

Kothyari et al. (2002), désignent un autre indice, le Sediment Transport Index (STI), comme le plus adapté pour représenter l'érosion et le transport sédimentaire par l'intermédiaire des calculs SIG. Cet indice proposé par Moore et Wilson (1992) est également basé sur la carte des pentes et peut s'écrire comme suit :

$$STI = [(m + 1) \cdot (A_s / 22.13)^m \cdot (\sin \beta / 0.0896)^n]$$

Equation 5 : Sediment Transport Index (STI). "As" représente l'accumulation des flux (flow accumulation), laquelle peut se traduire par la quantité de flux accumulée depuis les aires contributives plus haut en altitude par rapport à un point donné. "β" représente la pente locale, m = 0.4 et n = 1.3.

As is the flow accumulation. It determines how much water is accumulated from upstream areas and therefore, it identifies the areas that contribute to overland flow, "β" is the slope, m = 0.4 and n = 1.3.

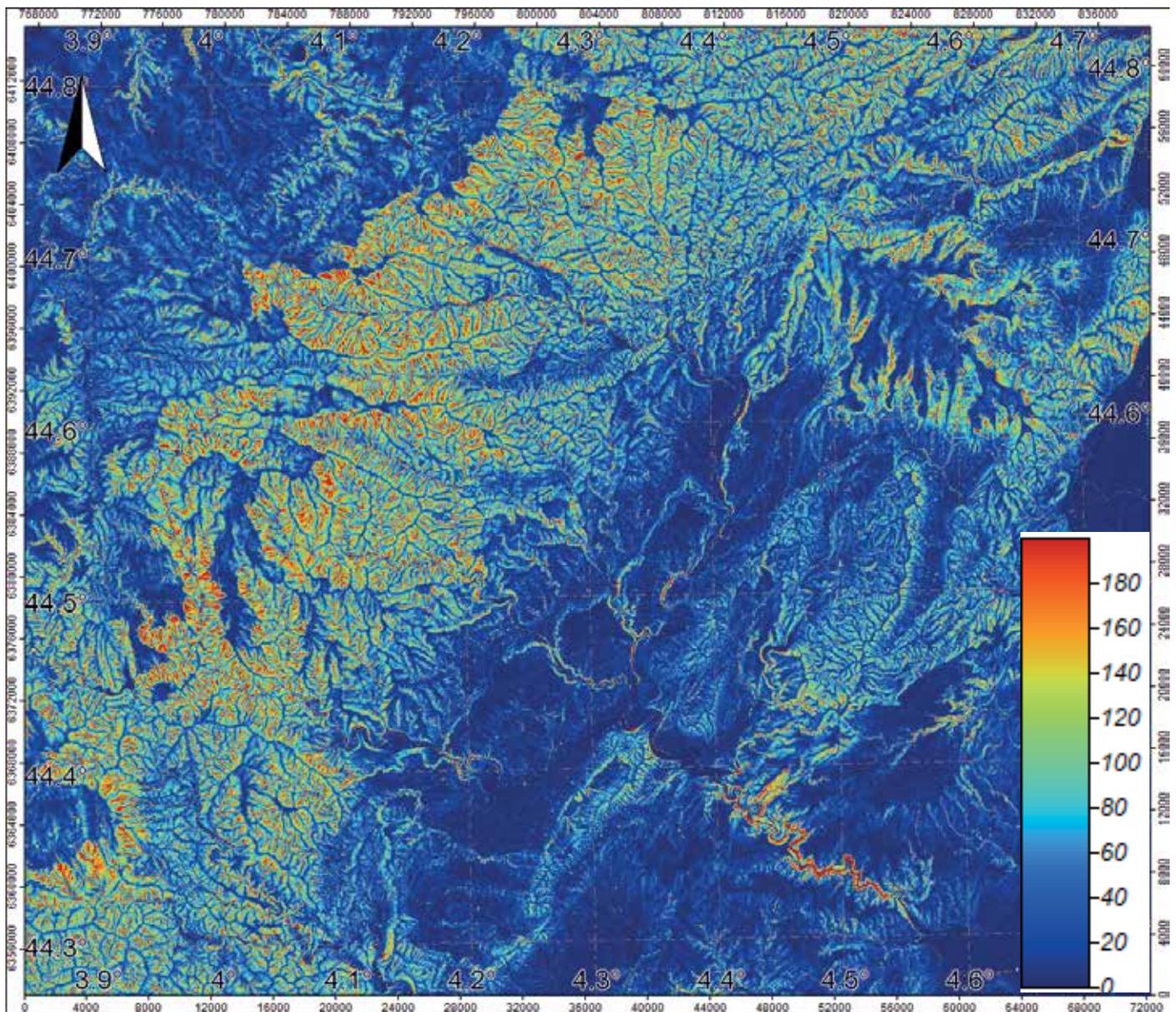


Figure 147 : Le Sediment Transport Index (STI) met aussi l'accent sur les pentes locales et fait donc ressortir le haut bassin versant. Il donne moins de poids au réseau hydrographique dans les zones de replat que le Stream Power Index.

Sediment Transport Index emphasizes local slopes as Stream Power Index. However, it downgrades the importance of the hydrographical network compared to SPI.

Le calcul de l'indice de transport des sédiments sur le bassin versant de l'Ardèche (figure 147) fait également ressortir la haute capacité de transport du haut bassin versant de la rivière. Cet indice est exprimé sans unité. Ses plus hautes valeurs indiquent les capacités de transport les plus importantes, donc, également, le phénomène d'érosion (Bannari et al., 2017).

La description détaillée de ces indices peut être retrouvée dans Bannari et al. (2017) qui en font l'inventaire. Ces indices ont notamment été utilisés pour caractériser des bassins versants à réponse rapide lors des crues éclair de 2014 dans la région de Guelmim (Maroc) dont l'environnement de moyenne montagne, soumis à un climat océanique méditerranéen, est similaire à celui de l'Ardèche.

Les calculs de *Stream Power Index* et de *Sediment Transport index* ainsi que les cartes générées font ressortir l'importance du haut bassin versant de l'Ardèche (figures 146 et 147). Ces deux indices peuvent traduire des dynamiques d'érosion/sédimentation commandées par des contraintes topographiques (pente et aire contributive) (Bannari et al. 2017 ; Moore et Wilson, 1992). Pour l'Ardèche, ils suggèrent le rôle majeur des domaines topographiques et géologiques dans la dynamique d'érosion / sédimentation de la rivière. Le haut bassin versant de l'Ardèche est aujourd'hui soumis à un régime climatique dit « cévenol », avec des versants pentus qui récoltent l'essentiel des précipitations. Les granites imperméables constituent les 2/3 du bassin versant et transmettent rapidement l'eau dans les talwegs, provoquant parfois des crues

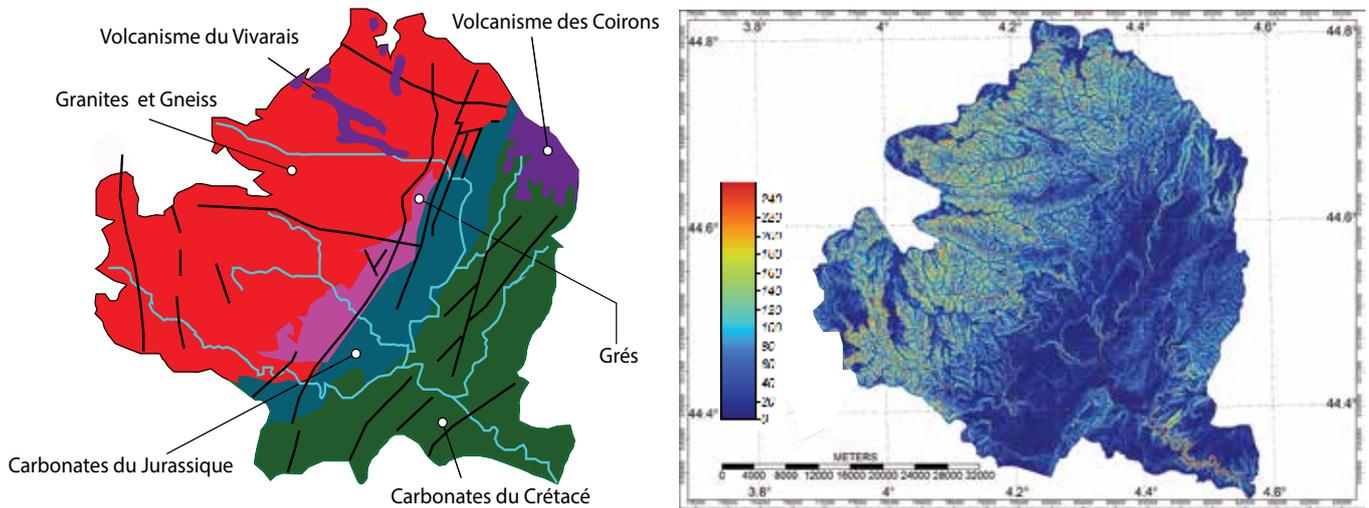


Figure 148 : Confrontation de la carte géologique simplifiée (données : BRGM – Infoterre) avec l'index de transport sédimentaire. La carte géologique simplifiée montre l'étendue spatiale du domaine des gneiss et des granites dans le haut bassin versant (la zone possédant les plus fortes pentes) en opposition aux zones de dépôts sédimentaires situées en aval.

Slope map compared to the + 30 m sediments map. The steep area has mainly a granite and gneiss bedrock while most of the deposits are located out of the granite area (geological map: BRGM – Infoterre).

éclaircs (*flash floods*) (Bravard, 1993) lors des phases météorologiques appelées « épisodes cévenols ». Cette partie du bassin versant peut quasiment être assimilée au domaine des granites et des gneiss. Or, l'analyse pétrographique de la rivière Ardèche et de ses terrasses a révélé un cortège de galets largement dominé par les granites, qui sont également les plus gros galets, sur toutes les terrasses investiguées du Pléistocène. La figure 148 montre que l'association du domaine granitique est donc bien corrélée avec les valeurs les plus élevées de l'index de transport sédimentaire (STI).

Ces indices font également ressortir des valeurs fortes au niveau des escarpements rocheux : versants des gorges de l'Ardèche, bordure du plateau des Coirons. Les zones subverticales sont en effet affectées par la détente mécanique et fournissent potentiellement du matériel détritique. Dans le cas des gorges de l'Ardèche, les éboulis de versant prennent une part importante du paysage dans les zones protégées du cours d'eau comme la Combe d'Arc, le Vallon du Tiourre, à Gournier (au milieu des gorges) et dans le Cirque de la Madeleine (cf. cartes géomorphologiques dans le chapitre 3, figures 59 et 60). Cette érosion des versants est suffisamment importante pour enfouir certains niveaux fluviaux sous parfois plusieurs mètres de gélifrats, comme cela a été constaté au sein de la Combe d'Arc par tomographie électrique, mais également sur la terrasse à + 30 m, presque toujours recouverte à son sommet par les tabliers d'éboulis. Ces cartographies constituent une perspective intéressante pour mieux comprendre la dynamique sédimentaire pléistocène de la rivière. Ces dernières restent cependant des informations semi-empiriques et nécessitent d'être accompagnés et validés par des relevés de terrain.

B) Calibration du « Sediment Transport Index » par l'utilisation des cosmonucléides produits in-situ : une perspective potentielle ?

Les index d'érosion et de transport sédimentaire offrent un aperçu global de la répartition de l'érosion potentielle selon le paramètre topographique (notamment avec les valeurs de pente).

Sur la rivière Ardèche, les paramètres topographiques ont été étayés des relevés de terrain et offrent une opportunité de spatialiser de manière raisonnée ces relevés ponctuels. A l'échelle de ce travail de thèse, les indices topographiques ont simplement permis de confirmer le rôle prépondérant du haut bassin versant dans la dynamique sédimentaire. Nos cartographies restent semi-empiriques. Pour aller plus loin, elles nécessiteraient d'être calibrées à partir de données quantitatives d'érosion et de dépôt mesurées sur le terrain (taux d'incision et recul de versant par exemple).

L'utilisation des nucléides cosmogéniques produits in-situ $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ et $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ permettrait de calculer des taux de dénudation sur les roches quartzieuses (Brown et al., 1995 ; Bierman et Steig, 1996 ; Granger et al., 1996). Ces taux peuvent être intégrés sur des temporalités allant de quelques milliers d'années (Kirchner et al., 2001 ; Von Blanckenburg, 2006 ; Siame et al., 2012 ; Granger et Riebe, 2013) à plusieurs millions d'années parfois (Granger et al., 1997 ; Granger et al., 2001 ; Stock et al., 2009 ; Cyr et al., 2010). Ces méthodes ont permis le développement de nouvelles approches des phénomènes d'érosion (Olivetti et al., 2016) et s'imposent aujourd'hui, par leurs nombreux champs d'application, comme des outils incontournables en géomorphologie (Granger et al., 2013). La détermination du rapport $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$

dans des sédiments quartzeux permet de déterminer des taux de dénudation de l'encaissant interprétables à l'échelle des bassins versants locaux (Schaller et Ehlers 2006). Les index d'érosion et de sédimentation (SPI et STI) présentés ci-dessus gagneraient à être confrontés et calibrés par des taux de dénudation dans le haut bassin versant granitique de l'Ardèche.

L'étude de Olivetti et al. (2016) effectuée sur la bordure Est du Massif central en Nord Ardèche donne des taux de dénudation par $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ entre 40 et 80 mm/ka en domaine granitique pour un temps d'intégration couvrant la période de l'Holocène.

Sur le bassin ardéchois, l'OHM-CV (Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais) étudie les processus d'érosion des sols à très court terme (échelle d'une crue à échelle décennale) sur le petit bassin versant de la Claduègne. Les résultats suggèrent des taux d'érosion de l'ordre du g/L lors des crues (Nord et al. 2016). A Saint Martin d'Ardèche, à la sortie des gorges, l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) évalue la quantité de matière en suspension charriée par l'Ardèche. L'étude montre une tendance globale très faible (environ 2 mg/L) quand le cours d'eau est calme, avec des augmentations très importantes lors d'épisodes cévenols (un pic à 632 mg/L en décembre 2017 par exemple). La modalité d'érosion semble donc majoritairement gouvernée par les épisodes de crue. Il est cependant difficile d'extrapoler ces résultats pour les périodes plus anciennes qui nous intéressent, d'autant plus que les facteurs climatiques et topographiques, comme nous l'avons montré, étaient différents. Néanmoins ces mesures vont également dans le sens d'un bassin versant dont la topographie semble un des contrôles majoritaires de la dynamique sédimentaire de la rivière. A ce titre, l'impact des épisodes de crue sur le transit sédimentaire et l'érosion du bassin versant est clairement mis en avant dans la dynamique actuelle. En était-il de même au dernier interglaciaire ?

3. Discussions.

L'étude des remblaiements fluviaux de l'Ardèche a permis de proposer des volumes et d'analyser la répartition de l'érosion le long du cours d'eau pour les niveaux à + 15 m et + 30 m. Les datations par spectrométrie ESR et U/Th permettent de contextualiser ces volumes sédimentaires dans une temporalité Pléistocène supérieur et de discuter des taux d'érosion du bassin versant de l'Ardèche à l'échelle d'un cycle glaciaire.

3.1 Estimation de taux d'érosion et de sédimentation pour les plaines alluviales.

Les datations ont permis de mettre en relation les niveaux fluviaux de la rivière avec les forçages climatiques (cf. *supra*, chapitre 7). L'étude du volume des corps sédimentaires à + 30 m et + 15 m permet de confirmer l'intensité de la phase d'érosion, vraisemblablement maximale, qui survient à l'interglaciaire MIS 5e. Environ 40 ka séparent l'établissement de la terrasse à + 30 m de celle à + 15 m. Etant donné le passage glaciaire-interglaciaire (Bridgland et Westaway, 2008), et si on fait l'hypothèse d'une érosion totale du corps sédimentaire du MIS6 (terrasse à +30) jusqu'au bedrock sur cette période donnée, on obtient un taux d'érosion d'environ 0.8 m/ka réparti sur l'ensemble du bassin d'accumulation sédimentaire. Cette dernière estimation semble réaliste étant donné la non-linéarité du processus d'érosion et le temps de construction nécessaire à l'établissement de la terrasse à + 15 m (dont nous datons seulement la fin du remplissage).

L'estimation du taux d'érosion de la terrasse à + 15 m est plus délicat, car cette dernière est encore en cours d'incision et d'érosion. Le volume total érodé (475 M m³) moyenné sur 122 ka environ, donne des taux d'érosion très faibles (environ 0.1 m/ka) que nous considérons comme n'étant pas représentatifs au regard du caractère non linéaire du processus d'érosion. Trop peu d'informations sont en notre possession pour analyser une telle dynamique. Néanmoins, les âges obtenus tendent à montrer la rapidité du phénomène d'érosion (quelques milliers d'années seulement). Les résultats tendent à montrer une incision rapide et généralisée du niveau à + 30 m et de son talweg rocheux au cours de la transition pléniglaciaire MIS 6 / interglaciaire MIS 5e. Alors que le niveau à + 30 m est démantelé au début du MIS5e, la mise en place de l'aggradation à + 15 m jusqu'à la fin de ce stade isotopique suggère une réponse sédimentaire du bassin versant en lien avec la transition climatique.

Cette sédimentation rapide interroge la réactivité du bassin-versant durant la transition glaciaire-interglaciaire. L'établissement rapide de la terrasse à + 15 m pourrait être une réaction du haut bassin versant au réchauffement par une production sédimentaire importante. Cette production est peut-être à mettre en relation avec l'augmentation marquée des précipitations sur le Massif Central au

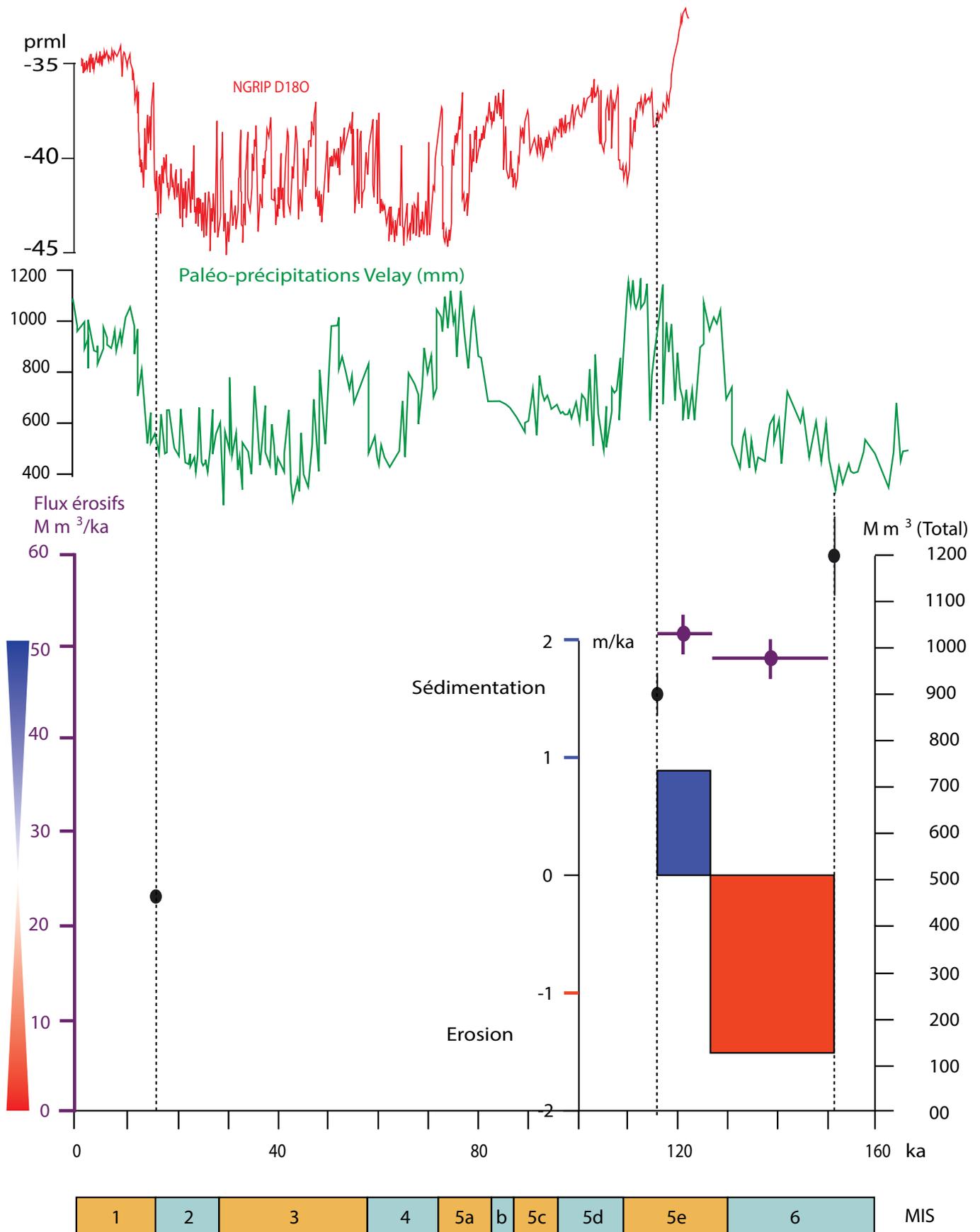


Figure 149 : Taux de sédimentation et taux d'érosion minimums proposés pour les terrasses à + 15 m et à + 30 m au droit de la moyenne vallée de l'Ardèche. L'érosion de la terrasse à + 30 m s'effectue pendant l'interglaciaire MIS5e, tandis que la T+15 s'établit juste après.

Sedimentation and erosion rates for the +15 m and + 30 m alluvial levels. The + 30 m level is eroded during the glacial-interglacial transition while the + 15m grows during the interglacial period (MIS5e).

cours de la transition glaciaire MIS6 /interglaciaire MIS5e (Cheddadi et al., 2005 ; Degeai et Pastre, 2009). Ainsi, la production sédimentaire, maximalisée en tête de bassin versant produirait une charge qui construirait les terrasses plus à l'aval.

Ces réflexions mettent en évidence la rapidité des cycles d'incision/sédimentation en milieu fluvial. Ces dernières portent néanmoins sur un seul cycle sédimentaire d'érosion/sédimentation; qu'en est-il à l'échelle d'un cycle glaciaire jusqu'à plusieurs millions d'années ? Peut-on, à partir des résultats chronologiques des basses terrasses sédimentaires réfléchir aux taux d'incision de la vallée de l'Ardèche?

Les importantes variations des remplissages du cours d'eau au Pléistocène se prêtent mal à l'estimation d'un taux d'érosion de la rivière. En s'intéressant uniquement aux niveaux des terrasses alluviales, on obtient un taux d'incision moyen supérieur à 150 m / Ma, ce qui est conséquent. Si l'on prend en compte seulement l'évolution théorique du talweg rocheux à partir de notre interprétation de l'évolution des banquettes rocheuses, on retombe sur un taux d'incision moyen d'environ 87 ± 7 m / Ma.

Ce taux d'incision est nettement plus en accord avec les interprétations d'Audra et al. (2001) d'environ 50 m/ Ma sur des temporalités longues (à l'échelle du million d'années) de l'érosion dans la moyenne vallée de l'Ardèche. De même, les estimations de dénudation de la bordure Est du massif central effectuées par Olivetti et al. (2016) entre 40 et 80 mm/ka (intégration temporelle sur la période de l'Holocène et du tardiglaciaire) confirment également la pertinence de cet ordre de grandeur.

Ces observations ont beaucoup plus de sens à l'échelle de l'ensemble du Quaternaire. Les terrasses alluviales semi-étagées, en tant que marqueurs de l'incision de la vallée, sont des relais pertinents pour discuter des vitesses d'incision à long terme, en relation avec la géodynamique locale du Massif Central. La synthèse des datations effectuées en

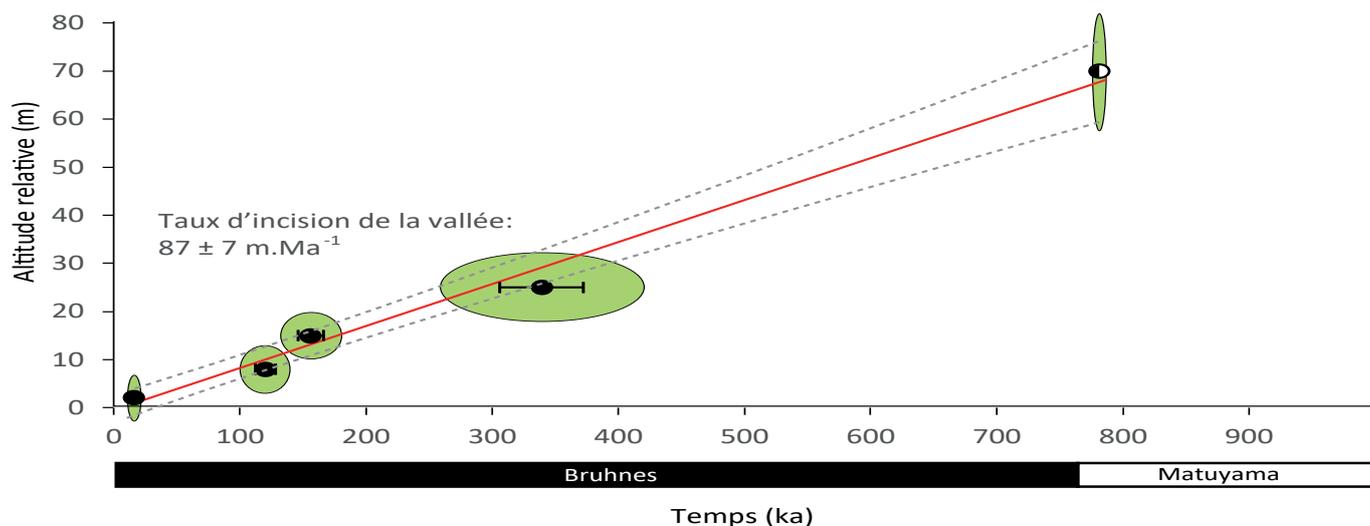


Figure 150 : Synthèse des datations absolues effectuées sur le bassin versant de l'Ardèche pour le Quaternaire moyen et récent. Les taux d'érosion moyens pour les périodes du pléistocène moyen et supérieur semblent suivre une loi linéaire et délivrent un taux d'incision de 87 m / Ma. Les âges utilisés sont ceux obtenus par modélisation hiérarchique Bayésienne, ainsi que les résultats d'Audra et al. (2001). Etant donné la grande marge d'erreur des âges Aluminium/Beryllium pour les périodes plus anciennes (Tassy et al., 2013), ces derniers ne sont pas utilisés ici par principe de précaution. L'altitude relative utilisée pour calculer les taux d'incision est celle des surfaces d'érosion sous les niveaux de terrasse.

Absolute dating synthesis for the entire quaternary period in the Ardèche river. Middle and upper pleistocene period deliver a mean incision value around 87 m / Ma. The ages that are used in this biplot are the ones issues from the posterior density estimation of the Bayesian hierarchical analysis, as well as Audra et al (2011) results. Considering the importance of the Aluminium/Beryllium age uncertainties for more ancient periods (Tassy et al., 2013), those are not used in this study. The relative height values correspond to the erosion surfaces located beneath the fluvial deposits.

Ardèche pour la période d'incision de la rivière au Pléistocène moyen et supérieur est présentée en figure 150.

Le taux d'érosion moyen déduit est du même ordre de grandeur, tout en étant supérieur, que les interprétations précédentes d'Audra et al. (2001) et d'Olivetti et al. (2016) à environ 50 mm et 40 mm/ka. Le corpus de dates permet de rediscuter de cette valeur et de mettre en évidence des vitesses d'incision modérées (87 ± 7 mm/ka) au cours du Pléistocène moyen à supérieur. Cette dernière estimation est cohérente avec les estimations de Molliex et al. (2016) par beryllium 10 (67 mm/ka). Ces valeurs restent cependant des estimations moyennes car il a été montré que les périodes d'incision des talwegs avaient vraisemblablement lieu sur de faibles durées temporelles (quelques ka). Dans le cas du cours de l'Ardèche, ces cycles d'incision-sédimentation, commandés par les cycles climatiques, s'inscrivent également dans une dynamique à plus long terme qui semble être celle de l'orogénèse du massif central (uplift tectonique modéré d'environ 87 ± 7 m / Ma au niveau des gorges de l'Ardèche).

3.2 Un contrôle sédimentaire du cours d'eau à dominante orographique plutôt qu'eustatique.

Terminons maintenant par des considérations plus récentes. Les calages chronologiques sur les phases glaciaires (pour les T+45 m, T+30 m, T+8 m) suggèrent des sédimentations relativement lentes étant donné la baisse des précipitations et la capacité de transport de la rivière en période froide (Cheddadi et al., 2005). Cependant, on pourra également penser qu'au contraire, le régime hydrologique périglaciaire implique un débit soutenu au printemps avec la fonte des neiges dans le haut bassin versant. Les conditions d'établissement de la T+ 15 sont en revanche différentes car elle s'est formée à la fin de la période chaude interglaciaire du MIS5e. Plusieurs hypothèses sont envisagées et sont reliées au rôle du haut bassin versant : La réactivité de ce dernier est aujourd'hui visible à travers les chroniques historiques et holocènes des crues (Mardigny, 1860 ; Sheffer et al., 2003). Cette hypothèse est également soutenue par la cartographie du bassin versant granitique liée aux index topographiques *Stream Power Index* et *Sediment Transport Index* (figures 146 et 147). Avec ces deux contraintes méthodologiques (index et datations), on peut supposer qu'en même temps que le bas système est soumis à l'érosion, le haut bassin versant voit sa production sédimentaire augmenter en réaction à la transition glaciaire-interglaciaire, suivant en cela les observations de l'interglaciaire Holocène dans les Alpes (Arnaud et al., 2012).

Cette augmentation de la production sédimentaire qui fait suite au réchauffement généralisé du MIS5e serait éventuellement à relier avec la dégradation du permafrost dans le haut bassin versant, comme on l'observe aujourd'hui dans les hautes montagnes alpines (Ravel et Deline, 2011 ; Arnaud et al.,

2012). Ce processus engendre une déstabilisation des versants et génère une augmentation du matériel alors qu'en pleine période glaciaire, les sédiments mobilisables restent limités à la couche active. Pour en proposer une cartographie à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche, nous avons réalisé une modélisation théorique de la répartition du permafrost. Ce dernier se base sur le « *Permafrost Favorability Index* » (PFI) développé par Marcer et al. (2017). Cet indice vise à caractériser la présence potentielle de permafrost dans les Alpes françaises en se basant sur des modèles topographiques, des modèles de température, d'ensoleillement, ainsi qu'un inventaire des glaciers rocheux. La version présentée ici reste simplifiée (aucune calibration par la présence de glaciers rocheux, formes liées à des périodes trop anciennes en Ardèche et aujourd'hui disparues) à une relation topographie/température (de l'époque) qui exploite les caractéristiques de répartition du PFI pour cette même latitude. La cartographie proposée représente donc une proposition de la répartition du permafrost pour des conditions pléni-glaciaires type MIS 2 ou MIS 6 (figure 151).

La modélisation a été réalisée avec une hypothèse de température moyenne annuelle pour le LGM (représentatif du maximum du froid de la dernière glaciation). Un delta de 9°C a donc été appliqué par rapport aux conditions actuelles (Karger et al., 2017). Il qualifie une partie du haut bassin versant en « contexte de permafrost continu » (indice > 0.8).

La dégradation du permafrost et l'accentuation des cycles gel-dégel au cours du réchauffement en transition glaciaire/interglaciaire pourrait être une explication au pulse d'aggradation rapide du MIS5e qui semble avoir duré en Ardèche jusqu'à environ 122 ka.

Nos hypothèses convergent toutes sur un point : les morphologies d'aggradation suggèrent majoritairement un lien avec des conditions glaciaires (T+8 m, + 30 m et + 45 m) tandis que les passages aux interglaciaires (début MIS 1 et début MIS 5e) semblent correspondre à des phases d'incision des sédiments fluviaux. Au regard de ces analyses, c'est le haut bassin versant qui paraît conditionner la morphogénèse sédimentaire du cours d'eau plus que les oscillations glacio-eustatiques du niveau de base marin. La réactivité du bassin versant amont couplée aux goulots d'étranglement générés par les morphologies en gorge pourrait ainsi expliquer cette relative indépendance de l'Ardèche vis-à-vis du glacio-eustatisme pléistocène.

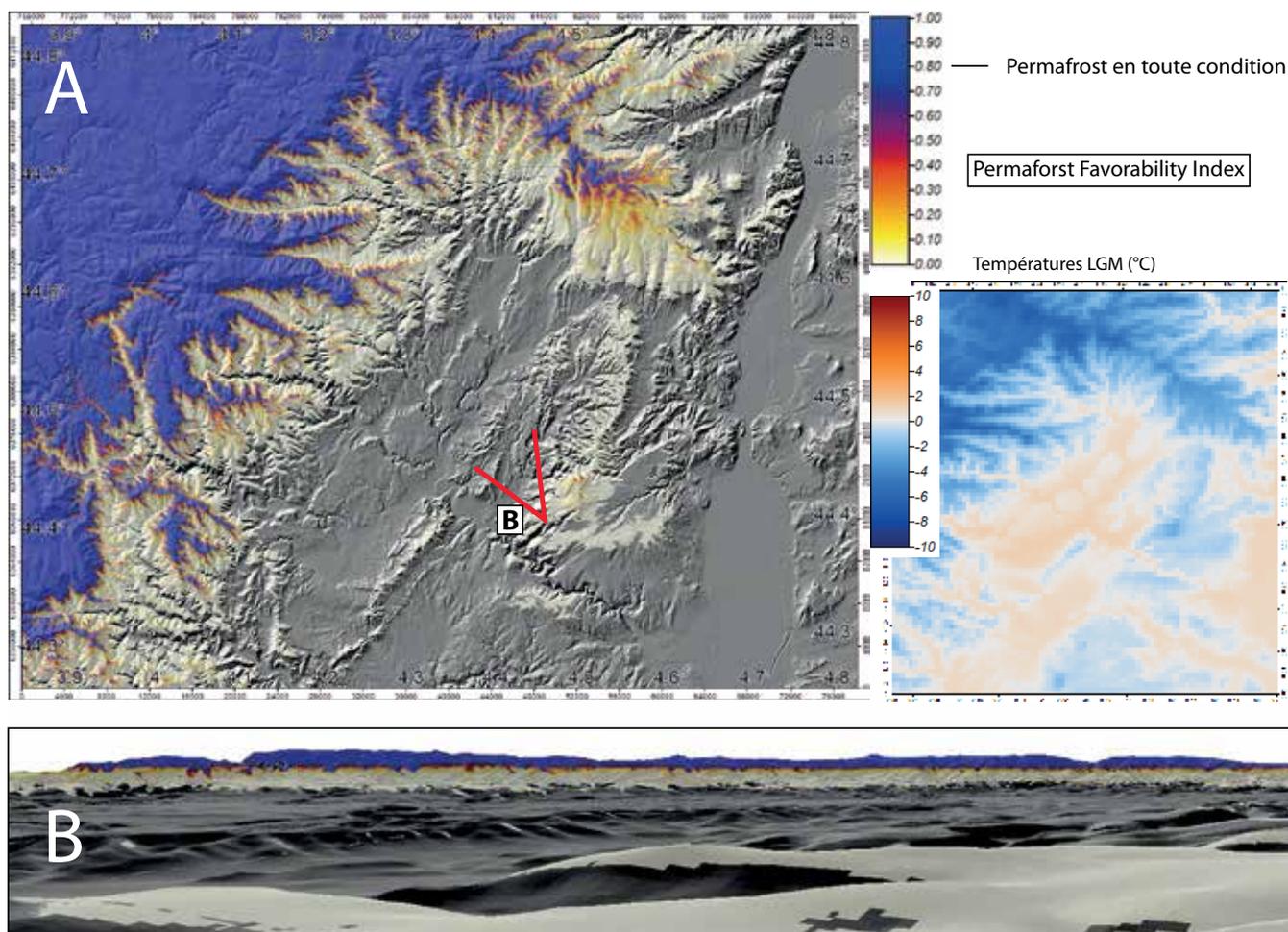


Figure 151 : A : Modélisation théorique du permafrost pour le bassin versant de l'Ardèche avec le Permafrost Favorability Index (PFI) de Marcer et al. (2017), tel qu'il pourrait avoir eu lieu en conditions pléniglaciaires (températures moyennes de 9°C) au deux derniers Maximums Glaciaires mondiaux (MIS 2 et MIS 6). L'hypothèse est celle d'une répartition du permafrost qui couvre entièrement les plateaux et également une partie du haut bassin versant de l'Ardèche. B : Vue cavalière du haut bassin versant de l'Ardèche. La carte des températures est tirée de la simulation mondiale des températures au LGM (Karger et al., 2017). Les parties grisées ne font pas partie de la zone de calcul (pas de probabilité de permafrost).

Theoretical modeling of permafrost distribution on the River Ardèche catchment under full-glacial conditions (about 9 °C of difference) such as Last Glacial Maximum (MIS 2). A: Permafrost theoretical distribution covers the entire Ardèche plateau and a part of the high catchment of the river. B: 3D view of the high River Ardèche catchment. Temperature map from the LGM global temperature simulation (Karger et al., 2017). Grey parts mean no data (and no permafrost probability).

4. Conclusion.

Nos résultats soulignent l'intérêt de conduire des approches morphométriques sur des reconstitutions paléo-topographiques 3D. Les informations quantitatives tirées de ces modèles ont permis d'estimer des volumes sédimentaires en transit dans la rivière, et à l'échelle de la Combe d'Arc, de discuter et quantifier les dynamiques sédimentaires issues des apports de versants. Leur confrontation avec les informations topographiques et climatiques au sein d'une chronologie absolue converge vers une meilleure compréhension des paléo-dynamiques pléistocènes de la rivière, ainsi que des vitesses d'évolution des reliefs selon leurs morphologies, l'encaissant géologique et les évolutions climatiques du Quaternaire.

Ces observations ont notamment pointé le rôle prépondérant du contrôle topographique dans la dynamique sédimentaire de l'Ardèche. Les volumes calculés sur les deux niveaux de terrasse suggèrent également une réactivité importante du bassin versant de l'Ardèche lors des phases de transition climatique comme la transition glaciaire MIS6 / interglaciaire MIS5e et qualifient l'Ardèche de rivière réactive aux contraintes topoclimatiques à l'échelle du Pléistocène supérieur.

Les taux d'érosion des escarpements rocheux du Cirque d'Estre calculés à partir du couplage LiDAR/ERT sur les éboulis ont confirmé les taux de dissolution utilisés par Sadier et al. (2012), ce qui confirme d'autant plus les résultats de leur datation de la fermeture de la grotte Chauvet par l'effondrement du porche.

Les taux d'érosion et d'incision avancés pour les terrasses à + 15 m et + 30 m suggèrent un bassin versant soumis à une lente aggradation sédimentaire en contexte de glaciation, laquelle atteint son maximum au cours des périodes pléniglaciaires (maximums des températures froides et minimums des niveaux marins). En revanche, l'incision des terrasses sédimentaires semble commandée par les phases de transition glaciaire-interglaciaire telles que le début du MIS 5e ou le début du MIS 1 / Holocène.

CONCLUSIONS GENERALES.

1. Les enseignements de la géomorphologie 3D par l'approche multi-méthodes.

Notre recherche doctorale avait pour objectif de souligner les apports de la géomorphologie 3D dans la définition des géographies de sites archéologiques ornés au moment de leurs fréquentations (pré) historiques. Cette attention répondait à une demande de mieux contraindre les caractères topographiques et morphologiques de ces sites. Si certains environnements physiques peuvent donner l'impression d'une relative immuabilité du relief, l'analyse géomorphologique nuance celle-ci en mettant en avant les modifications morphologiques liées à des écroulements, des incisions fluviales ou au contraire des dépôts, qu'ils soient alluviaux, colluviaux, éoliens, etc. Rendre compte des changements avant, pendant et après les périodes de fréquentation humaine de ces sites était un enjeu central. Une attention a été également portée sur la chronologie des événements géomorphologiques qui ont modifié leur environnement physique ainsi qu'à la production d'images rendant compte de l'évolution du relief. Si la cartographie géomorphologique, l'étude des différents processus morphogéniques, les datations des séquences majeures de structuration du paysage physique peuvent suffire pour recomposer par une approche scientifique le relief d'alors, il est plus délicat de transmettre cette construction intellectuelle par le verbe et les cartes. C'est pourquoi l'association de l'approche géomorphologique et de celle aujourd'hui permise par l'acquisition et le traitement des données 3D a retenu toute notre attention et a structuré ce travail.

Trois sites ont été investis dans cette démarche : tous trois associant un site orné, un versant et un cours d'eau : le Roc-aux-Sorciers dans la vallée de l'Anglin (Vienne-France), le site Borologa à la sortie des gorges de la Drysdale (Kimberley-Australie) et le complexe Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche). L'étude des deux premiers a mis en exergue la pertinence de l'approche géomorphologie 3D dans l'étude intégrée du site Borologa et dans la définition des modifications morphologiques du Roc-aux-Sorciers. Sur ces deux sites, la dimension fédératrice du modèle 3D crée un réel espace de dialogue et permet de tisser des liens entre les différents champs de recherche impliqués dans leur étude. Dans l'étude géomorphologique du site Borologa, cette approche a permis de préciser les dynamiques morphogéniques à l'origine des

différents monolithes ornés, de leur disposition sur les rives concaves de la Drysdale river et de préciser le cadre physique contemporain des occupations humaines du site (David et al., 2019 ; Delannoy et al., soumis). L'analyse géomorphologique du Roc-aux-Sorciers permet de proposer la morphologie de l'abri au moment des sculptures et sa disparition du paysage suite à l'écroulement d'un pan de la corniche et à la régularisation consécutive du bas versant de l'Anglin. La définition par l'approche géomorphologique des changements du relief et de leur inscription dans le temps (long et de l'instant pour les écroulements) souligne, si besoin est, la complexité de générer des « images » sur des modifications du relief et de les inscrire dans les temporalités des sociétés passées. Cette complexité invite à corrélérer dans un même modèle (géographique, topographique et conceptuel) les résultats acquis en fonction des dynamiques observées dans les environnements physiques proches et plus éloignés des sites archéologiques étudiés.

C'est à partir de ces constats et de ces méthodes de travail que l'étude du site « Chauvet-Pont d'Arc » a été pensée et construite. L'étude intégrée, multi-échelles et multi-méthodes s'est focalisée sur le recoupement du méandre de la Combe d'Arc, sur la genèse du Pont d'Arc. L'idée force était de créer l'ensemble des données géomorphologiques, chronologiques et 3D permettant de définir les différentes phases de mise en place du Pont d'Arc, avec une attention particulière autour de 30-36 000 ans, au moment des fréquentations humaines connues de la grotte Chauvet : quel paysage voyaient les Préhistoriques de Chauvet. Pour mener à bien cet objectif, nous avons procédé par étapes progressives. Le méandre de la Combe d'Arc-Pont d'Arc a, tout d'abord, fait l'objet d'une contextualisation topographique à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche, puis de la plaine de Vallon Pont d'Arc et de l'entrée des gorges. C'est à partir de ce support topographique 3D que l'étude de l'évolution de la vallée a pu être menée en croisant les données présentes à l'extérieur comme les terrasses alluviales, et celles contenues dans le karst souterrain proche du talweg de l'Ardèche (grottes des Châtaigniers et de Spectaclan). Ce couplage des domaines d'études, par le biais de corrélations de niveaux au sein d'un même modèle 3D, a mis en évidence la proximité altitudinale des terrasses alluviales et de certains dépôts sédimentaires et carbonatés endokarstiques. Ce croisement de données externes et internes a

été majeur dans la définition des cibles de datation aussi bien pour les terrasses alluviales que pour les spéléothèmes : comment contraindre au mieux le modèle morphogénique en recoupant les informations chronologiques et les inscrire dans un même modèle de raisonnement. C'est grâce à cette approche que nous avons pu relever le rôle majeur des niveaux sédimentaires du méandre de la Combe d'Arc dans la compréhension du processus de recoupement et par la même de l'ouverture du Pont d'Arc.

L'étude sédimentologique par fluorescence X et fluorescence en phase solide de la concrétion CHAT-02 a également apporté des informations supplémentaires sur les évolutions de la rivière pour la période du MIS-3 qui correspond à une temporalité climatique englobant celle des occupations de la grotte Chauvet : l'analyse de CHAT-02 suggère un niveau de rivière en dessous de 81.5 m NGF puis qui remonte progressivement avec l'arrivée du maximum du froid, au MIS 2. L'évolution de traceurs comme le phosphore pourrait également indiquer une activité pédologique au cours de la première phase d'occupation de la grotte Chauvet, traduisant un environnement peut-être plus végétalisé de ce secteur qu'habituellement rattaché à cette période.

L'étude de la Combe d'Arc par l'intermédiaire de la prospection géophysique ERT, a mis en évidence la présence d'un niveau de galets sur l'ensemble du méandre de la Combe d'Arc aux environs de 85 m NGF. Cet ancien niveau alluvial qui se raccorde à la terrasse + 15 m, serait, au niveau de la Combe d'Arc, l'ultime expression du passage pérenne de l'Ardèche dans l'ancien méandre avant que le cours de la rivière ne le quitte définitivement pour s'établir sous l'arche du Pont d'Arc. Ce repère morphogénique fixé dans la spatialité du site « Chauvet-Pont d'Arc », il devenait essentiel de le caler dans le temps.

La campagne de datations ESR réalisée au sein de la Combe d'Arc et à l'échelle des gorges de l'Ardèche avait pour objet de construire un modèle chronologique le plus robuste possible de l'évolution à la fois du méandre et de la rivière au cours du Pléistocène supérieur. Confronté au modèle d'emboîtement relatif des formes établi à partir des investigations sur la topographie du canyon, des terrasses alluviales, ainsi que des dépôts souterrains le couplage ESR/U-Th a conduit à proposer une hypothèse forte de mise en place des terrasses alluviales en lien avec les cycles climatiques de 100 ka. La datation du toit de la terrasse d'abandon à + 15 m vers 116 +/- 6 ka est majeure dans la reconstitution morphogénique du contexte physique de la grotte Chauvet : elle marque l'ouverture pérenne de l'arche. Les communautés humaines qui ont fréquenté la grotte Chauvet et contribué à son ornementation ont bien vu une morphologie d'arche au niveau de l'actuel Pont d'Arc.

Si cela avait pu être pressenti dans des travaux antérieurs sous l'angle de « complexe de site » associant les sites archéologiques et ornés à de forts marqueurs topographiques ou morphologiques extérieurs (Feld et Basso, 1996 ; Gunn, 1997 ; David et Thomas, 2016), nous pouvons aujourd'hui, par les

résultats de notre travail confirmer que le triptyque Pont d'Arc, méandre abandonné et grotte Chauvet existait avant et pendant les occupations de la grotte Chauvet.

Cette découverte ouvre de nouveaux horizons et nous permet d'élargir notre questionnement à celui de l'importance des paysages et du relief pour les communautés passées et dans le cas de Chauvet, du Paléolithique supérieur.

La présence de l'arche du Pont d'Arc au temps des fréquentations connues de Chauvet renforce donc la notion de « complexe de site » à l'échelle du Cirque d'Estre et confirme la nécessité dans l'approche intégrée de sites archéologiques, de prendre en compte le paysage et l'environnement physique extérieur comme partie intégrante du site.

Le rapprochement entre l'environnement intérieur de la grotte, du site, et son espace physique extérieur n'est pas nouveau en soit. Beaucoup de préhistoriens ont fait état, dans leurs recherches, de liens potentiels entre l'Homme et les paysages au cours de la préhistoire (Sherratt, 1996 ; Lemaire, 1997 ; Darvill, 1999 ; Strang, 2008 ; 2016 ; Darvill, 2016). La méthode de la géomorphologie 3D, telle que nous l'avons proposée au cours de ce travail, et les résultats qui en découlent, légitiment donc l'approche de la Landscape archaeology sur des sites aussi anciens que celui de Chauvet.

La prise en compte du contexte physique d'un site archéologique, signifie donc s'intéresser au site non pas comme un objet en soit, mais comme faisant partie d'un système, à l'échelle d'un complexe de sites jusqu'à celle d'une vallée. Les expériences et découvertes réalisées par l'intermédiaire des travaux de reconstitution topographique et géomorphologique du Roc-aux-Sorciers, du site Borolaga et enfin du complexe Chauvet/ Pont d'Arc/ Combe d'Arc démontrent l'intérêt de poursuivre cette approche sur d'autres sites ornés emblématiques (figure 152).

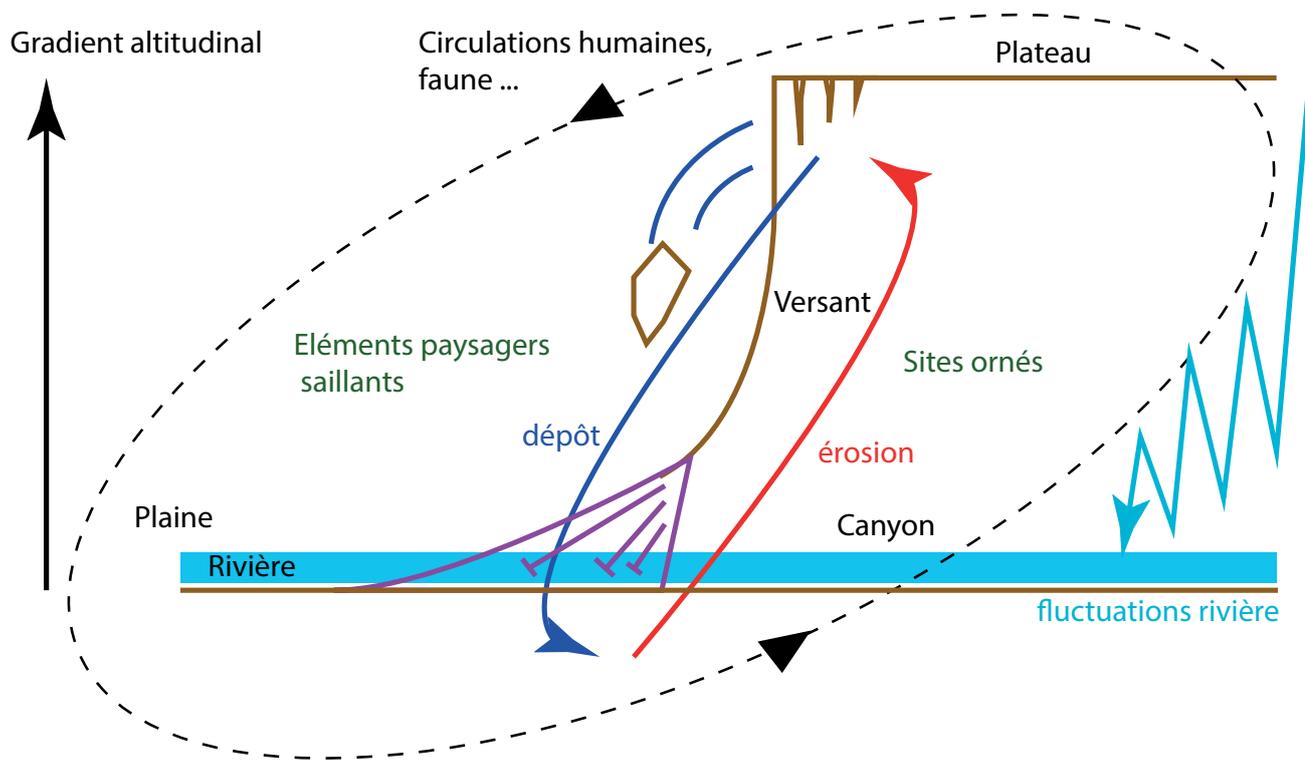


Figure 152 : Essai de représentation conceptuelle de la place du paysage, du relief, dans son interaction avec l'Homme à la Préhistoire.

Conceptualization attempt of the landscape place and interaction with human occupations during prehistoric ages.

2. Utiliser les reconstitutions des paléo-reliefs.

Au cours de ce travail de thèse, nous nous sommes attachés à reconstituer certaines paléo-topographies à partir de l'investigation géomorphologique 3D. Notre travail de reconstitution a donc essentiellement porté sur les formes et visait à donner une réalité physique (modèle 3D) à ces observations et interprétations. Comme nous l'avons relevé dans le dernier chapitre de ce mémoire, ces modèles peuvent être réutilisés à de nombreuses fins. Les potentiels d'utilisation sont importants et tous n'ont pas été explorés dans ce travail. Parmi les possibles débouchés des reconstitutions des paléo-reliefs, l'un d'entre eux est celui de la modélisation de fluides (eau, vent) ainsi que des processus d'érosion/dépôt. Dans ce dernier cas, bénéficier d'un modèle des paléo-topographies permet de s'affranchir de la notion de problème inverse consistant à reconstituer un ancien paysage à partir des formes érodées. Il est alors possible de procéder plus naturellement en érodant directement la reconstitution, qui sert donc d'instance de contrôle et de validation du processus modélisé. Ces travaux de reconstitution pourraient notamment appuyer les modélisations d'écoulement des glaciers (Seguinot et al., 2018), méthodes nécessitant d'être validées par une approche géomorphologique descriptive.

3. Le travail de l'eau.

La même approche peut être conduite pour les modélisations des paléo-circulations d'une rivière. Le modèle 3D des gorges de l'Ardèche a permis de commencer des travaux de simulation des flux de l'Ardèche afin de retrouver les paléo-dynamiques de la rivière au sein des anciens méandres, désormais abandonnés, de Montingrand et de la Combe d'Arc. Ce travail encore préliminaire, mené en collaboration avec le laboratoire LOCIE (Université Mont Blanc), a pour objectif de visualiser les anciennes dynamiques de la rivière par rapport à des morphologies qui ne sont plus en fonctionnement aujourd'hui. Bien qu'encore en développement, cette approche a été testée sur la crue de 1890, dernier événement connu du passage de l'eau dans le méandre de la Combe d'Arc (figure 153). L'observation des vitesses d'écoulement et de l'effet d'accélération des flux générés par l'étréouitesse du passage du Pont d'Arc permet de retrouver les dynamiques morphogéniques observées lors de la crue. Cette approche pourrait maintenant être conduite sur les modèles des paléo-topographies pour étudier les dynamiques de la rivière au nord de la butte de Montingrand et ainsi mieux comprendre l'évolution paléogéographique de la vallée de l'Ardèche en amont des gorges.

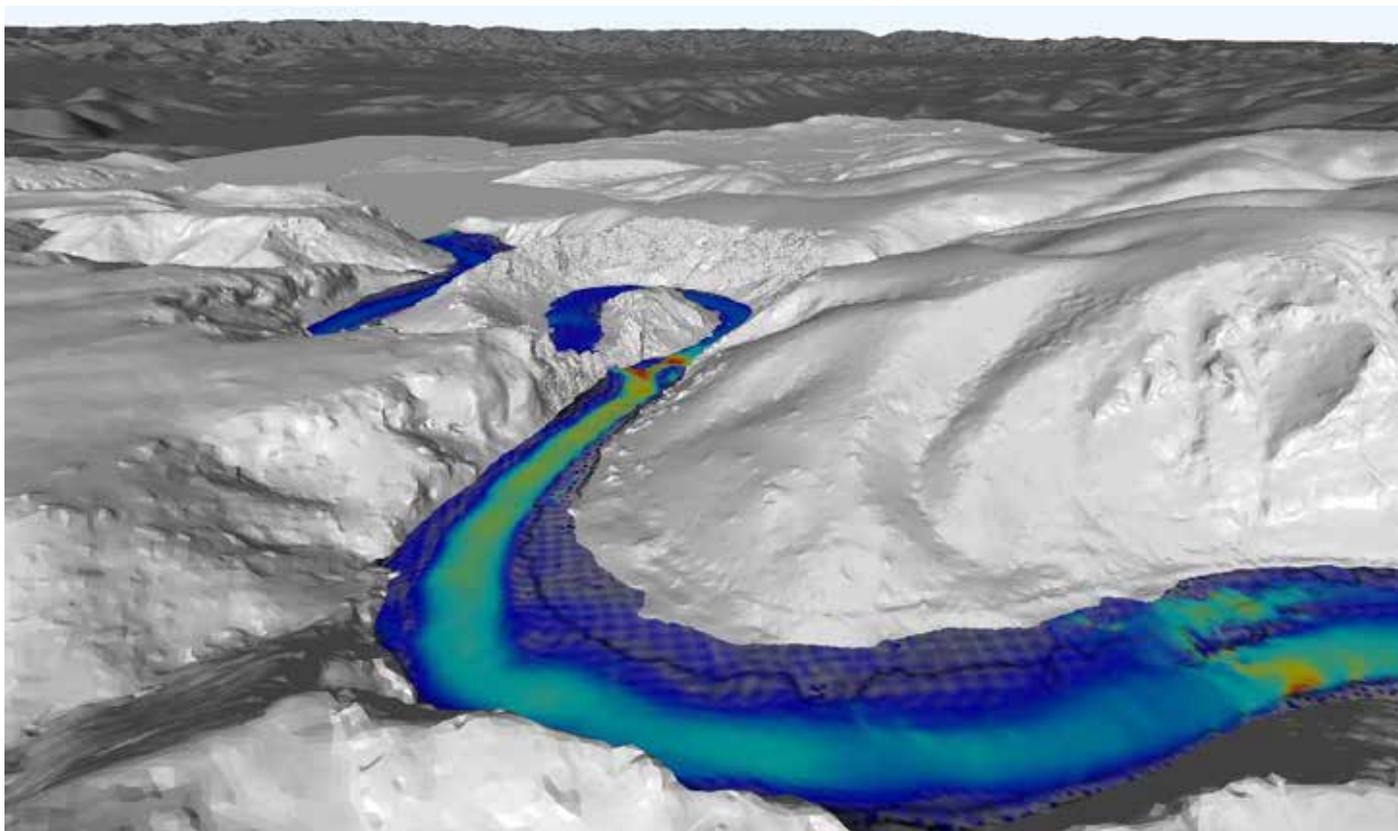


Figure 153 : Modélisation de la crue de 1890. Effectué sous GERRIS 2D partir du MNT de l'Ardèche actuelle, il a été possible d'obtenir une simulation des vitesses d'écoulement de la colonne d'eau au sein d'un modèle topographique. L'eau repasse dans le méandre et est accélérée par le conduit forcé que représente le passage du Pont d'Arc.

CFD modeling of the 1890 flood. GERRIS 2D software was used to obtain speed vectors and to show the accelerating effect of the narrow Pont d'Arc passage on the flows.

4. Le rôle de la lumière

Enfin, les travaux de reconstitution en 3D de l'environnement des sites archéologiques peuvent mener à des reconstitutions visuelles dans un objectif qui peut être scientifique, mais également de l'ordre de la communication et du partage.

La reconstitution « réaliste » de paysages n'était pas au cœur de ce travail doctoral. Notre approche est restée cantonnée aux caractéristiques morphologiques, à l'évolution du relief soumis aux processus de versant et de rivière. Néanmoins il nous semble logique de terminer ce travail par des reconstitutions visuelles à destination d'autres domaines de recherche que la géomorphologie ainsi que d'un public plus large.

Pour le site du Roc-aux-Sorciers, le visuel final que nous proposons représente les paléo-reliefs au moment de la première phase d'occupation magdalénienne connue, à 18 000 ans cal. BP (figure 154).

Les plafonds effondrés de l'abri sous roche ont été reconstitués en surplomb du site archéologique à partir de la largeur moyenne des gros blocs effondrés. Cette zone a été floutée par un procédé d'estompe pour représenter l'incertitude visuelle quant aux morphologies de détail de l'escarpement pré-effondrement, comme il a été procédé pour restituer l'entrée de la grotte Chauvet (Jaillet et al.,

2017).

Concernant le site australien, nous présentons ici le visuel d'ensemble des sites Borolaga. Cette prise de vue en perspective axonométrique (figure 155) apporte la cohérence spatiale nécessaire au travail de reconstitution géomorpho-archéologique à l'échelle du monolithe principal (Delannoy et al., *soumis*).

Les questionnements autour du porche d'entrée de la grotte Chauvet et les enjeux soulevés par les problématiques de la lumière dans cette cavité (Thibault et al., *soumis*) nous ont poussés à aborder ces questions, de manière très succincte, au travers du complexe de la Combe d'Arc. La quantité relativement importante d'informations récoltées sur ce site a permis d'avoir suffisamment d'éléments pour tenter une reconstitution à l'échelle de la Combe d'Arc, au moment du recoupement du méandre il y a environ 120 000 ans. La sensation de réalisme dépend notamment de la notion de lumière et sa répartition sur la scène que l'on souhaite montrer. Avoir un modèle en trois dimensions des morphologies reconstituées permet de modéliser directement la répartition des rayons du soleil et des ombrages potentiels sur ces dernières. Cette tentative a donc été réalisée au moyen de la méthode

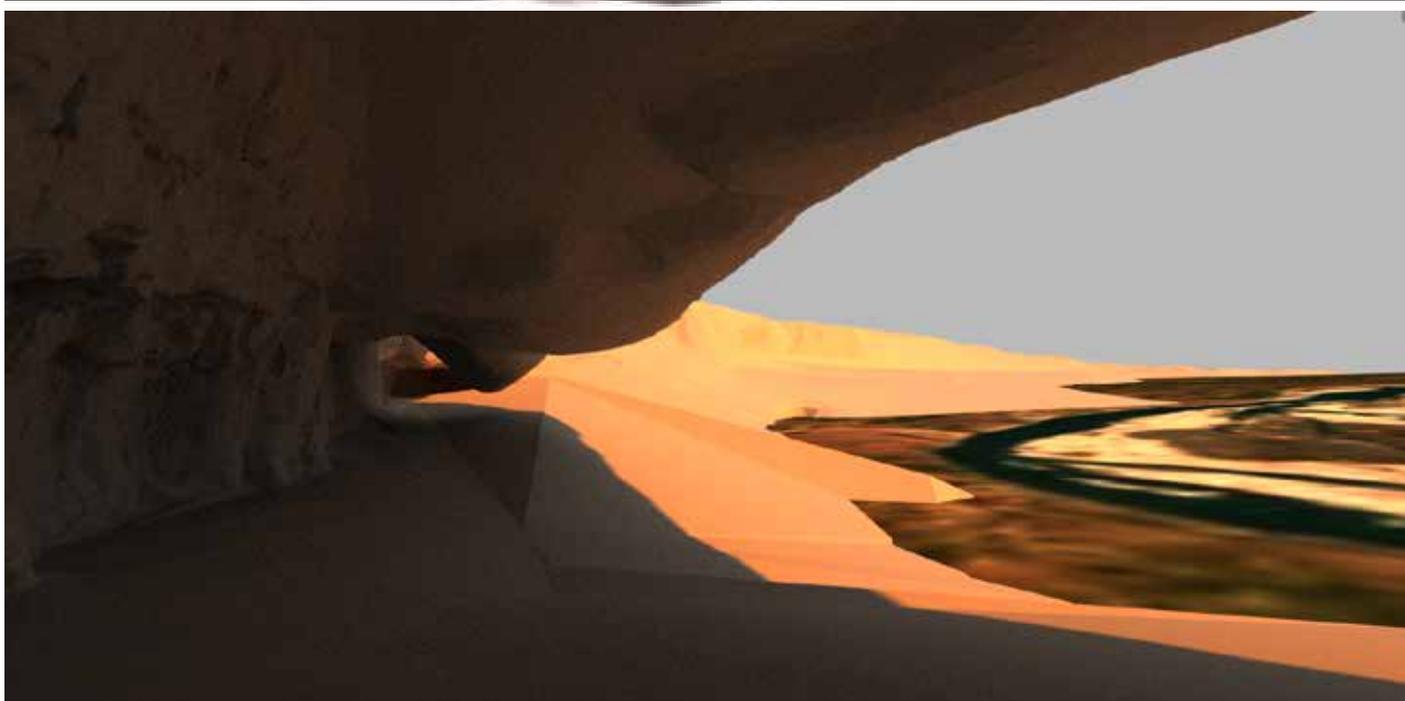
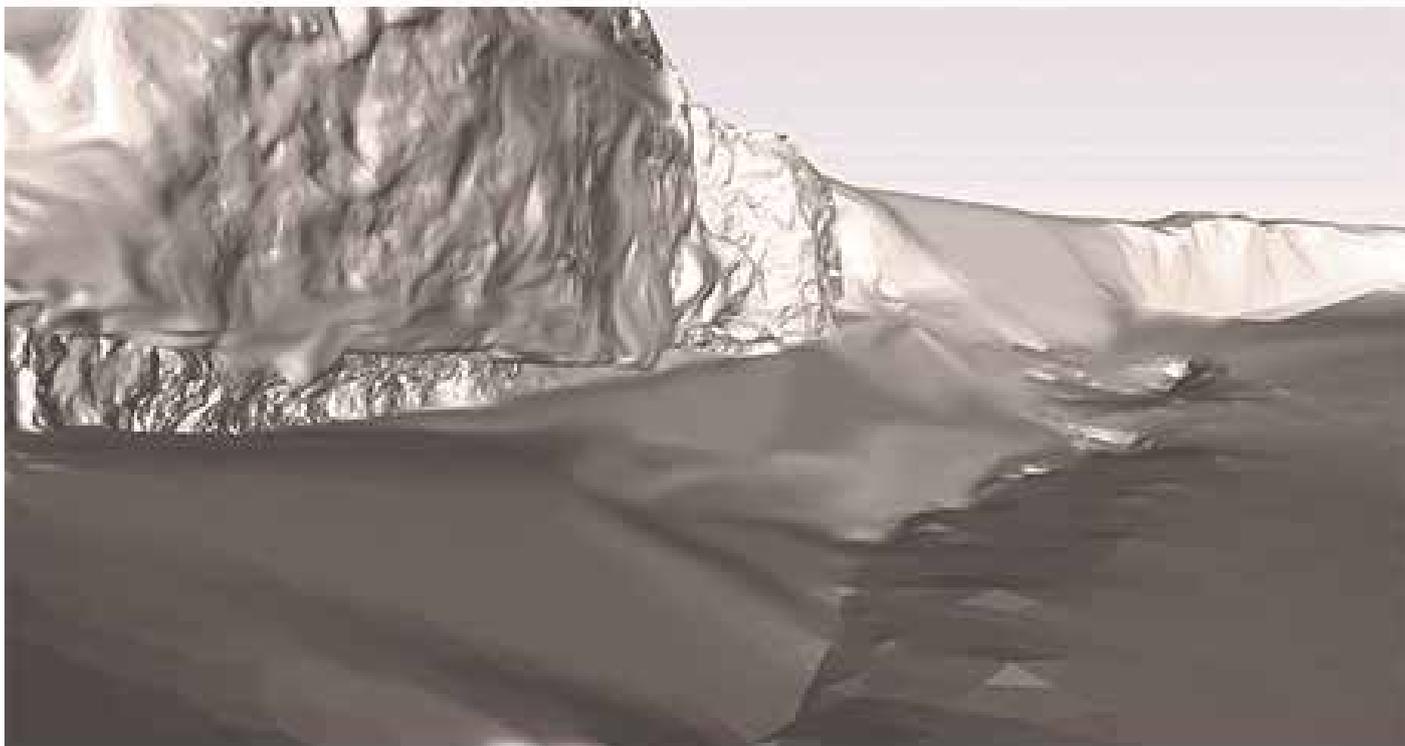


Figure 154 : Proposition de reconstitution de l'environnement physique du Roc-aux-Sorciers lors de la phase d'occupation du Magdalénien moyen. On peut observer les plafonds ornés s'avancant en porte à faux du site archéologique. Depuis l'intérieur de ce dernier, près des bas-reliefs sculptés, la rivière est bien visible. Le site reste néanmoins perché à + 4 m par rapport à la plus basse terrasse alluviale, rapportée au Tardiglaciaire/Holocène.

Reconstruction interpretation of the Roc-aux-Sorciers physical environment during the Middle-Magdalenian occupation stage. Ornamented roofs have been reshaped according to the mean width of the fallen rocks. We can note that the site which was then visible from the river, still was perched about + 4 m above the late glacial alluvial bank.

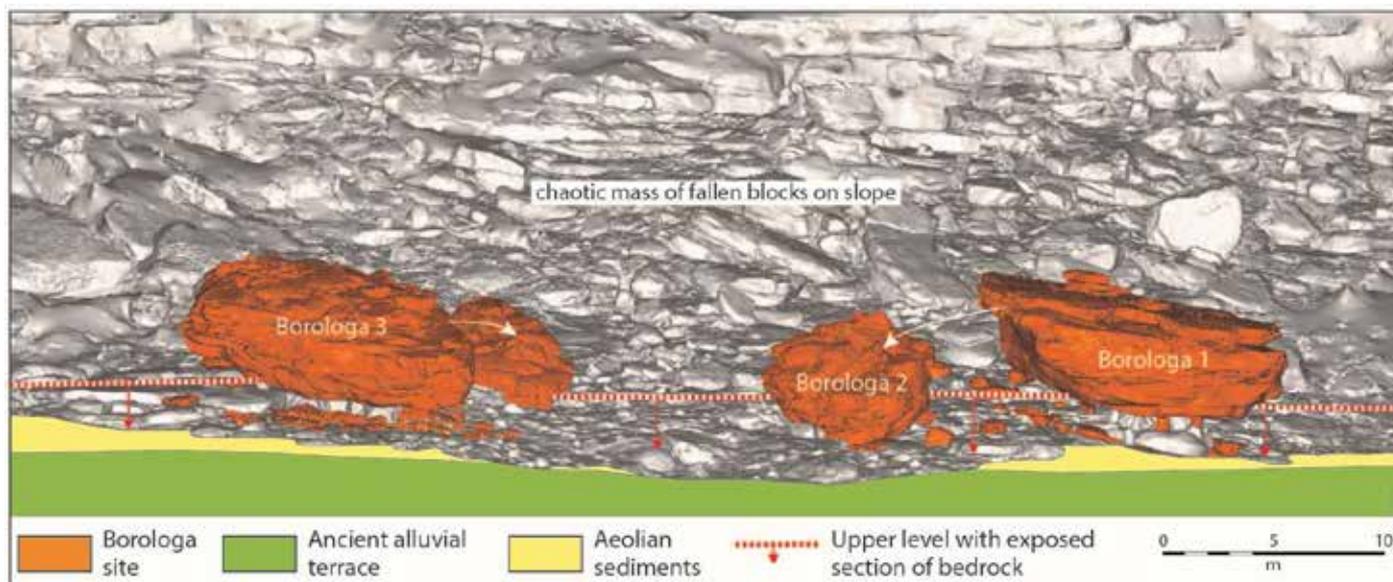


Figure 155 : Vu axonométrique générale du contexte géomorphologique des blocs déplacés autour des monolithes Borologa. Delannoy et al., soumis.

Geomorphological context of the three Borologa sites (Artwork Jean-Jacques Delannoy and Kim Génuite).

From : Delannoy et al., submitted).

statistique Monte-Carlo de raytracing avec Blender (figure 156). C'est une ouverture de l'arche bien plus petite qui s'offre à nos yeux, traversée par un niveau à + 15 m s'étendant pleinement dans la Combe d'Arc et présentant les caractéristiques d'une morphologie d'aggradation en chenaux anastomosés. L'arche a été légèrement floutée pour exprimer l'incertitude géométrique de la voûte, qui était vraisemblablement un peu plus basse qu'aujourd'hui. Les chenaux anastomosés de l'Ardèche pléistocène sont inspirés des cours d'eau périglaciaires actuellement visibles.

5. La reconstitution : un travail à l'interface des sciences et des arts.

Dans le travail de reconstitution, l'approche scientifique a ici joué un rôle essentiel. Elle est à la base même du processus : elle l'impulse, lui donnant une direction et une base. Néanmoins, ce travail a nécessairement ses limites. Le travail scientifique pose les bases théoriques et expérimentales de ce qui a potentiellement pu être mais se doit de rester dans le doute et d'évaluer l'incertitude de ce qu'il produit. Dans le cadre d'une reconstitution réaliste des paléo-reliefs et paléo-paysages, on sort du domaine de la science car l'objectif n'est plus seulement scientifique, mais bien d'utiliser l'artifice, la *mimesis* (Auerbach, 1968), pour donner à voir et mieux transmettre. Un travail de reconstitution réaliste doit donc nécessairement se défaire partiellement de la rigueur et de la réserve scientifique pour exprimer non plus seulement le résultat de mesures et d'observations, mais une émotion. Qui alors mieux que l'artiste pour continuer ce travail de reconstitution et le transmettre ?

Car c'est l'œuvre, avec tout son mystère, qui est

attendue et non la simple reconstitution 3D des morphologies disparues.

Entre réalisme et fiction, innovations infographiques et techniques, le travail de documentation pose aujourd'hui plus fortement que jamais la place de l'image et son rôle dans le processus de transmission. Image réelle ou image construite, instantanée ou filmée. Image à l'image de Lussas, petit village d'Ardèche dont le festival du documentaire, désormais mondialement connu, fait la promotion des « docu-fiction », nouvel espace de liberté dans le monde moderne, nouveau moyen d'expression et de transmission, entre les sciences et les arts. L'image produite découle donc de choix, d'une implication et d'une orientation qui ne sont plus seulement l'affaire du scientifique, mais aussi celle de l'artiste, ou plus simplement : de la sensibilité de l'être humain.



Figure 156 : Reconstitution visuelle de la Combe d'Arc lors de la phase terminale du recouplement, il y a 116 000 ans. L'ouverture de l'arche est nettement moins importante qu'aujourd'hui étant donné le niveau d'aggradation sédimentaire, et l'érosion de la voûte moins avancée qu'elle ne l'est actuellement. Le stade représenté ici marque l'abandon de la Combe d'Arc : les flux de la rivière commencent à se partager entre le méandre et le recouplement qui au fur et à mesure de son érosion latérale, devient le passage prioritaire de la rivière.

Visual reconstruction of the final phase of the meander cutoff, about 115 000 years ago. The Pont d'Arc opening is much less impressive than today because of the high river sediment level and because erosion processes are only starting to drill the cutoff. The river will slowly abandon its meander for the new passage, under the newly created natural bridge.

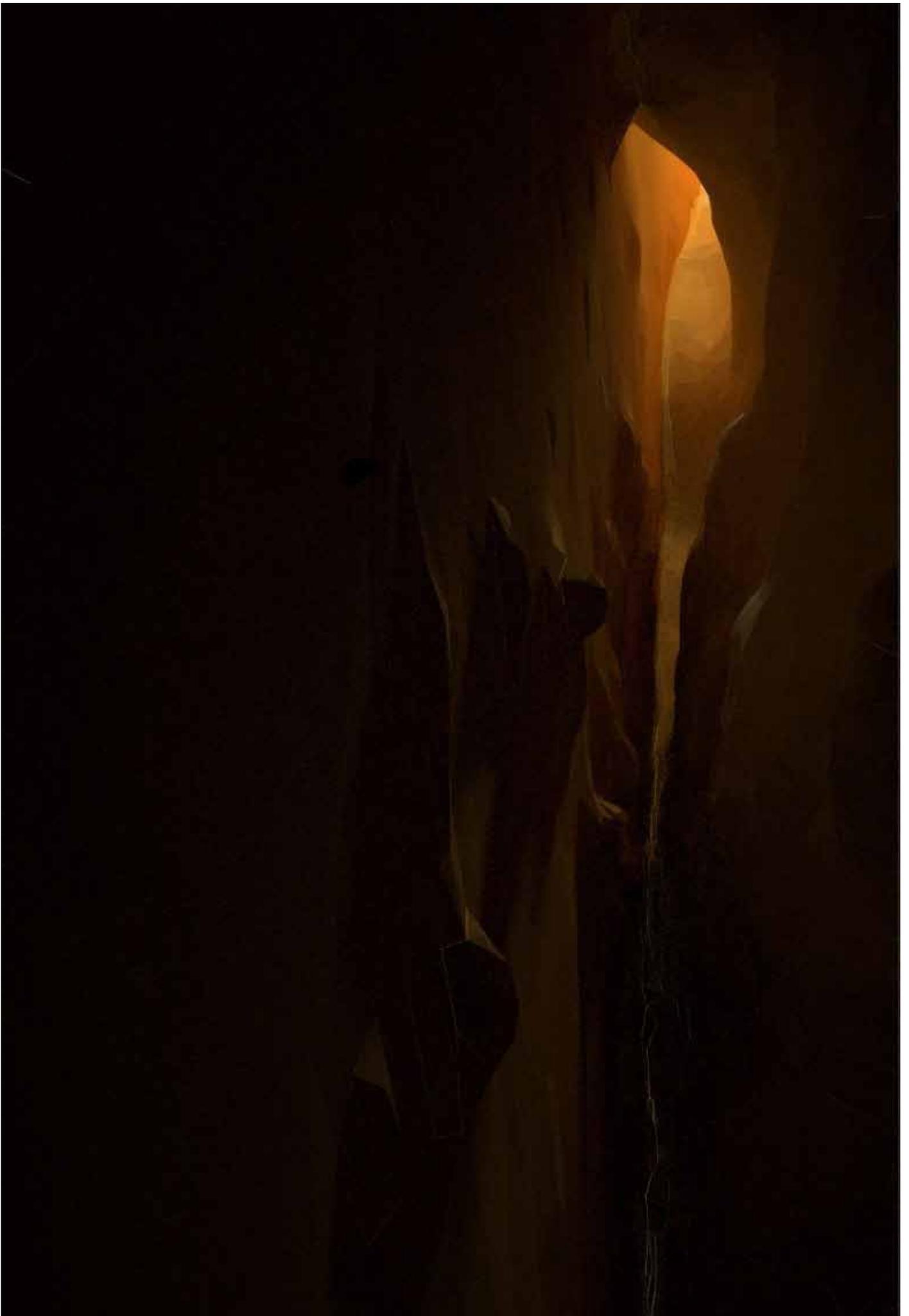
Au terme de ce travail, j'ai tenté de reconstruire la lumière du soleil entrant dans la grotte Chauvet, par la paléo-entrée reconstituée en 3D par Sadier (2013). La tentative repose donc sur le modèle 3D de la paléo-entrée de Chauvet, relié au modèle de la Combe d'Arc. Elle a été effectuée par méthode stochastique de lancer de rayons, pour un solstice d'hiver, avec une lumière de fin d'après-midi. Bien que basée sur des mesures, des observations sur le terrain et une topographie détaillée, la justification même de ce rendu est axée sur l'importance de lumière qui en devient alors l'un des objets principaux (figure 157).

Or, cette dernière est également dépendante de la perception de tout un chacun, de la variabilité de nos yeux et du contexte débouchant sur cette visualisation. Nous, hommes modernes, pouvons-nous vraiment nous mettre à la place des êtres humains du Paléolithique supérieur et observer cette cavité avec leur regard ? Cette reconstitution ne dépeint donc pas la réalité mais simplement une conjecture. Elle représente une proposition de reconstitution non pas du paléo-paysage vu par les sociétés préhistoriques, mais de mon paysage de la grotte Chauvet.

Figure 157 : Que pouvaient donc bien voir les êtres humains de la grotte Chauvet une fois entrés dans la cavité ? Proposition de reconstitution de la lumière pénétrant par le porche d'entrée reconstitué de la cavité, il y a 36 000 ans. La lumière pénètre profondément dans la grotte et éclaire une partie des sols de la salle des Bauges, ainsi que certaines zones des parois Ouest de la cavité.

What ever could the Chauvet cave people see once into the cave? Proposal of reconstruction of the sunlight penetrating inside the Chauvet cave (after the reconstructed paleo-entrance model (Sadier, 2013)). The Lightpath is reflected by the salle des Bauges soils. It also lightens up some parts of the western walls of the cave.





BIBLIOGRAPHIE

A

- Airvaux, J., Chollet, A., Clottes, J., 2001. L'art préhistorique du Poitou-Charentes : sculptures et gravures des temps glaciaires. La Maison des Roches. *L'Anthropologie*, 109(4), 183-184. Doi : 10.1016/j.anthro.2005.09.003
- Alimen, H., 1950. Indications climatiques dans les couches archéologiques d'un abri (sol polygonal de Mouthiers, Charente). *Bulletin de la Société Préhistorique Française*. 47, 286–288. <https://doi.org/10.3406/bspf.1950.2800>
- Ambert, P., 1976. Les ponts naturels de Minerve (Hérault). Etude géomorphologique. *Méditerranée*, 25, 43–53. <https://doi.org/10.3406/medit.1976.1664>
- André, D., Chabaud, M., 2000. Le plus grand mammouth totémique de la préhistoire ? Le Pont-d'Arc et son possible rapport avec l'ornementation de la grotte Chauvet (Vallon-Pont-d'Arc, Ardèche). *Préhistoire Sud-Ouest*, 19–39.
- Antoine, P., 1994. The Somme valley terrace system (northern France); a model of river response to Quaternary climatic variations since 800,000 BP. *Terra Nova*, 6, 453–464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1994.tb00889.x>
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Trans. AIME*, 146, 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Arnaud, F., Révillon, S., Debret, M., Revel, M., Chapron, E., Jacob, J., Giguet-Covex, C., Poulenard, J., Magny, M., 2012. Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology. *Quaternary Science Reviews*, 51, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.07.025>
- Arnaud-Fassetta, G., Landuré, C., 1997. *Occupation du sol et contraintes fluviales dans le delta du Rhône (France du Sud)*. Éditions APDCA Sophia Antipolis, 285-308, 1997 (hal-00878323) 285–308.
- Audra, P., Camus, H., Rochette, P., 2001. The-middle-Ardeche-valley-and-the-Jurassic-plateau-karst-Paleomagnetic-dating-of-Pliocene-and-Quaternary-evolution-Combe-Rajeau-aven.pdf. *Bulletin de la Société Géologique de France*. 121–129.
- Auerbach, E., 1968. Mimésis, la représentation de la réalité dans la littérature occidentale, traduit de l'allemand par Cornélius Heim, Paris, Gallimard, 1968, 559 p.

B

- Bahain, J.-J., Falguères, C., Laurent, M., Voinchet, P., Dolo, J.-M., Antoine, P., Tuffreau, A., 2007. ESR chronology of the Somme River Terrace system and first human settlements in Northern France. *Quaternary Geochronology*, LED 2005 2, 356-362. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2006.04.012>
- Banks, W.E., 2015. Constructing chronologies for the late Middle Paleolithic and Upper Paleolithic: limitations and means to overcome them. *World Archaeology*, 47, 585-600. <https://doi.org/10.1080/00438243.2015.1052544>
- Bannari, A., Ghadeer, M., El-Battay, A.E., Hameed, N., Rouai, M., 2017. Detection of Areas Associated with Flash Floods and Erosion Caused by Rainfall Storm Using Topographic Attributes, Hydrologic Indices, and GIS. *Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-information Technologies*, 155–174. https://doi.org/DOI:10.1007/978-3-319-51844-2_13
- Baudrillard, 1981. *Simulacres et Simulations*. Galilée, Paris, 233p. ISBN : 978-2718602103
- Belleville, L., 1985. Hydrogéologie karstique. Géométrie, fonctionnement et karstogénèse des systèmes karstiques des Gorges de l'Ardèche. *Thèse de Géologie*, Université scientifique médicale de Grenoble.
- Berger, E., 1998. *Perspectives offertes par le volcanisme du secteur de Montpezat*. Rapport préliminaire, dans le cadre du projet «Pays des Jeunes Volcans d'Ardèche»
- Berger, E., 1975. Dynamisme et pétrologie du volcanisme récent du Vivarais : caractères particuliers des appareils de la Vestide du Pal et du Chambon (Ardèche, France). *Comptes Rendus de l'Académie des. Sciences. Sér. D* 281, 507–510.
- Berthet, J., 2016. L'évolution géomorphologique des systèmes torrentiels proglaciaires de la vallée de Chamonix-Mont-Blanc, une approche du couplage sédimentaire de la fin du Petit Age Glaciaire au désenglacement récent. *Thèse de Université Grenoble Alpes*, 300p.
- Bertran, P., 2004. Dépôts de pente continentaux : Dynamique et faciès. *AFEQ, Maison de la Géologie*.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, 14, 239-256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Bierman, P., Steig, E.J., 1996. Estimating Rates of Denudation Using Cosmogenic Isotope Abundances in Sediment. *Earth Surf. Process. Landf.*, 21, 125-139. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199602\)21:2<125::AID-ESP511>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199602)21:2<125::AID-ESP511>3.0.CO;2-8)
- Bini, A., Quinif, Y., Sules, O., Uggeri, A., 1992. Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte Campo dei Fiori (Lombardie, Italie). *Karstologia*, 19, 23-30. <https://doi.org/10.3406/karst.1992.2280>
- Bishop, P., 1995. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion -. *Prog. Phys. Geogr.*19(4), 449-473.
- Blaauw, M., 2010. Method and code for "classical" age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5, 512–518.
- Bornand, M., 1978. Altération des matériaux fluvio-glaciaires, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. *Thèse de l'université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc*.
- Borsato, A., Frisia, S., Fairchild, I.J., Somogyi, A., Susini, J., 2007. Trace element distribution in annual stalagmite laminae mapped by micrometer-resolution X-ray fluorescence: Implications for incorporation of environmentally significant species. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71, 1494–1512. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.12.016>

- Borsato, A., Frisia, S., Wynn, P.M., Fairchild, I.J., Miorandi, R., 2015.** Sulphate concentration in cave dripwater and speleothems: long-term trends and overview of its significance as proxy for environmental processes and climate changes. *Quaternary Science Reviews*, 127, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.016>
- Bourdier, C., 2010.** Paléogéographie symbolique au Magdalénien moyen. Apport de l'étude des productions graphiques pariétales des abris occupés et sculptés de l'Ouest français (Roc-aux-Sorciers, Chaire-à-Calvin, Reverdit, Cap-Blanc). *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 109, 346–348.
- Bourdier, C., Lenoir, M., Malgarini, R., Mevel, L., Paillet, P., Pinçon, G., 2017.** Trente ans après Allain et al., 1985 : que sont devenus les gisements de référence ? *Actes des Scéances de la Société Préhistorique Française*. 30p.
- Bourdier, F., 1962.** Le bassin du Rhône au quaternaire. *Géologie et Préhistoire*. 2 vol., ed. CNRS Paris.
- Bozet, E., Miskovsky, J.-C., 2010.** Nouvelles données sur l'évolution paléoclimatique de l'époque magdalénienne, d'après l'étude lithostratigraphique du Roc-aux-Sorciers (Angles-sur-l'Anglin, Vienne, France). *Comptes Rendus Palevol*, 9, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2010.03.003>
- Bozzini, C., Conedera, M., Krebs, P., 2012.** A new monoploting tool to extract georeferenced vector data and orthorectified raster data from oblique non-metric photographs. *Int. J. Herit. Digit. Era*, 1, 499–518. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.1.3.499>
- Bravard, J.-P., 1993.** Quelques caractères de la morphodynamique fluviale des gorges de l'Ardèche. *Bulletins du Centre de Géomorphologie de Caen*, 23–32.
- Bravard, J.-P., Presteau, M., 1997.** Dynamique du paysage : entretiens de géoarchéologie : table ronde tenue à Lyon les 17 et 18 novembre 1995. *Service Régional de l'Archéologie (SRA)*.
- Brice, J.C., 1974.** Evolution of meander loops. *Geol. Soc. Am. Bull.* 85, 581–586.
- Bridgland, D., Westaway, R., 2008.** Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98, 285–315. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.032>
- Bridgland, D., Westaway, R., Cordier, S., 2009.** Les causes de l'étagement des terrasses alluviales à travers le monde. *Revue de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 5–23. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.4994>
- Bridgland, D.R., 2000.** River terrace systems in north-west Europe: an archive of environmental change, uplift and early human occupation. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1293–1303. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00095-5)
- Brocard, G., Teyssier, C., Dunlap, W.J., Authemayou, C., Simon-Labric, T., Cacao-Chiquín, E.N., Gutiérrez-Orrego, A., Morán-Ical, S., 2011.** Reorganization of a deeply incised drainage: role of deformation, sedimentation and groundwater flow. *Basin Res.* 23, 631–651. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00510.x>
- Brocard, G.Y., Willenbring, J.K., Miller, T.E., Scatena, F.N., 2016.** Relict landscape resistance to dissection by upstream migrating knickpoints. *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 121, 1182–1203. <https://doi.org/10.1002/2015JF003678>
- Brocard, G.Y., Van der Beek, P.-A., Bourles D.-L., Siame L.L., Mugnier J.-J., 2003.** Long-term fluvial incision rates and postglacial river relaxation time in the French Western Alps from ^{10}Be dating of alluvial terraces with assessment of inheritance, soil development and wind ablation effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 209, 197–214. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00031-1)
- Brodu, N., Lague, D., 2012.** 3D Terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing*, 68, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006>
- Brown, E.T., Bourlès, D.L., Colin, F., Raisbeck, G.M., Yiou, F., Desgarceaux, S., 1995.** Evidence for muon-induced production of ^{10}Be in near-surface rocks from the Congo. *Geophysical Research Letters*. 22, 703–706. <https://doi.org/10.1029/95GL00167>
- Bruxelles, L., Subsol, G., Moreno, B., Jessel, J.-P., Braga, J., Thackeray, F., Clarke, R.J., 2014.** Numérisation 3D in situ du squelette d'Australopithèque "Little Foot" à Sterkfontein, Afrique du Sud. *Karstologia Spéc.* 3D, 64, 1-6.
- Bruxelles, L., Clarke, R.J., Maire R., Ortega R., Stratford D., 2014.** Stratigraphic analysis of the Sterkfontein StW 573 Australopithecus skeleton and implications for its age. *Journal of Human Evolution*, 70, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.02.014>

C

- Cailleux, A., Tricart, J., 1959.** *Initiation à l'étude des sables et des galets*. CDU. Paris 3 Vol.
- Callot, Y., 1979.** *A propos des plateaux ardéchois : karst, rapports fond-surface et évolution des paysages calcaires ou en roche perméable cohérente. Essai sur les paramètres influant la formation des paysages calcaires ou en roche perméable cohérente*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Reims.
- Camporeale, C., Perucca, E., Ridolfi, L., 2008.** Significance of cutoff in meandering river dynamics. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 113. <https://doi.org/10.1029/2006JF000694>
- Campy, M., Macaire, J.-J., 2003.** Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux. *Quaternaire*, 14(4), 279-280.
- Camus, H., 2003.** *Vallées et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud cévenole : Relations avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats*. Thèse de l'Université Bordeaux 3.
- Cantagrel, J.-M., Didier, J., Gourgaud, A., 1984.** Magma mixing: origin of intermediate rocks and "enclaves" from volcanism to plutonism. *Phys. Earth Planet. Inter.* 35, 63–76. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(84\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(84)90034-7)
- Cardarelli, E., Filippo, G.D., Tuccinardi, E., 2006.** Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study. *Surface Geophysics*, 4, 387–392. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006012>
- Carrière, S.D., Chalikhakis, K., Sénéchal, G., Danquigny, C., Emblanch, C., 2013.** Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.014>

- Cayla, N., Hoblea, F., Biot, V., Delamette, M., Guyomard, A., 2012. De l'invisibilité des géomorphosites à la révélation géopatrimoniale. *Géocarrefour*, 171–186. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.8817>
- Cazes, G., Fink, D., Codilean, A.T., Réka-Hajnalka Fülöp, 2016. Spatial pattern of denudation in a lithologically controlled sub-tropical flat landscape: Insights from the Kimberley region, NW Australia. *EGU poster*, <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.2911.7043>
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., Bosch, F.P., 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeol. J.* 19, 1169. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>
- Chapman, H.D., 1965. Cation-Exchange Capacity. *Methods for Soil Analysis. Part 2 Chem. Microbiol. Prop. Agronomy monogra*, 891–901. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>
- Chauvet, J.-M., Brunel-Deschamps, E., Hillaire, C., 1995. *La grotte Chauvet*. Altsteinzeitliche Höhlenkunst Im Tal Ardèche Sigmar. Thorbecke Verl.
- Cheddadi, R., de Beaulieu, J.-L., Jouzel, J., Andrieu-Ponel, V., Laurent, J.-M., Reille, M., Raynaud, D., Bar-Hen, A., 2005. Similarity of vegetation dynamics during interglacial periods. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102, 13939–13943. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501752102>
- Chesworth, W., 2007. *Encyclopedia of Soil Science*. Springer Science & Business Media. 901p.
- Chiron, M., 1889. La grotte Chabot, commune d'Aiguèze (Gard). *Publ. Société Linn. Lyon*, 8, 96–97. <https://doi.org/10.3406/linly.1889.16309>
- Choppy, J., 1985. *Dictionnaire de speleologie physique et karstologie*. Spéléo-Club de Paris.
- Chung, J., Rogers, J.D., 2012. Estimating the position and variability of buried bedrock surfaces in the St. Louis metro area. *Eng. Geol.* 126, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.12.007>
- Ciesielski, H., Sterckeman, T., Santerne, M., Willery, J.P., 1997. Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. *Agronomie*, 17, 1–7. <https://doi.org/10.1051/agro:19970101>
- Clottes, J., 2001. La grotte Chauvet, L'art des origines. *Seuil*, Paris.
- Clottes, J., 1995. L'originalité de la grotte Chauvet-Pont-d'Arc, à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche) (information). *Comptes Rendus Séances Académie Inscr. B.-lett.* 139, 563–568. <https://doi.org/10.3406/crai.1995.15496>
- Combier, J., 1967. *Le Paléolithique de l'Ardèche dans son cadre paléoclimatique*. impr. Delmas, Bordeaux, 176, 390p.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.* 8, 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Cornette, A., 1987. Quelques données sur l'occupation amérindienne dans la région basse Mana, bas Maroni, d'après les sources ethno-archéologiques. *Equinoxe*, 24, 70–99.
- Couchoud, I., 2006. *Etude pétrographique et isotopique des spéléothèmes du sud-ouest de la France formés en contexte archéologique : Contribution à la connaissance des paléoclimats régionaux du stade isotopique 5*. Thèse de doctorat.
- Croudace, I.W., Rothwell, R.G. (Eds.), 2015. Micro-XRF studies of sediment cores: applications of a non-destructive tool for the environmental sciences, *Developments in paleoenvironmental research*. Springer, Dordrecht.
- Cuzange, M.-T., Delquć-Kolić, E., Goslar, T., Grootes, P.M., Higham, T., Kaltnecker, E., Nadeau, M.-J., Oberlin, C., Paterne, M., Plicht, J. van der, Ramsey, C.B., Valladas, H., Clottes, J., Geneste, J.-M., 2007. Radiocarbon Intercomparison Program for Chauvet Cave. *Radiocarbon*, 49, 339–347. <https://doi.org/10.1017/S0033822200042272>
- Cyr, A.J., Granger, D.E., Olivetti, V., Molin, P., 2010. Quantifying rock uplift rates using channel steepness and cosmogenic nuclide-determined erosion rates: Examples from northern and southern Italy. *Lithosphere*, 2, 188–198. <https://doi.org/10.1130/L96.1>

D

- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Comput. Geosci., Geological Applications of Digital Imaging*, 27, 1019–1029. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00160-6)
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, A.E., Jouzel, J., Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218–220. <https://doi.org/10.1038/364218a0>
- Darbellay, F., Paulsen, T., 2008. Le défi de l'inter et transdisciplinarité. Concepts, méthodes et pratiques innovantes dans l'enseignement et la recherche. *Lausanne Press*. Polytech. Univ. Romandes.164-166.
- David, B., Barker, B., Petchey, F., Delannoy, J.-J., Geneste, J.-M., Rowe, C., Eccleston, M., Lamb, L., Whear, R., 2013. A 28,000 year old excavated painted rock from Nawarla Gabarnmang, northern Australia. *Journal of Archaeological Science*, 40, 2493–2501. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.015>
- David, B., Delannoy, J.-J., Petchey, F., Gunn, R.G., Huntley, J., Verth, P., Genuite, K., Skelly, R., Mialanes, J., Harper, S., Ouzman, S., Balangarra corp, Heaney, P., Cosgrove, R., Field, J., Coster, A., Wong, W., 2019. Dating painting events through by-products of ochre processing: Borologa 1, Kimberley, Australia. *AAAR, Rock Art Australian Archaeology*, 85(1), 57–94. <https://doi.org/10.1080/03122417.2019.1603263>
- David, B., Taçon, P., Delannoy, J.-J., Geneste, J.-M., 2017. *The Archaeology of Rock Art in Western Arnhem Land, Australia*. ANU Press. 526p.
- David, B., Thomas, J., (eds) 2016. *Handbook of Landscape Archaeology*. Routledge. 719p. <https://doi.org/10.4324/9781315427737>
- De Saint Mathurin, S., 1984. L'abri du Roc-aux-Sorciers, in: *Collectif, L'Art Des Cavernes. Atlas Des Grottes Ornées Paléolithiques Françaises*. Ministère de la Culture, Paris, pp. 583–587.

- Debard, E., 1988.** Le quaternaire du Bas-Vivarais d'après l'étude des remplissages d'avens, de porches de grottes et d'abris sous roche. Dynamique sédimentaire, paléoclimatologie et chronologie., *Thèse de Géologie, Département des sciences de la terre, Université Claude Bernard, Lyon 1.*
- Degeai, J.-P., Pastre, J.-F., 2009.** Impacts environnementaux sur l'érosion des sols au Pléistocène supérieur et à L'holocène dans le cratère de maar du lac du Bouchet (Massif central, France). *Quaternaire*, 149–159. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.5101>
- Delannoy, J.-J., 2018.** Le karst souterrain et ses temporalités: vecteur de dialogues interdisciplinaires. Les apports de Richard Maire et discussion autour des notions d'instant, d'archives, de mémoires et d'indicateurs. *Karstologia Mémoires*. 31–51.
- Delannoy, J.-J., 1997.** *Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie) : les apports morphogéniques du karst.* Thèse de l'Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Delannoy, J.-J., Geneste J.-M., (dir), Atlas Chauvet**, DAF édition, à paraître
- Delannoy, J.-J., David, B., Geneste, J.-M., Katherine, M., Sadier, B., Gunn, R.G., n.d. Delannoy, J. J., David, B., Geneste, J. M., Katherine, M., Sadier, B., & Gunn, R., 2017.** Engineers of the Arnhem Land Plateau: Evidence for the origins and transformation of sheltered spaces at Nawarla Gabarnmang, in: *Terra Australis*. pp. 197–244.
- Delannoy, J.-J., David, B., Genuite, K., Finch, D., Ouzman, S., Green, H., Harper, S., Balangarra corp, Skelly, R., 2020.** Investigating the construction of rock art sites through archaeomorphology: the case of Borologa, Kimberley, Australia. *Journal of Archaeological Method and Theory*, submitted.
- Delannoy, J.-J., Duval, M., Gauchon, C., Jaillet, S., Paillet, A., Perrette, Y., Ployon, E., Sadier, B., 2008.** *Étude préalable au projet d'extension de classement du site des abords de Pont d'Arc - Ardèche.*
- Delannoy, J.-J., Perrette, Y., Debard, E., Ferrier, C., Kervazo, B., Perroux, A.-S., Jaillet, S., Quinif, Y., 2004.** Intérêt de l'approche morphogénique pour la compréhension globale d'une grotte à haute valeur patrimoniale. La grotte Chauvet (Ardèche -France). *Karstologia*, 44, 25–42. <https://doi.org/10.3406/karst.2004.2552>
- Delannoy, J.-J., Sadier, B., Jaillet, S., Ployon, E., Geneste, J.-M., 2010.** Reconstitution de l'entrée préhistorique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche, France) : les apports de l'analyse géomorphologique et de la modélisation 3D. *Karstologia*, 56, 17–34. <https://doi.org/10.3406/karst.2010.2679>
- Delannoy, J.-J., Geneste, J.-M., David, B., Margaret, K., Gunn, R.-G., Whear, R., 2012.** Apports de la géomorphologie dans l'aménagement et la construction sociale de sites préhistoriques. Exemples de la grotte Chauvet-Pont-d'Arc (France) et de Nawarla Gabarnmang (Australie). *Paléo, revue d'archéologie préhistorique*, 23, 85-104. ISSN : 1145-3370
- DeLaunay, B., 1934.** Sur la sphère vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR Otd. Mat. Estestv. Nauk*, 7, 93–800.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D., 2012.** Les glaciations quaternaires dans les Pyrénées ariégeoises : approche historiographique, données paléogéographiques et chronologiques nouvelles. *Quat. Rev. Assoc. Fr. Pour l'étude Quat*, 61–85. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.6091>
- Denizot, G., 1937.** Cycle pliocène et surface topographique anté-quaternaire sur le sol français. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 14 (106), 82-91.
DOI : 10.3406/bagf.1937.6778
- Desachy, B., 2005.** Du temps ordonné au temps quantifié : application d'outils mathématiques au modèle d'analyse stratigraphique d'Edward Harris. *Bull. Société Préhistorique Fr*, 102, 729–740. <https://doi.org/10.3406/bspf.2005.13176>
- Drysdale, R., Zanchetta, G., Hellstrom, J., Maas, R., Fallick, A., Pickett, M., Cartwright, I., Piccini, L., 2006.** Late Holocene drought responsible for the collapse of Old-World civilizations is recorded in an Italian cave flowstone. *Geology*, 34, 101–104. <https://doi.org/10.1130/G22103.1>
- Drysdale, R.N., Zanchetta, G., Hellstrom, J.C., Fallick, A.E., McDonald, J., Cartwright, I., 2007.** Stalagmite evidence for the precise timing of North Atlantic cold events during the early last glacial. *Geology*, 35, 77–80. <https://doi.org/10.1130/G23161A.1>
- Dunne, J., Elmore, D., Muzikar, P., 1999.** Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces. *Geomorphology*, 27, 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00086-5)
- Duval, M., 2012.** Dose response curve of the ESR signal of the Aluminum center in quartz grains extracted from sediment. *Ancient TL*, 30 (2), 41-49.
- Duval, M., 2008.** Patrimonialisation et mise en tourisme des espaces naturels. L'exemple des gorges de l'Ardèche. *Géographie Cult.* 61–78. <https://doi.org/10.4000/gc.3688>
- Duval, M., Gauchon, C., 2007.** Analyse critique d'une politique d'aménagement du territoire, les Opérations «Grands Sites». *Ann. Geogr.* 654, 147–168.
- Duval, M., Guilarte, V., 2015.** ESR dosimetry of optically bleached quartz grains extracted from Plio-Quaternary sediment: Evaluating some key aspects of the ESR signals associated to the Ti-centers. *Radiat. Meas.* 78, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2014.10.002>
- Duval, M., Guilarte, V., 2012.** Assessing the influence of the cavity temperature on the ESR signal of the aluminum center in quartz grains extracted from sediment. *Ancient TL*, 30 (2), 51-56.

E

- Edwards, L., 1977.** A modified pseudosection for resistivity and ip. *Geophysics*, 42, 1020–1036. <https://doi.org/10.1190/1.1440762>
- Ersahin, S., Gunal, H., Kutlu, T., Yetgin, B., Coban, S., 2006.** Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. *Geoderma*, 136, 588–597. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.014>

F

- Fairchild, I.J., Treble, P.C., 2009. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28, 449–468. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.007>
- Feld, S., Basso, K.H., (eds). 1996. *Senses of Place*. School of American Research Press.
- Fleming, 1970. Thermoluminescent dating: refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry*, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-4754.1970.tb00016.x> (accessed 7.3.19).
- Ford, D., Ewers, R., 1978. The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *International Journal of Speleology*, 10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.10.3.1>
- Ford, D.C., Williams, P.W., 1996. *Karst Geomorphology and Hydrology*, Reprinted. ed. Chapman & Hall, London.
- Frisia, S., Borsato, A., Drysdale, R.N., Paul, B., Greig, A., Cotte, M., 2012. A re-evaluation of the palaeoclimatic significance of phosphorus variability in speleothems revealed by high-resolution synchrotron micro XRF mapping. *Climates of the Past*, 8, 2039–2051. <https://doi.org/10.5194/cp-8-2039-2012>
- Fuentes, O., 2009. Le Roc-aux-Sorciers. Du site au centre d'interprétation, un choix scénographique original, in: *Nouvelles de l'Archéologie*, Éd. Maison Des Sciences de l'Homme, Paris.

G

- Geneste J.-M., 2005. L'archéologie des vestiges matériels dans la grotte Chauvet-Pont-d'Arc. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 102, 135–144.
- Genty, D., 2012. Chauvet cave chronology and paleoclimatic reconstructions using speleothems. *Collection EDYTEM*, 79–88.
- Genty, D., Baker, A., Massault, M., Proctor, C., Gilmour, M., Pons-Branchu, E., Hamelin, B., 2001. Dead carbon in stalagmites: carbonate bedrock paleodissolution vs. ageing of soil organic matter. Implications for ^{13}C variations in speleothems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65, 3443–3457. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00697-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00697-4)
- Genty, D., Blamart, D., Ouahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel, J., Van-Exter, S., 2003. Precise dating of Dansgaard–Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421, 833–837. <https://doi.org/10.1038/nature01391>
- Genty, D., Ghaleb, B., Plagnes, V., Causse, C., Valladas, H., Blamart, D., Massault, M., Geneste, J.-M., Clottes, J., 2004. Datations U/Th (TIMS) et ^{14}C (AMS) des stalagmites de la grotte Chauvet (Ardèche, France) : intérêt pour la chronologie des événements naturels et anthropiques de la grotte. *Comptes Rendus Palevol*, 3, 629–642. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2004.06.005>
- Génuite, K., Delannoy, J.-J., Jaillet, S., Arnaud, J., Berthet, J., Génuite, P., 2019. Le Pont d'Arc et la grotte des Châtaigniers (Gorges de l'Ardèche, France), indicateurs des processus du recouplement du méandre de la Combe d'Arc. *Géomorphologie : Relief Processus Environnements*, 25, 57–68.
- Génuite, K., Delannoy, J.-J., Jaillet, S., 2018. Reconstitution des paléogéographies karstiques par l'approche cartographique 3D: Application au Pont d'Arc et à la Combe d'Arc (Ardèche, France). *Karstologia*, 67, 17–24.
- Génuite, K., Perrette, Y., Jaillet, S., 2018. Flowstone growth in Gournier River (Vercors, France): a diachronic landscape analysis by 3D modelling and photo draping. *International Journal of Speleology*, 47, 81–91.
- Geyh, M.A., 1976. Reflections on the $^{232}\text{Th}/\text{U}$ dating of dirty material, *Geochronometria*, 20, 9–14.
- Gèze, B., 1973. *Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie*. Centre National de la Recherche Scientifique.
- Girardeau, D., 2018. *CloudCompare*. (logiciel). <https://www.danielgm.net/cc/>
- Giraud-Soulavie, J.L., 1781. *Histoire naturelle de la France méridionale : ou recherches sur la minéralogie du Vivarais, du Viennois, du Valentinois, du Forez... sur la physique de la mer méditerranée, sur les météores, les arbres, les animaux, l'homme et la femme de ces contrées ; avec six planches par volume*. Quillau.
- Gombert, P., 1988. *Hydrogéologie et karstogénèse du Bas-Vivarais calcaire (Ardèche, France)*. Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Granger, D.E., Fabel, D., Palmer, A.N., 2001. Pliocene–Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in Mammoth Cave sediments. *GSA Bull.* 113, 825–836. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<0825:PPIOTG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<0825:PPIOTG>2.0.CO;2)
- Granger, D.E., Gibbon, R.J., Kuman, K., Clarke, R.J., Bruxelles, L., Caffee, M.W., 2015. New cosmogenic burial ages for Sterkfontein Member 2 Australopithecus and Member 5 Oldowan. *Nature*, 522, 85–88. <https://doi.org/10.1038/nature14268>
- Granger, D.E., Kirchner, J.W., Finkel, R., 1996. Spatially Averaged Long-Term Erosion Rates Measured from in Situ-Produced Cosmogenic Nuclides in Alluvial Sediment. *J. Geol.* 104, 249–257. <https://doi.org/10.1086/629823>
- Granger, D.E., Lifton, N.A., Willenbring, J.K., 2013. A cosmic trip: 25 years of cosmogenic nuclides in geology. *GSA Bull.* 125, 1379–1402. <https://doi.org/10.1130/B30774.1>
- Green, H.E., 2013. *Exploring the palaeoclimate potential of South East Australian speleothems*. PHD Thesis.
- Gresse, M., 2018. *Imagerie géophysique (électrique et sismique) haute résolution et modélisation du système hydrothermal superficiel de la Solfatare de Pouzzoles, Italie du Sud. Application à l'étude des processus hydrothermaux*. Thèse de l'Université Grenoble Alpes, 237p.
- Gresse, M., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S., Chiodini, G., Roux, P., Rinaldi, A.P., Wathelet, M., Ricci, T., Letort, J., Petrillo, Z., 2018. Anatomy of a fumarolic system inferred from a multiphysics approach. *Nature, Scientific Reports*, 8, 7580.

- Grün, R., 1989.** Electron spin resonance (ESR) dating. *Quaternary International*, 1, 65–109. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(89\)90010-4](https://doi.org/10.1016/1040-6182(89)90010-4)
- Grussenmeyer, P., Landes, T., 2011.** Lasergrammétrie Terrestre. Images et modèles 3D en milieu naturel, *Collection EDYTEM*, 13, 11–28.
- Guérin, G., Gillot, P.-Y., 2007.** Nouveaux éléments de chronologie du volcanisme Pléistocène du bas Vivarais (Ardèche, France) par thermoluminescence. *Comptes Rendus Geoscience*, 339, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.10.005>
- Guillien, Y., de Saint Mathurin, S., 1976.** Le gisement du Roc-aux-sorciers et la séquence climatique du Magdalénien. *Bulletin de la Société Préhistorique de France*, 73, 15–21.
- Gunn, R.G., 1997.** Rock art, occupation and myth. The correspondence of symbolic and archaeological sites within Arrernte rock art complexes of central Australia. *Rock Art Research*, 14, 124–135.
- Gunn, R.G., Douglas L. C., Whear R. L., 2018.** The complexity of Arnhem land rock art complexes, *AURA*, 35 (1), 3.

H

- Halliburton, L.E., 1989.** ESR and optical characterization of point defects in quartz. *Int. J. Rad. Appl. Instrum. [A]* 40, 859–863. [https://doi.org/10.1016/0883-2889\(89\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0883-2889(89)90007-5)
- Harmand, D., Adamson, K., Rixhon, G., Jaillet, S., Losson, B., Devos, A., Hez, G., Calvet, M., Audra, P., 2017.** Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions. *Quaternary Science Reviews*, 166, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.016>
- Hellstrom, J.C., McCulloch, M.T., 2000.** Multi-proxy constraints on the climatic significance of trace element records from a New Zealand speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 179, 287–297. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00115-1)
- Hill, C.A., Forti, P., Shaw, T.R., 1997.** *Cave minerals of the world*. National speleological society, Huntsville.
- Huang, Y., Fairchild, I.J., Borsato, A., Frisia, S., Cassidy, N.J., McDermott, F., Hawkesworth, C.J., 2001.** Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy). *Chemical Geology*, 175, 429–448. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00337-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00337-5)
- Huguet, F., Giret, A., 2013. Huguet, F., & Giret, A., 2013.** Genèse et évolution géomorphologique du site de la Grotte-aux-Sorciers (Angles-sur-l'Anglin, Vienne, France). *L'Anthropologie*, 117, 48–61.

I

- Ikeya, M., 1993.** *New Applications of Electron Spin Resonance: Dating, Dosimetry and Microscopy*. World Scientific. 500p.
- Immenhauser, A., Dublyansky, Y.V., Verwer, K., Fleitman, D., Pashenko, S.E., 2007.** Textural, Elemental, and Isotopic Characteristics of Pleistocene Phreatic Cave Deposits (Jabal Madar, Oman). *J. Sediment. Res.* 77, 68–88. <https://doi.org/10.2110/jsr.2007.012>
- Inkpen, R., Viles, H., Moses, C., Baily, B., 2012.** Modelling the impact of changing atmospheric pollution levels on limestone erosion rates in central London, 1980–2010. *Atmos. Environ.* 61, 476–481. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.042>
- INRAP, 2009.** *La géoarchéologie appliquée aux sites du Néolithique jusqu'à nos jours*. Cahiers de l'INRAP.

J

- Jacob, N., Gob, F., Bravard, J.-P., Petit, F., 2006.** Les formes fluviales d'une rivière en gorge, le Chassezac (Cévennes, France). *Géomorphologie : Relief Processus Environnements*, 12, 3–22. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.419>
- Jacob-Rousseau, N., 2008.** La question des héritages dans l'évolution des lits rocheux — réflexions à partir de l'exemple du Chassezac (Cévennes, France). (The problem of inherited shapes in the bedrock channels - some insights from the example of the Chassezac river, Cévennes, France). *Bull. Assoc. Géographes Fr.* 85, 245–253. <https://doi.org/10.3406/bagf.2008.2619>
- Jaillet, S., 2005.** *Le Barrois et son karst couvert ; structure, fonctionnement, évolution*. (Thèse de Géographie). Bordeaux 3.
- Jaillet, S., Cailhol, D., Arnaud, J., Astrade, L., Belingard, C., Boche, E., Cornillon, T., Couchoud, I., Duguet, R., Franck, N., Emblanch, C., Hellstrom, J.C., Le Roux, P., Monteil, P., Peyronel, O., Pons-Branchu, E., Sadier, B., Thomas, M., 2012.** Les crues du système karstique de Foussoubie (Ardèche, France). Une analyse géomorphologique et hydrodynamique des circulations dans la zone épinoyée du karst. *Collection EDYTEM*, 12, 115–138.
- Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Monney, J., Sadier, B., 2017.** *3-D modelling in rock art research: Terrestrial laser scanning, photogrammetry and the time factor*. The Oxford Handbook of the Archaeology and Anthropology of Rock Art, Oxford Handbook, <http://www.oxfordhandbooks.com/view/10.1093/oxfordhb/9780190607357.001.0001/oxfordhb-9780190607357-e-47>, 2017.
- Jaillet, S., Monney, J., 2018.** Analyse 3D des volumes et remplissages souterrains de la grotte aux points au temps des fréquentations paléolithiques de la grotte aux Points (Aiguèze, Gard). *Karstologia*, 72(1), 27–36.
- Jaillet, S., Ployon, E., Villemin, T., 2011a.** *Images et modèles 3D en milieux naturels*, Collection EDYTEM, n° 12, 978-2-918435-04-4. halsde-00737370
- Jaillet, S., Pons-Branchu, E., Hobléa, F., Berthet, J., Deline, P., Duvillard, P.-A., Génuite, K., 2018.** La dépression glacio-karstique du Mariet (Bauges occidentales, France) : un marqueur de l'englacement würmien des Alpes françaises du Nord. *Géomorphologie : Relief Processus Environnements*, 24, 107–120. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12139>

- Jaillet, S., Pons-Branchu, E., Maire, R., Hamelin, B., Brulhet, J., 2006. Enregistrement des paléo-mises en charge holocènes dans deux stalagmites du réseau du Rupt-du-Puits (Varrois, France). Analyses morphologiques des lamines et datations U/Th en TIMS. *Geologica Belgica*, 9 (3-4), 297-307.
- Jaillet, S., Sadier, B., Hajri, S., Ployon, E., Delannoy, J.-J., 2011b. Une analyse 3D de l'endokarst : applications lasergrammétriques sur l'aven d'Ornac (Ardèche, France). *Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement*. 17, 379–394. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9594>
- Jaillet, S., Sadier, B., Perazio, G., Delannoy, J.-J., 2014. Une brève histoire de la 3D en grotte. *Karstologia*, 63, 3–20.
- Jardani, A., Dupont, J.-P., Revil, A., 2006. Self-potential signals associated with preferential groundwater flow pathways in sinkholes. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 111, B09204. <https://doi.org/10.1029/2005JB004231>
- Jarry, M., Pallier, C., Bruxelles, L., Bon, F., Lejay, M., Anderson, L., Lacombe, S., Lelouvier, L.-A., Martin, H., Pétilion, J.-M., Potin, Y., Rabanit, M., Simonnet, R., Wattez, J., Arrighi, V., Callède, F., 2017. L'Aurignacien de la grotte du Mas d'Azil (Ariège): résultats 2011-2016. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 6.
- Jaubert, J., Verheyden, S., Genty, D., Soulier, M., Cheng, H., Blamart, D., Burlet, C., Camus, H., Delaby, S., Deldicque, D., Edwards, R.L., Ferrier, C., Lacrampe-Cuyaubère, F., Lévêque, F., Maksud, F., Mora, P., Muth, X., Régnier, É., Rouzaud, J.-N., Santos, F., 2016. Early Neanderthal constructions deep in Bruniquel Cave in southwestern France. *Nature*, 534, 111–114. <https://doi.org/10.1038/nature18291>
- Johannesson, H., Parker, G., 2013. Linear Theory of River Meanders, in: River Meandering. *American Geophysical Union (AGU)*, pp. 181–213. <https://doi.org/10.1029/WM012p0181>
- Joly, F., 1974. Contribution française à la cartographie géomorphologique et à la connaissance cartographique du Quaternaire. *Ann. Géographie*, 83, 369–380. <https://doi.org/10.3406/geo.1974.18943>

K

- Kant, 1781. *Kritik der reinen Vernunft*. PUF.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhrer, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P., Kessler, M., 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Sci. Data*, 4, 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kirchner, J.W., Finkel, R.C., Riebe, C.S., Granger, D.E., Clayton, J.L., King, J.G., Megahan, W.F., 2001. Mountain erosion over 10 yr, 10 k.y., and 10 m.y. time scales. *Geology*, 29, 591–594. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0591:MEOYKY>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0591:MEOYKY>2.0.CO;2)
- Kothyari, U.C., Jain, M.K., Raju, K.G.R., 2002. Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS / Estimation de la variation temporelle de l'exportation sédimentaire grâce à un SIG. *Hydrol. Sci. J.*, 47, 693–706. <https://doi.org/10.1080/02626660209492974>
- Kukla, G., 2005. Saalian supercycle, Mindel/Riss interglacial and Milankovitch's dating. *Quaternary Science Reviews, Quaternary Land-ocean Correlation* 24, 1573–1583. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.08.023>

L

- Labrousse, B., 1977. *Altération des terrasses anciennes de l'Ardèche*. Thèse de doctorat.
- Lanos, P., Philippe, A., 2015. *Hierarchical Bayesian modeling for combining Dates in archaeological context*. hal-01162404v3. 18p.
- Lanos, P., Philippe, A., Lanos, H., Dufresne, P., 2016. *Chronomodel: Chronological modelling of archaeological data using Bayesian statistics*. (version 1.5). URL <http://www.Chronomodel.fr>.
- Lauritzen, S.-E., 1996. *Climate Change: The Karst Record*. Karst Waters Institute, 2, 78.
- Lauritzen, S.E., Lundberg, J., 2000. Solutional and erosional morphology. *Speleogenesis Evol. Karst Aquifers Natl. Speleol. Soc.* Huntsville, 408–426.
- Lê S, Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1–18.
- Lisiecki, L. E., Raymo M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records, *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Loke, M., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, 44 (1), 131-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Lorenz, J., Gely, B., 2010. *Contexte géologique et morphologique. Angles-sur-l'Anglin, le Roc-aux-Sorciers: art et parure du Magdalénien*. www.catalogue-roc-aux-sorciers.fr/html/12/collection/1_5_3.html.
- Losson, B., Quinif, Y., 2001. La capture de la Moselle. Nouvelles données chronologiques par datations U/Th sur spéléothèmes. *Karstologia*, 37, 29–40. <https://doi.org/10.3406/karst.2001.2469>
- Lowe, D.G., 1999. *Object recognition from local scale-invariant features*, in: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Presented at the Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, Kerkyra, Greece, 2, 1150-1157. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>

M

- Maddy, D., Demir, T., Veldkamp, A., Bridgland, D.R., Stemerink, C., Schriek, T.V.D., Schreve, D., 2012. The obliquity-controlled early Pleistocene terrace sequence of the Gediz River, western Turkey: a revised correlation and chronology. *J. Geol. Soc.* 169, 67-82. <https://doi.org/10.1144/0016-76492011-011>
- Marcer, M., Bodin, X., Brenning, A., Schoeneich, P., Charvet, R., Gottardi, F., 2017. Permafrost Favorability Index: Spatial Modeling in the French Alps Using a Rock Glacier Inventory. *Front. Earth Sci.* 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00105>

- Mardigny, M., 1860.** *Mémoire sur les inondations des rivières de l'Ardèche*. Dalmont et Dunod. ed. 58p.
- Martel, E.-A., 1930.** *La France ignorée*. Nord. Ouest. Centre. Causses et Pyrénées. Grès de Fontainebleau. Grottes du Périgord. Cavernes et dessins préhistoriques. Igués du Quercy. Padirac. Lacave. Cabrerets. Tindoul. Massif Central. L'Ardèche. Les Causses et l'Aven Armand. Les Pyrénées souterraines. Au pays basque. Le recul des côtes. Librairie Delagrave.
- Masse, J., 1976.** *Les calcaires urgoniens de Provence: Valanginien, Aptien inférieur: stratigraphie, paléontologie, les paléo-environnements et leur évolution*. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille II.
- Maxwell, A.R., Papanicolaou, A.N., 2001.** Step-pool morphology in high gradient streams. *Int. J. Sediment Res.* 16, 11.
- McDonald, J., Drysdale, R., Hill, D., 2004.** The 2002–2003 El Niño recorded in Australian cave drip waters: Implications for reconstructing rainfall histories using stalagmites. *Geophys. Res. Lett.* 31. <https://doi.org/10.1029/2004GL020859>
- McDonald, J., Reynen, W., Petchey, F., Ditchfield, K., Byrne, C., Vannieuwenhuysse, D., Leopold, M., Veth, P., 2018.** Karnatukul (Serpent's Glen): A new chronology for the oldest site in Australia's Western Desert. *PLOS ONE*, 13, e0202511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202511>
- Menneron, Y., 2003.** *Etude géomorphologique du Cirque d'Estre: réalisation d'une carte géomorphologique*. mémoire de master 1 de l'université de Savoie.
- Michou, J., 1984.** La basse terrasse de l'Ardèche et de ses affluents. *Bull. Assoc. Fr. Pour L'étude Quat.* 21, 85-86. <https://doi.org/10.3406/quate.1984.1489>
- Milankovitch, M., 1941.** Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Belgrade: Zavod za Udžbenike i Nastavna Sredstva. ISBN 978-86-17-06619-0. *Royal Serbian Academy Special Publication*, 133, 1-633.
- Mitášová, H., Hofierka, J., 1993.** Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Math. Geol.* 25, 657-669. <https://doi.org/10.1007/BF00893172>
- Mocochain, L., Audra, P., Clauzon, G., Bellier, O., Bigot, J.-Y., Parize, O., Monteil, P., 2009.** The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: Example of the Lower Ardèche river (mid Rhône valley). *Geomorphology*, 106, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.021>
- Mocochain, L., Clauzon, G., Bigot, J.-Y., Brunet, P., 2006.** Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sediment. Geol.*, The Messinian Salinity Crisis Revisited 188-189, 219-233. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.03.006>
- Moncel, M.-H., Daujeard, C., Crégut-Bonnoure, E., Boulbes, N., Puaud, S., Debard, E., Bailon, S., Desclaux, E., Escude, É., Roger, T., Dubar, M., 2010.** Nouvelles données sur les occupations humaines du début du Pléistocène supérieur de la moyenne vallée du Rhône (France). Les sites de l'abri des pêcheurs, de la Baume Flandin, de l'Abri du Maras et de la grotte du Figuier (Ardèche). *Quat Rev. Assoc. Fr. Pour L'étude Quat.* 385-411. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.9212>
- Moncel, M.-H., Puaud, S., Daujeard, C., Lartigot-Campin, A.-S., Millet, J.-J., Theodoropoulou, A., Crégut-Bonnoure, E., Gély, B., Vercoûtère, C., Desclaux, E., Roger, T., Bourges, F., 2012.** La Grotte du Figuier (Saint-Martin-d'Ardèche): bilan des travaux récents sur un site du Paléolithique moyen et supérieur de la moyenne vallée du Rhône (Sud-Est de la France). *Bull. Société Préhistorique Fr.* 109, 35-67.
- Moncel, M.-H., Puaud, S., Daujeard, C., Lateur, N., Lartigot-Campin, A.-S., Debard, É., Crégut-Bonnoure, É., Raynal, J.-P., 2014.** Le site du Ranc-Pointu n° 2 à Saint-Martin-d'Ardèche : une occupation du Paléolithique moyen ancien dans le Sud-Est de la France. *Comptes Rendus Palevol*, 13, 121-136. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2013.08.004>
- Montjuvent, G., 1973.** La transfluence Durance-Isère. Essai de synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes françaises), *Geologie Alpine*, 49, 57-118.
- Montjuvent, G., 1978.** Le Drac. Morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaire d'un bassin alpin. CNRS, Paris, 433p.
- Monney, J., 2018.** La grotte aux Points d'Aiguèze, petite soeur de la grotte Chauvet, et les recherches menées dans le cadre du projet "Datation Grottes Ornées." *Karstologia*, 72 (1), 1-10.
- Monney, J., 2012.** *Et si d'un paysage on contait le passé. Tissu de sens et grottes ornées le long des Gorges de l'Ardèche*. Collection EDYTEM. karst, paysages et Préhistoire. 13, 21-42
- Monney, J., 2010.** *Project Datation Grottes Ornées*. Rapport d'Activité 2010 (3ème Volet) Grotte des Deux-Ouvertures (St-Martin-d'Ardèche), Combe d'Arc (Vallon-Pont-d'Arc). Opérations n°2010-1119 et 1173, 163p.
- Monney, J., Jaillet, S., 2019.** Fréquentations humaines, ornementation pariétale et processus naturels: mise en place d'un cadre chronologique pour la grotte aux Points d'Aiguèze. *Karstologia*, 73 (2), 49-62.
- Montgomery, D.R., Brandon, M.T., 2002.** Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges. *Earth Planet. Sci. Lett.* 201, 481-489. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00725-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00725-2)
- Moore, I.D., 1996.** Hydrologic modeling and GIS. *GIS Environ. Model. Prog. Res.* Issues 143-148.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., 1991.** Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process.* 5, 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Moore, I.D., Wilson, J.P., 1992.** Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *J. Soil Water Conserv.* 47, 423-428.
- Moreno, D., Richard, M., Bahain, J.-J., Duval, M., Falguères, C., Tissoux, H., Voinchet, P., 2017.** ESR dating of sedimentary quartz grains: some basic guidelines to ensure optimal sampling conditions. *Quat. Rev. Assoc. Fr. Pour L'étude Quat.* 161-166. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.8008>
- Murphy, P.N.C., Ogilvie, J., Arp, P., 2009.** Topographic modelling of soil moisture conditions: a comparison and verification of two models. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 94-109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01094.x>

N

- Nicod, J., 1997a.** Les canyons karstiques “Nouvelles approches de problèmes géomorphologiques classiques” (spécialement dans les domaines méditerranéens et tropicaux) [The karstic canyons, geomorphological problems and new directions (particularly in mediterranean and tropical lands)]. *Quaternaire*, 8, 71-89. <https://doi.org/10.3406/quate.1997.1563>
- Nicod, J., 1997b.** Les recoupements karstiques de méandres encaissés. *Karstologia*, 30, 41-48. <https://doi.org/10.3406/karst.1997.2401>
- Nomade, S., Genty, D., Sasco, R., Scao, V., Féruglio, V., Baffier, D., Guillou, H., Bourdier, C., Valladas, H., Reigner, E., Debard, E., Pastre, J., Geneste, J.-M., 2016.** A 36,000-Year-Old Volcanic Eruption Depicted in the Chauvet-Pont d’Arc Cave (Ardèche, France)? *PLOS ONE*, 11(1), 1-10, e0146621. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146621>
- Nord, G., Legout, C., Grangeon, T., Wijbrans, A., Gérard, S., Delrieu, G., 2016.** *Erosion et flux sédimentaires dans les têtes de bassin versant dans le bas Vivarais en Ardèche*, OHMCV, 25.

O

- Olivetti, V., Godard, V., Bellier, O., 2016.** Cenozoic rejuvenation events of Massif Central topography (France): Insights from cosmogenic denudation rates and river profiles. *Earth Planet. Sci. Lett.* 444, 179-191. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.049>
- Orsini, L., Remy, J.C., 1976.** Utilisation du chlorure de cobalthexamine pour la détermination simultanée de la capacité d’échange et des bases échangeables des sols. *Sci Sol*, 4, 269-275.

P

- Palacky, G., 1988.** *Resistivity characteristics of geologic targets*, in: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics.
- Palmer, A.N., Audra, P., 2004.** *Patterns of caves*. *Encycl. Cave Karst Sci.* Fitzroy Dearborn Lond. 573–574.
- Pascal, M., Elmi, S., Busnardo, R., Lafarge, D., Truc, G., Valleron, M., Chedhomme, J., Combiér, J., 1989.** *Carte géologique de la France (1/50 000), feuille de Bourg-Saint-Andéol (889)*, notice explicative par M. Pascal Lafarge J Chedhomme C Glintzboeckel 1989 Orléans Bur. Rech. Géologiques Minières.
- Peeters, I., Rommens, T., Verstraeten, G., Govers, G., Van Rompaey, A., Poesen, J., Van Oost, K., 2006.** Reconstructing ancient topography through erosion modelling. *Geomorphology*, 78, 250-264. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.033>
- Perrette, Y., 1999.** Les stalagmites : archives environnementales et climatiques à haute résolution. Présentation des protocoles d’étude et premiers résultats sur des spéléothèmes du Vercors. *Karstologia*, 34, 23-44. <https://doi.org/10.3406/karst.1999.2445>
- Perrette, Y., Delannoy, J.-J., Bolvin, H., Cordonnier, M., Destombes, J.-L., Zhilinskaya, E.A., Aboukais, A., 2000.** Comparative study of a stalagmite sample by stratigraphy, laser induced fluorescence spectroscopy, EPR spectrometry and reflectance imaging. *Chemical Geology*, 162, 221-243. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00069-8)
- Perrette, Y., Delannoy, J.-J., Desmet, M., Lignier, V., Destombes, J.-L., 2005.** Speleothem organic matter content imaging. The use of a Fluorescence Index to characterise the maximum emission wavelength. *Chemical Geology*, 214, 193-208. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.09.002>
- Perron, J.T., Royden, L., 2013.** An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth Surf. Process. Landf.* 38, 570-576. <https://doi.org/10.1002/esp.3302>
- Pike, R.J., Evans, I.S., Hengl, T., 2009.** *Geomorphometry: A Brief Guide*, in: *Developments in Soil Science*. Elsevier, pp. 3-30. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
- Pilleyre, T., Montret, M., Fain, J., Miallier, D., Sanzelle, S., 1992.** Attempts at dating ancient volcanoes using the red TL of quartz. *Quaternary Science Reviews, Proceedings of the 6th International Specialist Seminar on Thermoluminescence and Electron Spin Resonance Dating*, 11, 13-17. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(92\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0277-3791(92)90036-8)
- Pinçon G., 2009.** *Le Roc-aux-sorciers: Art et parure du Magdalénien, Catalogue des collections*. RMN, Paris.
- Pinçon G., 2008.** Chronologie pariétale des oeuvres magdaléniennes du Roc-aux-Sorciers(Angles-sur-l’Anglin, Vienne) : entre tradition et innovation. *In Situ, Revue des patrimoines*, 9, 1-21, Paris.doi :10.4000/insitu.3292
- Pinçon, G., 1993.** *Étude et relevés d’art pariétal. Le Roc-aux-Sorciers (Vienne)*. Rapport d’activité.
- Pineda, J., 1988.** Pineda, J., 1988. A parallel algorithm for polygon rasterization. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 22.
- Plagnes, V., Causse, C., Genty, D., Paterne, M., Blamart, D., 2002.** A discontinuous climatic record from 187 to 74 ka from a speleothem of the Clamouse Cave (south of France). *Earth Planet. Sci. Lett.* 201, 87-103. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00674-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00674-X)
- Planchon, O., Darboux, F., 2002.** A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *CATENA*, 46, 159-176. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3)
- Pons-Branchu, E., Ayrault, S., Roy-Barman, M., Bordier, L., Borst, W., Branchu, P., Douville, E., Dumont, E., 2015.** Three centuries of heavy metal pollution in Paris (France) recorded by urban speleothems. *Sci. Total Environ.* 518–519, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.071>
- Pons-Branchu, E., Douville, E., Roy-Barman, M., Dumont, E., Branchu, P., Thil, F., Frank, N., Bordier, L., Borst, W., 2014.** A geochemical perspective on Parisian urban history based on U–Th dating, laminae counting and yttrium and REE concentrations of recent carbonates in underground aqueducts. *Quaternary Geochronology*. 24, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2014.08.001>
- Pons-Branchu, E., Hamelin, B., Brulhetet, J., Bruxelles, L., 2004.** Speleothem rupture in karst: tectonic or climatic origin? U-Th dating of rupture events in Salamandre Cave (Gard, southeastern France). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 175, 473–479. <https://doi.org/10.2113/175.5.473>

- Pons-Branchu, E., Hamelin, B., Losson, B., Jaillet, S., Brulhet, J., 2010.** Speleothem evidence of warm episodes in northeast France during Marine Oxygen Isotope Stage 3 and implications for permafrost distribution in northern Europe. *Quaternary Research*, 74, 246-251. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.06.007>
- Pons-Branchu, E., Quinif, Y., 2018.** La chronologie des spéléothèmes par les séries de l'Uranium appliquée aux enregistrements par l'endokarst. Historique, perspectives et applications. *Karstologia*, 69, 45-52.
- Poudyal, C.P., Chang, C., Oh, H.-J., Lee, S., 2010.** Landslide susceptibility maps comparing frequency ratio and artificial neural networks: a case study from the Nepal Himalaya. *Environ. Earth Sci.* 61, 1049-1064. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0426-5>

Q

- Quiers, M., Perrete, Y., Chalmin, E., Fanhget, B., Poulenard, J., 2015.** Geochemical mapping of organic carbon in stalagmites using liquid-phase and solid-phase fluorescence. *Chemical Geology*. 411, 240-247.
- Quiers, M., Batiot-Guilhe, C., Bicalho, C.C., Perrette, Y., Seidel, J.-L., Van Exter, S., 2014.** Characterisation of rapid infiltration flows and vulnerability in a karst aquifer using a decomposed fluorescence signal of dissolved organic matter. *Environ. Earth Sci.* 71, 553-561. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2731-2>
- Quiers, M., Develle, A.-L., Couchoud, I., Chalmin-Aljanabi, E., Perrette, Y., 2013.** *Adaptation de la technique de mesure de fluorescence X par scanner XRF aux spéléothèmes.* Poster EDYTEM.
- Quiles, A., Valladas, H., Bocherens, H., Delqué-Količ, E., Kaltnecker, E., Plicht, J. van der, Delannoy, J.-J., Feruglio, V., Fritz, C., Monney, J., Philippe, M., Tosello, G., Clottes, J., Geneste, J.-M., 2016.** A high-precision chronological model for the decorated Upper Paleolithic cave of Chauvet-Pont d'Arc, Ardèche, France. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 4670-4675. <https://doi.org/10.1073/pnas.1523158113>
- Quinif, Y., 1997.** Enregistrement et datation des effets sismo-tectoniques par l'étude des spéléothèmes. *Ann. Société Géologique Belg.* 119(1), 1-13.
- Quinif Y, 1989.** La datation Uranium Thorium. *Spéléochronos*, 3-22.
- Quinif, Y., Genty, D., Maire, R., 1994.** Les spéléothèmes : un outil performant pour les études paléoclimatiques. *Bull. Société Géologique Fr.* 165, 603-612.

R

- Radwan, M.M., Makarovic, B., I. voor L., 1980.** *Digital mono-plotting system - improvements and tests.* ITC-J. Neth.3, 511-534.
- Ravanel, L., Deline, P., 2011.** Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. *The Holocene*, 21, 357-365. <https://doi.org/10.1177/0959683610374887>
- Revil, A., Pezard, P.A., 1998.** Streaming electrical potential anomaly along faults in geothermal areas. *Geophys. Res. Lett.* 25, 3197-3200. <https://doi.org/10.1029/98GL02384>
- Rhoades, J.D., 1982.** Cation Exchange Capacity. *Methods Soil Anal. Part 2 Chem. Microbiol. Prop. Agronomy monogra*, 149-157. <https://doi.org/10.2134/agronomogr9.2.2ed.c8>
- Richter, T.O., Gaast, S. van der, Koster, B., Vaars, A., Gieles, R., Stigter, H.C. de, Haas, H.D., Weering, T.C.E. van, 2006.** The Avaatech XRF Core Scanner: technical description and applications to NE Atlantic sediments. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 267, 39-50. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.03>
- Riebe, C.S., Granger, D.E., 2013.** Quantifying effects of deep and near-surface chemical erosion on cosmogenic nuclides in soils, saprolite, and sediment. *Earth Surf. Process. Landf.* 38, 523-533. <https://doi.org/10.1002/esp.3339>
- Rink, W.J., 1997.** Electron spin resonance (ESR) dating and ESR applications in quaternary science and archaeometry. *Radiat. Meas.* 27, 975-1025. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)00219-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00219-9)
- Robert, T., Dassargues, A., Brouyère, S., Kaufmann, O., Hallet, V., Nguyen, F., 2011.** Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods for a water well drilling program in fractured/karstified limestones. *J. Appl. Geophys.* 75, 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.008>
- Rochette, P., Bertrand, H., Braun, C., Berger, E., 1993.** La province volcanique Pléistocène Supérieur du Bas-Vivarais (Ardèche, France) : propagation de fentes crustales en échelons ? *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 316(7), 913-920.
- Rödder, T., Kneisel, C., 2012.** Permafrost mapping using quasi-3D resistivity imaging, Murtèl, Swiss Alps. *Surf. Geophys.* 10, 117-127. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2011029>
- Roman, F., 1950.** Le Bas Vivarais (Géologie régionale de la France, VI). *Actual Sci. Ind.* Hermann 150.
- Rousseau, L., 1933.** Le Magdalénien dans la Vienne. Découverte et fouille d'un gisement du Magdalénien à Angles-sur-l'Anglin (Vienne). *Bull. Société Préhistorique Fr.* 30, 239-256. <https://doi.org/10.3406/bspf.1933.12156>

S

- Sabatier, P., Dezileau, L., Briquieu, L., Colin, C., Siani, G., 2010.** Clay minerals and geochemistry record from northwest Mediterranean coastal lagoon sequence: Implications for paleostorm reconstruction. *Sediment. Geol.* 228, 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.04.012>
- Sadier, B., 2013.** *3D et géomorphologie karstique : La grotte Chauvet et les cavités des Gorges de l'Ardèche*, doctoral dissertation, 478p.
- Sadier, B., Delannoy, J.-J., Benedetti, L., Bourles, D.L., Jaillet, S., Geneste, J.-M., Lebatard, A.-E., Arnold, M., 2012.** Further constraints on the Chauvet cave artwork elaboration. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 8002-8006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1118593109>

- Saison, A., 2017. *Diagnostic archéologique du contournement routier par RD 390-RD 4*. Moyen Âge, 3.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173-193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Sanchis, E., Séranne, M., 2000. Structural style and tectonic evolution of a polyphase extensional basin of the Gulf of Lion passive margin: the Tertiary Alès basin, southern France. *Tectonophysics*, 322, 219-242. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00097-4)
- Sanzelle, S., Pilleyre, T., Montret, M., Faïn, J., Miallier, D., Camus, G., de Goër de Hervé, A., Defleur, A., 2000. Datation par thermoluminescence : étude d'une corrélation chronologique possible entre le maar de La Vestide-du-Pal et un niveau de téphra de La Baume-Moula-Guercy (Ardèche, France). *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.* 330, 541-546. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)00171-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)00171-3)
- Sasco, R., Guillou, H., Nomade, S., Scao, V., Maury, R.C., Kissel, C., Wandres, C., 2017a. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and unspiked ⁴⁰K-⁴⁰Ar dating of upper Pleistocene volcanic activity in the Bas-Vivarais (Ardèche, France). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 341, 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.003>
- Sasco, R., Guillou, H., Nomade, S., Scao, V., Maury, R.C., Kissel, C., Wandres, C., 2017b. ⁴⁰Ar/ ³⁹Ar and unspiked ⁴⁰K- ⁴⁰Ar dating of upper Pleistocene volcanic activity in the Bas-Vivarais (Ardèche, France). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 341, 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.003>
- Scapozza, C., Laigre, L., 2014. The contribution of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Alpine dynamics geomorphology: case studies from the Swiss Alps. *Géomorphologie Relief Processus Environnement*, 20, 27-42.
- Schaller, M., Ehlers, T.A., 2006. Limits to quantifying climate driven changes in denudation rates with cosmogenic radionuclides. *Earth Planet. Sci. Lett.* 248, 153-167. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.027>
- Schoene, B., 2014. *U–Th–Pb Geochronology*, in: *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, pp. 341-378. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00310-7>
- Scropton, N., Burns, S., Dawson, P., Rhodes, J.M., Brent, K., McGee, D., Heijnis, H., Gadd, P., Hantoro, W., Gagan, M., 2018. Rapid measurement of strontium in speleothems using core-scanning micro X-ray fluorescence. *Chem. Geol.* 487, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.04.008>
- Seguinot, J., Ivy-Ochs, S., Juvet, G., Huss, M., Funk, M., Preusser, F., 2018. Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps. *The Cryosphere*, 12, 3265-3285. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000297918>
- Sheffer, N.A., Enzel, Y., Benito, G., Grodek, T., Poart, N., Lang, M., Nallet, R., Cœur, D., 2003. Paleofloods and historical floods of the Ardèche River, France: *Water Resour. Res.* 39(12), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2003WR002468>
- Siame, L.L., Chen, R.-F., Derriex, F., Lee, J.-C., Chang, K.-J., Bourlès, D.L., Braucher, R., Léanni, L., Kang, C.-C., Chang, C.-P., Chu, H.-T., 2012. Pleistocene alluvial deposits dating along frontal thrust of Changhua Fault in western Taiwan: The cosmic ray exposure point of view. *J. Asian Earth Sci.* 51, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.02.002>
- Sibson, R., Barnett, V., 1981. Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. *Interpreting multivariate data*. 21-36.
- Stark, C., Barbour, J., Hayakawa, Y., Hattanji, T., Hovius, N., Chen, H., Weei-Ching, L., Horng, M.-J., Xu, K.-Q., Fukahata, Y., 2010. The Climatic Signature of Incised River Meanders. *Science*, 327(5972), 1497-1501. URL <http://science.sciencemag.org/content/327/5972/1497> (accessed 3.28.19).
- Stock, G.M., Frankel, K.L., Ehlers, T.A., Schaller, M., Briggs, S.M., Finkel, R.C., 2009. Spatial and temporal variations in denudation of the Wasatch Mountains, Utah, USA. *Spatial and temporal variations in denudation. Lithosphere*, 1, 34-40. <https://doi.org/10.1130/L15.1>
- Stone, J., Allan, G.L., Fifield, L.K., Evans, J.M., Chivas, A.R., 1994. Limestone erosion measurements with cosmogenic chlorine-36 in calcite — preliminary results from Australia. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* 92, 311-316. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(94\)96025-9](https://doi.org/10.1016/0168-583X(94)96025-9)
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 38, 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Subercaze, A., 2017. *Utilisation combinée des rayons X et Gamma émis lors de l'interaction avec la matière d'ions légers aux énergies intermédiaires : des mécanismes primaires de réaction aux applications*, Thèse de Doctorat de l'Université Bretagne Loire.
- ## T
- Taillefer, F., 1949. Les méandres des rivières. *Inf. Géographique*, 13, 120-125.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resour. Res.* 33, 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tassy, A., Mocochain, L., Bellier, O., Braucher, R., 2013. Coupling cosmogenic dating and magnetostratigraphy to constrain the chronological evolution of peri-Mediterranean karsts during the Messinian and the Pliocene: Example of Ardèche valley, Southern France. *Geomorphology*, 81-92.
- Thibault, G., Hullot, J.-F., Genuite, K., Tosello, G., Droulez, J., Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Sadier, B., Monney, J., Dolle, L., Geneste, J.-M., *soumis*, The Visibility of Parietal Entities Under Paleolithic Lighting: Perceptual Experimentation and Probabilistic Modelling Applied to the Chauvet-Pont d'Arc Cave. *Journal of Archaeological Method and Theory*, *soumis*.
- Tierney, J., Giosan, L., Donnelly, J.P., Shuman, B., 2005. The Use of Scanning XRF Technology in Terrestrial Paleoclimatology and Paleohydrology. *AGU Fall Meet. Abstr.* 14, PP14B-02.
- Tissoux, H., Falguères, C., Voinchet, P., Toyoda, S., Bahain, J.J., Despriée, J., 2007. Potential use of Ti-center in ESR dating of fluvial sediment. *Quaternary Geochronology*, 2, 367-372. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2006.04.006>
- Tooth, A.F., Fairchild, I.J., 2003. Soil and karst aquifer hydrological controls on the geochemical evolution of speleothem-forming drip waters, Crag Cave, southwest Ireland. *J. Hydrol.* 273, 51-68. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00349-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00349-9)

- Toyoda, S., Voinchet, P., Falguères, C., Dolo, J.M., Laurent, M., 2000.** Bleaching of ESR signals by the sunlight: a laboratory experiment for establishing the ESR dating of sediments. *Appl. Radiat. Isot.* 52, 1357-1362. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00095-6)
- Treble, P., Shelley, J.M.G., Chappell, J., 2003.** Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911–1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 216, 141-153. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00504-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00504-1)
- Tricart, J., 1972.** Cartographie géomorphologique. *Ann. Géographie*, 81, 751-753.

V

- Valladas, H., Tisnérat-Laborde, N., Cachier, H., Kaltnecker, E., Arnold, M., Oberlin, C., Evin, J., 2005.** Bilan des datations carbone 14 effectuées sur des charbons de bois de la grotte Chauvet. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 102, 109-113.
- Valois, R., Bermejo, L., Guérin, R., Hinguant, S., Pigeaud, R., Rodet, J., 2010.** Karstic morphologies identified with geophysics around Saulges caves (Mayenne, France). *Archaeol. Prospect.* 17, 151-160. <https://doi.org/10.1002/arp.385>
- Vayssière, A., Depret, T., Castanet, C., Gautier, E., Virmoux, C., Carcaud, N., Garnier, A., Brunstein, D., Pinheiro, D., 2016.** Etude des paléoméandres holocènes de la plaine alluviale du Cher (site de Bigny, moyenne vallée du Cher). *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 22, 163-176. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11369>
- Vermeesch, P., 2018.** IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geosci. Front., Special Issue: Frontiers in geoscience: A tribute to Prof. Xuanxue Mo*, 9, 1479-1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Vogel, J.C., Waterbolk, H.T., 1963.** Groningen Radiocarbon Dates IV. *Radiocarbon*, 5, 163-202. <https://doi.org/10.1017/S0033822200036857>
- Voinchet, P., 2002.** *Datation par résonance paramagnétique électronique (RPE) de quartz blanchis extraits de sédiments fluviaux pléistocènes : contribution méthodologique et application aux systèmes de la Creuse, du Loir et de l'Yonne.* Thèse de doctorat, Paris, Muséum national d'histoire naturelle.
- Voinchet, P., Bahain, J.-J., Falguères, C., Laurent, M., Dolo, J., Despriée, J., Gageonnet, R., Chaussé, C., 2004.** ESR dating of quartz extracted from Quaternary sediments application to fluvial terraces system of northern France [Datation par résonance paramagnétique électronique (RPE) de quartz fluviaux quaternaires: application aux systèmes de terrasses du nord de la France.]. *Quaternaire*, 15, 135-141. <https://doi.org/10.3406/quate.2004.1761>
- Von Blanckenburg, F., 2006.** The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth Planet. Sci. Lett.* 242, 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.017>
- Vosselman, G., 2000.** Slope based filtering of laser altimetry data. *IAPRS*, 33, 935-942.

W

- Wagstaff, J.M., 1987.** *Landscape and culture: geographical and archaeological perspectives.* B. Blackwell (ed).
- Wainer, K., Genty, D., Blamart, D., Daëron, M., Bar-Matthews, M., Vonhof, H., Dublyansky, Y., Pons-Branchu, E., Thomas, L., van Calsteren, P., Quinif, Y., Caillon, N., 2011.** Speleothem record of the last 180 ka in Villars cave (SW France): Investigation of a large $\delta^{18}\text{O}$ shift between MIS6 and MIS5. *Quaternary Science Reviews*, 30, 130-146. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.07.004>
- Weil, J.A., 1984.** A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Phys. Chemical Mineralogy*, 10, 149–165. <https://doi.org/10.1007/BF00311472>
- Welsh, D., 2015.** *Aboriginal paintings of Drysdale River National Park, Kimberley, Western Australia.* Coolalinga.
- Westaway, R., Bridgland, D., White, M., 2006.** The Quaternary uplift history of central southern England: evidence from the terraces of the Solent River system and nearby raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2212-2250. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.06.005>
- Wiesmann, S., Steiner, L., Pozzi, M., Bozzini, C., Bauder, A., Hurni, L., 2012.** Reconstructing Historic Glacier States Based on Terrestrial Oblique Photographs. In *Proceedings of the AutoCarto International Symposium on Automated Cartography*, Columbus, OH, USA (Vol. 1618). 14.
- Wintle, A.G., Huntley, D.J., 1982.** Thermoluminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, 1, 31-53. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(82\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0277-3791(82)90018-X)
- Wray, R.A.L., 1997.** *Quartzite dissolution: karst or pseudokarst?* Speleogenesis and evolution of karst aquifers, 9.

Y

- Yokoyama, Y., Falguères, C., Quaegebeur, J.P., 1985.** ESR dating of quartz from quaternary sediments: First attempt. *Nucl. Tracks Radiat. Meas. Special Issue: Thermoluminescence and Electron-Spin-Resonance Dating* 10, 921-928. [https://doi.org/10.1016/0735-245X\(85\)90109-7](https://doi.org/10.1016/0735-245X(85)90109-7)

Z

- Zavoiski, E., 1945.** Spin-magnetic resonance in paramagnetics. *J Phys USSR*, 9, 211-245.
- Zeeman, P., 1896.** *Over den invloed eener magnetisatie op den aard van het door een stof uitgezonden licht.* Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam.
- Zeller, E.J., Levy, P.W., Mattern, P.L., 1967.** *Geologic dating by electron spin resonance.* *Radioact. Dating Methods Low-Level Count.* Proc. Symp.
- Zhang, W., Cui, Z., 2007.** *Data processing and Analysis Tools. National Center for Airborne Laser mapping. National Center for Airborne Laser mapping.* Florida International university.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G., 2016.** An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sens.* 8, 501.
- Zhou, W., Beck, B.F., Stephenson, J.B., 2000.** Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes. *Environ. Geol.* 39, 760–766. <https://doi.org/10.1007/s002540050491>

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

Articles de revue

- Génuite, K.**, Delannoy, J.-J., Jaillet, S., Arnaud, J., Berthet, J., Génuite, P., 2019. Le Pont d'Arc et la grotte des Châtaigniers (Gorges de l'Ardèche, France), indicateurs des processus du recouplement du méandre de la Combe d'Arc. *Géomorphologie : Relief Processus Environnements*, 25, 57–68.
- Génuite, K.**, Delannoy, J.-J., Jaillet, S., 2018. Reconstitution des paléogéographies karstiques par l'approche cartographique 3D: Application au Pont d'Arc et à la Combe d'Arc (Ardèche, France). *Karstologia*, 67, 17–24.
- Génuite, K.**, Perrette, Y., Jaillet, S., 2018. Flowstone growth in Gournier River (Vercors, France): a diachronic landscape analysis by 3D modelling and photo draping. *International Journal of Speleology*, 47, 81–91.
- David, B., Delannoy, J.-J., Petchey, F., Gunn, R.G., Huntley, J., Verth, P., **Génuite, K.**, Skelly, R., Mialanes, J., Harper, S., Ouzman, S., Balangarra corp, Heaney, P., Cosgrove, R., Field, J., Coster, A., Wong, W., 2019. Dating painting events through by-products of ochre processing: Borologa 1, Kimberley, Australia. *AAAR, Rock Art Australian Archaeology*.
- Jaillet, S., Pons-Branchu, E., Hobléa, F., Berthet, J., Deline, P., Duvillard, P.-A., **Génuite, K.**, 2018. La dépression glacio-karstique du Mariet (Bauges occidentales, France) : un marqueur de l'englacement würmien des Alpes françaises du Nord. *Géomorphologie Relief Process. Environ*, 24, 107–120. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12139>

Livres

- Jaillet, S., Pons-Branchu, E., Couchoud I., Coutterand, S., Hobléa, F., Berthet, F., Delannoy, J.-J., Deline, P., Duvillard P.-A., Dodelin, C., Foliot, I., Gauchon, C. **Génuite, K.**, Lanet, O., Lesaulnier, P., Ménard, G., Mulot, J., Nant, J., Lips, S., Tessane, E., 2018. Héritages glaciaires würmiens et enregistrements karstiques dans la bordure occidentale des Bauges (Alpes du Nord, France) *Karstologia: mémoires* 20,

Articles soumis

- Génuite, K.**, Jaillet S., Berthet, J., Mourey J., 2020. Lidar Terrestre, Consolider des nuages de points par les cibles : Protocole et limites méthodologiques. *Collection EDYTEM : 2D-3D-4D Environnements naturels, soumis*.
- Delannoy, J.-J., David, B., **Génuite, K.**, Finch, D., Ouzman, S., Green, H., Harper, S., Balangarra corp, Skelly, R., 2020. Investigating the construction of rock art sites through archaeomorphology: the case of Borologa, Kimberley, Australia. *Journal of Archaeological Method and Theory, submitted*.
- Marcer, M., Ringso-Nielsen, S., Ribeyre, C., Kummert, M., Duvillard, P.-A., Schoeneich, P., Bodin, X., **Génuite, K.**, accepté. Investigating the slope failures at the Lou rock glacier front, French Alps. *Permafrost and Periglacial processes, in press*.
- Thibault, G., Hulot, J.-F., **Génuite, K.**, Tosello, G., Droulez, J., Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Sadier, B., Monney, J., Dolle, L., Geneste, J.-M., soumis, The Visibility of Parietal Entities Under Paleolithic Lighting: Perceptual Experimentation and Probabilistic Modelling Applied to the Chauvet-Pont d'Arc Cave. *Journal of Archaeological Method and Theory, soumis*.
- Jaillet, S., Bruxelles, L., Delannoy, J.-J., Delannoy, Y., **Génuite, K.**, Monney, J., 2019 (accepté). Spéléogénèse de la grotte des deux Ouvertures (Gorges de l'Ardèche, France). Implication pour les fréquentations humaines et animales. *Colloque Paysages et préhistoire, Hommage à Paul Ambert. Accepté*.
- Jaillet, S., Delannoy, J.-J., **Génuite, K.**, Hobléa, F., Monney, J., (soumis). L'image topographique du karst et des grottes : entre représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire. *Géomorphologie Relief Processu Environnement*.

Communications dans un colloque international

- Génuite, K.**, Jaillet, S., Revil, A., Gresse, M., Voinchet, P., Pons-Branchu, E., Bahain, J.-J., Delannoy, J.-J., Arnaud, J., Marchand, T., Génuite, P., The Châtaigniers cave (Gorges de l'Ardèche, France), an indicator of river Pleistocene evolution and the Pont d'Arc meander shortcuts. *27th International Karstological School, 2019, Postojna*.
- Génuite, K.**, Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Arnaud, J., Marchand, T., Le karst de la grotte des Châtaigniers: une cavité pour comprendre la genèse du Pont d'Arc et de la Combe d'Arc. *Journées de Spéléologie Scientifique de Belgique, 2018, Han-Sur-Lesse*.
- Génuite, K.**, Delannoy, J.-J., Jaillet, S., 2018. Reconstitution des paléogéographies karstiques par l'approche cartographique 3D: Application au Pont d'Arc et à la Combe d'Arc (Ardèche, France). *Colloque International KARST2018, Journées de l'Association Française de Karstologie, Chambéry*.

Communications dans un colloque national

Génuite, K., Delannoy, J.-J., Jaillet, S., 2018. Apports de la géomorphologie 3D dans la reconstitution des paléogéographies préhistoriques disparues. reconstituer l'invisible à l'aide de la topographie haute-résolution. *25^{èmes} Journées des jeunes Géomorphologues, Lyon.*

Génuite, K., Pons-Branchu, Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Arnaud, J., Marchand, T., Genuite, P., 2019. Le Pont d'Arc et la grotte des Châtaigniers (Gorges de l'Ardèche, France), indicateurs des processus du recouplement du méandre de la Combe d'Arc. 18^{èmes} RIKRAK, Saint Guillemlé désert, France.

Communications régionales

Génuite, K., Jaillet, S., Delannoy, J.-J., Arnaud, J., Marchand, T., Le karst de la grotte des Châtaigniers: une cavité pour comprendre la génèse du Pont d'Arc et de la Combe d'Arc. *Congrès spéléologique de haute-Savoie, Samoëns.*

Posters

Génuite, K., Jaillet, S., Delannoy, J.-J., 2016. Le concrétionnement actif dans la rivière de Gournier: Analyse paysagère et modélisation 3D. *Journée des Doctorants de l'USMB, 2016.*

Génuite, K., Jaillet, S., Delannoy, J.-J., 2017. Vers une évolution paysagère des environs du Pont d'Arc (Ardèche, France): apports de la 4D à la cartographie géomorphologique haute résolution. *Journée de Spéléologie Scientifique de Belgique, 2017, Han-Sur-Lesse.*

TABLE DES FIGURES

Introduction

Figure 1 L'approche géomorphologique permet de distinguer les différents facteurs impactant l'évolution des reliefs et des paysages, et ainsi proposer des reconstitutions de ces derniers. Schéma : Delannoy J-J, non publié. 15

Figure 2 Modèle théorique des processus à l'œuvre au sein de la zone critique, et des approches concernées. La prise en compte des interactions du système terre dans une démarche intégrée place l'évolution du relief au centre de la compréhension de l'évolution des paysages, sur des temporalités courtes (anthropisation, occupation humaine) ainsi que pour des dynamiques à plus long terme (érosion des versants, sédimentation des rivières, variations climatiques régionales). Figure tirée du programme équipement d'excellence (EQUIPEX) CRITEX (2012). 16

Figure 3 Démarche méthodologique mise en place au cours de la thèse. Après une phase d'acquisition sur le terrain (données topographiques et caractérisation morphologique), ces informations sont rassemblées au sein d'un même modèle spatial qui permet leur confrontation et leur corrélation. 17

Figure 4 Représentation 1.5D, 2D, 2.5D, et 3D des incertitudes en science. Cette figure, loin d'être exhaustive, montre que la multiplication des dimensions est complexe à représenter, et les incertitudes associées également. Plus on ajoute de dimensions, plus il y a d'informations, moins la représentation des incertitudes est lisible. 18

Figure 5 Présentation du contexte géographique et géomorphologique des trois sites d'étude. Ils sont tous localisés dans une vallée encaissée méandrique, soit à l'entrée ou à la sortie d'un méandre. 19

Figure 6 Sites d'étude abordés : Chauvet- Pont d'Arc ; Roc- aux- Sorciers ; monolithes Borologa. 19

Figure 7 Reconstitution 3D des paléo-reliefs du Roc-aux-Sorciers au temps des occupations humaines (avant l'effondrement). L'approche géomorphologique 3D, en convoquant les résultats des recherches précédentes, a permis de proposer une reconstitution de la géométrie des sols archéologiques enfouis ainsi qu'un abri-sous-roche beaucoup plus en porte-à-faux (plusieurs mètres) qu'il ne l'est actuellement. 20

Figure 8 Evolution du versant Borologa et déplacement de monolithes au cours du temps. Trois grandes phases ont pu être distinguées par la rétro-modélisation 3D des blocs de quartzite. Ce travail a mené à une formalisation des processus géomorphologiques à l'œuvre sur un versant de quartzite. Ces reconstitutions amènent à reconstruire les fréquentations passées dans un cadre d'évolution ayant des temporalités beaucoup plus longues : l'évolution du versant. 21

Figure 9 Reconstitution des paléo-morphologies fluviales lors du stade final du recoupelement du méandre de la Combe d'Arc, désormais abandonné. La reconstitution des morphologies disparues ou enfouies au moyen d'investigations géophysiques et topographiques haute-résolution a débouché sur un cadrage précis de l'évolution du méandre, ayant permis de dater avec précision le stade final du recoupelement. 22

Figure 10 Mobilisation des méthodes et outils employés sur chaque site étudié. L'élargissement des questionnements et des zones de recherche implique des processus de plus en plus complexes et la multiplication des différentes approches. Chaque étape méthodologique reste réalisée sous le contrôle d'une construction géométrique. 23

Chapitre 1

Figure 11 Modèle 3D du site du Roc-aux-Sorciers, Anglin, France. Une vue possible sur la topographie en amont de la vallée de l'Anglin à partir de la reconstitution théorique du niveau d'occupation Magdalénien moyen du site. Les travaux de reconstitution proposés au cours de ce travail de thèse sont basés sur des acquisitions 3D des sites archéologiques et de leur environnement physique direct. L'approche géomorphologique a été pensée dès le départ avec les travaux archéologiques pour concevoir un modèle 3D intégré, répondant à plusieurs questionnements disciplinaires. 25

Figure 12 Localisation du site du Roc-aux-Sorciers. L'abri-sous-roche est localisé dans le dernier coude de l'Anglin, qui conflue avec la Gartempe plus au nord. 27

Figure 13 La frise sculptée du Roc-aux-Sorciers : une œuvre de sculpture magdalénienne unique. Ces sculptures sont dans la partie aval du site archéologique, dans l'Abri Bourdois et distinguent ce site des autres par l'unicité de telles œuvres d'art : sculptures marquant profondément la pierre et d'une grande finesse. Ces dernières ont été très bien conservées, longtemps enfouies et protégées par les sédiments. (Photo : Ph. Plailly) Topographie : Ph. Conte, Gulliver ; Centre d'interprétation du Roc-aux-Sorciers. 28

Figure 14 Etude sédimentaire réalisée dans les remplissages de l'Abri Bourdois. (Bozet et Miskovsky ,2010). La composition de ce dernier montre des blocs pluridécimétriques à la base de la coupe (-230/- 310 cm), recouverts jusqu'au sommet par des groises de gélifraction. Modèle d'âge recompilé avec clam 2.2 (Blauw, 2010). Etant donné l'ancienneté des datations radiocarbones (Vogel et Waterbolk,1963) et les cassures apparaissant dans le modèle d'âge, la chronologie nécessiterait une nouvelle campagne de datations 14C avec les nouvelles méthodes MC-ICPMS ; ce qui est également suggéré par Bourdier et al. (2017). 28

Figure 15 Cartographie géomorphologique des terrasses alluviales autour de la confluence Anglin-Gartempe. Malgré l'étagement peu marqué des terrasses et leur empreinte discrète dans le paysage, la topographie haute résolution permet tout de même de distinguer différentes générations de dépôt. Isohypses : MNT5m RGEAlt IGN. 31

Figure 16 Placement des cibles sphériques sur le terrain. Le positionnement de ces repères, bien visibles dans le paysage, doit constamment être pris en compte par l'opérateur car la qualité de la consolidation est grandement dépendante du positionnement des cibles sur le terrain. L'opérateur doit ainsi évaluer les zones de recouvrement des scans pour y positionner au moins 3 cibles en vue de la prochaine station de scan. 1. Sphère, 2. Disque, 3. Damier. 32

Figure 17 Consolidation par les cibles de plusieurs scènes de scan. Les nuages de points sont ainsi repositionnés par les sphères posées sur le terrain. On note la présence au sol de cercles, zones moins densément scannées car sous le scanner lui-même. 33

Figure 18 De l'acquisition à la consolidation. Le travail de l'opérateur commence dès la phase « terrain ». Il est préférable que l'opérateur de la consolidation soit également celui qui scanne et place les cibles sur le terrain. La phase de consolidation sur station informatique est composée d'une sélection semi-automatique des cibles, puis d'un alignement numérique des nuages en fonction de ces dernières. A toutes les étapes de traitement de la donnée, un contrôle visuel reste de toute façon nécessaire. 34

Figure 19 De la consolidation à l'utilisation des données topographiques. Les nuages de points issus du scanner sont assemblés en un seul jeu de données, qui est ensuite traité et classifié (différenciation sol-végétation) avant d'être maillé, en raster ou en triangulation Delaunay 3D. Ces différentes sorties du nuage de points permettent de conduire de nouvelles analyses géomorphométriques (calculs de volumes, pentes, par exemple). 35

Figure 20 Différentes manières de visualiser une information par l'intermédiaire de l'imagerie 3D. Au-delà des modes de visualisation « classiques » (vision perspective, orthonormée), d'autres points de vue (vue interne) et d'autres manières de voir et percevoir son environnement (vue 360, réalité virtuelle) sont possibles. 36

Figure 21 Amélioration visuelle du site par l'utilisation du modèle 3D. Les sols sont visibles, notamment les talus qui bordent la rivière, juste en aval du site. De gros blocs affleurent également dans le talus. L'élimination de la végétation permet de visualiser le site dans son contexte morphologique et topographique. 37

Figure 22 Cartographie géomorphologique du site du Roc - aux - Sorciers. Le site est clairement dominé par les processus périglaciaires (tabliers d'éboulis formés de gélifracsts grossiers (groise) et une dynamique d'effondrement (blocs de gros volume retrouvés lors des coupes archéologiques). Les fouilles archéologiques sont également représentées (ligne rouge). Elles ont permis de dégager le site de sa gangue sédimentaire, composée en majorité de clastes issus du versant. 39

Figure 23 Coupes simplifiées du site du Roc-aux-Sorciers avec localisation des fouilles et de l'art pariétal : les excavations archéologiques ont entaillé l'ancienne surface correspondant au tablier d'éboulis. 40

Figure 24 Utilisation des archives historiques (photographies du site avant et pendant les fouilles) pour reconstituer l'ancien niveau du tablier d'éboulis sur le modèle maillé 3D. Photographies : Fond Saint-Mathurin (1950), archives MAN. 41

Figure 25 Interpolation de la surface d'occupation magdalénienne pré-effondrement. Méthodologie de reconstruction d'une paléo-topographie à partir d'informations ponctuelles sur cette dernière. 42

Figure 26 Monoplotting des niveaux pré-fouilles digitalisés à l'aide de documents historiques. Les niveaux du tablier d'éboulis sont digitalisés sur le modèle à l'aide de polygones 3D ou de points. Ces derniers sont ensuite maillés en 2,5D (interpolation par triangulation linéaire Delaunay 3D, ici en jaune). La morphologie de l'éboulis est alors reconstituée et peut être interprétée. 43

Figure 27 Fracturation et topographie des parois surplombant le site orné du Roc-aux-Sorciers. Carte de la profondeur et carte des pentes calculées par rapport au point de vue choisi). Fracturation en rouge. 42

Figure 28 Reconstitution en plusieurs phases de la morphogénèse du Roc-aux-Sorciers actuel. La reconstitution tente ici de mêler les résultats des reconstitutions 3D (modèle triangulé en arrière-plan), avec des éléments de dessin, en traits pleins ou en pointillés, pour représenter les différents niveaux d'incertitude (notamment en rapport à la rivière). 1. Surface d'occupation Magdalénien moyen, 2. Effondrement rocheux, 3. Formation d'un tablier d'éboulis, 4. Découverte du site par les archéologues et mise en place d'un chantier de fouilles, 5. Mise en place d'infrastructures de conservation et de protection (site actuel). 45

Figure 29 Proposition d'interprétation des différentes phases de morphogénèse et de fréquentation du site du Roc-aux-Sorciers (abri Bourdois) à partir du modèle 3D et de l'étude sédimentologique. La combinaison des regards au sein du modèle 3D permet de proposer une hypothèse d'évolution chronologique des morphologies du site, en tenant compte des informations géomorphologiques (les clastes et leur provenance, les blocs effondrés) ainsi que de l'étude stratigraphique et archéologique. 46

Chapitre 2

Figure 30 Situés au Nord-Ouest de l'Australie, les plateaux du Kimberley possèdent des vestiges d'occupations passées parmi les plus anciens, remontant à plus de 55 ka (Verth, 2017). Le site Borologa, se situe à la sortie des gorges de la Drysdale River. Les monolithes de quartzite (A) ont servi de support aux représentations des Wanjina (B). Figure reprise de : David et al. (2019). 50

Figure 31 L'acquisition topographique haute résolution a été réalisée en fonction des attentes scientifiques autour du site Borologa et a mobilisé plusieurs protocoles méthodologiques. L'utilisation du LiDAR à décalage de phase sur l'ensemble du site a permis d'alterner des acquisitions à haute résolution pour les zones ornées avec des passages à plus basse résolution pour une couverture générale plus étendue à l'échelle du versant. D'autres méthodes d'acquisition des données (photogrammétrie, photos) ont ponctuellement été utilisées au cours de l'acquisition. Noir : données ; rouge : travaux sur la donnée. 51

Figure 32 Scan régulier de l'excavation pour documenter sa progression. Le recalage par rapport à des cibles fixes au cours de la mission a permis leur consolidation automatique, permettant ainsi d'obtenir une vision précise de l'évolution de l'excavation ainsi que de la topographie des surfaces excavées. L'étape finale de l'excavation a également été levée par photogrammétrie afin d'obtenir un levé en couleur, puis recalé par rapport au levé LiDAR. Coupe détaillée d'après : David et al. (2019) 52

Figure 33 La cartographie anthropo-géomorphologique du monolithe Borologa 1 (DAO : Delannoy J-J, in : David et al., 2019) se base sur le placement des blocs sur le terrain et l'étude de leurs ancrages potentiels pour déterminer l'origine de leur mouvement : anthropique ou naturel. L'acquisition LiDAR convertie en MNT ombré offre un support cartographique pertinent pour identifier l'origine des blocs. Le couplage de cette approche au modèle 3D permettra d'aller plus loin et de proposer des protocoles de validation géométrique des zones d'ancrage au moyen de la topographie haute résolution. 53

Figure 34 Cartographie géomorphologique du dernier méandre de la Drysdale River qui sort du plateau du Kimberley. Le site est localisé au débouché des gorges, au contact entre les reliefs en plateaux étagés et la plaine occidentale qu'emprunte la Drysdale River jusqu'à son embouchure dans l'Océan Indien. Topographie : SRTM 90 m. 54

Figure 35 Cartographie géomorphologique du versant du site Borologa (rive droite de la Drysdale River). La localisation du site, à l'interface entre les dynamiques de versant et la morphogénèse fluviale, met en avant cette double influence, à la fois du plateau (dynamique gravitaire) et de la rivière (dynamique fluviale). Le travail mené par Gaël Caze et co-auteurs (2016) a permis de corréliser le rapport $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ avec le degré de pente des escarpements rocheux pour des échantillons de quartzite du Kimberley, contraignant les évolutions des monolithes du versant de la Drysdale river dans des temporalités du Pléistocène moyen. Datations cosmogéniques : Cazes et al., 2016. 56

Figure 36 Modélisation 3D de l'escarpement rocheux. La visualisation 3D permet de distinguer les 3 niveaux principaux (escarpements E1, E2 et E3), localisés en rive droite de la Drysdale River. 56

Figure 37 Principe de la triangulation de Delaunay par interpolation. La géométrie obtenue est anguleuse (sommets des triangles) et peut, si tous les points sont utilisés comme sommet, strictement correspondre à la géométrie du nuage de points. D'après: Thibault et al., soumis. 58

Figure 38 Segmentation et maillage des blocs de quartzite. Ces derniers, une fois séparés de la couche sol, restent entachés d'incertitudes car seule une partie de la surface de ces derniers est acquise par le scanner. La géométrie des surfaces enfouies n'étant pas accessible par la méthode du LiDAR, elle est alors reconstruite par l'opérateur. 58

Figure 39 Traitement géomorphométrique du MNT LiDAR (2 cm) sous le SIG d'analyse raster : SAGA-GIS. 1 : Carte des pentes. 2 : MNT ombré. 3 : Carte des altitudes. 4 : Isovaleurs d'altitude. 5 : Réseau hydrographique théorique. 6 : Cartographie géomorphologique du mouvement de versant. 59

Figure 40 Etablissement d'une coupe stratigraphique de synthèse à partir des mesures sur le modèle 3D. L'épaisseur des bancs de quartzite permet d'effectuer des corrélations entre les bancs à l'affleurement et les blocs de quartzite présents plus bas dans le versant. 60

Figure 41 Identification de liens entre différents blocs par observation du modèle 3D et à partir des informations stratigraphiques des bancs de quartzite. Le travail préalable sur la stratigraphie des bancs de quartzite permet, ici en plan, de reconstruire une première hypothèse de mise en place du mouvement de versant. 61

Figure 42 Assemblage par la méthode du « best fit » (Besl et McKay, 1992). L'algorithme ICP (Iterative Closest Point) met en correspondance les morphologies en identifiant des points et des distances communes entre les nuages/maillages. Un pré-alignement manuel est donc souvent nécessaire. 61

Figure 43 Protocole méthodologique de rétro-modélisation du versant. A chaque étape du processus, un contrôle visuel est effectué. Il est primordial et, à la manière d'un puzzle, oriente le jugement et permet de conserver un recul sur l'assemblage (cohérence avec les processus ou pas). Les zones enfouies, l'érosion des escarpements et les distances parfois importantes entre les blocs font qu'une démarche par essai-erreur se justifie pleinement, en plus de l'identification des couches communes. 62

Figure 44 Inspection visuelle des bancs de quartzite repositionnés près de l'escarpement : Les pointillés représentent la continuité des couches stratigraphiques, dont les épaisseurs semblent concorder. La reconstruction d'une morphologie tabulaire est également un point de contrôle important car ces morphologies sont fréquemment observées sur les versants. 63

Figure 45 Ajustement des blocs à leur emplacement originel. Certains blocs ont juste été reconstruits sur place, d'autres se sont scindés en groupements de blocs et ont servi à des reconstructions 3D plus importantes. La rétro-modélisation, guidée par l'analyse de la coupe stratigraphique de synthèse, a permis de proposer une reconstitution des monolithes à leur emplacement originel, ce qui génère un nouveau visuel de l'escarpement rocheux. 63

Figure 46 Ajustement manuel, validé par ajustement best-fit des monolithes Borologa 1 et 2. Leur reconstruction en un seul monolithe permet de reconstituer la « chambre » sous forme d'abri, accueillant actuellement les peintures pariétales sur chacun des deux blocs. 64

Figure 47 L'assemblage des blocs est effectué par un choix de l'opérateur. Il est ensuite validé par les cartes de corrélation du best-fit ou de l'alignement manuel. Les corrélations sont avant tout visuelles et permettent de retracer l'origine des blocs, faisant anciennement partie intégrante de l'escarpement et formant un relief tabulaire. 64

Figure 48 Chronoséquence des dynamiques du versant reconstitué par la modélisation 3D. Les phases d'évolution du versant mettent clairement en évidence les processus de glissement et de basculement des blocs. 66

Figure 49 Cartographie géomorpho - dynamique du recul du versant Borologa. Le mouvement de versant est identifié, ainsi que l'appartenance stratigraphique des blocs. Ce dernier s'arrête au niveau d'une terrasse sableuse d'origine fluviale et éolienne. Les corrélations spatiales sont bien établies sur la partie Est du modèle avec les monolithes Borologa 1 et 2 positionnés dans la continuité d'un mouvement global du versant, orienté dans le sens de la pente. Les corrélations sur la partie Ouest du modèle sont seulement supposées à cause d'un manque de données topographiques sur l'escarpement. 67

Figure 50 Processus de bascule des blocs par érosion différentielle des bancs de quartzite. Cette dynamique affecte les blocs de toute taille, des monolithes ornés (Borologa 1 et 2) aux blocs de quelques dizaines de centimètres. 68

Figure 51 Mise en évidence du processus de glissement des monolithes du versant. Bien que des phénomènes de rotation et de bascule s'appliquent également, le monolithe Borologa 1 conserve globalement ses caractéristiques de départ (pente et azimuth). La translation des gros blocs jusqu'au bas du versant met également en évidence le processus d'érosion différentielle des bancs de quartzite. La consistance de ces dernières peut varier et l'appel au vide entraîne alors la déstabilisation du versant. 69

Chapitre 3

Figure 52 Reconstitution topographique 3D du paléo-niveau de l'Ardèche à + 15 m à l'aide de relevés topographiques et de profils de tomographie électrique. 71

Figure 53 Synthèse des différentes méthodes mobilisées dans le cadre de cette étude pour la reconstitution géomorphologique des paysages. Différentes méthodes d'analyse et de prospection ont été utilisées pour étudier le méandre de la Combe d'Arc et son environnement physique. Chaque méthode employée est reliée par l'intermédiaire d'une construction topographique 3D. 72

Figure 54 Arche naturelle du Pont d'Arc. Les eaux de l'Ardèche s'écoulent aujourd'hui sous cet objet dont la facture topographique n'a pas d'équivalent sur terre. Les caractéristiques paysagères uniques de ce site en ont fait l'objet de deux démarches de mise en valeur : les opérations grand site de France, en 1991 (Duval et Gauchon, 2007) et 2017. Photographie : P. Génuite. 73

Figure 55 La grotte Chauvet, un haut lieu de l'art pariétal du Paléolithique supérieur (36000 ans BP). Cartographie géomorphologique des sols : Synthèse Jean-Jacques Delannoy. Photographies : Stéphane Jaillot. 74

Figure 56 Carte de localisation et de densité des grottes ornées des gorges de l'Ardèche au Paléolithique Supérieur. Le début et la fin du canyon ressortent nettement comme des zones de fréquentation. D'après : Monney, 2012. 75

Figure 57 L'arche naturelle du Pont d'Arc enjambe aujourd'hui le cours de l'Ardèche. Cet objet naturel majeur du paysage est aujourd'hui le lieu touristique le plus important du Sud-Ardèche. La connaissance de sa géométrie au Paléolithique supérieur, notamment durant les fréquentations connues de la grotte Chauvet, est au cœur de notre problématique géomorphologique. 76

Figure 58 Carte géomorphologique de la Combe d'Arc. Le méandre recoupé de l'entrée des gorges de l'Ardèche contient des marqueurs alluviaux caractérisés par des dépôts de galets, notamment dans sa partie amont et en rive gauche, après le Pont d'Arc. Ces niveaux, perchés par rapport à l'Ardèche actuelle (+ 30 m), sont la plupart du temps recouverts par des dépôts de pente. 77

Figure 59 Affleurements de galets localisés aux abords de l'Ardèche. Une fraction de ces derniers est visible dans le paysage à la faveur des aménagements routiers ou immobiliers ; la charge grossière représente le lit mineur de la rivière. 78

Figure 60 Carte géomorphologique des formes et formations alluviales à l'entrée des gorges de l'Ardèche. On relève la présence de terrasses par leurs replats typiques dans le relief. Les altitudes de ces niveaux alluviaux sont cartographiées à partir des relevés de terrain au dGPS, ou avec un point coté à proximité. Fond cartographique : MNE 1m, et réutilisation des travaux de Labrousse (1977), Mocochain et al. (2009), modifié. 78

Figure 61 Méthodologie 3D : la Combe d'Arc scannée, nettoyée de sa végétation et consolidée (assemblée). La résolution est suffisante pour permettre d'observer les modèles fluviaux - banquettes calcaires et dépôts sédimentaires - de part et d'autre du Pont d'Arc. Les plans digitalisés à partir des relevés au dGPS dessinent une première esquisse de la paléo-topographie du modèle fluvial du Cirque d'Estre. 81

Figure 62 Tableau comparatif des terrasses + 30 m, + 15 m et actuelle. La terrasse + 30 m possède des galets aux axes d'allongement plus importants que ceux de la terrasse + 15 m, ainsi qu'une proportion plus importante de galets de basalte. Dans les deux cas, les galets de calcaires sont absents ce qui contraste fortement avec la composition du cailloutis actuel où ces derniers représentent une portion majeure du spectre pétrographique. 82

Figure 63 Synthèse des datations effectuées sur les volcans pléistocènes du bassin versant ardéchois (sans les coulées des Coirons, très anciennes, 6 Ma) et densité d'activité. Radiocarbone : Berger, 1975. 40Ar/39Ar : Nomade et al., 2016 ; Sascó et al., 2017. 40K/40Ar ; Sascó et al., 2017. TL Quartz : Pilleyre et al., 1992 ; Sanzelle et al., 2000. TL plagioclases : Fleming, 1970 ; Guérin et Gillot, 2007. 82

Figure 64 Profil tomographique de la Combe d'Arc (Leroux et al., 2010). L'investigation des sous-sols par la méthode de l'ERT révèle plusieurs niveaux de résistivité électrique, pouvant correspondre à des niveaux limoneux, de galets, ou à la roche mère. L'organisation altitudinale des terrasses révèle un système étagé entre les terrasses + 30 m et + 15 m, et un système emboîté pour la terrasse + 15 m et les dépôts limoneux situés juste au-dessus d'elle (Sheffer et al., 2003). 83

Figure 65 Vue perspective nord-sud de la Combe d'Arc. Sur cette coupe passant par la grotte Chauvet jusqu'à l'Arche et comprenant une partie de la plaine alluviale, on identifie le niveau résistif situé à 87 m NGF. Il correspond à une profondeur de 4 m par rapport au sol (à 91 m NGF), et indique vraisemblablement un niveau de galets. Tomographie : Leroux 2010 ; topographie en coupe de la grotte des Châtaigniers. 84

Figure 66 Etapes de construction du nuage de points des gorges de l'Ardèche par multi- corrélation d'images. 1. Campagne aérienne (121 photos), 2. Nuage léger (1 585 768 points), 3. Nuage dense (686 349 324 points), 4. Points de contrôle au sol (56 points), 5. Recouvrement des photographies (131 km²), 6. Modèle Numérique de Terrain (MNT 5x5 m). 86

Figure 67 Assemblage des nuages de points d'origines et de résolutions différentes, pour obtenir un modèle topographique uni. La résolution et l'exactitude du modèle assemblé diminue au fur et à mesure de l'éloignement avec le centre de l'objet d'étude : le Pont d'Arc. 87

Figure 68 Maillage de la surface topographique des gorges de l'Ardèche. Au fur et à mesure de l'éloignement de la Combe d'Arc, les triangles sont de plus en plus grossiers. Les transitions s'effectuent sur les zones de replat afin de minimiser l'impact visuel de ces dernières sur le modèle 3D et d'assurer une vraie continuité topographique. Taille moyenne des triangles : 1 (50m) ; 2(25m) ; 3(10m) ; 4(2m) ; 5(30cm). 88

Figure 69 Modélisation 2.5D des terrasses alluviales sous 3DReshaper. Le processus d'interpolation nécessite de collecter toutes les données topographiques des terrasses alluviales (replats topo et points dGPS). Lorsqu'un point topo est réalisé sur un versant, son homologue est placé à la même altitude sur le versant opposé, perpendiculairement à la rivière, afin de permettre à l'algorithme d'interpolation de reconstruire toute la terrasse fluviale. 89

Figure 70 Modélisation des terrasses + 15 m et + 30 m par interpolation au moyen des voisins naturels. 1 et 2. Points de donnée des niveaux, respectivement à +15 m et à + 30 m. 3 et 4 : Interpolation par les voisins naturels (maille du raster : 100x100m). 90

Figure 71 La reconstitution 2.5D des niveaux de terrasses + 15 m et + 30 m par rapport au relief actuel révèle l'importance de l'aggradation pour ces deux niveaux et amène à reconsidérer l'évolution des paléo-géographies en fonction des importantes variations du niveau de la rivière. 91

Figure 72 Coupe projetée des terrasses alluviales de la basse-Ardèche. La large plaine d'épandage de Vallon Pont d'Arc se réduit une fois la rivière entrée dans les gorges, à une mince section active. Cette réduction liée à une contrainte topographique pourrait expliquer l'importance du remplissage sédimentaire juste à l'amont du canyon. 92

Figure 73 Les terrasses alluviales de la plaine de Vallon Pont d'Arc : des témoins des paléo-méandres de l'Ardèche 93

Figure 74 Modèle relatif d'évolution de la rivière pour aboutir à la plaine actuelle de Vallon Pont d'Arc. Le cours d'eau tend à s'écarter du cours du temps par avulsion, phénomène également proposé par Mocochain et al. (2009). L'échelle d'altitude est en mètres NGF. 95

Figure 75 Proposition de reconstitution des évolutions du relief en lien avec les variations des niveaux de la rivière à +30 m, +15m, jusqu'à aujourd'hui. Les recoupements de méandre sont mis en relation avec l'altitude des terrasses alluviales. Les croix rouges représentent les recoupements de méandre, et les points blancs le tracé des rivières. 97

Chapitre 4

Figure 76 En pénétrant dans les gorges de l'Ardèche, la rivière abandonne les plaines alluviales du Trident et de Vallon Pont d'Arc pour s'enfoncer en domaine karstique. L'entrée des gorges de l'Ardèche est particulièrement dense en cavités. Ces dernières se développent du plateau (260 m NGF / + 120 m) jusqu'au niveau actuel de la rivière (70 m NGF). La majorité des cavités découvertes s'ouvre dans les gorges de l'Ardèche ainsi que dans la partie terminale de l'Ibie. Données topographiques : Inventaire cavités CDS 07. 101

Figure 77 Carte de localisation. Le méandre abandonné de la Combe d'Arc et le Pont d'Arc, à l'entrée du canyon karstique des Gorges de l'Ardèche. La rivière s'écoule aujourd'hui sous l'arche calcaire, cette dernière s'ouvrant dans la partie la plus fine du pédoncule de la Combe d'Arc. Les phénomènes karstiques environnant le Pont d'Arc sont les environnements analysés dans ce chapitre : 1. Le Pont d'Arc ; 2. Entrée de la grotte des Châtaigniers ; 3. Grottes de la rive droite du Pont d'Arc ; 4. Grottes de la rive gauche du Pont d'Arc ; 5. Grotte Chauvet ; 6. Point de vue de la photographie. Localisation : Les Gorges de l'Ardèche. Système de coordonnées : Lambert 93 - RGF 93. 102

Figure 78 Les différentes méthodes d'acquisition topographiques et leur fusion au sein d'un même modèle 3D. Malgré la diversité des méthodes d'acquisition topographiques, la consolidation des données acquises au sein d'un même référentiel géographique permet d'obtenir un modèle tridimensionnel unique. L'ensemble de cette opération a été effectué sous le contrôle de points dGPS pris en extérieur. E. Exactitude : la fidélité d'un relevé par rapport à la réalité ; R. Résolution : la quantité de points fournissant l'information topographique pour une surface donnée ; C. Consolidation : procédé d'assemblage entre les différentes acquisitions topographiques. L'assemblage des données entre elles permet une évaluation de l'incertitude finale du modèle à +/- 22 cm. 104

Figure 79 Comparaison géométrique entre les grottes du Pont d'Arc et des Châtaigniers. Les plans du Pont d'Arc et de la grotte des Châtaigniers présentent des axes de structuration karstiques similaires (notamment N/S et ONO/ESE). La coupe (D) met en évidence des similarités altitudinales entre le système du Pont d'Arc et celui de la grotte des Châtaigniers : Un niveau s'établit autour de 80 m NGF dans le Pont d'Arc, tandis que le niveau 100 m NGF est plus marqué dans la grotte des Châtaigniers. A. Cirque d'Estre ; B. Grotte des Châtaigniers ; C. Pont d'Arc ; D. Comparaison altitudinale. 1. Encaissant calcaire ; 2. Cavités ; 3. Banquettes à + 5 m ; 4. Fracturation ; 5. Méandre abandonné ; 6. Bancs de sable ; 7. L'Ardèche. Topographie Grottes de la rive droite : Gilbert Platier. 105

Figure 80 Vues détaillées des morphologies karstiques du Pont d'Arc. A. Vue N-S du Pont d'Arc. B. Vue E-O du Pont d'Arc. C. Rive gauche du Pont d'Arc, vue depuis l'aval, en rive droite : les morphologies endokarstiques sont bien visibles, notamment pour le niveau 75-80 m NGF, beaucoup plus développé que celui à 100 m. 1. Niveau à 100 m NGF ; 2. Niveau à 80 m NGF ; 3. Banquettes calcaires + 5 m ; 4. Joints de strate ; 5. Etiage actuel de l'Ardèche ; 6. Escarpement rocheux ; 7. Topographie. 106

Figure 81 Coupe topographique développée de la grotte des Châtaigniers et illustrations des morphologies noyées. Ces dernières sont très marquées dans la cavité et sont présentes à toutes les altitudes. 1. Cavité ; 2. Coupoles ; 3. Pendants de voûte. 4. Banquette limite. Crédits photo : Stéphane Jaillot. 107

Figure 82 Carte des micro-formations de calcite et des dépôts liés à l'ennoisement de la grotte des Châtaigniers. Ces morphologies de ré-ennoisement de la cavité affectent notamment les niveaux 110, 100, 85 et 80 et 73 m NGF. Ces niveaux sont peut-être en relation avec les terrasses alluviales de l'Ardèche. La présence de ces morphologies au niveau du siphon terminal (B) témoigne de leur développement en milieu noyé ou épinoyé. 1. Topographie ; 2. Limite supérieure des cristaux en dents de cochon ; 3. Dépôts argileux laminés ; 4. Evolution du niveau de base, 5. Niveau des terrasses alluviales. Credits photo: Pat Génuite. 108

Figure 83 La grotte de la Rouvière, également dite Spectaclan, s'ouvre avant le méandre du Pas du Mousse, en rive gauche de l'Ardèche. Fond topographique : Michel et al., 2007 (modifiée). 109

Figure 84 Cartographie des niveaux de galets à + 45 m dans la grotte Spectaclan. Les altitudes sont en mètres NGF. Topographie : Michel et al., 2007(modifiée). Ronds verts : galets. Pointillés bleus : anciens niveaux de rivière. Ligne bleue : Ardèche actuelle. 110

Figure 85 Modèle chronologique relatif de la morphogénèse (spéléogénèse et dépôts) de la salle terminale sud de Spectaclan. Topographie : Michel et al., 2007. 1. Paragénéisme ; 2. Incision ; 3. Aggradation terminée par une phase grossière ; 4. Stabilité, pousse d'un plancher intermédiaire ; 5. Aggradation terminale grossière ; 6. Plancher stalagmitique massif ; 7. Incision généralisée. 111

Figure 86 Synthèse des principaux drains endokarstiques subhorizontaux sur une coupe projetée des Gorges de l'Ardèche (d'après : (Monney et al, 2012) ; (Tassy et al. 2013), et (Sadier et al. 2013) ; modifiés). Des niveaux de karstification apparaissent nettement. Les hauts niveaux de karstification Mio-Pliocène ont été étudiés par (Mocochain et al. 2009), (Tassy et al. 2013) et (Sadier 2013). Des niveaux de karstification de basse altitude avoisinent les niveaux de terrasses alluviales, de part et d'autre du canyon, et ceux des galets de basalte retrouvés dans les cavités des Gorges. Les traits pleins verticaux montrent l'appartenance de conduits étagés à un même réseau. 113

Figure 87 Relations entre les morphologies visibles dans la grotte des Châtaigniers et les terrasses alluviales de l'Ardèche et proposition d'un modèle d'évolution de la cavité. La partie supérieure de la figure est une représentation en coupe du puit terminal de la grotte des Chataigniers et du Pont d'Arc. La partie inférieure de la figure représente seulement une coupe des Châtaigniers, mais sous un autre angle. 1. Encaissant calcaire ; 2. Nodules de calcite ; 3. Argiles ; 4. Variations du niveau de la rivière ; 5. Niveaux maximums de la rivière ; 6. Terrasses alluviales de l'Ardèche ; 7. Surface d'érosion alluviale à + 5 m. 114

Figure 88 Frise chronologique des objets géomorphologiques marquant et intervenant dans le recouplement du méandre en fonction de l'altitude et des oscillations de l'Ardèche. 1. Pont d'Arc, 2. Variations du niveau de l'Ardèche, 3. Conduits endokarstiques, 4. Banquettes à +5 m, 5. Joint de strate, 6. Niveaux alluviaux, 7. Mise en relation théorique des faiblesses morphostructurales du pédoncule avec les niveaux alluviaux de l'Ardèche au cours du temps : (Vert : incision des banquettes, rouge : rôle de l'endokarst, noir : joint de strate), 8. Possibilités de recouplement. 116

Chapitre 5

Figure 89 Photographie de la crue de 1890. Le niveau de l'eau a dépassé celui de la Combe d'Arc, l'Ardèche reprend son ancien cours, le temps de la crue. (Edition C. Artige et E. Beaumel). 122

Figure 90 Localisation des coupes sédimentaires et des tranchées observées dans le méandre de la Combe d'Arc. Les deux sondages de Sheffer et al. (2003) n'avaient pas révélé de niveaux de galets et graviers mais les tranchées notées ici CA01, 02 et 03 ont dégagé le sommet du toit d'un remplissage de galets. Une transition sable/argile semble perceptible au sommet des tranchées CA01 et CA04, de même que dans la coupe ATM1 de Sheffer et al. (2003). 123

Figure 91 Bathymétrie du talweg de l'Ardèche sous le recoupement du Pont d'Arc. Le niveau du talweg se situe en moyenne autour de 67 m NGF. Légende : 1. Grotte de Paul et Virginie ; 2. Surcreusement du talweg à 63 m NGF. 3. Banquettes à + 5 m. 124

Figure 92 Schéma théorique du calcul de la CEC par mesure de l'absorbance de la solution restante avec un spectrophotomètre. Les valeurs de CEC obtenues ont été moyennées sur 5 mesures pour les échantillons argileux/argilo-sableux pour une valeur assez faible de 7.6. Les sables ont été moyennés sur 2 échantillons à une valeur très faible de 4. 125

Figure 93 Carte de localisation des profils de tomographie électrique réalisés dans la Combe d'Arc de 2010 à 2019. Lors des campagnes de 2017 et 2019, 44 profils se sont avérés utilisables ; ils ont totalisé 2111 électrodes (points blancs). Les profils COMB01 à COMB10 (pointillés rouges) ont été localisés mais n'ont pas été utilisés, de même pour les 5 profils de Leroux et al. (2010) en pointillés jaunes. Une grande densité de mesures était nécessaire pour conduire correctement la prospection des sous-sols dans un environnement aussi contraint topographiquement. 126

Figure 94 Le monoplotting des profils de résistivité électrique permet de recalibrer les informations issues de la résistivité électrique par rapport aux témoins géomorphologiques extérieurs apportés par le modèle 3D LiDAR. 128

Figure 95 Topographie LiDAR/bathymétrie, avec les profils de résistivité électrique COMB84 et COMB86 et intégration des tranchées sédimentaires CA01 et CA02. La cohérence intérieur-extérieur permet de calibrer les valeurs de résistivité du talweg rocheux (environ 600 Ohm. m) et du toit de galets de la terrasse à + 15 m. 129

Figure 96 Implantation des profils géophysiques dans le modèle LiDAR de la Combe d'Arc et interprétation des valeurs de résistivité électrique. Ces dernières sont interprétées conjointement avec le modèle 3D et avec les informations ponctuelles issues des coupes et ravinements. 1. Argiles ; 2. Clastes ; 3. Galets ; 4. Encaissant. 130

Figure 97 Convergence des données lors de l'inversion 3D. La RMS error indique la fiabilité de la convergence. Les données acquises dans la Combe d'Arc convergent très rapidement, au bout de quelques itérations seulement. 131

Figure 98 Illustration et représentation du processus d'itération sur l'imagerie des iso-valeurs de résistivité électrique. Les itérations montrées ici (3 et 10) sont proposées à titre d'exemple pour figurer l'évolution de l'inversion et la bonne convergence des données dès les premières itérations. La visualisation 3D des iso-valeurs de résistivité électrique sous VisIt peut être conduite par une représentation surfacique de la résistivité électrique, ou bien par maillage (triangulation) des iso-valeurs de résistivité électrique en fonction de l'itération demandée. Les morphologies sub-linéaires des dépôts fluviaux sont imagés avec très peu d'itérations. L'itération 10 révèle également des zones plus résistives correspondant potentiellement à des banquettes rocheuses et des tabliers d'éboulis. 132

Figure 99 Cartographie des altitudes (en m NGF) correspondant à l'iso-valeur 250 ohm m. Ce niveau oscille en moyenne entre 85 et 87 m NGF et présente des morphologies de replat caractéristiques de dépôts en convexité de méandre qui poussent à l'associer à un dépôt de galets. Une chenalisation est clairement visible entre les concavités de méandre et suggère l'ancien passage de l'Ardèche dans le méandre pour ce niveau de galets. 133

Figure 100 Cartographie du niveau de galets à + 15 m de la Combe d'Arc, situé sous les sédiments fins des crues holocène. A gauche, cartographie de l'iso-valeur 250 ohm m et à droite, l'interprétation géomorphologique. Le chenal principal est bien visible au milieu du banc de galets. Ce dernier dessine des méandres accentués qui viennent saper l'escarpement en lieu et place de certains éboulis actuels. Ces morphologies sont caractéristiques d'une circulation active de la paléo-rivière dans la Combe d'Arc. Ce chenal est désormais fossilisé sous les sédiments fins et les tabliers d'éboulis. 134

Figure 101 Coupe des profils géophysiques 2D et interpolation (triangulation) du niveau de résistivité à 600 ohm m dans la Combe d'Arc. La majorité des points digitalisés représentant le niveau à 600 ohm m se trouvent compris entre 70 et 75 m NGF. La largeur du bedrock reconstitué correspond à celle du canyon actuel de l'Ardèche avec des valeurs entre 100 et 120 m NGF. Le niveau minimum du talweg rocheux est cohérent avec les observations extérieures, bien qu'une profondeur plus importante semble enregistrée dans la partie amont du méandre. 135

Figure 102 Coupes et vue cavalière au sein de l'inversion 3D de la Combe d'Arc. Le chenal rempli de sédiments est bien imagé, notamment dans la partie amont du méandre. De replats plus résistifs (75-80 m NGF) peuvent être interprétés comme des banquettes rocheuses, témoins d'une phase d'incision de l'Ardèche lorsque cette dernière coulait encore dans son méandre. 136

Figure 103 Cartographie du bedrock sous la Combe d'Arc. La figure du dessus montre que le niveau de creusement sous le méandre semble assez proche le niveau de l'Ardèche actuelle. La figure du bas montre que les banquettes à + 5 m sont également visibles par endroit. Leur exhaussement est donc antérieur au dépôt de galets à + 15 m qui scelle le talweg rocheux. 139

Figure 104 Modèle d'évolution du recouplement de méandre amélioré par l'apport de la prospection géophysique ERT, qui remplace la terrasse de galets à + 15 m au cœur du processus de recouplement. Considéré ici comme une surface d'abandon fluviale, ce niveau de galets caractérise la dernière phase de circulation pérenne dans le Cirque d'Estre. L'érosion du niveau de galets partout ailleurs dans les Gorges de l'Ardèche marque l'abandon définitif du méandre et le passage pérenne de l'Ardèche sous l'arche du Pont d'Arc. 140

Figure 105 Modèle simplifié des évolutions morphologiques du méandre de la Combe d'Arc depuis l'aggradation de la terrasse à + 30 m jusqu'à la situation actuelle. Ce modèle représente les 8 phases décrites précédemment. 141

Chapitre 6

Figure 106 Cartographie des prélèvements des stalagmites dans le puits final de la grotte des Châtaigniers. 5 concrétions ont été prélevées dont 4 stalagmites (CHAT-01,02,03 et 04) ainsi qu'un plancher stalagmitique (CHAT-05). L'échelle planimétrique est en mètre. Les altitudes de prélèvement sont en NGF. 148

Figure 107 Localisation et coupe des échantillons sur une échelle altitudinale (mètres NGF). Le choix de ces derniers a été effectué en lien avec les dépôts argileux sus-jacents et/ou sous-jacents. Tableau 2 : Synthèse des datations U-Th réalisées sur les échantillons de la grotte des Châtaigniers. 1 5 0

Figure 108 Altitudes et phases de croissance des 5 concrétions échantillonnées dans la grotte des Châtaigniers. 151

Figure 109 La concrétion CHAT-01 (79.5 m NGF) pousse à l'intérieur d'un soutirage argileux. Ce dernier mène au siphon de la cavité. (dates en ka) 152

Figure 110 Concrétion CHAT-03 (80 m NGF). Datée de l'Holocène, cette dernière a poussé directement sur le dépôt argileux à 80 m NGF comme le montre la base convexe de la pousse. Ensuite des mises en charge ont complété la pile argileuse scellant la stalagmite sur une vingtaine de centimètres de hauteur. 152

Figure 111 Hypothèse de croissance et ratios isotopiques de la concrétion CHAT-02 : Après une croissance bien laminée et terminée par un hiatus argileux, la concrétion de droite finit par recouvrir la concrétion de gauche. Les zones ouvertes de la concrétion ont été entourées en noir tandis que les potentiels micro-gours ont été surlignés en bleu. Les deux grandissent ensuite ensemble, mais plus rapidement pour celle de droite. Les mesures U-Th ont été réalisées par spectrométrie de masse au LSCE. Les dates après le hiatus ont été rejetées car elles représentent des valeurs aberrantes tant au point de vue du reste du cortège de datations que du modèle géomorphologique. La vue présente deux sections polies à 90°. 153

Figure 112 La concrétion CHAT-04 (100 m NGF) possède la plus longue plage de croissance de tous les échantillons de la grotte des Châtaigniers : elle s'étale du MIS10 au MIS6, bien que la majorité de la croissance intervienne au cours du MIS9. Les interruptions de croissance sont bien visibles au sein de la concrétion et pourraient potentiellement être marqueurs des alternances glaciaires/ interglaciaires, ainsi que d'éventuels interstades du Pléistocène moyen. La cassure aux 2/3 de la concrétion n'est pas naturelle et résulte de l'échantillonnage. 154

Figure 113 Hypothèse chronologique construite à partir des datations U-Th et du modèle d'évolution de la rivière. Les datations replacent les oscillations sédimentaires à + 30 / + 15 et + 8 m dans la période du Pléistocène supérieur, de même que le recouplement de méandre. 156

Figure 114 Schéma théorique de la concrétion CHAT-02 confrontée au fonctionnement de la rivière. Cette dernière, positionnée entre la T+15 et la T+8, représente une archive stratégique pour étudier les variations de la rivière au cours du MIS3. 157

Figure 115 Les variations élémentaires de la concrétion CHAT-02 montrent une bonne relation avec les lamines les plus sombres pour Mn, Mg et Fe, tandis que S et P sont surtout associés au tiers central de la concrétion, avec des pics mieux marqués et plus localisés. Les éléments-traces sont exprimés en nombre de coups par mesure (cps). 158

Figure 116 Résultats des analyses de CHAT-02 par SPF et cartographie pour plusieurs longueurs d'onde. Les analyses 1 et 2 n'ont pas la même extension spatiale en latéral mais couvrent la même distance en hauteur. Les bandes à 266 nm et 355 nm (1 et 2) sont ici considérées comme les deux résultats centrés à 450 nm et associés aux spectres prenant en compte l'ensemble des longueurs d'onde investiguées (A, B, C, D, E, F). 160

Figure 117 Cartographie par fluorescence de CHAT-02 et extraction des spectres issus des cartographies SPF. Les profils d'élévation représentant ces derniers ont été extraits de manière linéaire. La fluorescence totale et la taille des particules composant cette dernière (Qualité de l'intensité). Ce dernier révèle au sein de la concrétion plusieurs phases distinctes que l'on peut corrélérer aux phases sombres de la lamination de CHAT-02 (bandes grisées). 163

Figure 118 Analyse PCA et cartographie factorielle réalisées sur les principaux éléments chimiques utilisés en sédimentologie des concrétions (Fairchild et Treble, 2009) ainsi que sur les traceurs terrigènes plus classiquement utilisés en analyse XRF sur des sédiments marins et lacustres, ces traceurs pouvant potentiellement représenter les apports de la rivière. Les éléments ont été préalablement normalisés par le calcium. 164

Figure 119 Corrélation du pôle terrigène avec la qualité de l'intensité. Ces deux informations sont bien corrélées ensemble, ainsi qu'avec les lamines sombres de la concrétion. Cette co-variance questionne le rôle de la rivière qui pourrait être à l'origine de ces phases sombres. 164

Figure 120 Synthèse et corrélation des analyses XRF et SPF avec les recherches précédentes effectuées en Ardèche et autour du Cirque d'Estre pour la même période. Les points bleus permettent de visualiser la correspondance pic à pic entre la matière organique grossière de CHAT-02 et la courbe des paléo-précipitations du Velay (cheddadi et al., 2005). La corrélation entre la matière organique grossière et le pôle terrigène est également bien visible et tend à confirmer le rôle de la rivière dans l'enregistrement sédimentaire de CHAT-02. Datation du LGM : Genty 2012. Volcanisme : Nomade et al. 2016. Occupation Chauvet: Quilès et al. 2016. D180 Groënland: NGRIP members, 2004. 167

Chapitre 7

Figure 121 Courbe de régression exponentielle + linéaire permettant le calcul de la dose équivalente, c'est-à-dire la quantité d'irradiation reçue par l'échantillon depuis son enfouissement et qui permet de calculer un âge. Les erreurs sont données à 2 sigma (2σ). 174

Figure 122 Courbe de blanchiment optique du centre ESR aluminium pour des quartz extraits des sédiments fossiles (a) et actuels (b). D'après Voinchet et al. (2003). Le temps de blanchiment optique par lampe UV nécessite un temps d'exposition d'environ 1000 heures. 174

Figure 123 Système et fonctionnement d'un Spectromètre ESR EMXplus Bruker. La mesure des centres paramagnétiques est permise par l'utilisation d'Azote liquide qui maintient les échantillons à très basse température. Figure extraite de Voinchet (2002). 175

Figure 124 Calcul de la dose totale à partir de l'extrapolation à l'origine des intensités ESR des différentes aliquotes 176

Figure 125 Spectre ESR des centres paramagnétiques Al et Ti (H, Na et Li) d'un échantillon de quartz à 77 K. 176

Figure 126 Localisation des prélèvements pour datation ESR le long du cours de l'Ardèche. 9 échantillons ont été prélevés en 2018 à l'amont et à l'entrée des gorges de l'Ardèche, sur la terrasse à + 15 m et à + 30 m. Les 2 échantillons de la grotte du Figuier ont été prélevés quelques années plus tôt dans le cadre des fouilles archéologiques organisées par Marie-Hélène Moncel (Moncel et al., 2010 ; 2012). 177

Figure 127 Localisation des prélèvements (cercles blancs) pour datation ESR dans l'environnement de la Combe d'Arc sur les affleurements des terrasses à + 15 m et à + 30 m. 178

Figure 128 Carte de localisation des échantillons prélevés en amont des gorges de l'Ardèche. 179

Figure 129 Le Ranc Pointu, dernier méandre des gorges de l'Ardèche avant la vallée du Rhône, abrite l'une des zones les plus concentrées en cavités ornées avec le cirque d'Estre. 1 : Grotte des 2 ouvertures, 2 : Baume des Cloches, 3 : Grotte du Ranc Pointu 2, 4 : Grotte du Figuier. Topo grotte du Figuier : d'après (Comber, 1967). 180

Figure 130 Modèle chrono-relatif des événements issu de l'étude géomorphologique. Les concrétions et les niveaux de terrasse alluviale sont considérés comme anti-corrélés pour un même niveau altitudinal. Le hiatus de croissance correspondant au LGM n'est pas une véritable phase stratigraphique, mais il définit néanmoins une période durant laquelle les concrétions ne poussent pas. À ce titre,

Figure 131 Modélisation bayésienne des datations effectuées sur les concrétions et les sédiments de rivière avec Chronomodel. La grande cohérence stratigraphique et le faible nombre d'outlayers (en rouge) reflètent la cohérence du modèle stratigraphique relatif. La modélisation statistique change peu les résultats. 184

Figure 132 Chronologie absolue des terrasses alluviales de l'Ardèche mise en relation avec les cycles climatiques et orbitaux du Pléistocène moyen et supérieur (Milankovitch, 1941 ; Lisiecki & Raymo, 2005). La correspondance entre terrasses alluviales et cycles de 100 ka peut être établie pour les niveaux + 8, + 30, et + 45 m, et peut-être pour un niveau plus ancien également proche des + 30 m. En revanche, la terrasse à + 15 m semble plutôt liée à un cycle de 41 ka. 186

Figure 133 Synthèse de l'évolution morphologique de l'Ardèche au cours du Pléistocène moyen et supérieur. Les cotes altitudinales sont prises au niveau du Pont d'Arc. Les réseaux karstiques représentés sont ceux de la grotte des Châtaigniers ainsi que de l'Aven Spectaclan pour le drain à + 45 m. Les temps du concrétionnement sont représentés en hypothèse maximale (lignes roses) tandis que les lignes vertes ne représentent que les intervalles temporels pouvant correspondre aux maximums d'aggradation et non le temps d'aggradation en lui-même. L'établissement des remblaiements sédimentaires de la rivière prend vraisemblablement beaucoup plus de temps et pourrait commencer au cours de périodes où les concrétions peuvent également croître. 188

Figure 134 Synthèse chronologique des étapes de l'ouverture de l'arche et du recouplement du méandre de la Combe d'Arc. Le recouplement se produit sur une temporalité relativement courte. La courbe d'évolution de l'Ardèche est présentée ici à titre théorique car nous n'avons pas connaissance de son évolution précise entre la T+15 m et la T+8m. Néanmoins, sur la période 50 – 30 ka BP, les flux détritiques enregistrés dans la concrétion CHAT-02 permettent de penser que le niveau de l'Ardèche, bien qu'en dessous de 81.5 m NGF, devait être assez proche. 190

Figure 135 Comparaison des dates du recouplement par rapport aux périodes d'occupation connues de la grotte Chauvet. Le recouplement est clairement antérieur. Contraintes de l'effondrement de Chauvet : Sadier et al., 2012 ; Datations 14C Chauvet : Valladas et al. 2005 ; Cuzange et al. 2007 ; Quilès et al., 2012 ; 2016. Concrétionnement dans Chauvet : Genty et al., 2004. Dans les cavités en lien avec la rivière : ce travail. Datation OSL : Moncel et al., 2014 ; Datations ESR : ce travail. 192

Chapitre 8

Figure 136 Méthodologie de création d'un MNT des paléo-reliefs à partir des modèles 3D. La méthode consiste à ne garder que les sommets des triangles (3DReshaper) puis de rasteriser « par le haut » (CloudCompare) pour obtenir une surface unifiée comprenant la topographie rehaussée du niveau reconstitué de la rivière. 198

Figure 137 Quelques exemples d'analyses morphométriques réalisées à partir des MNT raster. Pour ces 4 indices topographiques, le MNT à 25 m de l'Ardèche a été utilisé (IGN BDAlti 25 m). 1.Direction, 2. Pentés, 3. Altitudes, 4. MNT ombré. 199

Figure 138 méthode de comparaison de MNT. La différence entre les deux couches est utilisée pour calculer un volume. Ici: l'exemple de la Combe d'Arc. 200

Figure 139 Calcul des volumes des tabliers d'éboulis de la Combe d'Arc par interpolation des résultats de l'approche ERT/LiDAR (cf. chapitre 5). Ces derniers sont rapportés à la surface des escarpements subverticaux qui les surplombent. Les tabliers d'éboulis constituent un apport de volume substantiel (plusieurs centaines de milliers de m³) qui représente une importante évolution paysagère en termes de relief depuis l'abandon de la Combe d'Arc par les eaux pérennes de l'Ardèche. 200

Figure 140 Modélisation des toits des terrasses + 15 m et + 30 m ainsi que leur carte des pentes associées. Pour la terrasse à + 15m, une rupture de pente est visible à l'entrée du canyon des gorges de l'Ardèche. Le niveau à +30 m montre des ruptures de pente au niveau du recouplement du méandre de Montingrand et au nord de la butte éponyme. 201

Figure 141 Méthode d'interpolation du bedrock à partir des données ponctuelles de géophysique, de forages géologiques (BSS - BRGM) et d'affleurements rocheux (MNT 5 m IGN – RGE Alti) auxquelles on a rajouté des informations sur la topographie extérieure pour contraindre l'interpolation (méthode des voisins naturels). Les informations géologiques ainsi que la carte des pentes ont permis de délimiter l'interface topographie extérieure/sédiments fluviaux. 203

Figure 142 Interpolation du talweg rocheux actuel avec le réseau hydrographique actuel et les breaklines de la topographie extérieure. Ce résultat doit être interprété comme un niveau maximal théorique (le talweg rocheux peut donc être plus profond à certains endroits où il manque des données de forage). L'interpolation de l'unique forage profond de la Plaine de Vallon Pont d'Arc (BSS002BMNL) fait ressortir un talweg rocheux potentiellement beaucoup plus profond que ce que cette cartographie laisse apparaître ici, ce qui laisse également penser que cette zone, affouillée aux niveaux à + 30 m et + 45 m, a pu être le siège d'anciens méandres (voir chapitres 3 et 7). A : plaine de Ruoms ; B, plaine de Vallon-Pont-d'Arc ; C, plaine de l'Ibie. 205

Figure 143 Comparaison des niveaux de rivière avec la topographie supposée du bedrock. L'importance de la charge alluviale que représentaient les trois plaines d'alluvionnement principales (Aubenas, Ruoms et Vallon Pont d'Arc) ressort nettement pour les niveaux à + 15 m et + 30 m. 207

Figure 144 Profil longitudinal bassin versant de l'Ardèche depuis la plaine d'Aubenas. Calcul des volumes érodés des deux niveaux + 15 et + 30 m, sur cette partie. Le niveau de déblaiement plus avancé de la terrasse à + 30 m contraste avec le niveau à + 15 m, beaucoup moins déblayé, qui comporte de grands lambeaux de terrasse encore en place. 209

Figure 145 Profil en long et estimation du volume érodé dans la plaine de Vallon Pont d'Arc pour les niveaux + 15 m et + 30 m avec un échantillonnage raster de 25 x 25 m. Les calculs de volume ont été réalisés avec un pas d'échantillonnage de 1 km. 210

Figure 146 Le Stream Power Index (SPI) dépend de la pente locale. Sur le bassin versant de l'Ardèche, il fait ressortir la pente importante du haut bassin versant par rapport à la seconde partie, plus plate, des bassins carbonatés. Il donne également du poids au réseau hydrographique qui continue à être vecteur de transport (stream power), même dans des zones assez plates comme la plaine de Vallon Pont d'Arc. 212

Figure 147 Le Sediment Transport Index (STI) met aussi l'accent sur les pentes locales et fait donc ressortir le haut bassin versant. Il donne moins de poids au réseau hydrographique dans les zones de replat que le Stream Power Index. 213

Figure 148 Confrontation de la carte géologique simplifiée (données : BRGM – Infoterre) avec l'index de transport sédimentaire. La carte géologique simplifiée montre l'étendue spatiale du domaine des gneiss et des granites dans le haut bassin versant (la zone possédant les plus fortes pentes) en opposition aux zones de dépôts sédimentaires situées en aval. 214

Figure 149 Taux de sédimentation et taux d'érosion proposés pour les terrasses à + 15 m et à + 30 m au droit de la moyenne vallée de l'Ardèche. L'érosion de la terrasse à + 30 m s'effectue pendant la transition glaciaire/interglaciaire, tandis que la T+15 s'établit juste après l'interglaciaire MIS5e. 216

Figure 150 Synthèse des datations absolues effectuées sur le bassin versant de l'Ardèche pour le Quaternaire. Les taux d'érosion pour la période plio-quaternaire du pléistocène ancien semblent différer du pléistocène moyen et supérieur et posent la question de l'impact du forçage climatique. Les âges donnés sont des moyennes pondérées issues de notre recherche, ainsi que les résultats d'Audra et al. (2001) et Tassy et al. (2013). LR04 : Lisiecki et Raymo, 2004. 217

Figure 151 A : Modélisation théorique du permafrost pour le bassin versant de l'Ardèche avec le Permafrost Favorability Index (PFI) de Marcer et al. (2017), tel qu'il pourrait avoir eu lieu en conditions pléniglaciaires (températures moyennes de 9°C) au deux derniers Maximums Glaciaires mondiaux (MIS 2 et MIS 6). L'hypothèse est celle d'une répartition du permafrost qui couvre entièrement les plateaux et également une partie du haut bassin versant de l'Ardèche. B : Vue cavalière du haut bassin versant de l'Ardèche. La carte des températures est tirée de la simulation mondiale des températures au LGM (Karger et al., 2017). Les parties grisées ne font pas partie de la zone de calcul (pas de probabilité de permafrost). 219

Conclusions générales

Figure 152 Essai de représentation conceptuelle de la place du paysage, du relief, dans son interaction avec l'Homme à la Préhistoire. 223

Figure 153 Modélisation de la crue de 1890. Effectué sous GERRIS 2D partir du MNT de l'Ardèche actuelle, il a été possible d'obtenir une simulation des vitesses d'écoulement de la colonne d'eau au sein d'un modèle topographique. L'eau repasse dans le méandre et est accélérée par le conduit forcé que représente le passage du Pont d'Arc. 224

Figure 154 Proposition de reconstitution de l'environnement physique du Roc-aux-Sorciers lors de la phase d'occupation du Magdalénien moyen. On peut observer les plafonds ornés s'avancant en porte à faux du site archéologique. Depuis l'intérieur de ce dernier, près des bas-reliefs sculptés, la rivière est bien visible. Le site reste néanmoins perché à + 4 m par rapport à la plus basse terrasse alluviale, rapportée au Tardiglaciaire/Holocène. 225

Figure 155 Vu axonométrique générale du contexte géomorphologique des blocs déplacés autour des monolithes Borologa. Delannoy et al., soumis. 226

Figure 156 Reconstitution visuelle de la Combe d'Arc lors de la phase terminale du recoupement, il y a 116 000 ans. L'ouverture de l'arche est nettement moins importante qu'aujourd'hui étant donné le niveau d'aggradation sédimentaire, et l'érosion de la voûte moins avancée qu'elle ne l'est actuellement. Le stade représenté ici marque l'abandon de la Combe d'Arc : les flux de la rivière commencent à se partager entre le méandre et le recoupement qui au fur et à mesure de son érosion latérale, devient le passage prioritaire de la rivière. 227

Figure 157 Que pouvaient donc bien voir les Hommes de la grotte Chauvet une fois entrés dans la cavité ? Proposition de reconstitution de la lumière pénétrant par le porche d'entrée reconstitué de la cavité, il y a 36 000 ans. La lumière pénètre profondément dans la grotte et éclaire une partie des sols de la salle des Bauges, ainsi que certaines zones des parois Ouest de la cavité. 228

Tableaux

Tableau 1 Spécifications de l'acquisition et du modèle 3D des monolithes Borologa.	57
Tableau 2 Synthèse des datations U-Th réalisées sur les échantillons de la grotte des Châtaigniers.	150
Tableau 3 Récapitulatif des datations ESR réalisées. Les doses annuelles ont été calculées par une mesure de terrain au spectromètre portable, sauf pour Fig 1 et 2. La moyenne pondérée des doses équivalentes est indiquée, ainsi que les taux de blanchiment des sédiments. La dernière colonne présente l'âge estimé pour chaque échantillon, après pondération sous IsoplotR.	181
Tableau 4 Calcul des volumes de dépôts alluviaux issus des reconstitutions topographiques et des estimations moyennées sur l'ensemble des plaines sédimentaires de l'Ardèche.	208

GA_Phottogramm trie_2017

Processing Report
07 February 2019



Survey Data

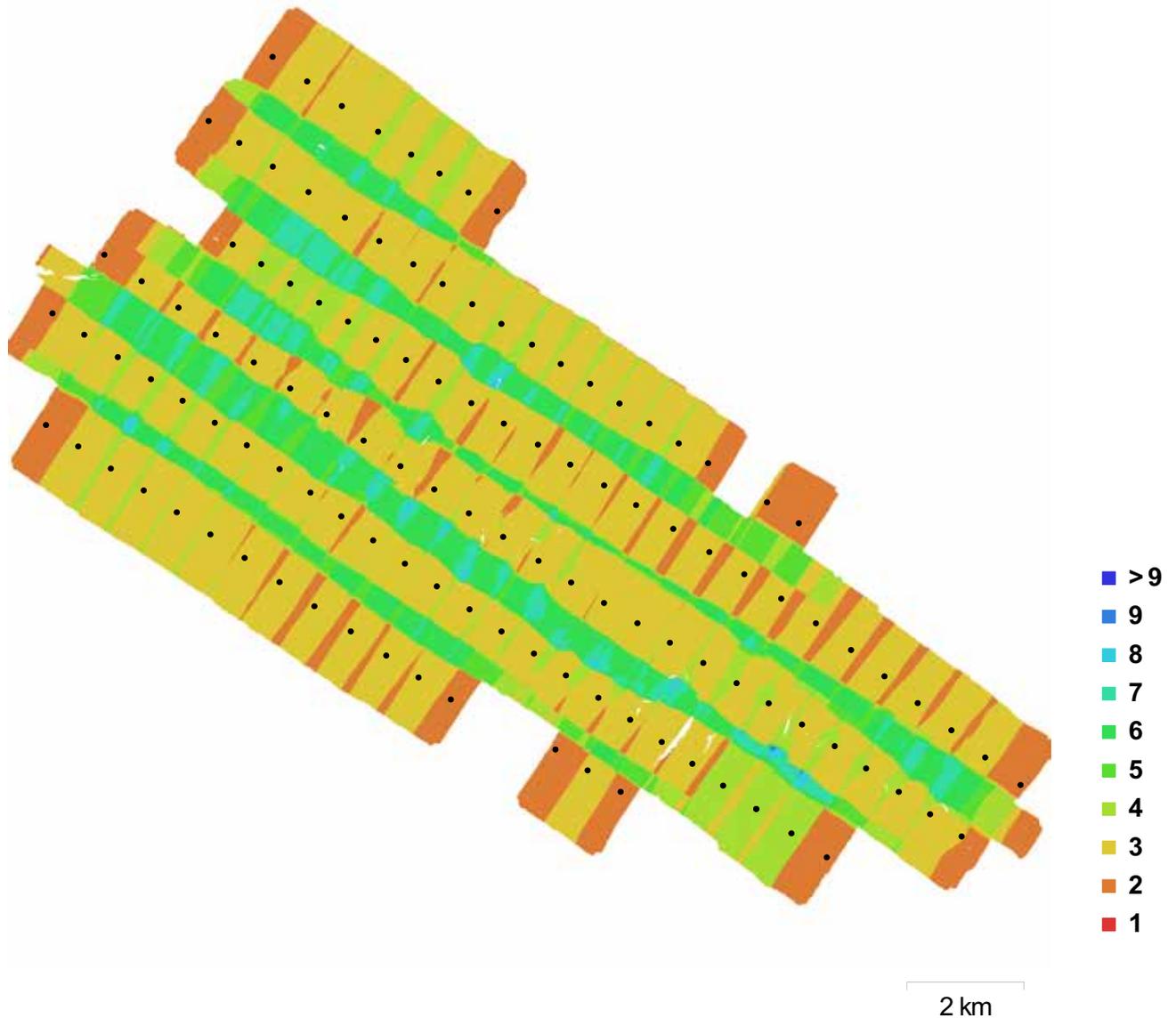


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	121	Camera stations:	120
Flying altitude:	1.81 km	Tie points:	1,294,502
Ground resolution:	22.5 cm/pix	Projections:	2,878,373
Coverage area:	124 km ²	Reprojection error:	1.31 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
unknown	8567 x 9233	213.28 mm	1e+04 x 1e+04 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

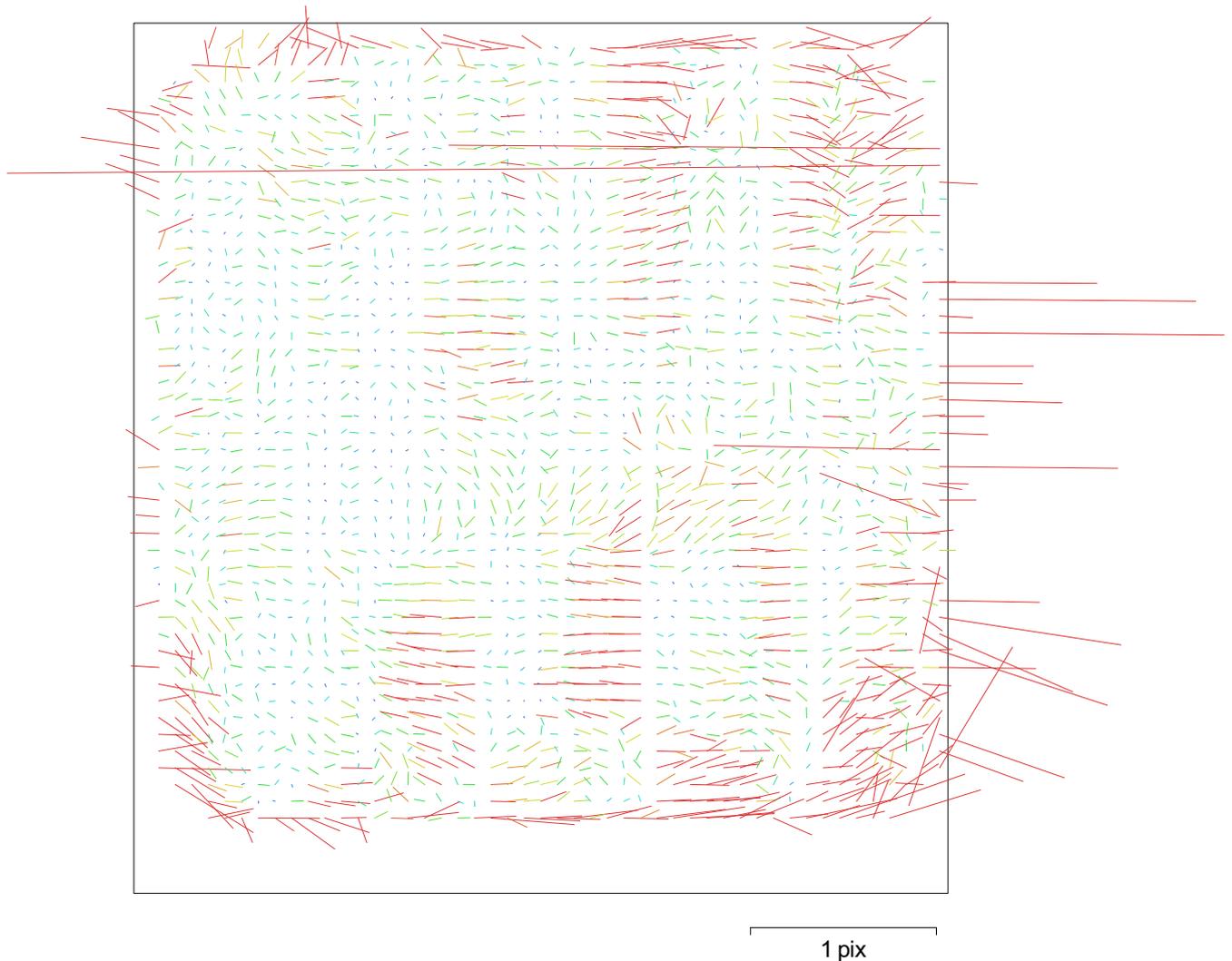


Fig. 2. Image residuals for unknown.

unknown

121 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
8567 x 9233	213.28 mm	1e+04 x 1e+04 μm	No
Type:	Frame	F:	7474.14
Cx:	51.1159	B1:	-11.0034
Cy:	-314.82	B2:	4.80227
K1:	-0.00288765	P1:	0.000426225
K2:	0.0040069	P2:	0.000389061
K3:	0.00982606	P3:	1.09585
K4:	-0.0200933	P4:	-1.59748

Ground Control Points

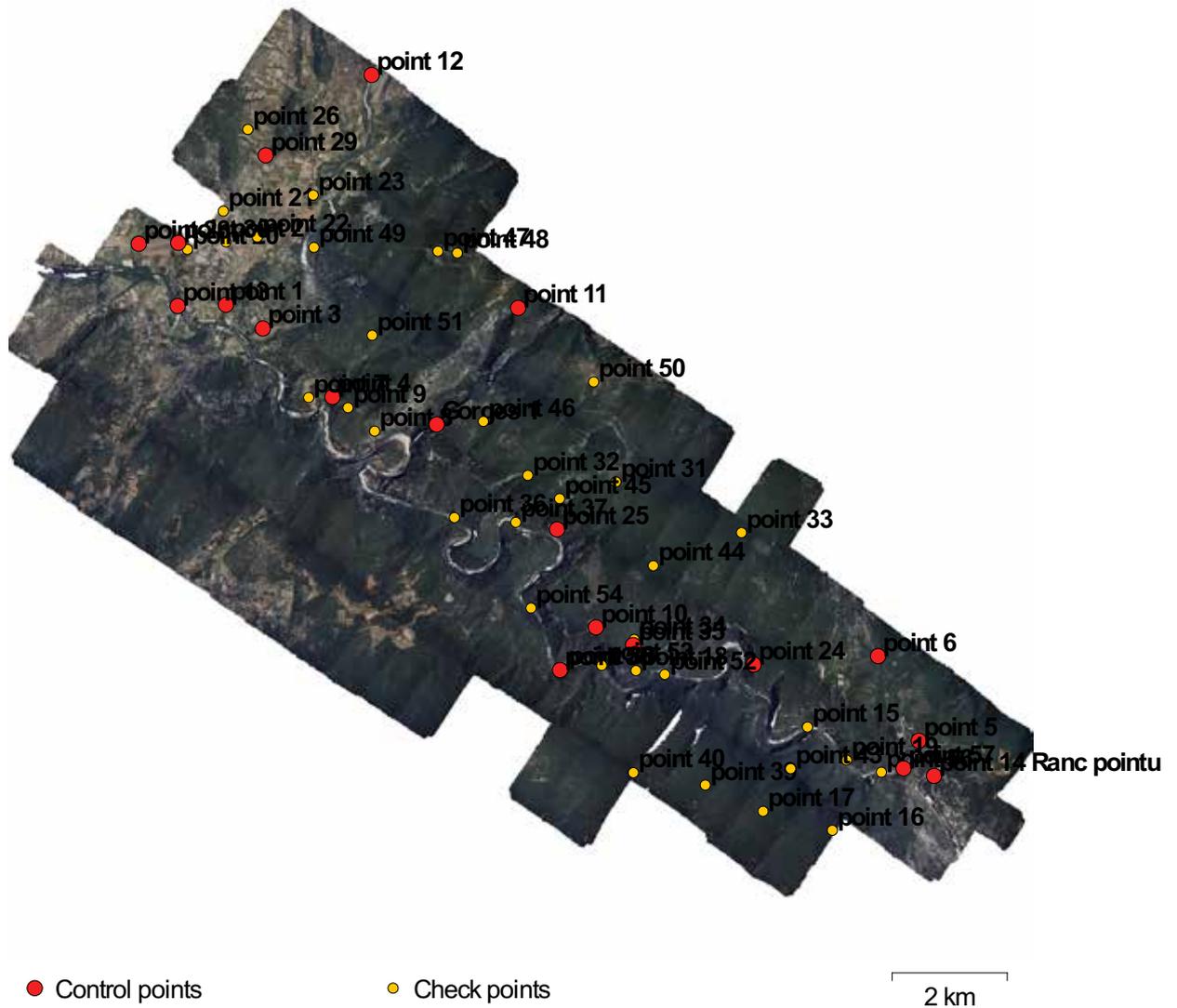


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total (m)	Image (pix)
19	5.30881	4.88511	2.49134	7.21441	7.63246	0.598

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
point 1	2.42836	0.802512	1.33888	2.88679	0.710 (6)
point 3	0.347908	-0.368438	0.0523363	0.509437	0.273 (7)
point 4	9.06071	-15.3172	-1.58487	17.8669	0.190 (3)
point 5	12.5276	-5.88455	1.16692	13.8899	0.912 (4)
point 6	-4.40555	2.71194	1.96435	5.53373	0.262 (3)
point 10	-7.70216	2.46341	-3.22855	8.70719	0.586 (3)
point 11	-1.58902	2.63414	-2.84814	4.19233	0.295 (3)
point 12	2.91244	-0.812967	0.122898	3.02627	0.096 (3)
point 13	-4.04749	-0.15438	-0.984172	4.16828	0.446 (3)
point 14 Ranc pointu	0.416516	-4.76711	-1.40419	4.98704	0.889 (6)
Gorges 1	-1.81711	3.23417	-0.60932	3.75939	0.461 (3)
point 24	-10.2823	7.09492	3.91121	13.0905	0.756 (3)
point 25	7.1499	2.55498	-0.734745	7.62816	0.776 (3)
point 28	-0.891823	-0.570075	1.65476	1.96432	0.211 (2)
point 29	-1.50243	1.93243	3.65249	4.39685	0.722 (3)
point 30	-2.29123	-0.785072	-3.16029	3.98164	0.432 (3)
point 35	-1.95136	5.67799	4.8539	7.7206	0.670 (2)
point 55	3.11788	3.98631	0.55658	5.09133	0.316 (3)
point 57	-1.46807	-4.41526	-4.55684	6.51265	0.859 (3)
Total	5.30881	4.88511	2.49134	7.63246	0.598

Table 3. Control points.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
point 2					0.548 (2)
point 7					0.123 (2)
point 8					0.153 (3)
point 9					0.166 (2)
point 15					0.587 (3)
point 16					0.221 (2)
point 17					0.240 (3)
point 18					1.360 (6)

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
point 19					0.825 (3)
point 20					0.347 (3)
point 21					0.213 (2)
point 22					0.872 (3)
point 23					0.165 (3)
point 26					0.087 (3)
point 31					0.124 (2)
point 32					0.128 (2)
point 33					0.271 (5)
point 34					1.476 (3)
point 36					0.274 (3)
point 37					0.311 (3)
point 38					0.330 (3)
point 39					0.614 (4)
point 40					0.405 (4)
point 43					0.396 (6)
point 44					0.135 (2)
point 45					0.240 (2)
point 46					0.177 (3)
point 47					0.252 (2)
point 48					0.379 (3)
point 49					0.569 (7)
point 50					0.179 (3)
point 51					0.495 (3)
point 52					0.856 (6)
point 53					1.284 (6)
point 54					0.379 (6)
point 56					0.494 (3)
Total					

Table 4. Check points.

Digital Elevation Model

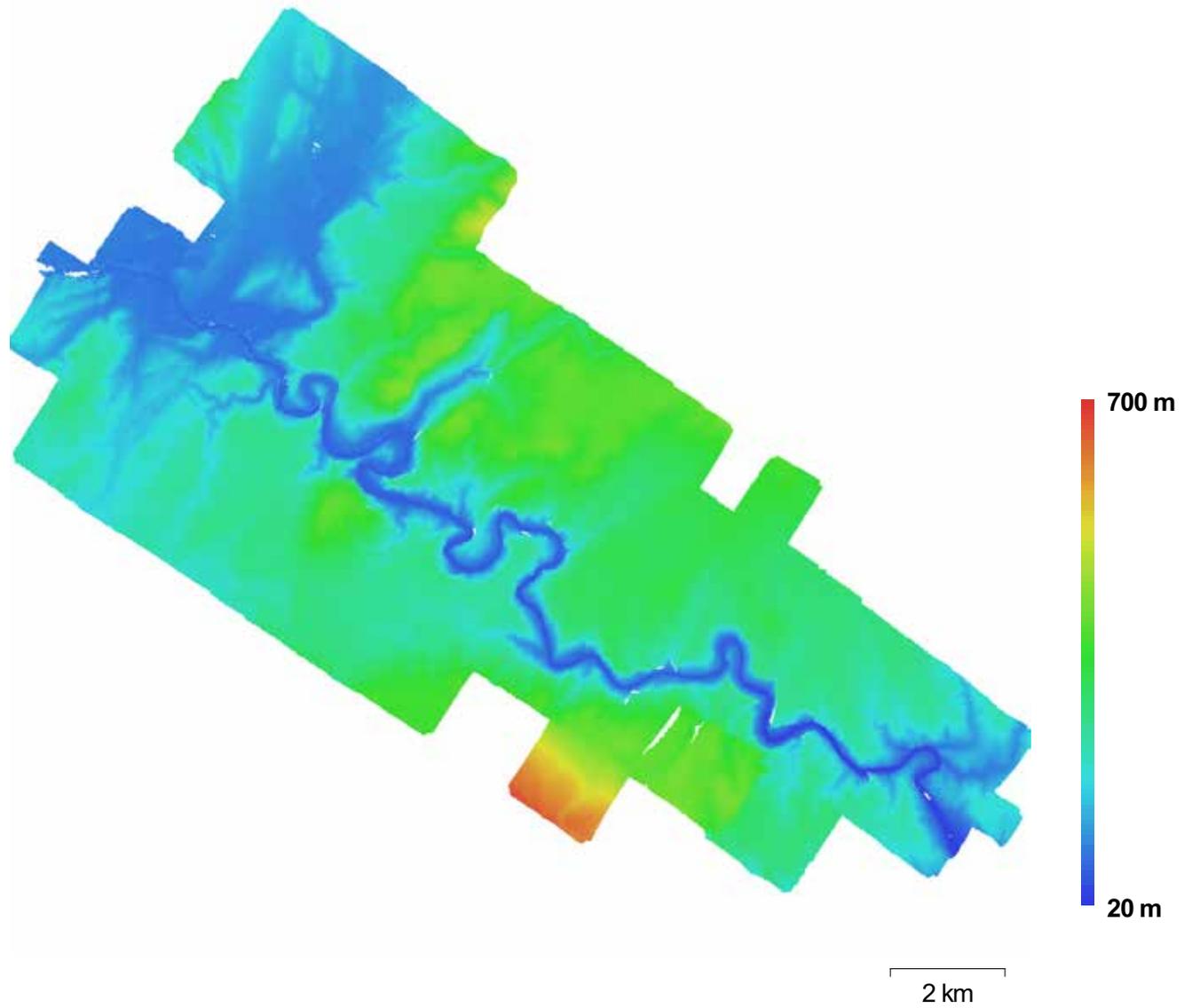


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 7.81 m/pix
Point density: 0.0164 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	121
Aligned cameras	120
Markers	56
Coordinate system	RGF93 / Lambert-93 (EPSG::2154)

Point Cloud

Points	1,294,502 of 1,585,768
RMS reprojection error	0.144156 (1.30939 pix)
Max reprojection error	7.91073 (64.6025 pix)
Mean keypoint size	7.91015 pix
Effective overlap	2.34691

Alignment parameters

Accuracy	Medium
Pair preselection	Disabled
Keypoint limit	200,000
Tie point limit	100,000
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 hours 28 minutes
Alignment time	5 seconds

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Optimization time	20 seconds

Dense Point Cloud

Points	731,216,141
--------	-------------

Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 hours 23 minutes
Dense cloud generation time	1 hours 28 minutes

DEM

Size	3,451 x3,100
Coordinate system	Local Coordinates (m)

Reconstruction parameters

Source data	Sparse cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	14 seconds

Software

Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP/PCA : Analyse Composante Principale (« *Principal Component Analysis* ») : méthode de statistique multivariée permettant de réduire le nombre de variables dans un jeu de données.

ASL : valeurs d'altitude par rapport au niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale (« *Above Sea Level* »).

BP : « *Before Present* », surtout utilisé pour les datations radiocarbone.

Cal. BP : Calibré « Before present », surtout utilisé pour les datations radiocarbone.

CEC : Capacité d'échange cationique d'un sédiment (« *Cationic Exchange Capacity* »).

DEM : « *Digital Elevation Model* » (voir : MNT).

dGPS : GPS différentiel (haute précision) utilisant la technologie par porteuse de phase.

EDYTEM : Laboratoire Environnement DYnamiques et TErritoires de Montagne.

EMQ : Erreur Moyenne Quadratique.

ERT : Tomographie de la résistivité électrique (« *Electrical Resistivity Tomography* »).

ESR : Méthode de datation par résonance paramagnétique électronique (« *Electron Spin Resonance* »).

FPS : Fluorescence UV en Phase Solide.

GCP : Points de contrôle topographique au sol (« *Ground Control Points* »).

ISerre : Laboratoire Institut des Sciences de la Terre.

Kelvin : Unité de température (Système International).

LIDAR : Light Detection And Ranging, technologie de topographie laser haute résolution.

LSCE : Laboratoire des SCiences et du Climat et de l'Environnement.

MC - ICP MS : Spectromètre de masse (« *Multiple Collector – Inductively Coupled Plasma -Mass Spectrometry* »).

MIS : Stades isotopiques marins de l'oxygène (Marine Isotope Stage).

MNE : Modèle Numérique d'Élévation (avec la végétation).

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle.

MNT : Modèle Numérique de Terrain (raster).

NGF : Altitudes par rapport au niveau moyen de la mer en France (Nivellement Général de la France).

OSL : Méthode de datation par luminescence stimulée optiquement (« *Optically Stimulated Luminescence* »).

RMSE : « *Root Mean Square Error* » (voir EMQ).

ROC (LIDAR) : Retour à Onde Complète (signal lidar pouvant être décomposé en plusieurs longueurs d'onde, chacune représentant potentiellement une interaction topographique (sol, branches, canopée...)).

SIG : Système d'information géographique (logiciels de cartographie informatique).

Sigma (1, 2) : Intervalle de confiance d'un résultat. 1 sigma = 68% ; 2 sigma = 95 %.

SPI : « *Stream Power Index* » (Indice de puissance des flux).

Statistique bayésienne : Méthode statistique basée sur l'inférence bayésienne, qui permet de calculer des probabilités d'évènements à partir d'observations et de contraintes.

STI : « *Sediment Transport Index* » (Indice de transport des sédiments).

TIN : Maillage 3D de triangles irréguliers (« *Triangle Irregular Network* »).

TL : Méthode de datation par thermoluminescence.

U-Th : Méthode de datation par les séries de l'Uranium et du Thorium dans une concrétion carbonatée.

XRF : Fluorescence par rayons X (X Ray Fluorescence).

²⁶Al/¹⁰Be : Méthode de datation cosmogénique basée sur le rapport entre l'Aluminium 26 et le Beryllium 10.

¹⁰Be/⁹Be : Méthode utilisant le rapport entre le Beryllium 10 (cosmogénique) et le Beryllium 9 permettant d'estimer des taux de dénudation à l'échelle d'un bassin versant.

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	3
Abstract.....	4
Remerciements.....	5
Sommaire.....	8
INTRODUCTION	13
Méthodologie	14
Une approche systémique de l'environnement : considérer l'espace comme un objet complexe, multifactoriel et intégratif.....	14
La topographie haute - résolution : une démarche à l'interface d'autres champs disciplinaires.....	15
La 3D comme outil intégratif participant au processus de la construction du savoir	16
Scientificité de la reconstitution visuelle : le poids de l'image.....	16
Approche intégrée de trois sites ornés	18
Le Roc –aux- Sorciers (Anglin, Vienne).....	19
Site Borologa (Drysdale River, Kimberley, Australie).....	20
Chauvet- Pont d'Arc (Ardèche, France).....	21
Plan de thèse	23
Inventaire des outils et des méthodes employées	23
Organisation	23
PARTIE I : GÉOMORPHOLOGIE 3D: ETUDE MULTISCALEAIRE D'UN SITE ARCHEOLOGIQUE DANS SON ENVIRONNEMENT PHYSIQUE	25
CHAPITRE 1 : MODÉLISER L'ENVIRONNEMENT AUTOUR D'UN SITE ARCHÉOLOGIQUE : L'EXEMPLE DU ROC-AUX-SORCIERS	27
1. Le Roc-aux-Sorciers : un site anciennement fouillé, re-questionné par la 3D	27
1.1 Contexte de recherche.....	28
2. Acquérir et construire le modèle 3D	31
2.1 Acquisition du nuage de points.....	31
<i>A) Le placement des cibles sur le terrain</i>	32
2.2 Consolidation.....	33
<i>A) La tension de cibles</i>	34
<i>B) Le contrôle visuel</i>	34
2.3 Elimination de la végétation sur le modèle (traitement manuel et numérique).....	35
2.4 Maillage.....	35
3. Exploitation des données topographiques	36

3.1 Visualisation du site.....	36
3.2 Cartographie géomorphologique du Roc- aux-Sorciers.....	37
3.3 Reconstitution des paléosurfaces disparues et apport de la 3D dans la compréhension de ces dernières.....	39
3.4 Reconstitution de la surface théorique d'occupation au Magdalénien moyen par interpolation.	41
4. Discussions	45
4.1 reconstitution de l'évolution du relief par phases.....	45
4.2 Mise en place d'une chronologie relative des occupations et de la morphogénèse du site.....	45
5. Conclusions	47
CHAPITRE 2 : PENSER L'ESPACE TOPOGRAPHIQUE COMME INTERFACE DES PHÉNOMÈNES NATURELS ET ANTHROPIQUES : MODÉLISATION INTÉGRÉE ET APPROCHE GÉOMORPHOLOGIQUE 3D DU SITE BOROLOGA (KIMBERLEY, AUSTRALIE)	49
Introduction – contextualisation	49
1. Un site mobilisant de nombreux enjeux de recherche, à différentes échelles d'investigation.	50
1.1 Prospections archéologiques.....	51
1.2 Cartographie anthropo-géomorphologique.....	52
2. Etude géomorphologique du versant du site Borologa	54
2.1 Cartographie du dernier méandre de la Drysdale river.....	54
2.2 Le rebord du plateau et son escarpement rocheux surplombant le site Borologa.....	55
3. Méthodes d'acquisition topographique LiDAR pour l'analyse 3D	56
3.1 Acquisition.....	56
3.2 Maillage des nuages de points.....	57
4. Corrélation stratigraphique 3D des couches de quartzite : cartographie en coupe et mesures sur le modèle 3D	59
4.1 Observations. 59	
4.2 Mesures sur le modèle et stratigraphie des bancs de quartzite. 60	
4.3 Identification 2D et corrélation visuelle des morphologies. 60	
5. Rétromodélisation de la dynamique morphogénique du versant par assemblage best-fit des blocs 3D	61
5.1 Protocole.....	61
5.2 Résultats.....	62
6. Discussion	66
6.1 Cartographie retro-géomorphologique des processus.....	66
6.2 Les mouvements de bascule des blocs.....	68
6.3 Les processus de glissement – translation.....	68
6.4 Le rôle de l'incision de la rivière.....	69
7. Conclusion	70

PARTIE II GEOMORPHOLOGIE 3D : CONSTRUCTION D'UN MODELE RELATIF D'EMBOITEMENT DES FORMES DU MEANDRE DE LA COMBE D'ARC..

Avant-propos	71
CHAPITRE 3: RECONSTITUTION DES PALÉOMORPHOLOGIES FLUVIATILES ET KARSTIQUES PAR L'APPROCHE CARTOGRAPHIQUE 3D. APPLICATION AU SITE DE LA COMBE D'ARC-PONT D'ARC (ARDECHE, FRANCE)	73
1. L'Ardèche	73
2. Reconstitution et évolution du cours de l'Ardèche au Quaternaire	76
2.1 Cartographie des dépôts fluviatiles de la plaine de Vallon-Pont-d'Arc.....	76
A) <i>Le méandre abandonné de la Combe d'Arc</i>	78
B) <i>Les dépôts fluviatiles de la plaine de Vallon -Pont-d'Arc</i>	80
2.2 Réalisation d'un modèle 3D haute-résolution.....	80
3. Résultats	81
3.1 Pétrographie des dépôts alluviaux.....	81
3.2 La surface alluviale de la Combe d'Arc.....	84
4. Discussions	85
5. Création d'un modèle topographique 3D étendu	86
5.1 Génération du modèle photogrammétrique des gorges de l'Ardèche.....	87
5.2 Protocole de consolidation.....	88
5.3 Maillage 3D.....	89
6. Reconstitution 3D des paléo-niveaux fluviatiles + 15 m et + 30 m dans les gorges de l'Ardèche	90
6.1 Acquisition des points topographiques.....	90
6.3 Implémentation et visualisation dans le modèle 3D.....	91
7. Discussions	93
7.1 L'interface plaine-gorges : un goulot d'étranglement morphogène.....	93
7.2 Une plaine témoignant de la présence d'anciens méandres, aujourd'hui recoupés.....	95
8. Conclusion	98
CHAPITRE 4 : APPORTS DE L'ETUDE DES RESEAUX ENDOKARSTIQUES DANS LA COMPREHENSION DE L'EVOLUTION DU MEANDRE DE LA COMBE D'ARC	101
Avant-propos	101
Introduction	102
1. Méthode : Topographie 3D des morphologies à l'échelle de la Combe d'Arc	103
2. Comparaison morphologique et altitudinale des cavités de basse altitude du Cirque d'Estre et de l'entrée des Gorges de l'Ardèche	104
2.1 Cartographie des données structurales de la Combe d'Arc.....	104
2.2 Le Pont d'Arc.....	104
3. La grotte des Châtaigniers	107
3.1 Description.....	107
3.2 Des morphologies noyées dans un réseau de basse altitude.....	108

3.3. Des modelés et cristallisations de paroi attestant de phases de ré-ennoisement de la cavité...	109
4. La grotte de Spectaclan	110
5. Discussions	112
5.2 L'enregistrement de l'évolution de la rivière dans les conduits karstiques.....	115
5.3 Le sapement latéral de la concavité du méandre par la rivière.....	115
5.4 Les modalités du recouplement de la Combe d'Arc.....	116
6. Conclusion	117
CHAPITRE 5 : IMAGERIE DU SOUS-SOL DE LA COMBE D'ARC PAR RESISTIVITE ELECTRIQUE (ERT)).....	121
1. Modèle géomorphologique théorique du sous-sol de la Combe d'Arc	121
1.1 Organisation des dépôts sédimentaires de la Combe d'Arc.....	122
1.2 Le bedrock et les banquettes à + 5 m.....	124
2. Acquisition des profils de tomographie électrique ERT	125
2.1 Interprétation de la résistivité électrique.....	125
2.2 Campagnes de terrain 2017 – 2019.....	126
3. Inversions	127
3.1 Inversion 2D.....	127
3.2 Résultats 2D.....	128
3.3 Inversion 3D.....	130
3.4 Résultats 3D.....	131
4. Reconstitution géométrique des morphologies du sous-sol de la Combe d'Arc	133
4.1 Modélisation 3D des morphologies du toit des galets de la terrasse à + 15 m.....	133
4.2 Modélisation 3D des morphologies du talweg rocheux de la Combe d'Arc.....	135
5. Datation relative de l'ouverture du Pont d'Arc	137
5.1 L'exhaussement des banquettes à + 5m au sein du méandre : un marqueur de l'incision du talweg de l'Ardèche.....	137
5.2 Evolution paléo-géographique de la Combe d'Arc.....	139
6. Conclusion	141
PARTIE III : CHRONOLOGIE ET 3D	145
CHAPITRE 6 : LES SPELEOTHEMES DE LA GROTTTE DES CHATAIGNIERS : ARCHIVES CHRONOLOGIQUES ET INDICATEURS DE L'INCISION PLEISTOCENE DE L'ARDÈCHE	147
1. Du modèle chronologique par phases au modèle chronologique absolu	147
1.1 Stratégie d'échantillonnage des concrétions.....	147
1.2 Analyse des coupes des concrétions prélevées.....	152
1.3 Apport des datations U-Th sur le modèle théorique d'évolution de la Combe d'Arc.....	156
2. Etude géochimique de la concrétion CHAT-02	157
2.1 CHAT-02, un spéléothème enregistrant des niveaux de la rivière à 81.5 m NGF.....	158
2.2 Fluorescence X (XRF).....	158

2.3 Fluorescence en phase solide (SPF).....	160
3. Analyse des résultats	162
3.1 Cartographie de la matière organique.....	162
3.2 Etude des variations élémentaires par PCA.....	162
4. Discussions	166
4.1 L'enregistrement des variations du niveau de base au cours du MIS3 par CHAT-02.....	166
4.2 Les pôles phosphore et cations solubles.....	167
4.3 Le paléo-paysage de la grotte Chauvet.....	167
5. Conclusion	167
CHAPITRE 7 : DATATIONS ESR SUR QUARTZ DES TERRASSES ALLUVIALES + 15 M, + 30 M ET + 45 M DE L'ARDECHE	173
Avant-propos	173
1. La méthode de datation ESR	173
1.1 Préparation des échantillons.....	174
1.2 Dose totale, dose résiduelle et dose archéologique.....	174
1.3 Détermination de la paléo-dose par spectrométrie ESR.....	175
<i>A) Le centre Aluminium</i>	175
<i>B) Les centres Titane (Ti-Li et Ti-H)</i>	176
2. Prélèvement de sédiments sur les basses terrasses de l'Ardèche	177
2.1 Le choix des sites de prélèvement pour datation ESR.....	177
2.2 Description site par site.....	178
<i>A) Les échantillons prélevés dans la Combe d'Arc</i>	178
<i>B) Les échantillons prélevés en amont des gorges de l'Ardèche</i>	179
<i>C) Les échantillons prélevés en aval des gorges de l'Ardèche</i>	180
3. Datation ESR des sédiments de la vallée de l'Ardèche	181
3.1 Spectres ESR.....	181
3.2 Tableaux des résultats.....	181
3.3 Essai de corrélation des datations ESR et U/Th à l'aide du modèle d'emboîtement relatif.....	182
<i>A) Modèle chrono-relatif</i>	183
4. Résultats et discussion	184
4.1 Les terrasses alluviales de l'Ardèche et cycles glaciaires pléistocènes.....	184
<i>A) Des niveaux d'aggradation calés sur les cycles de 100 ka</i>	184
<i>B) Chrono séquence de l'évolution morphologique de l'Ardèche au Pléistocène moyen et supérieur</i>	186
4.2 Datation des recoupements des méandres de l'Ardèche.....	188
<i>A) Le recoupement du méandre de Montingrand</i>	188
<i>B) Datation du stade final du recoupement de la Combe d'Arc</i>	190
<i>C) Implication paléogéographique et archéologique du Pont d'Arc</i>	192
5. Conclusion.....	193

CHAPITRE 8 : ETUDE MORPHOMETRIQUE ET VOLUMETRIQUE DES NIVEAUX A + 15 M ET + 30 M...	197
1. Calcul des volumes disparus par analyse diachronique.....	197
1.1 Utiliser les reconstitutions des paléo-topographies.....	197
A) <i>Les calculs raster</i>	198
B) <i>Stockage sédimentaire dans la Combe d'Arc</i>	199
C) <i>Cartographie des pentes des sédiments de la plaine de Vallon Pont d'Arc</i>	201
D) <i>Reconstitution du talweg rocheux des niveaux +15 et +30 m</i>	203
1.2 Calcul des volumes érodés par comparaison de MNT.....	206
A) <i>Cartographie des différences</i>	207
B) <i>Répartition du stockage sédimentaire dans les plaines d'alluvionnement</i>	208
2. Une analyse du bassin versant par les index topographiques érosion/sédimentation.....	210
2.1 Caractériser l'érosion par des indices topographiques : traitements SIG.....	211
A) <i>Les indices topographiques d'érosion : « Stream Power Index » et « Sediment Transport index ».</i>	211
B) <i>Calibration du « Sediment Transport Index » par l'utilisation des cosmonucléides produits in-situ : une perspective potentielle ?</i>	214
3. Discussions	215
3.1 Estimation de taux d'érosion et de sédimentation pour les plaines alluviales.....	215
3.2 Un contrôle sédimentaire du cours d'eau à dominante orographique plutôt qu'eustatique.....	218
4. Conclusion	220
CONCLUSIONS GENERALES	221
1. Les enseignements de la géomorphologie 3D par l'approche multi-méthodes.....	221
2. Utiliser les reconstitutions des paléo-reliefs.....	223
3. Le travail de l'eau.....	223
4. Le rôle de la lumière.....	224
5. La reconstitution : un travail à l'interface des sciences et des arts.....	226
Bibliographie.....	231
Table des figures.....	245
Annexes.....	259
Sigles et abréviations.....	267
Table des matières.....	269