

Fig. 42. Glacial and glaciofluvial outwash deposits, with associated ages in the Têt and neighbouring catchments. <sup>14</sup>C ages after Delmas (2005). <sup>10</sup>Be exposure ages for sites I/CAL and P/CAC after Gresset et al. (2017) and others after Delmas et al. (2008). Schmidt-hammer exposure dating (SHED) results after Tomkinstal (2018). Geomorphological map (landforms and deposits) after Delmas (2005). Digital elevation data source: Institut Géographique National, ground resolution: 20 m.

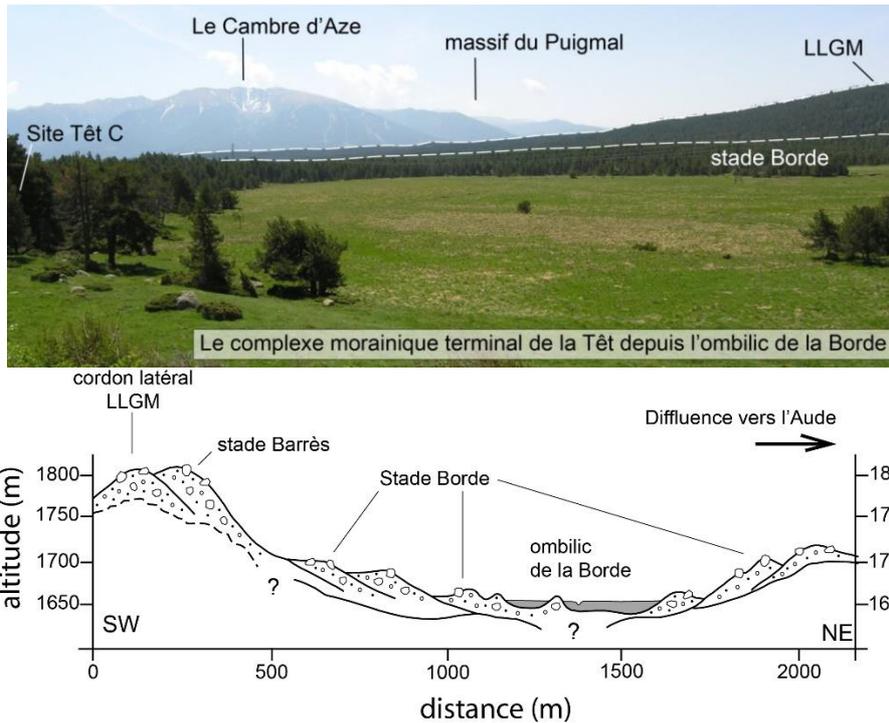


Fig. 43. Le complexe morainique terminal de la Têt au niveau de la Borde. A – L'ombilic de la Borde, vue vers le sud. B – Transect du complexe morainique terminal de la Têt (transect perpendiculaire à l'axe de l'aue).

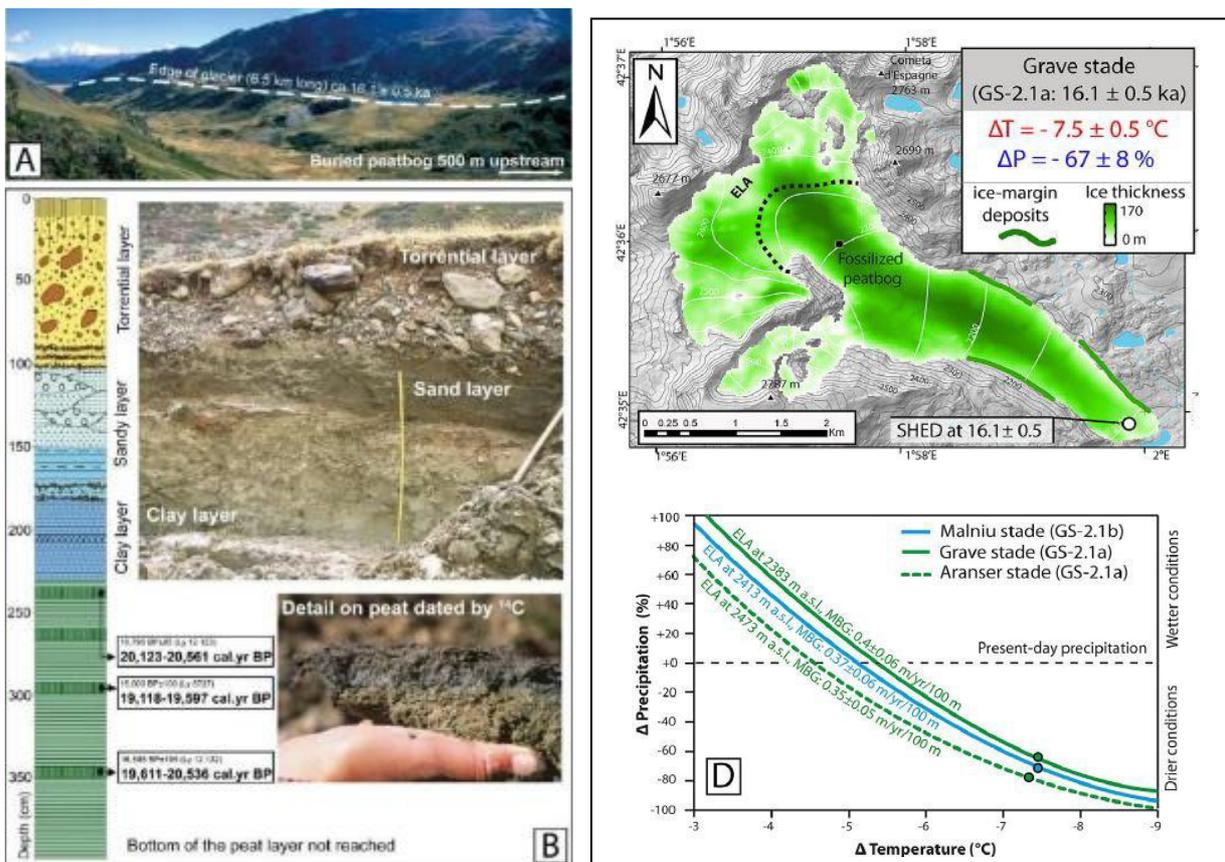


Fig. 44. Post-GLGM deglaciation and early LGIT glacier re-advance in the Grave valley.

A- Lateral moraine, legacy of the GS-2.1a glacial readvance, in the Grave/upper, Têt valley. B- Radiocarbon ages and stratigraphy of the buried peat bog and lacustrine, deltaic, and high-energy, poorly sorted fluvial deposits. Extrait de Delmas, (2019) et Reixach et al., (2021).

La déglaciation post-GLGM de ce segment de vallée a été extrêmement précoce et rapide comme l'indique les âges  $^{14}\text{C}$  à 20 ka cal BP du site de la Grave (Fig. 44b). Ces données indiquent que dès la fin du GLGM, la glace était cantonnée aux cirques de la haute vallée avec une LEG vers 2350 m, i.e. 300 à 400 m au-dessus de celle atteinte au cours du GLGM. Au cours du Oldest Dryas (GS-2.1a), un nouvel épisode de progression glaciaire aboutit à la formation d'une langue de glace de 6 km de long dans la haute vallée de la Grave (Fig. 44a, c et d). Ce dernier disparaît au cours de l'interstade Bølling-Allerød (GI-1), à l'instar de nombreux glaciers est-pyrénéens. Le coup de froid du Younger Dryas (GS-1) se traduit quant à lui essentiellement par le développement de glaciers rocheux.

*On se dirige ensuite vers le col du Puymorens où un deuxième arrêt sera consacré aux dépôts de marge glaciaire et données géochronologiques obtenues aux abords de ce col de transfluence situé en position charnière entre le bassin du Carol sur la façade méditerranéenne de la chaîne, et le bassin de l'Ariège, sur la façade nord, directement ouverte aux influences climatiques d'origine atlantique.*

**2b- Les séquences glaciaires de la haute vallée de l'Ariège et du col du Puymorens. Les paléoenglacements comme marqueur des changements climatiques survenus dans l'est-pyrénéens au cours du LGM et de la Dernière Terminaison Glaciaire (Théo Reixach, UMR HNHP, UPVD).**

La position des fronts pyrénéens au cours du GLGM n'est pas encore identifiée de manière exhaustive, mais les données actuellement disponibles sont suffisamment nombreuses pour révéler l'existence d'un gradient est-ouest ayant une signification potentiellement paléoclimatique (Calvet et al. 2011 ; Delmas et al., 2011). En effet, les glaciers de vallée localisés à l'extrémité orientale de la chaîne ont enregistré au GLGM une avancée des fronts glaciaires presque aussi ample que celle survenue au cours du LLGM/MIS 4. Sur la Têt, le Carol, le Malniu, les fronts GLGM sont localisés seulement quelques centaines de mètres en amont des emprises MIS 4 (Delmas et al., 2008 ; Pàllas et al., 2010). En revanche, l'écart est de plus en plus grand vers l'ouest au fur et à mesure que les influences climatiques océaniques deviennent de plus en plus sensibles (jusqu'à 30 km dans la vallée du Gállego, García-Ruiz et al., 2003). Ce contraste est-ouest des paléoenglacements pyrénéens traduit une cyclogenèse d'origine méditerranéenne plus intense et relativement plus efficace en termes d'alimentation neigeuse que celle issue de l'Atlantique (Fig. 45).

L'emprise spatiale et la chronologie des fluctuations glaciaires contemporaines de la Dernière Terminaison Glaciaire sont en revanche encore assez mal renseignées avec seulement une douzaine de sites datés par  $^{14}\text{C}$  sur sédiments glaciolacustres et par exposition  $^{10}\text{Be}$  et  $^{36}\text{Cl}$  sur blocs erratiques et roches polies par la glace (Fig. 45). L'opportunité de multiplier les données permettra notamment d'identifier à quel moment les circulations d'ouest que nous les connaissons aujourd'hui se sont mises en place.

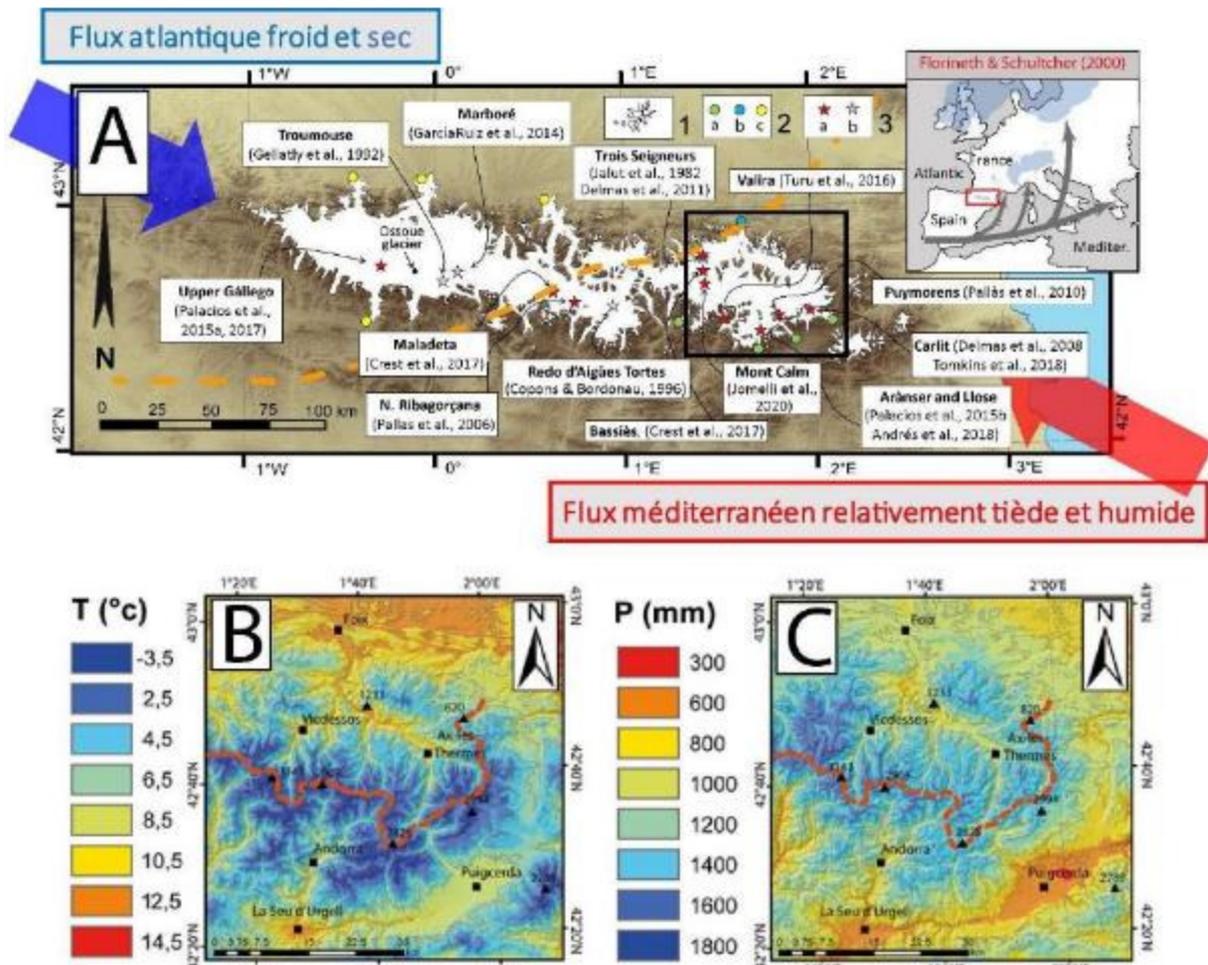


Fig. 45. Paléoenlacements pleistocènes pyrénéens et contraste climatique actuelles dans les Pyrénées Orientales. A- Paléoenlacements pleistocènes pyrénéens (d'après Calvet et al., 2011 ; Delmas et al., 2011). 1- Emprise würmienne maximale, événement contemporain du MIS4, antérieur au Global LGM. 2- Emprise des fronts glaciaires pyrénéens au cours du Global LGM. a- vallée ou emprise Global LGM proche de l'emprise MIS 4, b- vallée ou emprise Global LGM située ~ 10 km en amont de l'emprise MIS 4, c- vallée ou emprise Global LGM située 8 km en amont de l'emprise MIS 4. 3- Site associés à des stades d'enlagement tardiglaciaire ou holocènes datés à partir de données TCN (a) et radiocarbone (b). B et C- Températures moyennes mensuelles annuelles (°C) et précipitations cumulées annuelles (mm) (générées à partir des données de Batalla et al., 2018). Ligne rouge pointillée : ligne de partage des eaux entre la façade atlantique et méditerranéenne. Extrait de Reixach et al., (2021), modifié.

### **L'est des Pyrénées un secteur clé pour apprécier l'impact des changements climatiques contemporains de la dernière terminaison glaciaire**

L'est des Pyrénées se caractérise par de forts contrastes climatiques entre les deux façades montagneuses de la chaîne (Fig. 45b et c). Dans ce secteur, une série de 22 datations  $^{10}\text{Be}$  a été réalisée sur constructions morainiques de la haute vallée de l'Ariège et du col du Puymorens (Fig. 46, Reixach et al., 2021) qui occupe une position charnière entre le bassin du Querol (façade sud sous influence méditerranéenne), et le bassin de l'Ariège (façade nord sous influence atlantique).

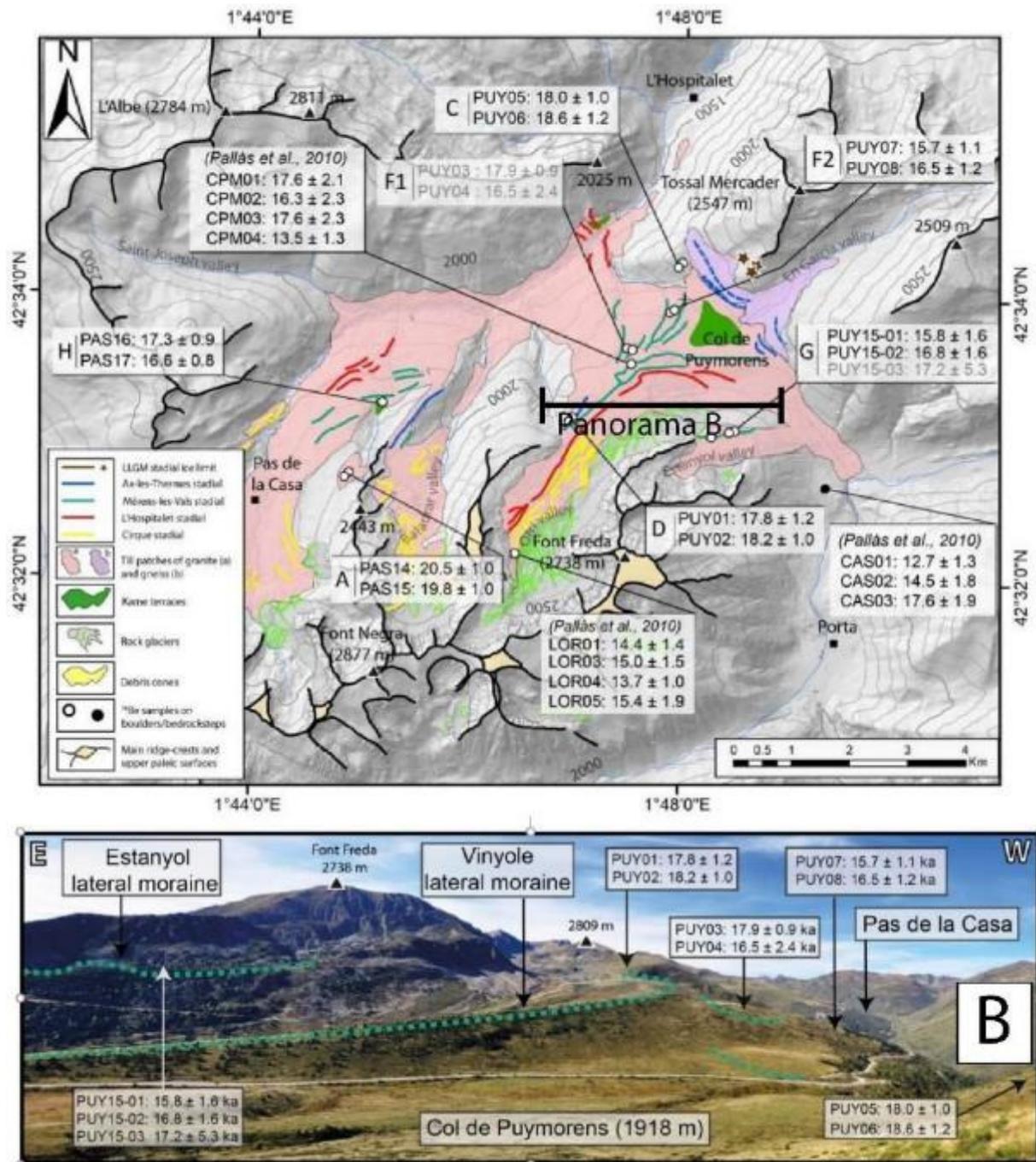


Fig. 46. Carte géomorphologique et datations par exposition ( $^{10}\text{Be}$ ) aux abords du col de Puymorens. Extrait de Reixach et al., (2021), modifié.

L'étude des données chronologiques et paléogéographiques récemment acquises dans ce segment de vallée a permis de documenter l'étendue et la chronologie de 4 stades d'englacement successifs contemporains de la dernière terminaison glaciaire (Fig. 47) :

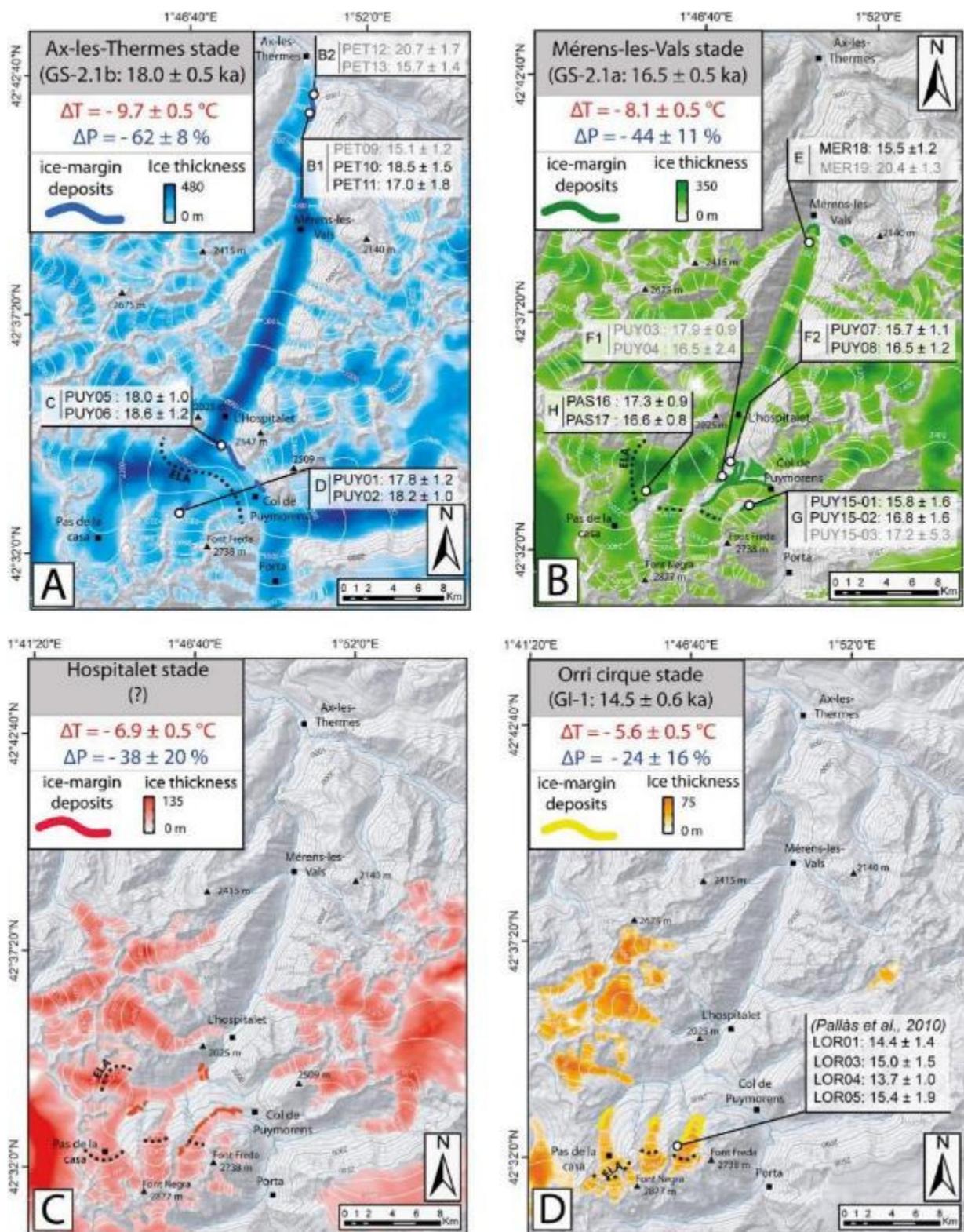


Fig. 47. Emprise des stades d'englacement identifiés dans la haute vallée de l'Ariège.

Extrait de Reixach et al., (2021).

- (1) **Le stade Ax-les-Thermes** correspond à un glacier de vallée composite d'une vingtaine de km de long délimité par les moraines latérales du complexe de Petches positionnées en amont d'Ax-les-Thermes et par les moraines latérales les plus externes dans la partie amont. Il se caractérise par une transfluence active avec la vallée du Querol. Les âges sur

la moraine latérale droite du complexe de Petches et sur la marge latérale droite du glacier dans la zone amont fixent la chronologie de cette emprise au Oldest Dryas (GS-2.1b :  $18,0 \pm 0,5$  ka).

- (2) **Le stade Mérens** d'une quinzaine de km de long est caractérisé par une disjonction des vallées adjacentes et l'arrêt de la transfluence avec le Querol. La datation du front morainique de Mérens-les-Vals et des lobes de disjonction dans la partie amont fixe la chronologie de cette emprise en l'associant ainsi au Oldest Drays (GS-2.1a :  $16,5 \pm 0,5$  ka).
- (3) **Le stade de l'Hospitalet** d'une dizaine de km de long est jalonné au front par plusieurs moraines frontales présentent en amont du village de l'Hospitalet. Ce stade est non daté faute de blocs exploitables.
- (4) **Le stade des cirques** caractérise la dernière étape de la déglaciation et correspond à de petits glaciers bien individualisés dans les cirques des vallées de l'Orri et Baladrar. La remodelisation des datations obtenues par [Pallàs et al., 2010](#) sur les moraines latérales de l'Orri ont permis d'attribuer cette emprise au Bølling-Allerød (GI-1 :  $14,5 \pm 0,6$  ka).

Les modélisations glaciologiques et paléoclimatiques obtenues à travers la cartographie de ces 4 stades d'englacement ont par ailleurs permis de renseigner les amplitudes de températures et précipitations au sein de la Dernière Terminaison Glaciaire. Le climat dans la haute vallée de l'Ariège était globalement plus froid et plus sec qu'à l'actuel avec une amélioration progressive des conditions climatiques entre le GS-2.1b et GI-1. La remontée de la ligne d'équilibre glaciaire (LEG) de 410 m et l'augmentation du gradient de bilan de masse (MBG) de  $0,04$  m/yr/100m sont les témoins d'une augmentation des températures et précipitation de  $4,2$  °C et 38 %, respectivement.

Ces observations sont mises en perspective avec l'ensemble des données paléogéographiques et chronologiques (64 données modélisées) recueillies à travers 7 vallées (Suc, Escalé, Picot, Médecourbe, Aranser, Malniu et Grave) dans l'est des Pyrénées concernant la Dernière Terminaison Glaciaire ([Fig. 48](#)). Elles permettent de proposer un bilan des contrastes climatiques observés dans ce secteur de la chaîne, en lien avec les dynamiques paléoclimatiques enregistrées au cours de cette période clé du Pléistocène supérieur à l'échelle de l'Europe occidentale et de la Méditerranée.

Les données chronologiques montrent que la déglaciation dans l'est des Pyrénées est rapide et massive est que seuls de petits glaciers de cirques (Vallée de la Grave et Medecourbe e.g.) persistent au cours du GS-1 ( $\sim 12.3$  ka) dans les cirques où les conditions topoclimatiques sont favorables. Les modélisations glaciologiques montrent un contraste paléoclimatique prononcé avec une façade atlantique plus froide et plus humide que la façade méditerranéenne. Sur la façade nord (i) les LEG sont systématiquement moins élevées (au cours du GS-2.1b : respectivement 2012 m and 2413 m pour le stade Ax and Malniu ; au cours du GS-2.1a : respectivement 2152 m and 2473 m pour le stade Mérens et Aranser) et (ii) les MBG systématiquement plus importants (GS-2.1b : respectivement  $0.47 \pm 0.05$  et  $0.37 \pm 0.06$  m/yr/100 m pour le stade Ax and Malniu ; GS-2.1a : respectivement  $0.50 \pm 0.05$  et  $0.35 \pm 0.05$  m/yr/100 m pour le stade Mérens et Aranser). Ce contraste semblable à l'actuelle, mais néanmoins plus prononcé semble se mettre en place dès la fin du LGM ( $\sim 19$  ka).

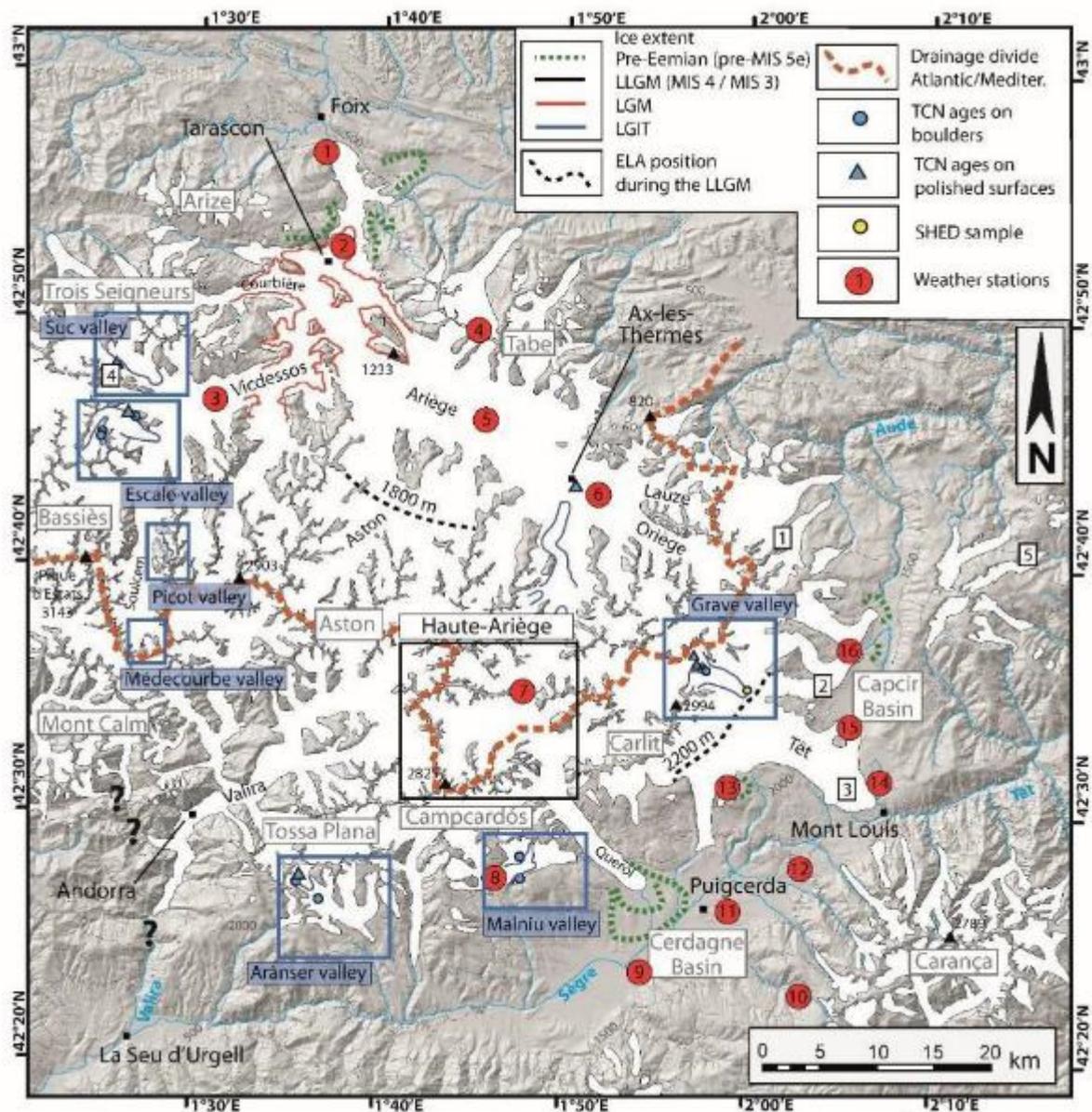


Fig. 48. Paléoenclacements pléistocènes pyrénéens de la façade est des Pyrénées. Ligne pointillée : ligne de partage des eaux entre la façade Atlantique et Méditerranéenne. Les encadrés bleus et noirs représentent les zones d'étude. Les points rouges représentent les stations météorologiques utilisées pour les modélisations paléoclimatiques. Les carrés blancs représentent les tourbières. Extrait de [Reixach et al., \(2021\)](#), modifié.

### Pique-nique au col du Puymorens

**On quitte le col du Puymorens vers 14h00 pour être à Niaux au plus tard vers 15h30.**

## 2c- Le système karstique de Niaux-Sabart-Lombrives. Visite du Salon Noir.

**Mise en place du réseau en lien avec l'incision plio-quaternaire des vallées. Réactivations pléistocènes des galeries épiphréatique en contexte glaciaire. (Patrick Sorriaux).**

La grotte de Niaux appartient à un réseau karstique de plusieurs kilomètres de développement situés dans une position privilégiée, à la confluence de deux rivières, l'Ariège et le Vicdessos (Fig. 49 et 50) (Martel, 1908 ; Renault, 1970 ; Sorriaux, 1981, 1982 ; Bakalowicz et al., 1984 ; Sorriaux et al., 2016). Le massif a conservé les traces de plusieurs phases de karstification étagées (une dizaine de niveaux), en relation avec le creusement des vallées sous les hautes surfaces aplanies (comme à Villefranche ; ici le Plateau de Beille). Cet étagement de niveaux karstiques est mis en rapport avec le soulèvement fini-néogène des Pyrénées (Calvet et al., 2021). Le niveau principal des très grandes galeries de Niaux-Lombrives-Sabart et leurs vieilles alluvions d'une paléo-Ariège pourraient être mis en relation avec le haut niveau de piémont du Pliocène-Pléistocène ancien (Lannemezan et ses équivalents). Ultérieurement le karst a été réactivé quand les glaciers ont empli les vallées (plus de 600 m de glace ici ; Delmas, 2009, 2015, 2019 ; Delmas et al., 2011, 2012) et il a enregistré fidèlement les cycles glaciaires-interglaciaires, au moins quatre depuis 450 ka, et les rajeuinements successifs du karst en lien avec l'englacement des vallées pendant le Quaternaire.

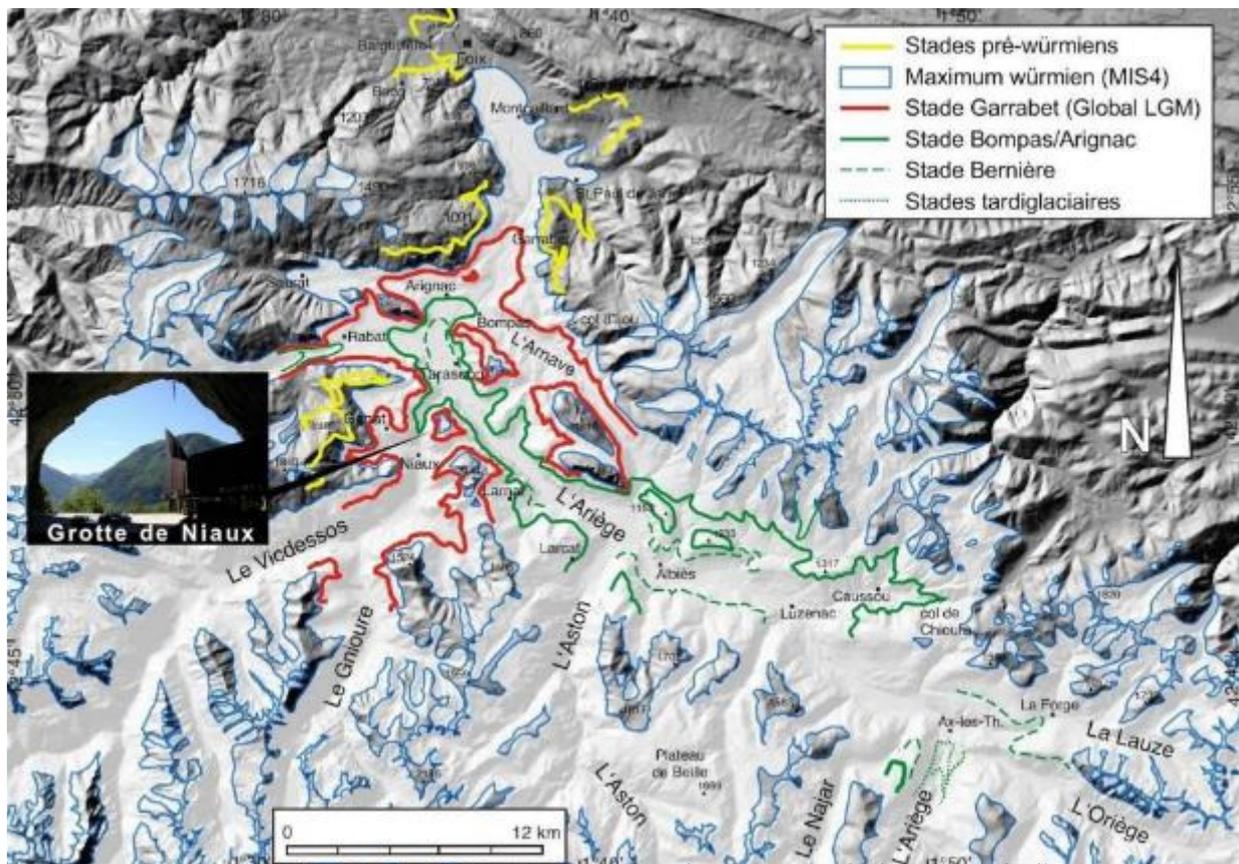


Fig. 49. Extension des paléoenclacements pléistocènes de la vallée de l'Ariège et localisation de la grotte de Niaux. Extrait de Sorriaux et al., (2016).

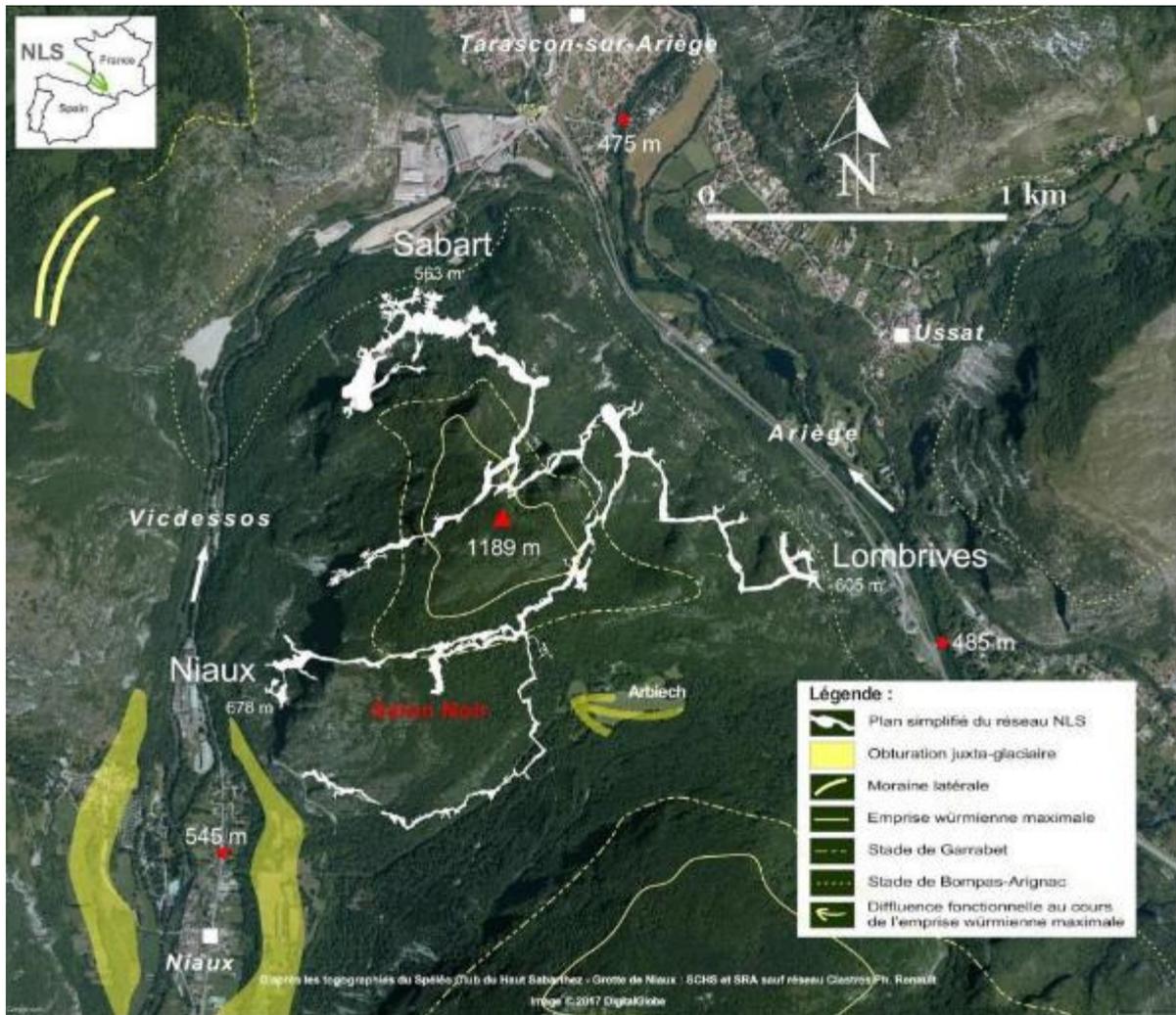


Fig. 50. Topographie du système karstique de Niaux-Lombrives-Sabart et morphologies glaciaires.



Fig. 51. La vallée du Vicdessos vue du chemin de la grotte de la Vache.  
Noter la grande terrasse supérieure qui correspond au toit du remplissage glacio-lacustre de Niaux.

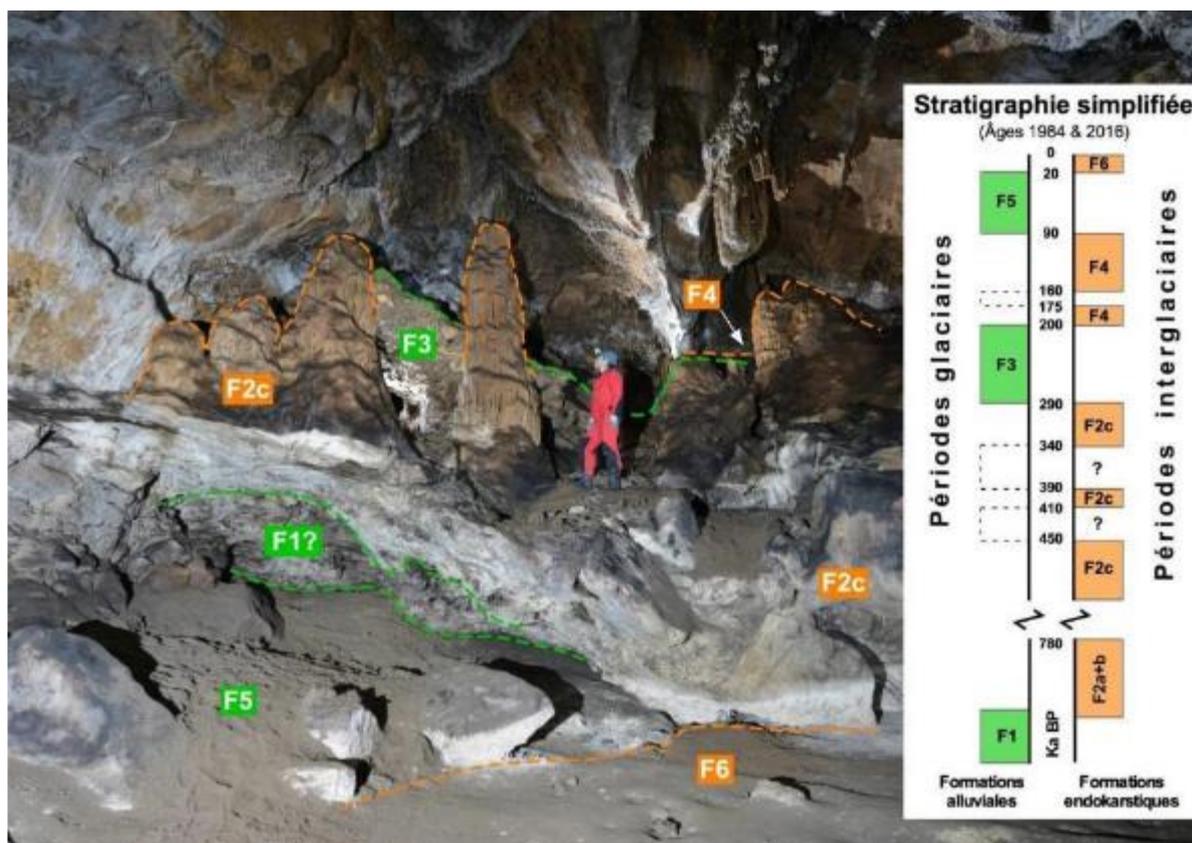


Fig. 52. Coupe stratigraphique de référence (galerie des Comtes de Foix).

Sites localisés à quelques centaines de mètres de l'entrée à 670 m d'altitude.

Sur la coupe stratigraphique de référence (Fig. 52), l'épaisse formation calcitique (planchers et piliers stalagmitiques) visible sur l'affleurement est le Complexe de la calcite (F2c). Il correspond à un repère stratigraphique majeur dans la grotte. Une stalagmite sommitale a été datée à 336 ka (MIS 9) et plusieurs échantillons sont datés à plus de 450 ka (limite de la méthode U-Th). Dans ces échantillons, les rapports  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  proches de l'équilibre (il faut 2 millions d'années pour atteindre cet équilibre) suggèreraient aussi des âges > 1 Ma pour la base de la formation (Sorriaux et al., 2016). Le Complexe de la calcite repose ici sur une formation alluviale encore plus ancienne (Formation alluviale de Lombrives - F1) ayant fait l'objet de datations cosmogéniques  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  qui donnent des âges compris entre 8 et 3 Ma sur d'autres sites étudiés (Sartégou, 2017 ; Sartégou et al., 2020). Les piliers stalagmitiques du Complexe de la calcite sont repris dans un conglomérat et des grès (Formation de la galerie des comtes de Foix - F3), qui sont scellés par plusieurs planchers stalagmitiques (Formation des planchers intermédiaires - F4) qui se sont mis en place entre 200 et 90 ka. Dans cette unité, certains planchers permettent de bien caractériser l'interglaciaire Eémien (MIS 5e) (Sorriaux et al., 2016). La Formation de la galerie des comtes de Foix (F3) correspond à une phase glaciaire pré-würmienne probablement MIS 8. La glaciation MIS 6 et les plus anciennes MIS 10 ou MIS 12 semblent avoir eu un impact mineur sur le karst. Les sables fluvio-glaciaires non cimentés (Formation alluviale de Niaux - F5), en bas de la coupe, sont associés au maximum würmien et au stade de Garrabet, dont les eaux de fonte ont parcouru le système karstique (Delmas et al., 2011). Quand la glace atteignait plus de 1 000 m d'altitude au MIS 4 (70 ka), les circulations souterraines se sont produites de la vallée de l'Ariège vers la vallée du Vicdessos (Sorriaux, 1982) en empruntant l'étage supérieur et ont participé à la vidange d'une grande partie des remplissages plus anciens. Après le maximum d'extension et jusqu'au MIS 2 (29 ka), les circulations souterraines ont

progressivement abandonné la branche vers Niaux pour se diriger entièrement vers Sabart par les puits de Lombrives. Ces sables sont recouverts par des sédiments argileux et calcitiques (Dépôts récents - F6) correspondant au post-glaciaire et dont les premiers planchers stalagmitiques sont datés à 19 ka (Sorriaux, 1981, 1982 ; Bakalowicz et al., 1984 ; Sorriaux et al., 2016). L'abandon définitif du réseau par les eaux de fonte est étroitement corrélé à l'amaigrissement généralisé des glaciers dans les vallées de l'Ariège et du Vicdessos. Les reconstitutions paléogéographiques montrent qu'au moment où le glacier de l'Ariège construit le dernier vallum en aval de Tarascon, la vallée du Vicdessos est déglacée et un lac de barrage glaciaire occupe alors l'ombilic de Niaux jusqu'à 580 m d'altitude, 100 m en contrebas du porche de la grotte de Niaux (Fig. 51) (Delmas, 2009 ; Delmas et al., 2011, 2012).

**Archéologie et préhistoire à la grotte de Niaux. Yanik Le Guillou**  
**Ingénieur DRAC/SRA - Occitanie. UMR 5608 CNRS TRACES**

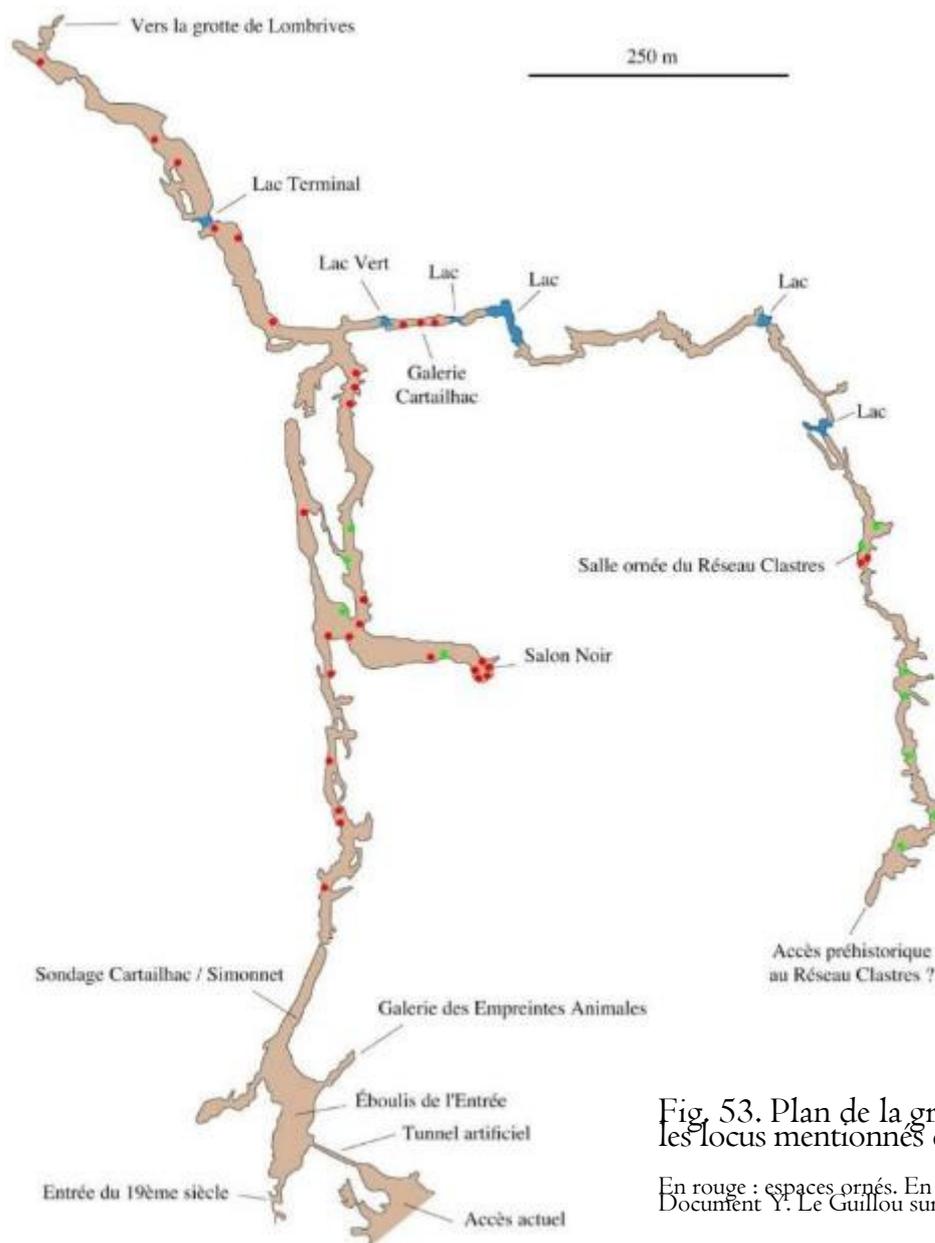


Fig. 53. Plan de la grotte de Niaux situant les locus mentionnés ci-après.

En rouge : espaces ornés. En vert : empreintes humaines.  
 Document Y. Le Guillou sur base topographique

Deux phases de présence magdalénienne ont pu être identifiées sur la base de quelques datations directes au  $^{14}\text{C}$  de pigments pariétaux constitués de charbon de bois. Les résultats indiquent des âges à  $12,89 \pm 0,16$  ka BP (soit 14,956 à 15,910 cal ka BP d'après IntCal20, Reimer et al., 2020),  $13,06 \pm 0,2$  ka BP (soit 15,103 à 16,257 cal ka BP) et  $13,85 \pm 0,15$  ka BP (soit 16,343 à 17,285 cal ka BP). Ces dessins associés à des âges très différents correspondent à des styles de dessin également très différents. Au total, il est possible de distinguer une première phase, peu représentée, autour de 16,7 cal ka BP (Fig. 54) et une seconde phase, qui concerne probablement l'essentiel de l'ornementation pariétale, autour de 15,5 cal ka BP.



← Fig. 54. Ce bison du Salon Noir est d'un style très différent des autres. Il est aussi le seul présentant des caractères sexuels primaires. Sa datation directe indique qu'il aurait été dessiné un millénaire avant les autres. Cliché Y. Le Guillou.



d'un schématisme très original pourrait représenter, e, ou deux bouquetins affrontés. D'après cliché J

Deux autres catégories de dessins révèlent peut-être d'autres phases magdaléniennes d'ornementation : un premier ensemble concerne les peintures de la Galerie Cartailhac dont thèmes et styles (Fig. 55) sont nettement différents de ceux du reste de la grotte. Un second ensemble concerne la totalité des tracés réalisés à l'ocre rouge dans l'ensemble de la grotte. Leur lien avec l'ensemble des peintures figuratives noires reste à préciser. L'essentiel des œuvres pariétales est concentré au Salon Noir (Fig. 56) où se trouvent une cinquantaine de bisons, chevaux, et bouquetins.

Au réseau Clastres, d'autres dessins noirs (Fig. 57) sont, en termes de style, assez contemporains de ceux du Salon Noir. Mais, en termes de fréquentation magdalénienne, l'accès à ces peintures ne se faisait pas par la grotte de Niaux. Le préhistorien doit donc dissocier les deux ensembles.



Fig. 56 - Un des panneaux emblématiques du Salon Noir. Cliché J.F. Peiré.



Fig. 57. Les deux bisons du Réseau Clastres. Cliché J. Clottes.

Les tracés rouges, presque tous non figuratifs (Fig. 58), sont disséminés dans presque toutes les galeries accessibles sans équipement technique. Ils prouvent qu'à l'occasion, certaines personnes devaient disposer d'une connaissance complète du réseau. Mais ce savoir était-il divulgué, transmis, au cours de ces quelques siècles de présence ; où n'était-il que conjoncturel, épiphénomène dans la relation de l'homme paléolithique à la grotte ?



Fig. 58. Dans la Galerie Profonde, deux signes peints, associés à un segment de ligne dorsale animale ainsi qu'on les trouve, selon certains auteurs, à des formes et fissures naturelles de la roche. Cliché Y. Le Guillou.

Des gravures figuratives sont incisées sur l'argile de la grotte (Fig. 59). Peu nombreuses, celles qui nous sont parvenues non piétinées au cours des millénaires, sont conservées sous des plafonds bas. Ces dessins sont eux aussi disséminés dans la cavité. Leur ancienneté est affirmée par une pellicule légèrement indurée qui les recouvre. Mais quelle est la nature de ces pellicules, quels sont leur mode et leur durée de formation, pourquoi et par quoi sont-elles teintées en plus ou moins brun foncé ou noir ?



Fig. 59. Dans la Galerie Profonde, bison incisé dans le sol, sous une voûte basse. Le dessin est réalisé à partir de cupules naturelles, figurant l'œil et de possibles impacts de blessures. On note la pellicule indurée et sa destruction par des piéttements plus récents. Cliché Y. Le Guillou.

Les occupations préhistoriques de la grotte de Niaux ne se limitent pas à la réalisation d'œuvres pariétales ou assimilées. D'autres types d'activités sont présents, concernant parfois d'autres périodes.

Aucun indice n'indique de présence humaine antérieure à la limite haute de la datation d'un bison du Salon Noir :  $13,85 \pm 0,15$  ka BP (soit 16,343 à 17,285 cal ka BP).

Des empreintes de pieds nus, d'adultes et surtout d'adolescents, sont présentes en plusieurs lieux de la grotte. Rien ne permet leur datation hormis leur recouvrement par le même type de pellicule que celui qui affecte les gravures. Outre ces impacts humains, on trouve des empreintes d'*Ursus arctos* concernant probablement le 6<sup>ème</sup> millénaire dans les secteurs d'entrée, et d'autres de petits caprinés, malheureusement non datées pour l'heure. Des empreintes de canidé peuvent vraisemblablement être associées aux visiteurs du 19<sup>ème</sup> siècle.

Des indices d'activité paléolithique, bris et décharnements d'os de bouquetin, ont été identifiés dans l'éboulis de la salle d'entrée et dans la Galerie des Empreintes Animales.

Dans les mêmes secteurs, des indices d'activités post paléolithiques sont présents : des céramiques brisées ont été abandonnées en 3 endroits au moins. Elles ne sont pas tournées. Un de ces emplacements se trouve dans un sondage (Fouille Cartailhac de 1907 et fouille Simonnet de 1972) réalisé dans des parties basses de la galerie, lourdement comblées par des sédiments calcités de fond de gours.

Concernant le cheminement paléolithique, aucun indice ou questionnement argumenté ne permet d'autre hypothèse que celle d'un passage par des galeries proches de l'accès actuel. L'option d'une accessibilité par le fond de la grotte (donc par la grotte de Lombrives) ou par des réseaux profonds aujourd'hui colmatés a été récusée. Pourtant, dès 1908, H. Breuil doute, avec raison, que cet accès ait pu se faire par l'entrée du 19ème siècle.

Des études sur les morphologies, les concrétionnements, les faciès sédimentaires, couplées à un regard compétent à l'extérieur du massif, et éventuellement à des données topométriques, pourraient permettre de localiser, dans ce vaste secteur d'entrée, l'emplacement de l'entrée magdalénienne, et celui des entrées ultérieures (Fig. 60).

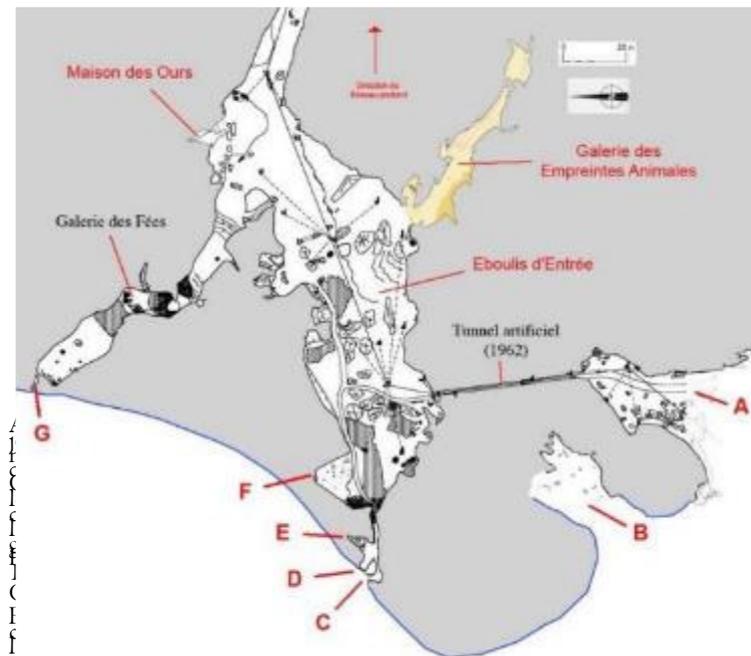


Fig. 60. Entrées possibles de la grotte de Niaux. Base topographique SCHS et Y. Le Guillouf. Le trait bleu est une approximative courbe altimétrique de flanc de massif à une altitude correspondant aux entrées possibles concernées. Est-il est crédible d'envisager, qu'il y a 20 000 ans, lors des violentes activités periglaciaires concomitantes à la libération du porche de l'emprise de la glace, l'entrée était, sur près de 100 m de large, une succession de porches ou une immense ouverture béante, orientée vers le Nord-Ouest, et qui s'étendait de l'Entrée Naturelle (C) jusqu'à l'extrémité de la Galerie des Fées (G) ?

G : C'est l'extrémité de la Galerie des Fées. Vue de l'intérieur, elle a l'aspect d'un éboulis assez calcifié recouvert de quelques stalagmites. Leur formation est contemporaine de mouvements d'un éboulis non encore stabilisé. L'extrémité du boyau terminal est obstruée par de gros cailloux aérés aux formes émoussées. L'absence de courant d'air perceptible paraît indiquer un véritable colmatage, toutefois, la présence d'insectes et de racines révèle un biotope en lien direct avec l'extérieur.

Nuitée à Tarascon-sur-Ariège à l'Hostellerie de la Poste : <https://www.lhostellerieposte.com/>

## 3<sup>e</sup> jour : Géoarchéologie, dynamiques karstiques et séquences fluviales en Ariège

*Le premier arrêt sera consacré à la présentation de la grotte du Mas d'Azil, important site karstique qui a joué le rôle de relais sédimentaire. Elle a piégé les archives sédimentaires et préservé les vestiges archéologiques en relation avec le fonctionnement et les fluctuations climatiques de la vallée de l'Arize, depuis la fin du MIS 3 jusqu'au début de l'Holocène.*

**3a- La grotte du Mas d'Azil. Dynamique sédimentaire en contexte karstique. Géoarchéologie et occupations préhistoriques (Céline Pallier, Marc Jarry, Laurent Bruxelles, François Bon & Yanik Le Guillou, Inrap, Université de Toulouse Jean Jaurès, UMR Traces, SRA-DRAC).**

La grotte du Mas d'Azil a fait l'objet de plusieurs diagnostics et fouilles préventives de 2012 à 2018 et d'un programme de recherche depuis 2013. A ce titre, elle offre un bel exemple de complémentarité entre archéologie préventive et de recherche programmée et de synergie interdisciplinaire.

Pourquoi étudier la grotte du Mas d'Azil et la vallée de l'Arize ?

La façade nord-pyrénéenne comporte une grande richesse en vestiges archéologiques du Paléolithique supérieur, tout au long du dernier stade glaciaire. Toutefois, les différentes cultures qui le composent sont représentées de façon inégale, avec des lacunes chronologiques, et surtout des lacunes spatiales, donnant l'image d'une forte variabilité des occupations à toutes les échelles. La façade nord des Pyrénées est aussi caractérisée par la présence de massifs karstiques dont les cavités constituent des pièges sédimentaires, témoins des environnements passés. Cependant, les réponses hydro-sédimentaires au cours de la dernière période glaciaire y demeurent mal connues.

La vallée de l'Arize, dans la zone nord-pyrénéenne, prend sa source dans le massif du même nom et se jette dans la Garonne. Son tracé, en « baïonnette », est fortement contraint par la nature des terrains qu'elle traverse, alternant des zones plus marneuses et sensibles à l'érosion et des zones calcaires qu'elle franchit le plus souvent en cluse (Fig. 61). Lors de la dernière glaciation, le massif de l'Arize était occupé par de petits cirques glaciaires, sensibles aux variations climatiques de faible intensité (Fig. 62).

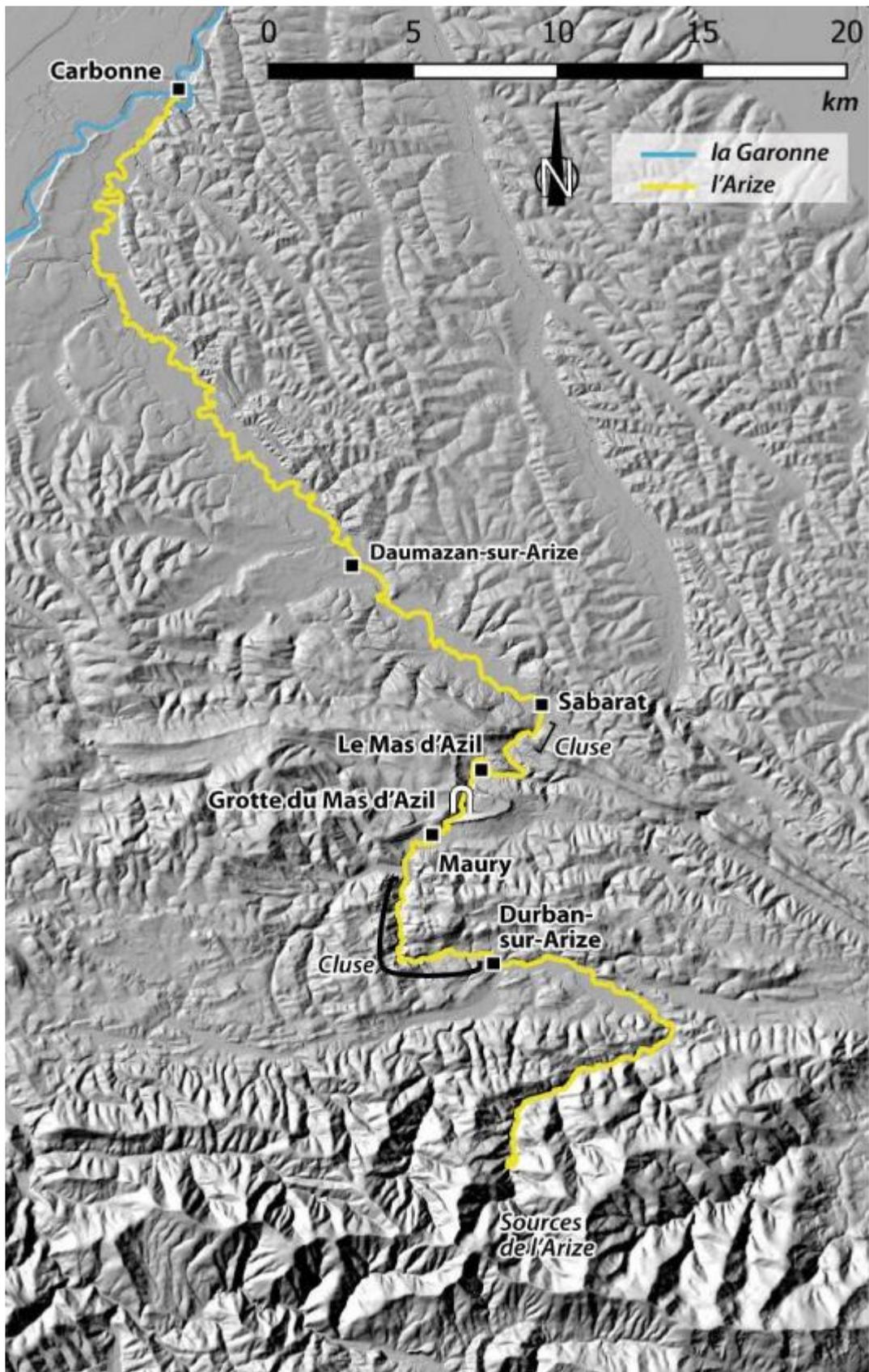


Fig. 6I. Le tracé en « baïonnette » de la vallée de l'Arize. Extrait Pallier (2021).

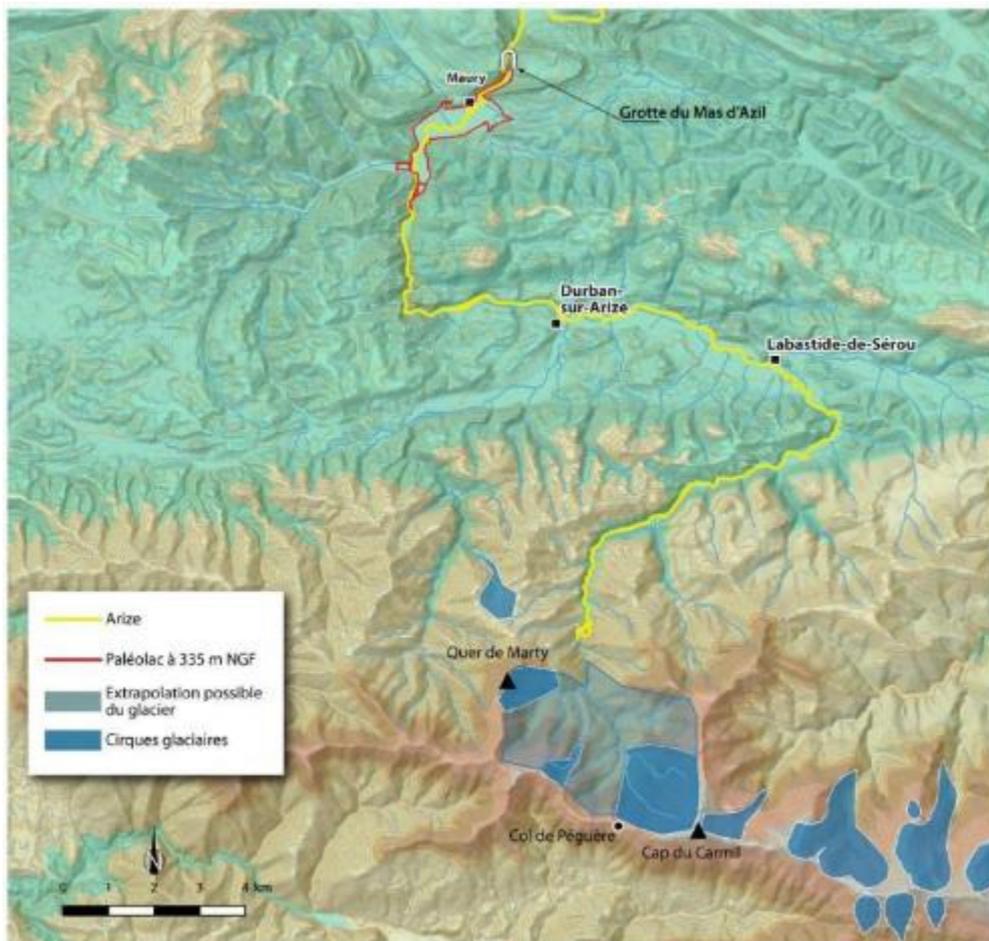


Fig.62. Petits cirques glaciaires du Pléistocène supérieur en amont de la vallée. Source : données IGN, SIG et infographie : Patrick Massan, Didier Carhol, Céline Pallier, d'après Calvet et al. (2011), modifié Démas (2019).

La grotte du Mas d'Azil est une perte-résurgence traversée par l'Arize (Fig. 63). Compte tenu de sa position, c'est un enregistreur à très haute résolution des réponses hydro-sédimentaires découlant des fluctuations climatiques lors des deux derniers cycles glaciaires. La visite de la grotte, de son réseau profond en rive droite mais aussi de la large terrasse en rive gauche, permettra notamment d'observer les témoignages de dynamiques du dernier cycle glaciaire qui ont conditionné à la fois les occupations humaines et la conservation exceptionnelle de vestiges archéologiques de plusieurs chrono-cultures du Paléolithique supérieur.



Fig. 63. Le porche sud de la grotte du Mas d'Azil. © D. Gliksman, Inrap.

#### Être ou ne pas être dans la grotte du Mas d'Azil au cours de la dernière glaciation ?

La grotte du Mas d'Azil est connue pour ses vestiges du Paléolithique supérieur d'une richesse exceptionnelle. Ce potentiel lui a permis de participer aux fondements de la Préhistoire, notamment en donnant son nom à l'une de ses périodes chrono-culturelle, l'Azilien. Dans le même temps, elle a accueilli depuis le milieu du XIXe siècle de très nombreuses recherches dont les archives, mobilières et manuscrites, sont d'une richesse et dans un état de conservation remarquable. Malgré cela, ces informations demeurent parcellaires et dispersées, à l'instar des lambeaux de couches archéologiques qui subsistent dans la grotte.

L'étude des stratigraphies sédimentaires et archéologiques, leur cartographie et leurs corrélations, permettent à présent de proposer une histoire globale de l'évolution de l'Arize et de la grotte, dans laquelle deux phases principales d'aggradation sédimentaire ont été identifiées. La première est corrélative du creusement par paragénétisme et de la structuration en boucles karstiques de la majeure partie de la cavité, certainement au cours du MIS 6 (Fig. 64). La seconde se déroule à la transition MIS 3-MIS 2 et a fortement contraint l'occupation humaine de la grotte au cours du Paléolithique supérieur, tout en jouant un rôle majeur dans la conservation des vestiges ou, au contraire, dans leur érosion. Parallèlement, des lacunes sont observées dans les occupations archéologiques de la grotte du Mas d'Azil, tant sur le plan chronologique (absence de niveaux d'occupation in situ de l'Aurignacien récent jusqu'au Magdalénien ancien), que spatial (répartition différentielle des vestiges notamment au cours du Magdalénien) (Fig. 65 et 66).

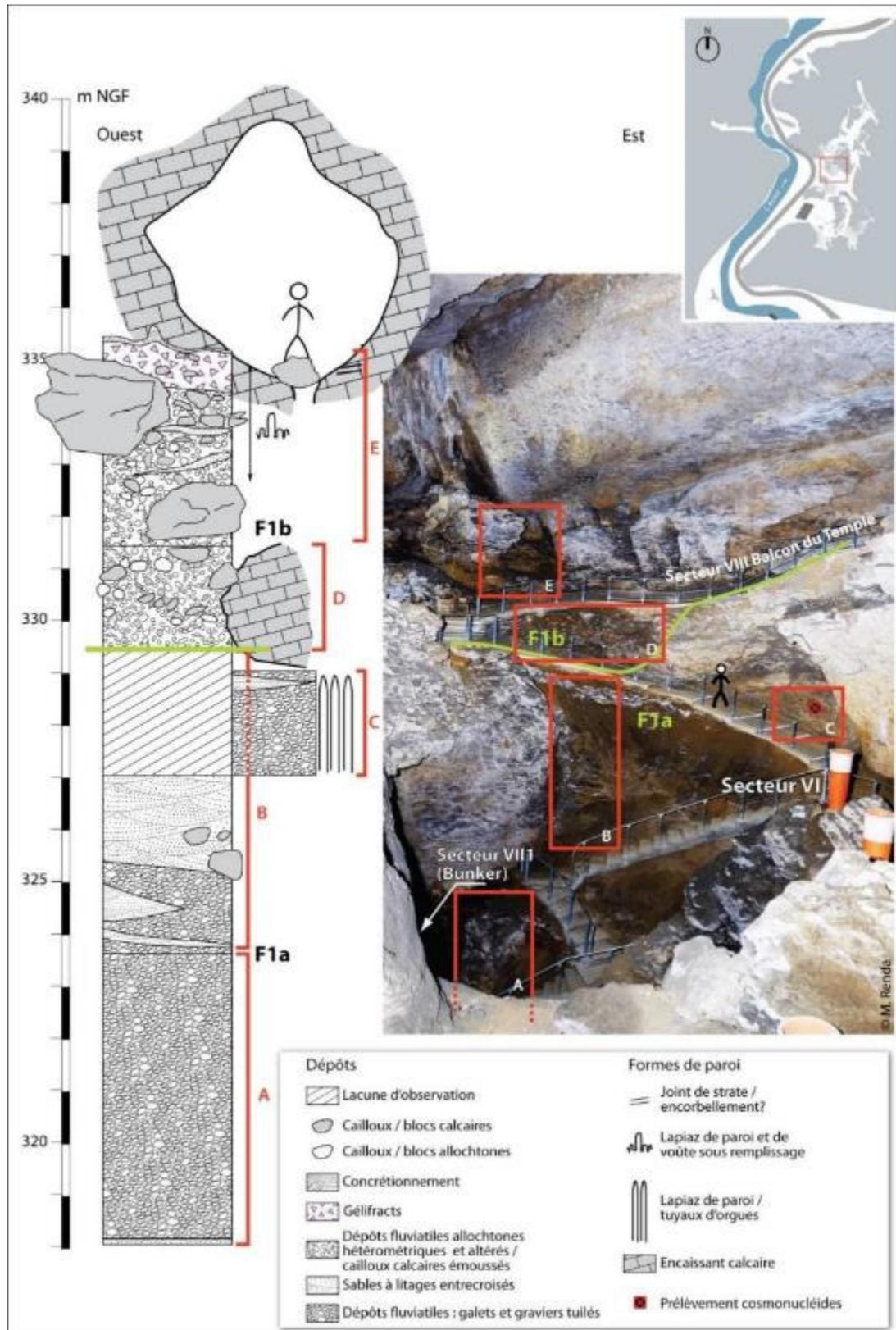


Fig. 64. Stratigraphie dans la salle du Temple, témoin des remplissages fluviatiles au cours du MIS 6. Extrait de Pallier (2021).

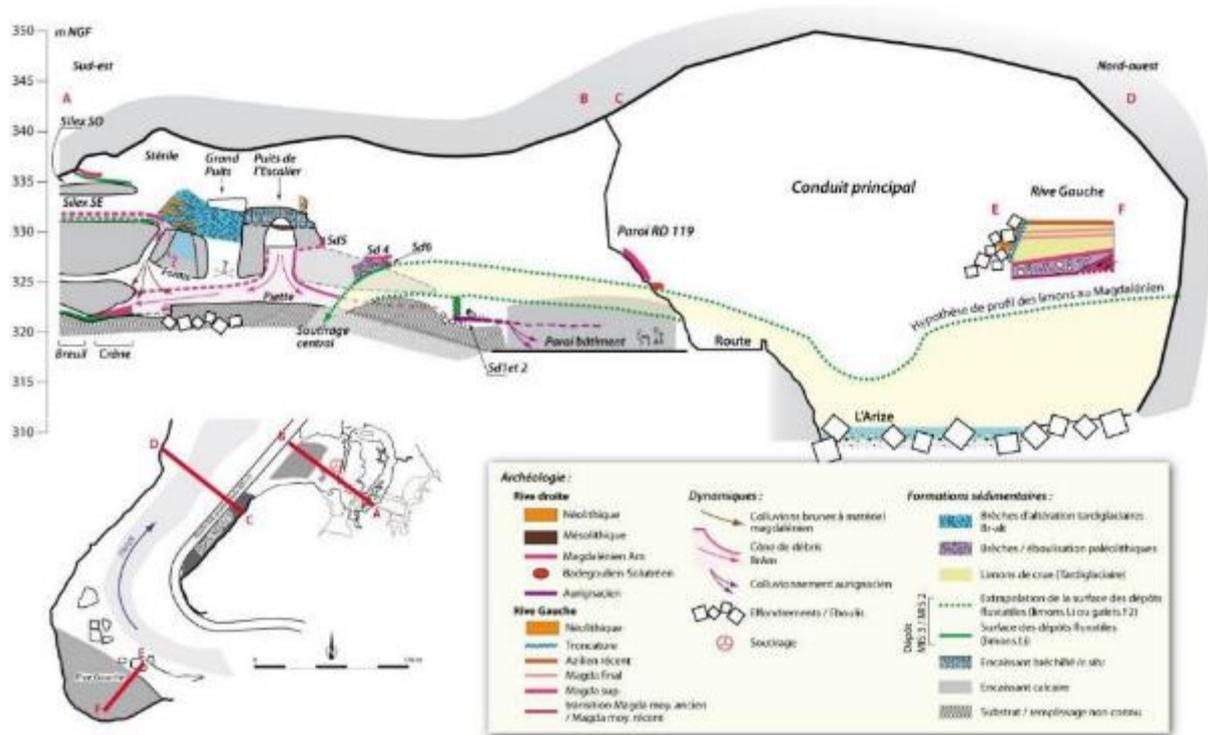


Fig. 65. Coupe transversale interprétative de la zone sud de la grotte du Mas d'Azil Extrait de [Paler \(2021\)](#). Au sud-ouest, un réseau complexe de galeries débouche sur le vaste conduit principal. Au sein de ce réseau de galeries, les témoins de la dynamique fluviale de l'Arize sont intercalés entre différents niveaux d'occupations du Paléolithique supérieur (de l'Aurignacien jusqu'au Magdalénien) et des dépôts d'altération des parois du début de l'Holocène.

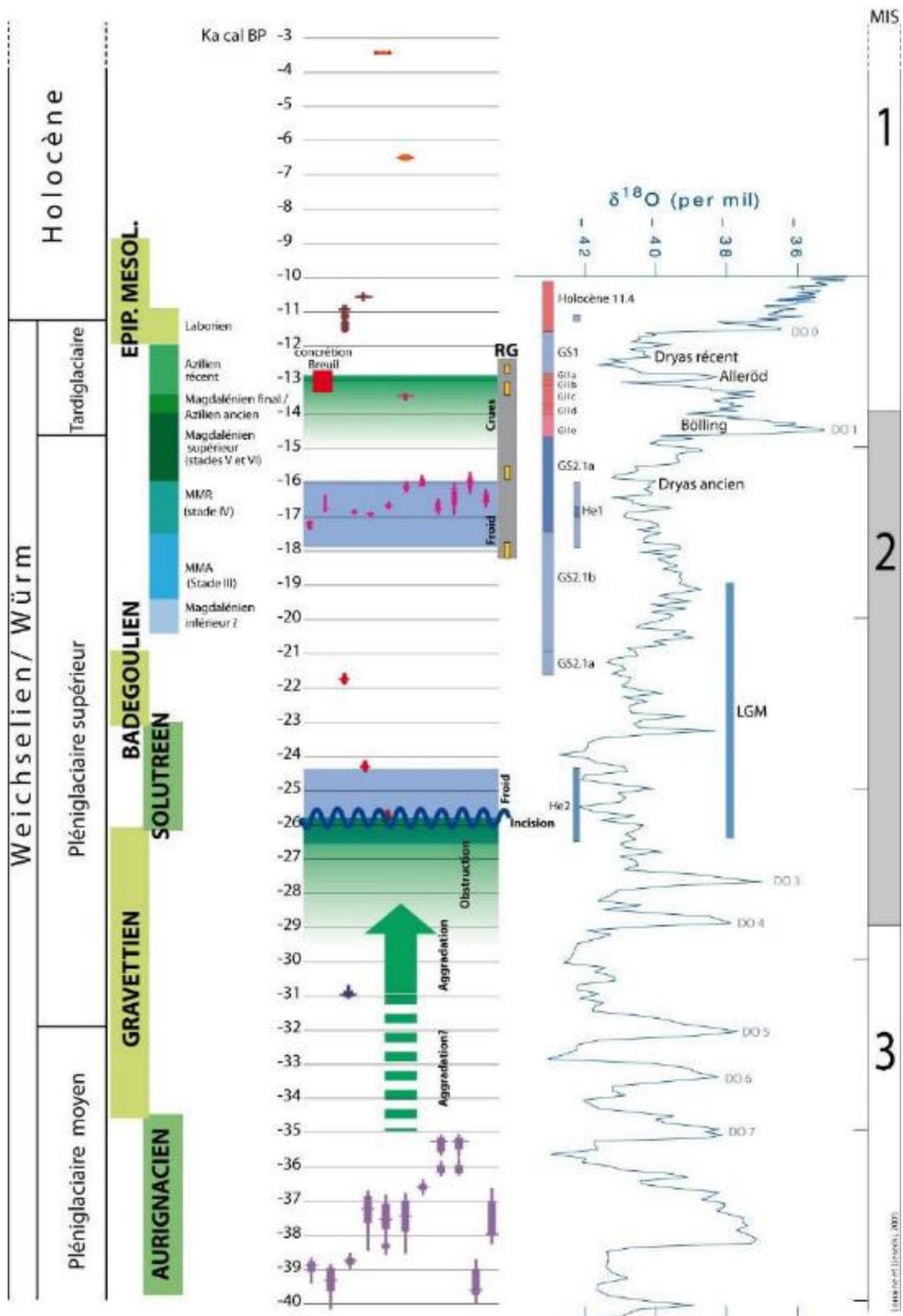


Fig. 66. Chronologie de synthèse des occupations des évènements morphosédimentaires dans la grotte du mas d'Azil. Extrait de [Pallier \(2021\)](#).

Dès lors, quelle signification peut-on attribuer à ces lacunes : absence des humains ou conservation différentielle ? Dans la grotte du Mas d'Azil, la perception des niveaux d'occupation (accessibles, cachés ou disparus) s'explique en partie par les différents processus sédimentaires qui s'y sont succédés. Les niveaux d'occupation aurignaciens, en particulier, ont été recouverts par plusieurs mètres de sédiments fluviaux. Cette phase d'aggradation a entraîné l'érosion de la partie superficielle des dépôts (Aurignacien récent) mais a aussi permis la préservation, en les scellant, des niveaux sous-jacents de l'Aurignacien ancien. Puis, en provoquant l'obstruction du porche aval et la mise en place d'une vaste étendue lacustre à l'amont, elle a rendu la grotte inaccessible pendant plusieurs millénaires, contemporains du Gravettien et de la première partie du Solutréen (Fig. 67 et 68). Au début du MIS 2, la désobstruction du porche aval permet à nouveau l'écoulement de l'Arize dans la galerie principale et rétablit l'accessibilité du lieu au milieu du Paléolithique supérieur, au Solutréen récent et /ou au Badegoulien, dont des traces d'incursions sont localement préservées. Enfin, si l'étude géomorphologique ne permet pas d'expliquer l'absence du Magdalénien inférieur, l'analyse et le croisement des processus qu'elle regroupe (variation des dynamiques fluviales en aggradation ou en incision, colluvionnements depuis le plateau, érosions d'origine anthropiques et phénomènes d'altération des parois) a permis une réflexion très précise sur l'organisation de l'espace, les accès et les circulations des populations à l'intérieur de la grotte au cours du Magdalénien moyen-récent puis de l'Azilien.

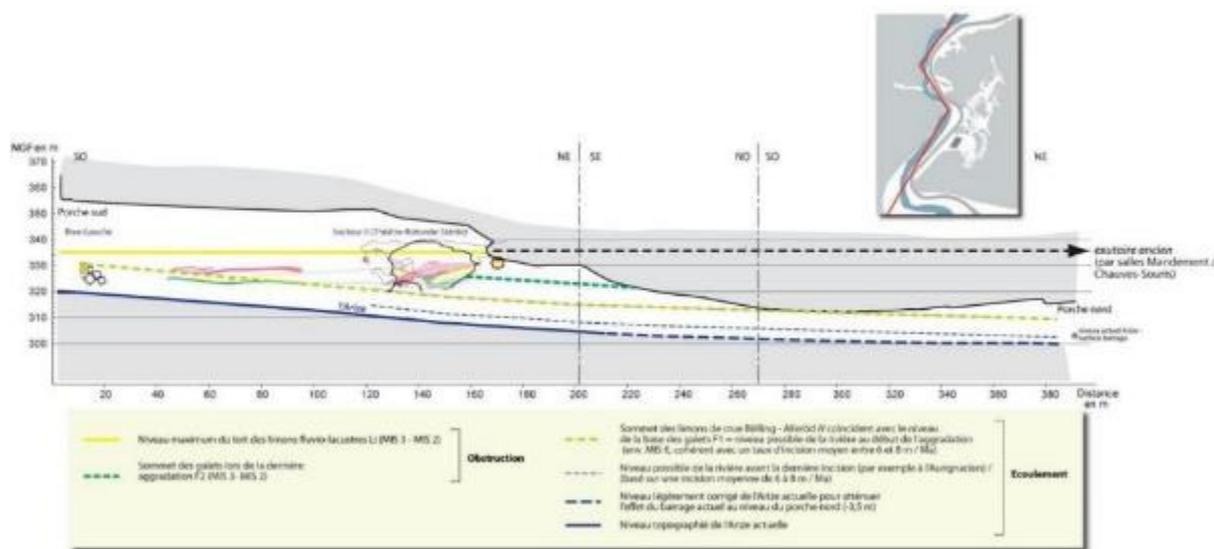


Fig. 67. Extrapolation des pentes des paleo-écoulements de l'Arize et du niveau lacustre à la transition MIS 3-MIS 2 au sein du conduit principal, dans la grotte. Les niveaux de circulation théoriques de l'Arize au cours du MIS 6 et du Tardiglaciaire permettent l'écoulement de la rivière tandis que le niveau de l'aggradation au MIS 3 entraîne l'obstruction du conduit et la formation d'un lac de barrage. Extrait de Pallier (2021).

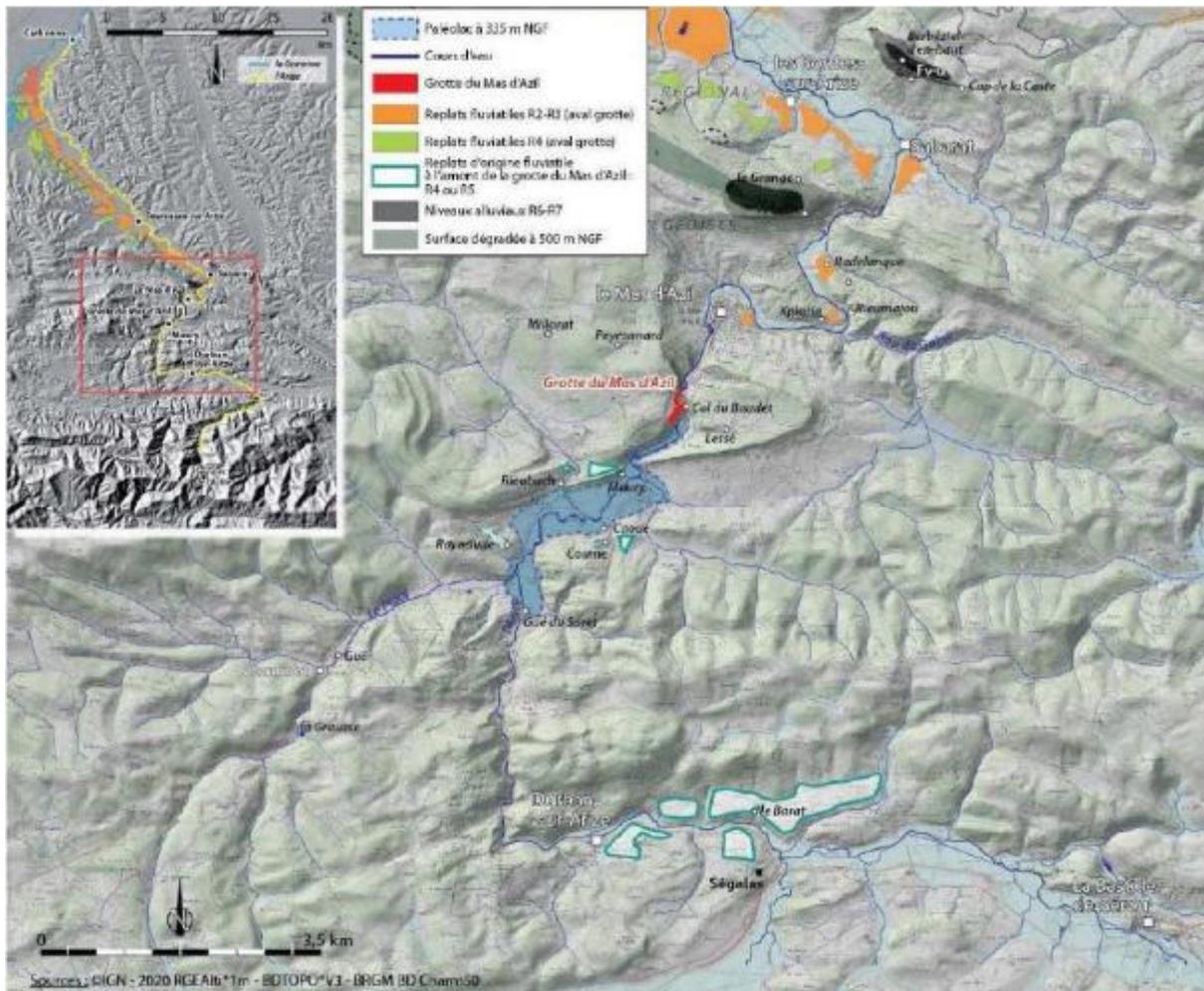


Fig. 68. Replats fluviaux en amont de la grotte du Mas d'Azil jusqu'à L'Arize / Extension possible du paléolac à l'amont de la grotte à la transition MIS 3- 2

2. Fond IGN RGE 5m – SIG : B. Chadelle – Dessin : C. Pallier in Pallier (2021).

### Quelles informations sédimentaires et archéologiques à l'échelle de la vallée de l'Arize ?

Les terrasses alluviales sont aussi des enregistreurs potentiels d'occupation archéologiques pour certaines périodes mais comprennent aussi de nombreuses lacunes comme, par exemple, l'absence de sites du Paléolithique supérieur dans l'axe principal de la vallée de la Garonne. Ainsi, l'intérêt de l'enregistrement sédimentaire de la grotte du Mas d'Azil va au-delà de la cavité elle-même. Il renseigne sur les dynamiques hydrosédimentaires et sur les conditions paléoclimatiques à l'échelle de la vallée de l'Arize, elle-même replacée à l'échelle du piémont central des Pyrénées. Dans celle-ci, les processus sédimentaires de la fin du MIS 3 et du MIS 2 observés à l'intérieur de la grotte ont également été enregistrés mais de façon très dégradée. En aval, plusieurs niveaux de replats d'origine fluviale sont marqueurs d'anciens niveaux de base de l'Arize (Fig. 68 et 69). Ils ne supportent toutefois qu'une nappe alluviale très résiduelle et ne semblent offrir qu'un maigre potentiel de conservation d'éventuels vestiges. En outre, bien qu'une corrélation géométrique directe ne soit pas possible, des correspondances peuvent être établies entre l'enregistrement dans la grotte et dans la vallée de l'Arize grâce à la comparaison avec les grandes vallées du versant nord-pyrénéen comme la Garonne et l'Ariège (Fig. 70).

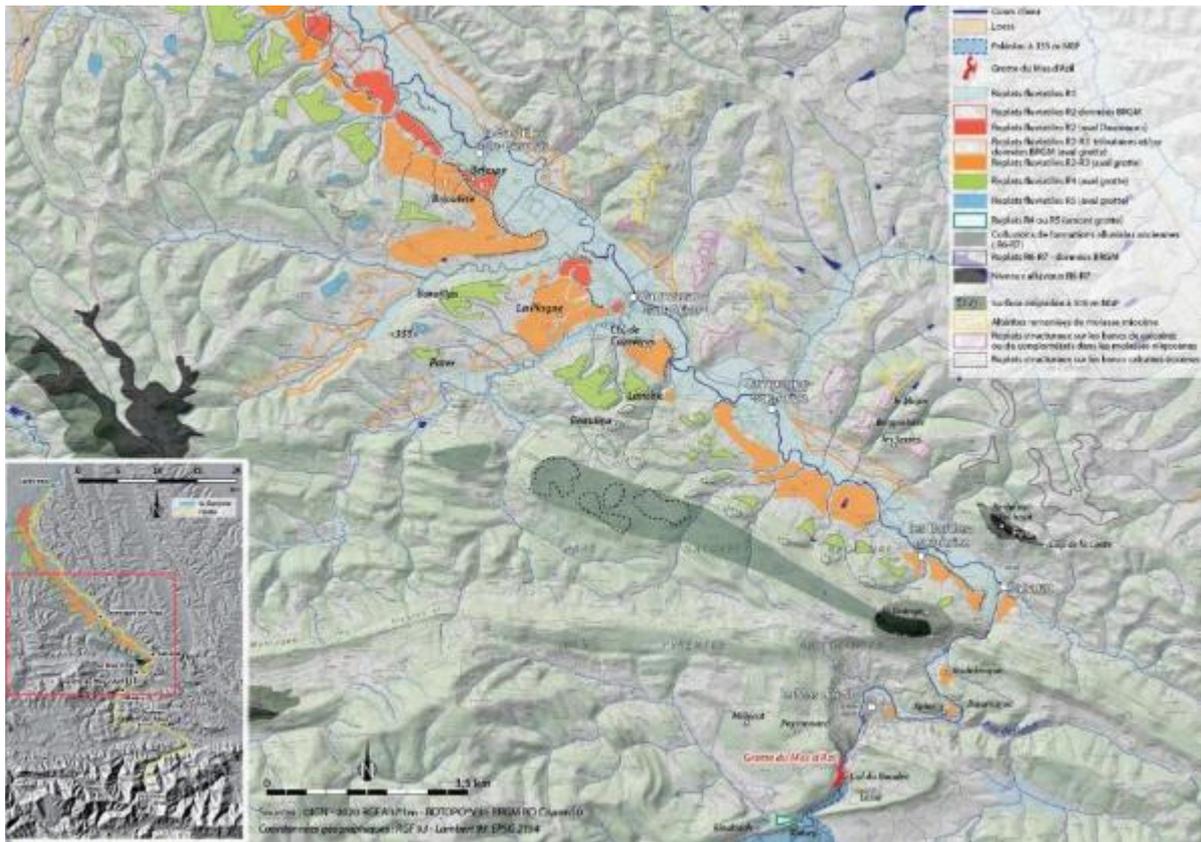


Fig. 69. Replats fluviaux à l'aval de la grotte jusqu'à La Bastide-de-Besplas. Fond BRGE Sm<sup>2</sup>. SIG: B. Chadelle – Dessin: C. Pallier. Extrait de Pallier (2021).

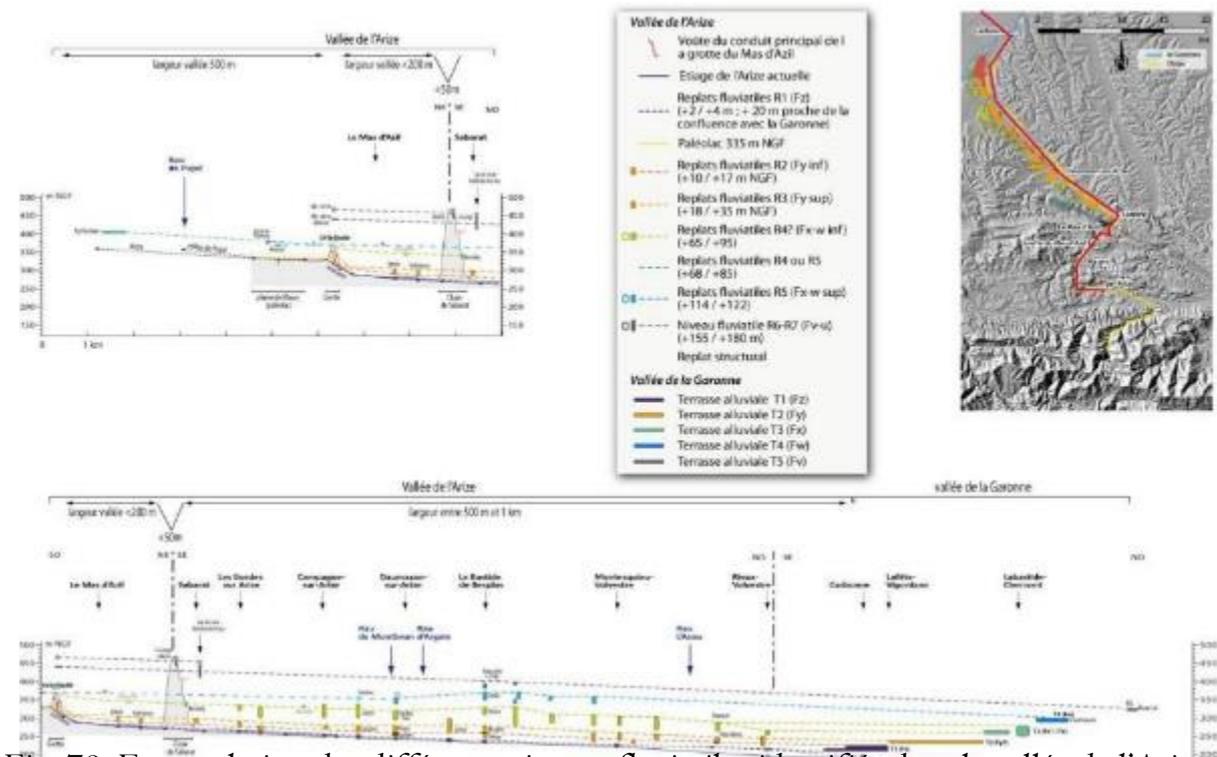


Fig. 70. Extrapolation des différents niveaux fluviaux identifiés dans la vallée de l'Arize et leur corrélation avec les terrasses de la Garonne. Extrait de Pallier (2021).

Pour comprendre les espaces vides de vestiges à l'échelle d'une région, il faut détecter et interpréter des espaces particuliers dans lesquels l'information a été enregistrée puis les mettre en relation. En Ariège, la grotte du Mas d'Azil constitue un enregistreur à très haute résolution des réponses hydrosédimentaires découlant des fluctuations climatiques au cours du dernier cycle glaciaire. L'étude interdisciplinaire de cette cavité, mêlant historiographie, géomorphologie, karstologie, géoarchéologie et archéologie, a apporté des éléments de réponses à la question des lacunes archéologiques, soulignant l'importance de la taphonomie différentielle des vestiges et ce à de multiples échelles d'observations, de la galerie jusqu'à la vallée de l'Arize et par extension, au piémont nord-pyrénéen.

### **3b- Etagement et chronologie des terrasses fluviales dans le bassin de Pamiers : réponse du système fluvial aux fluctuations pléistocènes du glacier de l'Ariège (Magali Delmas, UMR HNHP, UPVD).**

Sur le chemin du retour, un arrêt dans le bassin de Pamiers permettra de présenter la séquence de terrasses fluvioglaciaires du piémont de l'Ariège et ses raccords avec les dépôts de marge glaciaire contemporains de la dernière expansion glaciaire maximale (LLGM). Les datations par profils verticaux de nucléides cosmogéniques obtenues sur les trois niveaux de terrasses les plus récents de la séquence pléistocène permettront de discuter des moteurs responsables des cycles aggradation-incision en contexte fluvio-glaciaire (rôle des fluctuations des paléoenglacements, des dynamiques glaciolacustres et des phénomènes d'ajustement paraglaciaire dans le fonctionnement du système fluvial en contexte post-glaciaire).

Le bassin de l'Ariège est le plus oriental des bassins-versants nord-pyrénéens drainé vers l'Atlantique. Il couvre environ 5 000 km<sup>2</sup> de la haute chaîne axiale au piémont molassique où il conflue avec la Garonne immédiatement en amont de Toulouse. Il abritait au cours du LLGM un glacier de vallée composite long de 60 km. Une série de datations par exposition permet de situer la dernière expansion glaciaire maximale (LLGM) dans le courant du MIS 4 (Delmas et al., 2011). Le front contemporain du GLGM est quant à lui positionné 8 km en amont de l'emprise LLGM (moraines de Garrabet, Bompas-Arignac et Bernière). Un âge à  $131.4 \pm 5.5$  ka permet enfin de situer les marges glaciaires contemporaines du MIS 6 2 à 3 km en aval de l'emprise LLGM.

La séquence fluvioglaciaire située en position de piémont montre 3 niveaux de terrasses très bien préservés dans le bassin de Pamiers (Fig. 71). La nappe T1 est associée à des sols bruns peu évolués. Elle est sableuse et caillouteuse avec une très grande majorité de galets sains ou très faiblement altérés. La nappe T2 porte des sols fersialitiques. Elle est associée à des profils d'altération relativement profonds, 4 à 5 mètres au moins, les matrices de teinte jaune-ocre, enrichies en argile et en fer libre ; les fractions grossières comprennent au moins 50 % de galets cristallins altérés. La nappe T3 se caractérise par des altérations plus avancées encore, des sols sont lessivés en surface (boulbènes) et des Bt rouge avec traces d'hydromorphie.

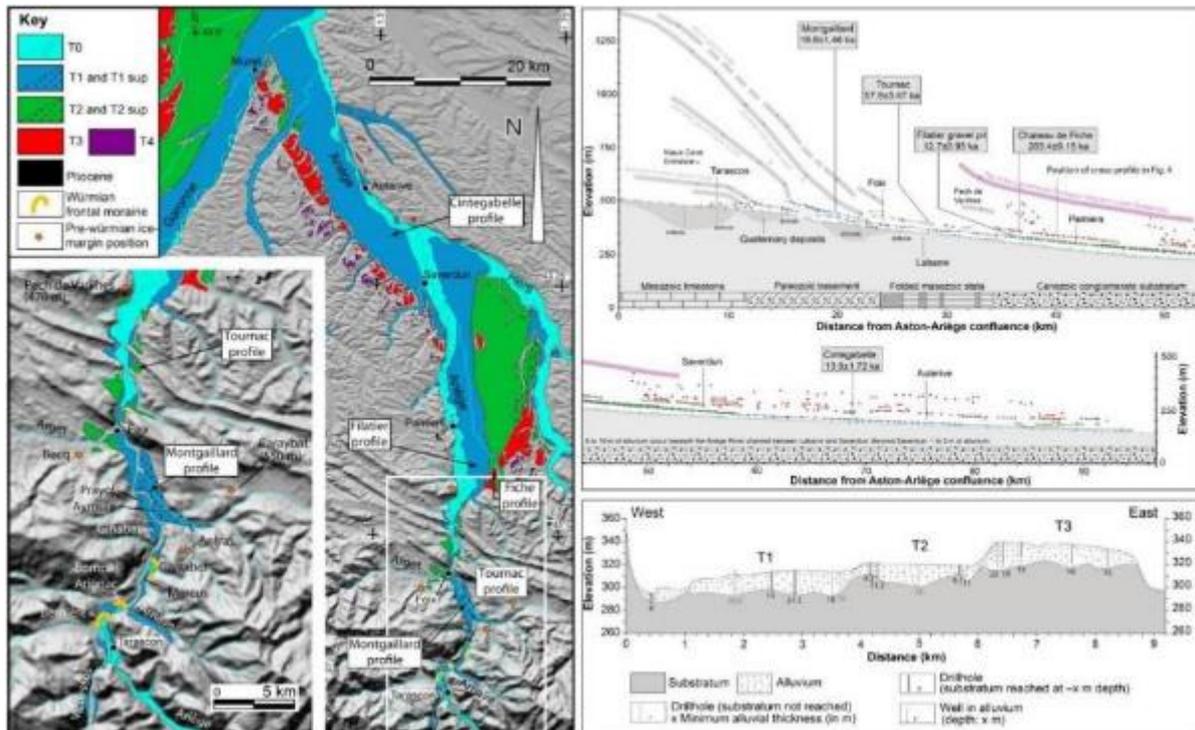


Fig. 71. Etagement des terrasses fluviales en Ariège, bassin de Pamiers. Epaisseur des nappes d'après les données de la Banque du Sous-Sol (BRGM). Situation représentative de la géométrie des séquences fluviales pléistocènes de la façade nord des Pyrénées. Extrait de [Delmas et al., 2015](#).

Ces trois générations de terrasses ont fait l'objet de 5 profils verticaux de 9 à 12 échantillons chacun sur 4,6 à 15 m de profondeur (3 sur la nappe T1, 1 sur T2 et 1 sur T3). Les résultats indiquent :

- (i) des profils en steady state exploitables donc seulement en termes d'âges minima sur les nappes T2 et T3,
- (ii) un âge compatible avec le GLGM sur la nappe T1 quelques kilomètres (4 km) en aval du front morainique de Garrabet (profil Montgaillard),
- (iii) des âges contemporains de la Dernière Terminaison Glaciaire à 18 et 31 km en avant de la moraine GLGM de Garrabet (profils Filatier et Cintegabelle, [Fig. 72](#)).

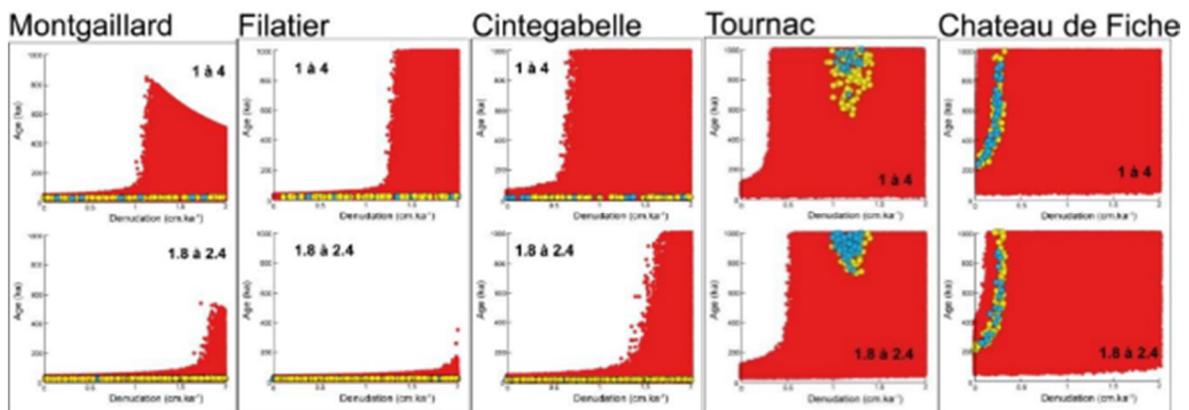


Fig. 72. Re-modélisation « tous paramètres libres » des profils verticaux de l'Ariège.

Extrait de [Delmas, \(2019\)](#).

L'opportunité de disposer sur un même bassin-versant de données chronologiques bien contraintes concernant les fluctuations des fronts glaciaires, d'une part, et le toit des nappes alluviales, d'autre part, a permis de mettre en évidence :

- (i) une aggradation des systèmes fluviaux au cours des épisodes de progression glaciaire contrôlée par le volume considérable de sédiments produit par les bassins versants englacés,
- (ii) une incision déclenchée par la récession des langues de glace vers les hautes vallées mais strictement cantonnée à l'apex des nappes fluvioglaciaires car principalement liée à la régularisation des profils en long au droit des anciens cônes proglaciaires,
- (iii) une aggradation généralisée des nappes alluviales durant plusieurs millénaires après la déglaciation quasi intégrale des bassins versants, car l'ajustement paraglaciale des zones récemment déglacées produit des volumes importants de sédiments qui engorgent les fonds de talwegs au-delà de ce que les cours d'eau sont capables de transiter.
- (iv) une incision généralisée, sensible à l'échelle de l'ensemble du bassin fluvial, contrôlée non pas par l'augmentation du *stream power* en période de fonte des glaces mais par la reconquête végétale du bassin-versant qui clôtura la crise érosive d'origine paraglaciale précédemment évoquée.

Ce modèle est très bien renseigné en Ariège, où la position des fronts glaciaires contemporains du Global LGM est identifiée sur la base de datations par exposition (TCN) sur les blocs erratiques des complexes morainiques de Garrabet, Bompas-Arignac et Bernière (Delmas et al., 2011) et où la nappe T1 a fait l'objet de trois profils verticaux de TCN qui datent la surface d'abandon vers 14,5-23,4 ka à Montgaillard, à l'apex du cône fluvioglaciaire (T1 sup.), vers 13,2-19,2 ka à Filatier et vers 11,7-20,9 ka à Cintegabelle, c'est-à-dire 4, 19 et 50 km en aval du front morainique de Garrabet (Delmas et al., 2015, remodelisation des données in Delmas, 2019). Ces données montrent que le déboisement de la nappe T1 en deux niveaux de terrasse (T1 sup. et T1 inf.) dans le bassin de Foix, donc à proximité des anciens fronts glaciaires, est contemporain de la déglaciation fini-LGM mais que l'aggradation des fonds de vallée se poursuit sur l'ensemble du bassin fluvial (construction de la nappe T1 inf. dans le bassin de Foix et son prolongement aval T1 en position de piémont) au moins jusqu'à l'interstade Bölling-Alleröd (GI-1), peut-être jusqu'au début de l'Holocène, en raison de la crise érosive d'origine paraglaciale qui affecte le bassin-versant en cours de déglaciation à partir de 19-20 ka (Delmas et al., 2011). L'incision généralisée de la nappe T1 est quant à elle étroitement liée à la reconquête végétale du bassin fluvial dont l'histoire est très bien contrainte en Ariège par plusieurs séquences polliniques localisées dans la section montagnarde du bassin versant (Jalut et al., 1992 ; Reille & Andrieu, 1993).

**Retour en bus le 11 septembre à 17 h 00  
à la gare TGV de Perpignan  
(dernier train pour Paris à 17 h 40)**

# Bibliographie

- Alimen, H., 1964. Le Quaternaire des Pyrénées de Bigorre. Mémoire du Service de la Carte Géologique, Paris, 394 p.
- Aguilar, J.P., Lazzari, V., Michaux, J., Sabatier, M., Calvet, M., 2007. Lo Fournas 16-M (Miocène supérieur) et Lo Fournas 16-P (Pliocène moyen), nouvelles localités karstiques à Baixas, Sud de la France): partie I - description et implications géodynamiques. *Géologie de la France* 1, 55–62.
- Andrés, N., Gómez-Ortiz, A., Fernández-Fernández, J.M., Tanarro, L.M., Salvador-Franch, F., Oliva, M., Palacios, D., 2018. Timing of deglaciation and rock glacier origin in the southeastern Pyrenees: a review and new data. *Boreas* 47, 1050–1071.
- Andrieu, V., 1987. Le paléoenvironnement du piémont nord-pyrénéen occidental de 27 000 BP au Postglaciaire : la séquence d'Estarrès (Pyrénées Atlantiques, France) dans le bassin glaciaire d'Arudy. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences Série II* 304, 103–108.
- Andrieu, V., 1991. Dynamique du paléoenvironnement de la vallée montagnarde de la Garonne (Pyrénées centrales, France) de la fin des temps glaciaires à l'actuel. Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université de Toulouse–le–Mirail, 311 p.
- Andrieu, V., Hubschman, J., Jalut, G., Hérail, G., 1988. Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs : application à l'interprétation du retrait glaciaire. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire* 34/35, 55–67.
- Arenas, C., Millán, H., Pardo, G., Pocoví, A., 2001. Ebro Basin continental sedimentation associated with late compressional Pyrenean tectonics (north–eastern Iberia): controls on basin margin fans and fluvial systems. *Basin Research* 13, 65–89.
- Babault, J., Van den Driessche, J., Bonnet, S., Castelltort, S. & Crave, A., 2005. Origin of the highly elevated Pyrenean peneplain. *Tectonics*, 24, TC2010.
- Bachelet, B., Aguilar, J.P., Calvet, M., Michaux, J., 1990. Nouvelles faunes de rongeurs du Pliocène des Pyrénées orientales : conséquences pour le genre *Stephanomys*. *Géobios* 23, 117–120.
- Bakalowicz, M., Sorriaux, P., Ford, D.C., 1984. Quaternary glacial events in the Pyrenees from U-series dating of speleothems in the Niaux–Lombrives–Sabart caves, Ariège, France. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 38, 193–197.
- Balco, G., Stone, J.O.H., Carrie, J., 2005. Dating plio-pleistocene glacial sediments using the cosmic-ray-produced radionuclides  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$ . *American Journal of Science* 305, 1–41.
- Balco, G., Rovey, C.W., 2008. An isochron method for cosmogenic nuclide dating of buried soils and sediments. *American Journal of Science* 308, 1083–1114.

Barnolas, A., Chiron, J.C., 1996/2018. Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. Volume 1 : introduction, géophysique, cycle hercynien. BRGM-ITGE, 729 p + volumes 2 & 3 : cycle alpin, 32 planches h.t. et notice papier, texte format numérique, AGSO & BRGM.

Beaumont, C., Muñoz, J.A., Hamilton, J., Fullsack, P., 2000. Factors controlling the Alpine evolution of the central Pyrenees inferred from a comparison of observations and geodynamical models. *Journal of Geophysical Research* 105, 8121–8145.

Belmonte, A., 2014. Geomorfología del macizo de Cotiella (Pirineo oscense): cartografía, evolución paleoambiental y dinámica actual. PhD thesis. Universidad de Zaragoza, p. 581.

Benito, G., Sancho, C., Peña, J.L., Machado, M.J., Rhodes, E.J., 2010. Large-scale karst subsidence and accelerated fluvial aggradation during MIS 6 in NE Spain: climatic and paleohydrological implications. *Quaternary Science Reviews* 29, 2694–2704.

Bevington, P., Robinson, K., 2003. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. Mc Graw-Hill Higher Education, 336 p.

Birkeland, P. W., 1967. Correlation of soils of stratigraphic importance in western Nevada and California, and their relative rates of profile development. In: Morrison, R. B., Wright, H. E. Jr., Eds. *Quaternary Soils*. INQUA Congress VII, Proceedings 9, Desert Research Institute, Reno, Nevada, 71–91.

Birkeland, P.W., 1968. Correlation of Quaternary stratigraphy of the Sierra Nevada with that of the Lake Lahontan area. In: Morrison, R.B., Wright, H.E., Eds. *Means of correlation of Quaternary successions*. International Association of Quaternary Research, Proceedings, 7th Congress U.S.A., 8, 469–500.

Birkeland, P.W., 1999. *Soils and geomorphology*. Oxford university press, 430 p.

Biro, P., 1937. *Recherches sur la morphologie des Pyrénées Orientales franco-espagnoles*. Thèse de Doctorat d'Etat, Baillière et fils éd., Paris, 311 p.

Bordonau i Ibern, J., 1992. Els complexos glacio-lacustres relacionats amb el darrer cicle glacial als pirineus. *Geoforma ediciones*, Logroño, 251 p.

Bordonau, J., Vilaplana, J.M., Fontugne, M., 1993. The Glaciolacustrine complex of Llestui (Central Southern Pyrenees): A key-locality for the chronology of the last glacial cycle in the Pyrenees. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences Série II* 316, 807–813.

Bornand, M., 1972. *Étude pédologique de la moyenne vallée du Rhône*, 250 p. avec carte pédologique au 1 : 100 000e. INRA, Montpellier.

Bornand, M., 1978. *Altération des matériaux fluvioglaciers, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône*, 329 p. INRA-ENSA, Montpellier.

Bosch, G.V., Van den Driessche, J., Babault, J., Robert, A., Carballo, A., Le Carlier, C., Loget, N., Prognon, C., Wyns, R., Baudin, T. (2016) – Peneplanation and lithosphere dynamics in the Pyrenees. *Comptes Rendus Géoscience* 348, 194–202.

- Braucher, R., Del Castillo, P., Siame, L., Hidy, A., Bourlès, D., 2009. Determination of both exposure time and denudation rate from an in situ-produced  $^{10}\text{Be}$  depth profile: a mathematical proof of uniqueness. Model sensitivity and applications to natural cases. *Quaternary Geochronology* 4, 56–67.
- Braucher, R., Merchel, S., Borgomano, J., Bourlès, D.L., 2011. Production of cosmogenic radionuclides at great depth: A multi element approach. *Earth and Planetary Science Letters* 309, 1–9.
- Calvet, M., 1981. Nappes alluviales et niveaux quaternaires du bas-Vallespir. Implications néotectoniques et paléoclimatiques. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 52, 125–159.
- Calvet, M., 1986. Les terrasses alluviales de la Têt : étude granulométrique et pétrographique des galets. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 57, 231–246.
- Calvet, M., 1996. Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne : Les Pyrénées Orientales. Thèse de Doctorat d'Etat, Document du BRGM n° 255, BRGM ed., Orléans, 1177 p.
- Calvet, M., Gunnell, Y., 2008. Planar landforms as markers of denudation chronology: an inversion of East Pyrenean tectonics based on landscape and sedimentary basin analysis. In: Gallagher, K., Jones, S.J., Wainwright, J., Eds. *Landscape Evolution: Denudation, Climate and Tectonics Over Different Time and Space Scales*, Geological Society, London, Special Publications 296, 147–166.
- Calvet, M., Delmas, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D., 2011. Recent advances in research on Quaternary glaciations in the Pyrenees. In: Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P., Eds. *Quaternary Glaciations. Extent and Chronology, a closer look Part IV. Developments in Quaternary Science* 15, Elsevier, 127–139.
- Calvet M., Autran A., Wiazemsky M., Laumonier B., Guitard G., 2015a. Carte géol. France (1/50 000), feuille Argelès-sur-Mer – Cerdère (1097). Orléans : BRGM. Notice explicative par Laumonier B., Calvet M., Barbey P., Guennoc P., Lambert J., Lenoble J.-L., Wiazemsky M., 2015, 149 p.
- Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Hez, G., Bourlès, D., Guillou, V., Delmas, M., Aster Team, 2015b. Cave levels as proxies for measuring post-orogenic uplift: evidence from cosmogenic dating of alluvium-filled-cave in the French Pyrenees. *Geomorphology* 246, 617–633.
- Calvet, M., Braucher, R., Sorriaux, P., Hez, G., Gunnell, Y., 2018. De la difficulté de dater les réseaux karstiques étagés. Poster. Colloque Karst 2018, Hommage à R. Maire, Chambéry, 27 juin-1 juillet 2018
- Calvet, M., Hez, G., Gunnell, Y., Jaillet, S., 2019. Le karst du synclinal de Villefranche, enregistreur de l'incision de la vallée de la Têt. *Bol/Soc. Esp. Speleo. Sci. Karst* 14, 15–32.
- Calvet, M., Gunnell, Y., Laumonier, B., 2021. Denudation history and palaeogeography of the Pyrenees and their peripheral basins: an 84-million-year geomorphological perspective. *Earth Science Reviews* 2015, 103436.
- Calvet, M., Delmas, M., Gunnell, Y., Laumonier, B., in press. *Geology and landscape of the Eastern Pyrenees - A field guide with excursions*. Springer, série Geoguide.

- Cartailhac, E., Breuil, H., 1908. Les peintures et gravures des cavernes pyrénéennes. *L'Anthropologie* 19, 15–46.
- Choukroune, P., 1992. Tectonic evolution of the Pyrenees. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 20, 143–158.
- Collina-Girard, J., 1975. Les industries archaïques sur galets des terrasses quaternaires de la plaine du Roussillon. Thèse 3e cycle, Univ. Provence, 408 p.
- Collina-Girard, J., 1976. Les alluvions fluviales des fleuves côtiers dans le Roussillon. In: de Lumley, H., coord., *La Préhistoire française*, CNRS édit., t. 1, p. 78–82.
- Copons, R., Bordonau, J. 1996. El registro sedimentario del cuaternario reciente en el lago Redó d'Aigües Tortes (Pirineos centrales). In : Grandal d'Anglade A., Pagés Valcarlos J., Eds. IV° Reunión de Geomorfología, Sociedad Española de Geomorfología O Castro, 249–260.
- Clottes, J., 2010. Les cavernes de Niaux. Art préhistorique en Ariège. Éditions Errance.
- Crest, Y., Delmas, M., Braucher, R., Gunnell, Y., Calvet, M., ASTER Team, 2017. Cirques have growth spurts during deglacial and interglacial periods: evidence from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  nuclide inventories in the central-eastern Pyrenees (France, Spain). *Geomorphology* 278, 60–77.
- Crouzel, F., 1957. Le Miocène continental du bassin d'Aquitaine, *Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France* 248, 264 p
- Debals, B., 1998. Étude sédimentologique des formations quaternaires des bassins des fleuves côtiers du Roussillon (France) : vallées de la Têt et du Tech. Thèse Doctorat, Université de Perpignan, 2 t., 288 p.
- Debals, B., 2000. Mise au point sur la chronostratigraphie des dépôts alluviaux quaternaires de la plaine du Roussillon : exemple de la vallée de la Têt (France). *Quaternaire* 11, 31–39.
- Delmas, M., 2005. La déglaciation dans le massif du Carlit (Pyrénées orientales): approches géomorphologique et géochronologique nouvelles. *Quaternaire* 16, 45–55.
- Delmas, M., 2009. Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'est des Pyrénées. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 529 p.
- Delmas, M., 2015. The last maximum ice extent and subsequent deglaciation of the Pyrenees: an overview of recent research. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 41, 109–137.
- Delmas, M., 2019. L'apport des nucléides cosmogéniques produits in situ à la quantification multi-scalaire des changements environnementaux quaternaires dans les montagnes des latitudes tempérées. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Lumière Lyon 2, 312 p.
- Delmas, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Calvet, M., Bourlès, D., 2008. Exposure age chronology of the last glacial cycle in the eastern Pyrenees. *Quaternary Research* 69, 231–241.

Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., 2009. Variability of erosion rates in the Eastern Pyrenees during the last glacial cycle—a global perspective with special reference to the Eastern Pyrenees. *Quaternary Science Reviews* 28, 484–498.

Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Boulès, D., 2011. Palaeogeography and  $^{10}\text{Be}$  exposure-age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109–122.

Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Boulès, D., 2012. Les glaciations quaternaires dans les Pyrénées ariégeoises : approche historiographique, données paléogéographiques et chronologiques nouvelles. *Quaternaire* 23, 61–85.

Delmas, M., Braucher, R., Gunnell, Y., Guillou, V., Calvet, M., Boulès, D., 2015. Constraints on Pleistocene glaciofluvial terrace age and related soil chronosequence features from vertical  $^{10}\text{Be}$  profiles in the Ariège River catchment (Pyrenees, France). *Global and Planetary Change* 132, 39–53.

Delmas, M., Mahé, C., Crest, Y., Braucher, R., Calvet, M., Gunnell, Y., 2017. Surface exposure dating of Lateglacial ice fluctuations in the upper Ariège catchment (France): inferences concerning paleoclimate and implications for Upper Paleolithic human dispersals through the Pyrenees. *International Meeting on Sedimentology, 33rd IAS & 16th ASF Joint Meeting, Toulouse october 10-12th 2017, Poster.*

Delmas M., Calvet M., Gunnell Y., Voinchet P., Manel C., Braucher R., Tissoux H., Bahain J.J., Perrenoud C., Saos T., 2018. Terrestrial  $^{10}\text{Be}$  and Electron Spin Resonance dating of fluvial terraces quantifies Quaternary surface uplift in the eastern Pyrenees. *Quaternary Science Reviews* 193, 188–211.

Delmas, M., Gunnell, Y., Calvet, M., Reixach, T., Oliva, M., 2021a. The Pyrenees: glacial landforms prior to the Last Glacial Maximum (chapter 40). In: Palacios, D., Hughes, P., García-Ruiz, J.M., Andrés, A. (Eds.), *European Glacial Landscapes: Maximum Extent of Glaciations*. Elsevier (in press).

Delmas, M., Gunnell, Y., Calvet, M., Reixach, T., Oliva, M., 2021b. The Pyrenees: glacial landforms from the Last Glacial Maximum (chapter 59). In: Palacios, D., Hughes, P., García-Ruiz, J.M., Andrés, A. (Eds.), *European Glacial Landscapes: Maximum Extent of Glaciations*. Elsevier (in press).

Depéret, C., 1923. Les glaciations des vallées pyrénéennes françaises et leurs relations avec les terrasses fluviales. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* 176, 1519–1524.

Duval, M., Sancho, C., Calle, M., Guilarte, V., Peña-Monne, J.L., 2015. On the potential of the ESR dating method applied to optically bleached quartz grains in sedimentary fluvial environments: some examples from the Early Pleistocene terraces of the Alcanadre River (Ebro basin, Spain). *Quaternary Geochronology* 29, 58–69.

Duvail, C., Gorini, C., Lofi, J., Le Strat, P., Clauzon, G., Dos Reis, T., 2005. Correlation between onshore and offshore pliocene–quaternary systems tracks below the Roussillon Basin (eastern Pyrenees, France). *Marine and Petroleum Geology* 22, 747–756.

- Eberl, B., 1930. Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpenvorland. Augsburg: Benno Filser Verlag.
- Florineth, D., Schlüchter, C., 2000. Alpine evidence for atmospheric circulation patterns in Europe during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Research* 54, 295–308.
- Gangloff, P., Hétu, B., Courchesne, F., 1991. Présence d'un dépôt glaciaire sous la terrasse moyenne d'Agnos, vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques). *Quaternaire* 2, 131–133.
- García-Ruiz, J.M., Valero-Garcés, B.L., Martí-Bono, C., González-Sampériz, P., 2003. Asynchronicity of maximum glacier advances in the central Spanish Pyrenees. *Journal of Quaternary Science* 18, 61–72.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Moreno, A., 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, central-western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean Late Pleistocene glaciers. *Geografiska Annaler Series A Physical Geography* 95, 15–32.
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., de Andrés, N., Valero-Garcés, B.L., López-Moreno, J.L., Sanjuán, Y., 2014. Holocene and 'Little Ice Age' glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. *The Holocene* 24, 1–14.
- Gellatly, A.F., Grove, J.M., Switsur V.R., 1992. Mid-Holocene glacial activity in the Pyrenees. *The Holocene* 2, 266–270.
- Genti, M., 2015. Impact des processus de surface sur la déformation actuelle des Pyrénées et des Alpes. PhD thesis (unpubl.). Univ. of Montpellier, p. 247.
- Giret, A., 1995. Etude des déformations quaternaires de la Têt par l'analyse morphométrique, *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire* 6, 121–137.
- Giret, A., 1997. L'Agly et ses terrasses dans la traversée des Fenouillèdes. *Quaternaire* 8, 409–418.
- Giret, A., 2014. Le Quaternaire fluvial et torrentiel du Roussillon, Tours, *Présence graphique - Monts*, 162
- Granger, D.E., Kirchner, J.W., and Finkel, R.C., 1997, Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$  in cave-deposited alluvium: *Geology* 25, 107–110.
- Granger, D.E., Smith, A.L., 2000, Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$ : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Serie B* 172, 822–826.
- Granger, D.E., Muzikar, P.F., 2001, Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: Theory, techniques and limitations: *Earth and Planetary Science Letters* 188, 269–281.
- Gunnell, Y., Zeyen, H., Calvet, M., 2008. Geophysical evidence of a missing lithospheric root beneath the Eastern Pyrenees: consequences for post-orogenic uplift and associated geomorphic signatures. *Earth and Planetary Science Letters* 276, 302–313.

Gunnell, Y., Calvet, M., Brichau, S., Carter, A., Aguilar, J.P., Zeyen, H., 2009. Low long-term erosion rates in high-energy mountain belts: insights from thermo- and biochronology in the Eastern Pyrenees. *Earth and Planetary Science Letters* 278, 208–218.

Harmand D., Adamson K., Rixhon G., Jaillet S., Losson B., Devos A., Hez G., Calvet M., Audra Ph., 2017. Relationships between fluvial evolution and karstification related to the climatic, tectonic and eustatic forcing temperate and cold regions: the recent data. *Quaternary Science Review*, 166, 38-56.

Hayes, A., Kucera, M., Kallel, N., Saffi, L., Rohling, E.J., 2005. Glacial Mediterranean Sea surface temperatures based on planktonic foraminiferal assemblages. *Quaternary Science Reviews* 24, 999–1016.

Head, M.J., Gibbard, P.L., 2015. Early–Middle Pleistocene transitions: Linking terrestrial and marine realms. *Quaternary International* 389, 7–46.

Hernandez, M., Mercier, N., Bertran, P., Colonge, D., Lelouvier, L.A., 2012. Premiers éléments de datation des industries du Pléistocène moyen (Acheuléen–Paléolithique moyen ancien) de la région pyrénéo-garonnaise : une approche géochronologique pluri-méthodes (TL, OSL et TT-OSL) des sites de Duclos et Romentères. *Paléo* 23, 155–170.

Hétu, B., Gangloff, P., 1989. Dépôts glaciaires du Pléistocène inférieur sur le piémont des Pyrénées Atlantiques. *Zeitschrift für Geomorphologie* 33, 384–403.

Hétu, B., Gangloff, P., Courchesne, F., 1992. Un till de déformation du Pléistocène inférieur à la base de la Formation du Lannemezan (Piémont des Pyrénées Atlantiques, France). *Quaternaire* 3, 53–61.

Hez, G., Jaillet, S., Calvet, M., Delannoy, J.J., 2015. Un enregistreur exceptionnel de l'incision de la vallée de la Têt : le karst de Villefranche, Pyrénées-orientales. France. *Karstologia* 65, 9–32.

Hidy, A.J., Gosse, J.C., Pederson, J.L., Mattern, J.P., Finkel, R.C., 2010. A geologically constrained Monte Carlo approach to modeling exposure ages from profiles of cosmogenic nuclides: an example from Lees Ferry, Arizona. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11, Q0AA10.

Hubschman, J., 1973. Etablissement par l'étude des faciès d'altération, d'un schéma stratigraphique du Quaternaire garonnais et ariégeois. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences série D* 277, 753–755.

Hubschman, J., 1975a. Les terrasses récentes de la Garonne et leur évolution. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire* 12, 137–147.

Hubschman, J., 1975b. L'évolution des nappes alluviales ante-rissiennes de la Garonne dans l'avant-pays molassique. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire* 12, 149–169.

Hubschman, J., 1975c. Morphogenèse et pédogenèse quaternaire dans le piémont des Pyrénées garonnaises et ariégeoises. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Toulouse-le-Mirail. Atelier de reproduction des Thèses de Lille III, 745 p.

Hubschman, J., 1984. Glaciaire ancien et glaciaire récent : analyse comparée de l'altération de moraines terminales nord-pyrénéennes. In : *Montagnes et Piémonts, Hommage à François Taillefer*. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Toulouse, 313–332.

Huyghe, D., Mouthereau, F., Castellort, S., Filleaudeau, P.Y., Emmanuel, L., 2009. Paleogene propagation of the southern Pyrenean thrust wedge revealed by finite strain analysis in frontal thrust sheets: Implications for mountain building. *Earth Planet. Sci. Lett.* 288, 421–433.

Huyghe D., Mouthereau F., Ségalen, L., Furió, M., 2020. Long-term dynamic topographic support during post-orogenic crustal thinning revealed by stable isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ) paleo-altimetry in eastern Pyrenees. *Sci. Rep.*, doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-020-58903-w.

Icole, M., 1974. Géochimie des altérations dans les nappes d'alluvions du piémont occidental nord-pyrénéen. *Éléments de paléopédologie quaternaire. Sciences Géologiques 40*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 200 p.

Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Maisch, M., Christl, M., Kubik, P.W., Schlüchter, C., 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Reviews* 28, 2137–2149.

Jalut, G., Andrieu, V., Delibrias, G., Fontugne, M., Pagès, P. 1988. Palaeoenvironment of the valley of Ossau (Western French Pyrenees) during the last 27,000 years. *Pollens et Spores* 30, 357–394.

Jalut, G., Montserrat, J., Fontugne, M., Delibrias, G., Vilaplana, J.M., Julia, R., 1992. Glacial to interglacial vegetation changes in the northern and southern Pyrenees: deglaciation, vegetation cover and chronology. *Quaternary Science Reviews* 11, 449–480.

Kessler J., Chambraud A., 1986. *La météo de la France : tous les climats localités par localités.* J.Clattès, 312 p.

Lal, D., 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters* 104, 424–439.

Laumonier, B., 2015. Les Pyrénées alpines sud-orientales (France, Espagne) : essai de synthèse. *Rev. Géol. Pyrén.* 2, 44. <http://www.geologie-despyrenees.com/>.

Le Guillou, Y., Alard, P., Vaginay, M., 2009. Visites au Réseau Clastres. *Préhistoire, Art et Sociétés* 62, 5–18.

Le Guillou, Y., 2019. L'aventure d'une fouine au Réseau Clastres. *Préhistoire, Art et Sociétés* 70, 75–79.

Le Guillou, Y., 2020. Félix Garrigou et la grotte de Niaux. *Préhistoire du sud-ouest* 27, 2019-2, 133–142.

Le Guillou, Y., Elalouf J.M., Fourvel, J.B., Maksud, F., 2021. Les ours de la grotte de Niaux. *Préhistoire, Art et Sociétés* 71, 29–60.

Lewis, C.J., Mc Donald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J., 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 67, 141–152.

- Lewis, C.J., Sancho, C., McDonald, E.V., Peña-Monne, J.L., Pueyo, E.L., Rhodes, E., Calle, M., Soto, R., 2017. Post-tectonic landscape evolution in NE Iberia using staircase terraces: combined effects of uplift and climate. *Geomorphology* 292, 85–103.
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}O$  records. *Paleoceanography* 20, PA1003
- Mardonne, M., Jalut, G., 1983. La tourbière de Biscaye (alt. 409 m, hautes Pyrénées): approche paléoécologique des 45 000 dernières années. *Pollen et Spores* 25, 163–211.
- Martel, E.A., 1908. Cavernes de Tarascon-sur-Ariège. *Spelunca, Bulletin & Mémoires de la Société de Spéléologie*, 54, VII, 47 p.
- Maurel O., Monié P., Pik R., Arnaud N., Brunel M., Jolivet M. (2008) – The Meso-Cenozoic thermo-tectonic evolution of the Eastern Pyrenees: an  $^{40}Ar/^{39}Ar$  fission track and (U–Th)/He thermochronological study of the Canigou and Mont-Louis massifs. *Int. J. Earth Sc.*, 97, 565–584.
- Mensua S., Ibañez J., Yetano M., 1977. Sector central de la depresion del Ebro, mapa de terrazas fluviales y glaciares. Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, 5 hojas al 1:100000, Comentario a los mapas, 18 p.
- Milesi G, Monié P., Münch P., Soliva R., Taillefer A., Bruguier O., Bellanger M., Bonno M., Martin C. (2020) –Tracking geothermal anomalies along a crustal fault using (U–Th)/He apatite thermochronology and rare-earth element (REE) analyses: the example of the Têt fault (Pyrenees, France). *Solid Earth*, 11, 1747–1771.
- Mix, A.C., Bard, E., Schneider, R., 2001. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews* 20, 627–657.
- Mouchéné, M., van der Beek, P., Mouthereau, F., Carcaillet, J., 2017. Controls on Quaternary incision of the Northern Pyrenean foreland: Chronological and geomorphological constraints from the Lannemezan megafan, SW France. *Geomorphology* 281, 78–93.
- Muñoz, J.A., 1992. Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section. In: McClay, K.R., Ed. *Thrust Tectonics*, Chapman and Hall, New York, 235–246.
- Nguyen, H.N., Vernant, P., Mazzotti, S., Khazaradze, G., Asensio, E., 2016. 3D GPS velocity field and its implications on the present-day post-orogenic deformation of the Western Alps and Pyrenees. *Solid Earth* 7, 1349–1363.
- Nivière, B., Lacan, P., Regard, V., Delmas, M., Calvet, M., Huyghe, D., Roddaz, B., 2016. Evolution of the late Pleistocene Aspe River (Western Pyrenees, France). Signature of climatic events and active tectonics. *Compte Rendus Géosciences* 348, 203–212.
- Ortuño, M., Marti, A., Martin-Closas, C., Jimenez-Moreno, G., Martinetto, E., Santanach, P., 2013. Palaeoenvironments of the Late Miocene Prüedo Basin: implications for the uplift of the Central Pyrenees. *Journal of the Geological Society of London* 170, 79–92.
- Ortuño, M., Viaplana-Muzas, M., 2018. Active fault control in the distribution of elevated low relief topography in the central-western Pyrenees. *Geologica Acta* 16, 499–518.

- Palacios, D., de Andrés, N., López-Moreno, J.I., García-Ruiz, J.M. 2015a. Late Pleistocene deglaciation in the central Pyrenees : the upper Gállego valley. *Quaternary Research* 83, 397–414.
- Palacios, D., Gómez-Ortiz, A., de Andrés, N., Vázquez-Selem, L., Salvador-Franch, F., Oliva, M. 2015b. Maximum Extent of Late Pleistocene Glaciers and Last Deglaciation of La Cerdanya Mountains, Southeastern Pyrenees. *Geomorphology* 231, 116–129.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Léanni, L., ASTER Team, 2017. Deglaciation in the central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews* 162, 111–127.
- Pallàs, R., Rodes, A., Braucher, R., Bourles, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., 2010. Small, isolated glacial catchments as priority target for cosmogenic surface dating of Pleistocene climate fluctuations, SE Pyrenees. *Geology* 38, 891–894.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Carcaillet, J., Ortuno, M., Bordonau, J., Bourlès, D., Vilaplana, J.M., Masana, E., Santanach, P., 2006. Late Pleistocene and Holocene glaciation in the Pyrenees: a critical review and new evidence from  $^{10}\text{Be}$  exposure ages, south-central Pyrenees. *Quaternary Science Reviews* 25, 1937–1963.
- Pallier, C., 2021. De l'enregistrement sédimentaire en milieu karstique à la taphonomie des sites archéologiques du Paléolithique supérieur (MIS 3 - MIS 2) : les apports de la grotte du Mas d'Azil et de la vallée de l'Arize (Ariège, France). Thèse de doctorat, Université Toulouse Jean Jaurès, 235 p.
- Peña Monné, J.L., Turu, V., Calvet, M., 2011. Les terrasses fluviales del Segre i afluent principals: descripció d'afloraments i assaig de correlació. In: Turu, V., Constante, A. (Eds.), *El Cuaternario en España y áreas afines, avances en 2011, XIII Reunión Nacional de Cuaternario*, Andorra, 4-7 juillet, Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (AEQUA), pp. 51–55.
- Penck, A., 1883. La période glaciaire dans les Pyrénées. *Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse* 19, 105–200.
- Penck, A., 1894. Studien über das Klima Spaniens während der Jüngerer Tertiärperiode und der Diluvialperiode. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 29, 109–141.
- Penck, A., Brückner, E., 1909. Die alpen im eiszeitalter. Chr. Herm Tauchnitz, Leipzig, 1199 p.
- Philip, H., Bousquet, J. C., Escuer, J., Fleta, J., Goula, X., Grellet, B., 1992. Présence de failles inverses d'âge quaternaire dans l'est des Pyrénées : implications sismotectoniques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, série II*, 314, 1239–1245.
- Philip, H., 2018. Tectonique récente et actuelle. In : *Synthèse géophysique et géologique des Pyrénées. Volume 3 : Cycle alpin, phénomènes alpins*, AGSO/BRGM, 361-404.
- Quinif, Y., Maire, R., 1998. Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin cave, French Pyrenees. *Quaternary Research* 49, 37–50.
- Renault, P., 1970. Excursion dans les grottes de Niaux et de Lombrives, réunion intergroupe sur les remplissages karstiques de l'Association des Sédimentologues Français, 20-21 novembre 1970 Foix, 14 p.

Reille, M., Andrieu, V., 1995. The late Pleistocene and Holocene in the Lourdes Basin, Western Pyrenees, France: new pollen analytical and chronology data. *Vegetation History and Archaeobotany* 4, 1–21.

Reimer, P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R., Friedrich, M., Grootes, P., Guilderson, T., Hajdas, I., Heaton, T., Hogg, A., Hughen, K., Kromer, B., Manning, S., Muscheler, R., Palmer, J., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R., Richards, D., Scott, E., Southon, J., Turney, C., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., & Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62.

Reixach, T., Delmas, M., Braucher, R., Gunnell, Y., Mahé, C., Calvet, M. 2021. Climatic conditions between 19 and 12 ka in the eastern Pyrenees, and wider implications for atmospheric circulation patterns in Europe. *Quaternary Science Reviews* 260, 106923.

Roure, F., Choukroune, P., 1998. Contribution of the ECORS seismic data to the Pyrenean geology: crustal architecture and geodynamic evolution of the Pyrenees. In: Damotte, B. (Ed.), *The ECORS Pyrenean deep seismic surveys, 1985–1994*, *Mém. Soc. Géol. Fr.*, 173, pp. 37–52.

Sancho, C., Calle, M., Peña-Monné, J.L., Duval, M., Oliva-Urcia, B., Pueyo, E.L., Benito, G., Moreno, A., 2016. Dating the earliest Pleistocene alluvial terrace of the Alcanadre River (Ebro Basin, NE Spain): insights into the landscape evolution and involved processes. *Quaternary International* 407, 86–95.

Sartégou, A., 2017. *Évolution morphogénique des Pyrénées orientales : apports des datations de systèmes karstiques étagés par les nucléides cosmogéniques et la RPE*. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan-Via Domitia, 418 p.

Sartégou, A., Bourlès, D.L., Blard, P.H., Braucher, R., Tibari, B., Zimmermann, L., Leanni, L., Aumaître, G., Keddadouche, K., 2018. Deciphering landscape evolution with karstic networks: a Pyrenean case study. *Quaternary Geochronology* 43, 12–29.

Sartégou, A., Blard, P.-H., Braucher, R., Bourlès, D., Sorriaux, P., Zimmermann, L., Laffitte, A., Tibari, B., Leanny, L., Guillou, V., Bourdet, A., Aster Team 2020. Late Cenozoic evolution of the Ariège River valley (Pyrenees) constrained by cosmogenic  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}/^{21}\text{Ne}$  dating of cave sediments. *Geomorphology* 371, 107441.

Schaefer, L., 1953. Die donauzeitlichen Ablagerungen a Lech und Wertach. *Geologica Bavarica* 19, 13–64.

Schoeffler, J., 1973. Étude structurale des terrains molassiques du piémont nord des Pyrénées de Peyrehorade à Carcassonne. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 28, 4, 515–549 et 5, 639–665).

Sinclair, H.D., Gibson, M., Naylor, M., Morris, R.G., 2005. Asymmetric growth of the Pyrenees revealed through measurement and modelling of orogenic fluxes. *American Journal of Science* 305, 369–406.

Solomina, O.N., Bradley, R.S., Hodgson, D.A., Ivy-Ochs, S., Jomelli, V., Mackintosh, A.N., Nesje, A., Owen, L.A., Wanner, H., Wiles, G.C., Young, N.E., 2015. Holocene glacier fluctuations. *Quaternary Science Reviews* 111, 9–34.

Sorriaux, P., 1981. Etude et datation de remplissages karstiques : nouvelles données sur la paléogéographie quaternaire de la région de Tarascon (Pyrénées ariégeoises). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, série II* 293, 703–706.

Sorriaux, P., 1982. Contribution à l'étude de la sédimentation en milieu karstique. Le système de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées Ariégeoises). Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse et Laboratoire Souterrain de Moulis CNRS, 255 p.

Sorriaux, P., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Durand, N., Pons-Branchu, E., 2016. Relations entre karst et glaciers depuis 450 ka dans les grottes de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées ariégeoises). Nouvelles datations U/Th dans la grotte de Niaux. Volume spécial en Hommage à R. Maire, *Karstologia* 67, 3–16.

Stange, K.M., Van Balen, R.T., Carcaillet, J., Vandenberghe, J., 2013. Terrace staircase development in the southern Pyrenees foreland: inferences from 10Be terrace exposure ages at the Segre River. *Global and Planetary Change* 101, 97–112.

Stange, K.M., Van Balen, R.T., Kasse, C., Vandenberghe, J., Carcaillet, J., 2014. Linking morphology across the glaciofluvial interface: A 10Be supported chronology of glacier advances and terrace formation in the Garonne River, northern Pyrenees, France. *Geomorphology* 207, 71–95.

Suc, J.P., Fauquette, S., 2012. The use of pollen floras as a tool to estimate palaeoaltitude of mountains: The eastern Pyrenees in the Late Neogene, a case study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 321–322, 41–54.

Teixell, A., Labaume, P., Ayarza, P., Espurt, N., de Saint Blanquat, M., Lagabrielle, Y., 2018. Crustal structure and evolution of the Pyrenean-Cantabrian belt: a review and new interpretations from recent concepts and data. *Tectonophysics* 724–725, 146–170.

Tomkins, M.D., Dortch, J.M., Hughes, P.D., Huck, J.J., Stimson, A., Delmas, M., Calvet, M., Pallas, R., 2018. Rapid age assessment of glacial landforms in the Pyrenees using Schmidt hammer exposure dating (SHED). *Quaternary Research* 90, 26–37.

Turner, C., Hannon, G.E., 1988. Vegetational evidence for the late Quaternary climate changes in southwest Europe in relation to the influence of the North Atlantic Ocean. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 318, 451–485.

Turu, V., Calvet, M., Bordonau, J., Gunnell, Y., Delmas, M., Vilaplana, J., Jalut, G., 2017. Did Pyrenean glaciers dance to the beat of global climatic events? Evidence from the Würmian sequence stratigraphy of an ice-dammed palaeolake depocentre in Andorra. In: Hughes, P.D., Woodward, J.C., Eds. *Quaternary Glaciation in the Mediterranean Mountains*. Geological Society, London, Special Publications 433, 111–136.

Vanara, N., 2000. Le Karst des Arbailles. *Karstologia Mém.* 3, 320.

Vanara, N., Maire, R., Lacroix, J., 1997. La surface carbonatée du massif des Arbailles (Pyrénées Atlantiques) : un exemple de paléoréseau hydrographique néogène déconnecté par la surrection. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 168, 255–265.

Vergés, J., Millán, H., Roca, E., Muñoz, J. A., Marzo, M., Cirés, J., Den Bezemer, T., Zoetemeijer, R., Cloetingh, S., 1995. Eastern Pyrenees and related foreland basins: pre-, syn- and post-collisional crustal scale cross-sections. *Marine and Petroleum Geology* 12, 893–915.

Vergés, J., Fernández, M., Martínez, A., 2002. The Pyrenean orogen: pre-, syn-, and post-collisional evolution. In: Rosenbaum, G., Lister, G.S., Eds. *Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan Orogen*. *Journal of the Virtual Explorer* 8, 55–74.

de Vernal, A., Eynaud, F., Henry, M., Hillaire-Marcel, C., Londeix, L., Mangin, S., Matthiessen, J., Marret, F., Radi, T., Rochon, A., Solignac, S., Turon, J.L., 2005. Reconstruction of sea-surface conditions at middle to high latitudes of the Northern Hemisphere during the Last Glacial Maximum (LGM) based on dinoflagellate cyst assemblages. *Quaternary Science Reviews* 24, 897–924.

Vilaplana, J.M., 1983. Quaternary Glacial Geology of Alta Ribagorça Basin (Central southern Pyrenees). *Acta Geologica Hispanica* 18, 217–233.

Vilaplana, J.M., Bordonau, J., 1989. Dynamique sédimentaire lacustre de marge glaciaire : le paléolac de Llestui (Noguera Ribagorçana, Versant sud des Pyrénées). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire* 40, 219–224.

Vissers, R.L.M., Meijer, P.T., 2012. Iberian plate kinematics and Alpine collision in the Pyrenees. *Earth-Science Reviews* 114, 61–83.

Wolkowinsky, A.J., Granger, D.E., 2004. Early Pleistocene incision of the San Juan River, Utah, dated with <sup>26</sup>Al and <sup>10</sup>Be. *Geological Society of America* 32, 749–752.

L'est des Pyrénées offre un riche laboratoire de terrain qui permet d'explorer (i) l'impact des changements climatiques sur les fluctuations glaciaires pléistocènes, (ii) la dynamique des systèmes fluviaux en phase avec les changements environnementaux enregistrés à l'échelle du bassin-versant, (iii) les rythmes et vitesses de l'incision des vallées en phase avec l'évolution du relief et les mouvements verticaux de la croûte terrestre. L'itinéraire couvre deux transects montagne-piémont, l'un sur la façade méditerranéenne de la chaîne, du Roussillon à la Cerdagne, le long de la vallée de la Têt, l'autre sur la façade atlantique, du col de Puymorens au piémont nord-pyrénéen, le long de la vallée de l'Ariège. Au fil des arrêts, nous visiterons les archives fluviales et glaciaires préservées sur les versants et en contexte karstique. Nous insisterons sur les travaux et données géochronologiques publiés au cours de ces 10 dernières années.

### Les étapes de l'itinéraire de la façade méditerranéenne au piémont nord des Pyrénées



**1<sup>er</sup> jour : L'évolution Plio-Quaternaire du bassin du Roussillon et de ses bordures**

**2<sup>ème</sup> jour : Les paléoenlacements pléistocènes des hauts massifs (Cerdagne et Hte Ariège)**

**3<sup>ème</sup> jour : Géoarchéologie, dynamiques karstiques et séquences fluviales en Ariège**