



HAL
open science

Étude carto-géomorphologique de la montagne des Monges dans les Préalpes de Digne (Alpes-de-Haute-Provence) : focus particulier sur les dynamiques glaciaires du secteur

Théo Armando

► **To cite this version:**

Théo Armando. Étude carto-géomorphologique de la montagne des Monges dans les Préalpes de Digne (Alpes-de-Haute-Provence) : focus particulier sur les dynamiques glaciaires du secteur. Géographie. 2020. dumas-02965338

HAL Id: dumas-02965338

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02965338>

Submitted on 13 Oct 2020

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.

Université Grenoble Alpes, Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine.
Master 2 – Géographie, Aménagement, Environnement, Développement (GAED).
Parcours Géographie Information Interface Durabilité Environnements (GEOÏDES)

Etude carto-géomorphologique de la montagne des Monges dans les Préalpes de Digne (Alpes-de-Haute-Provence). (Focus particulier sur les dynamiques glaciaires du secteur).

Stage réalisé à Edytém Chambéry

Mémoire soutenu le 10 septembre 2020

Par : Théo Armando

Devant un jury constitué de :

- M. Philippe SCHOENEICH : Géomorphologue, Professeur, UGA / Référent de mémoire
- M. Franck GIAZZI : Géographe, Maître de conférences, UGA / Examineur

Résumé

Ce travail de master 2 est le fruit de l'étude géomorphologique menée à la suite de plusieurs missions terrain dans le massif des Monges (Alpes-de-Haute-Provence) entre 2019 et 2020. Cette étude a pour but d'établir le contexte géomorphologique du site et d'interpréter ses dynamiques quaternaires. En plus des observations terrain, cette étude a nécessité la création de plusieurs données cartographiques pour aider à l'interprétation. Ce travail apporte des éléments nouveaux et approfondit les recherches de M. Jorda (1983, 1989) et de l'IMEP (2011, 2019). Cette étude a notamment révélé de nombreuses moraines et dépôts de till répartis entre 1480 m et 1900 mètres. Ces moraines correspondent à des stades glaciaires attribués au Würm ; néanmoins, la singularité de ces dépôts glaciaires dans cette région complique la datation par correspondance. Ces vestiges glaciaires sont uniques dans les Préalpes Digoises avec des altitudes bien inférieures aux moraines repérées ailleurs dans les Alpes du Sud. Par le biais de la construction d'une carte géomorphologique et de la reconstitution glaciaire, ce travail de mémoire pose les bases de la morphogenèse quaternaire de la montagne des Monges. Cette étude a permis d'identifier certains éléments morphologiques marquants du paysage des Monges avec notamment des déstabilisations de versant et des formes périglaciaires apparues après le dernier maximum glaciaire.

Ces découvertes concernant la probable formation de moraines au cours du maximum würmien doivent être confirmées par des campagnes de datation. De plus, la découverte de lignes d'équilibre glaciaire plus basses que prévu, amène à s'interroger sur d'éventuelles empreintes glaciaires insoupçonnées sur d'autres sommets des Alpes du Sud.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mes encadrants de stage Philip Deline et Laurent Astrade, professeur à l'Université de Savoie, pour leur confiance, leur disponibilité, leur gentillesse et leur rigueur tout au long de la découverte de la géomorphologie des Monges.

Je remercie Philippe Schoeneich, professeur à l'IUGA de m'avoir transmis des notions de géomorphologie et de m'avoir accompagné dans la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce stage :

Madame Myette Guimar, qui en tant que chargée de mission scientifique à la réserve naturelle géologique de Haute-Provence est à l'initiative de cette étude. Je la remercie également pour sa confiance et pour nous avoir accompagné sur le terrain à la découverte des bois fossiles et autres. Enfin, je la remercie pour son sang-froid face à l'agressivité du berger d'Anatolie.

Messieurs Jean Aimé Esmiol, pour sa gentillesse et sa disponibilité, grâce à qui j'ai pu accéder à une cabane de l'ONF pour stocker mes affaires lors des missions terrain.

Thibault Cardinal et Marine Bourgeon pour m'avoir aidé et conseillé dans l'usage des logiciels et la création de données.

Franck Giazzi pour le temps passé à l'évaluation de ce mémoire et de ma soutenance à venir, ainsi que pour ses cours fort intéressants.

Ma mère, pour son soutien constant et ses précieuses relectures.

Table des matières

Liste des abréviations	1
Introduction	2
Partie 1 : Présentation du site des Monges	5
1) Localisation	5
2) Description du site d'étude	6
3) Etat des connaissances sur la géomorphologie glaciaire.....	7
Partie 2 : Approches méthodologiques et géomorphologiques mobilisées	8
1) Création des supports numériques utiles à l'analyse carto-géomorphologique.....	8
2) Travail de cartographie combinant outils SIG et mission terrain	10
3) Légende de la cartographie géomorphologique.....	11
4) Reconstitution des stades glaciaires et des lignes d'équilibre des paléo-glaciers	12
Partie 3 : Présentation des formes et processus modelant le paysage des Monges	14
1) Formes et processus issus d'une évolution sous climat froid.....	15
2) Formes et processus de versant	21
3) Erosion et évolution récente du paysage.....	24
Partie 4 : Reconstitution de la Morphogénèse	27
1) Reconstitution des stades glaciaires, calcul des LEG et tentative de calage chronologique.....	27
2) Reconstitution morphogénique des Monges.....	28
Conclusion	31
Sources	32
Table des Figures	36
Table des Annexes	38
Annexes	39

Liste des abréviations :

AABR	: Area-Altitude Balance Ratio
AAR	: Accumulation Area Ratio
BRGM	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CD04	: Conseil départemental des Alpes-de-Haute-Provence
DGPV	: Déformations Gravitaires Profondes de Versants
ELA	: Equilibrium Line Altitude
IMBE	: Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale
LEG	: Ligne d'Equilibre Glaciaire
LGM	: Last Glacial Maximum
MGE	: Median Glacier Elevation
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
ONF	: Office National des Forêts
PAG	: Petit Age Glaciaire
RNN	: Réserve Naturelle Nationale
SIG	: Système d'Information Géographique
THAR	: Toe to Headwall Altitude Ratio

Introduction

La Réserve naturelle géologique de Haute-Provence développe des études avec des partenaires scientifiques dans le but d'accroître la connaissance de son patrimoine naturel. C'est dans le cadre d'un de ces partenariats réalisés avec le laboratoire Edytem que j'ai été recruté comme stagiaire pour étudier la géomorphologie de la montagne des Monges située dans les Préalpes de Digne. En effet, compte tenu de la richesse du massif des Monges tant d'un point de vue de sa biodiversité que de sa géodiversité, et compte tenu également de la fragilité de ces patrimoines, la réserve géologique envisage le classement de ce massif en Réserve Naturelle Nationale (RNN). Dans cet objectif, la Réserve souhaite approfondir et actualiser les connaissances scientifiques sur le massif des Monges, en particulier sa géomorphologie et ses dynamiques et évolutions quaternaires. Cette étude vient en complément des travaux déjà réalisés par Cécile Miramont et ses collaborateurs de l'université Aix-Marseille en partenariat avec le département des Alpes-de-Haute-Provence. (CCTP_Etude Géomorpho)

Ainsi, des études ont déjà été menées sur le territoire des Monges. Suite à la découverte par M. Guiomar de bois fossiles dans le secteur de Coste Belle et de Reynier, l'IMBE s'est chargé de l'étude de ces bois fossiles dans l'objectif de reconstituer l'histoire de la végétation, de la dynamique érosive et du climat au cours de l'Holocène (Miramont, 2011). Cet objectif s'est poursuivi par le carottage de deux zones humides au nord-ouest des Monges (IMBE, 2019). Les études cartographiques sur les Monges remontent aux années 1980-83, notamment dans le cadre de la carte géologique BRGM, feuille de La Javie à 1/50000. M. Jorda avait alors repéré des dépôts glaciaires et fluvioglaciaires. Après avoir été un temps contestée, il semble qu'aujourd'hui, la présence de glaciers aux Monges soit admise. Pour compléter et approfondir ces travaux, la réserve souhaite bénéficier du regard de spécialiste pour l'analyse et l'interprétation des différentes formes géomorphologiques, leur origine, organisation et chronologie. La montagne des Monges présente un intérêt particulier car il s'agit de l'unique montagne des Préalpes de Digne où la présence passée d'un glacier local a été identifiée.

C'est dans ce contexte qu'un appel d'offre a été lancé par la Réserve naturelle géologique de Haute-Provence auprès de laboratoires compétents en géomorphologie. Le laboratoire Edytem représenté par Philip Deline et Laurent Astrade a donc remporté cet appel d'offre. Il convient de présenter brièvement les acteurs de ce projet que sont la Réserve naturelle géologique de Haute-Provence comme commanditaire et le laboratoire Edytem comme prestataire.

Créée en 1984 par décret, la Réserve géologique de Haute-Provence est une réserve naturelle qui s'étend sur un territoire de plus de 200 000 hectares et 59 communes entre les Alpes-de-Haute-Provence et le Var. C'est la plus grande et la plus ancienne réserve géologique protégée d'Europe. Administrée depuis 2014 par le Département des Alpes-de-Haute-Provence, elle a trois types de mission : la conservation du patrimoine géologique, la sensibilisation du public et l'augmentation des connaissances de ce patrimoine géologique.

Créée en 2003, Edytem est une unité mixte de recherche de l'Université Savoie Mont Blanc et du CNRS. « Edytem est né de la volonté de rassembler des chercheurs en géosciences (géologie, hydrogéologie, géomorphologie) et en sciences humaines et sociales (géographie), dans le but de résoudre, par une vision interdisciplinaire, les problématiques

environnementales au sens le plus large (climatique, biologique, écologique, sociale ...) propre aux Environnements, **D**ynamiques et **T**erritoires de **M**ontagne (EDyTEM). Ses champs de compétence s'expriment de façon privilégiée autour des montagnes, du karst, des lacs, ou encore des espaces protégés » (Edytem, 2015).

Avec l'accord des commanditaires, les chercheurs d'Edytem ont proposé à un stagiaire de mener à bien ce travail. Ainsi, c'est dans ce cadre que j'ai eu la chance d'être pris en stage afin de contribuer à la réalisation des objectifs suivants :

- Le premier objectif est de réaliser une cartographie géomorphologique détaillée des Monges.
- Le second objectif est d'apporter des éléments d'interprétation sur la dynamique holocène du secteur d'étude en lien avec les travaux de l'IMBE et en s'appuyant sur la carte géomorphologique réalisée.

Tout cela dans le but de préciser la valeur patrimoniale du géosite.

La géomorphologie est la discipline qui permet de mieux connaître les dynamiques qui ont contribué à façonner un paysage. Ces dynamiques sont soumises à des processus de différentes origines (glaciaire, périglaciaire, karstique, gravitaire, fluviale, organogène, anthropique). La carto-géomorphologie permet de repérer les formes et d'attribuer un processus à leur origine à partir des observations terrain conjuguées à l'utilisation de supports numériques tels que les MNT ou les orthophotos qui permettent d'avoir une vision plus globale des formes et de leur agencement. La cartographie numérique permet de changer rapidement les supports cartographiques (MNT, Orthos, Pente) et d'attribuer des descriptions aux éléments dessinés. Compte tenu de la diversité et complexité des processus, les connaissances nécessaires à leur interprétation sont très vastes. Ainsi, le recours à la bibliographie est permanent pour identifier au mieux la nature des formes et dépôts. Généralement, les supports numériques facilitent la délimitation des formes, puis les observations terrain permettent d'attribuer le processus à l'origine de la forme dessinée. Le report systématique des observations sur une carte permet progressivement d'établir la répartition et l'agencement des formes et dépôts. La visualisation sur une carte de l'ensemble de l'organisation morphologique facilite l'interprétation de la succession des processus. En effet, à partir de la disposition des formes et dépôts il est parfois possible de déterminer que tel dépôt est antérieur ou postérieur à tel autre (Datation relative). Ainsi, la cartographie géomorphologique est un support très utile pour établir la reconstitution morphogénique d'un site.

Pour concilier les contraintes formelles inhérentes à un mémoire tout en répondant aux objectifs fixés par la Réserve, la problématique choisie pour guider la rédaction de ce document consiste à se demander en quoi *la carto-géomorphologie est une approche pertinente pour étudier et interpréter les dynamiques naturelles qui ont façonné le paysage des Monges au cours du Quaternaire récent ?*

Tout d'abord, le site des Monges fera l'objet d'une présentation incluant la localisation de la zone d'étude et la description de ses composantes naturelles.

Ensuite seront présentés les outils, données et méthodes mobilisés pour mener à bien le travail d'interprétations géomorphologiques et de cartographie.

Puis les formes et processus géomorphologiques présents aux Monges seront regroupés dans trois parties et feront l'objet d'une présentation non-exhaustive.

Enfin, la dernière partie tentera d'inclure la dimension temporelle en apportant des éléments d'interprétation sur la dynamique du paysage au cours du Quaternaire récent. Un intérêt particulier sera apporté à la reconstitution glaciaire.



Photos présentant quelques points de vue du site d'étude. En haut à gauche le plateau sommital des Monges et les deux cirques qui l'incisent de part et d'autre. En haut à droite une vue de la prairie de Clapouse depuis le sommet des Monges. En bas à gauche le secteur de Coste Belle. En bas à droite le secteur de Communaresse.

Partie 1 : Présentation du site des Monges

1) Localisation

Localisé dans les Alpes-de-Haute-Provence, au cœur du Géoparc de Haute-Provence, le sommet des Monges (2115m) est le point culminant des Préalpes de Digne. La montagne des Monges s'étend sur 3 communes, avec à l'est la commune de Barles, au nord-ouest la commune de Bayon, et au sud-ouest la commune d'Authon.

A moins de 20 km à vol d'oiseau de Digne-les-Bains ou de Sisteron, le massif des Monges reste malgré tout difficile d'accès ; la route la plus directe depuis Digne, longue de 80 km, nécessite plus d'une heure trente de trajet. Ces informations prosaïques illustrent l'isolement de cette montagne par rapport aux grandes vallées de circulation. En effet, sa position interne au sein du massif des Préalpes de Digne l'a isolée des grandes vallées glaciaires de la Durance, de l'Embrunais et de l'Ubaye. Ces vallées ont accueilli au cours du Quaternaire de puissants glaciers régionaux qui ont laissé une empreinte importante dans le paysage.

Le site d'étude a été divisé en trois secteurs présentés dans la [figure 1](#).

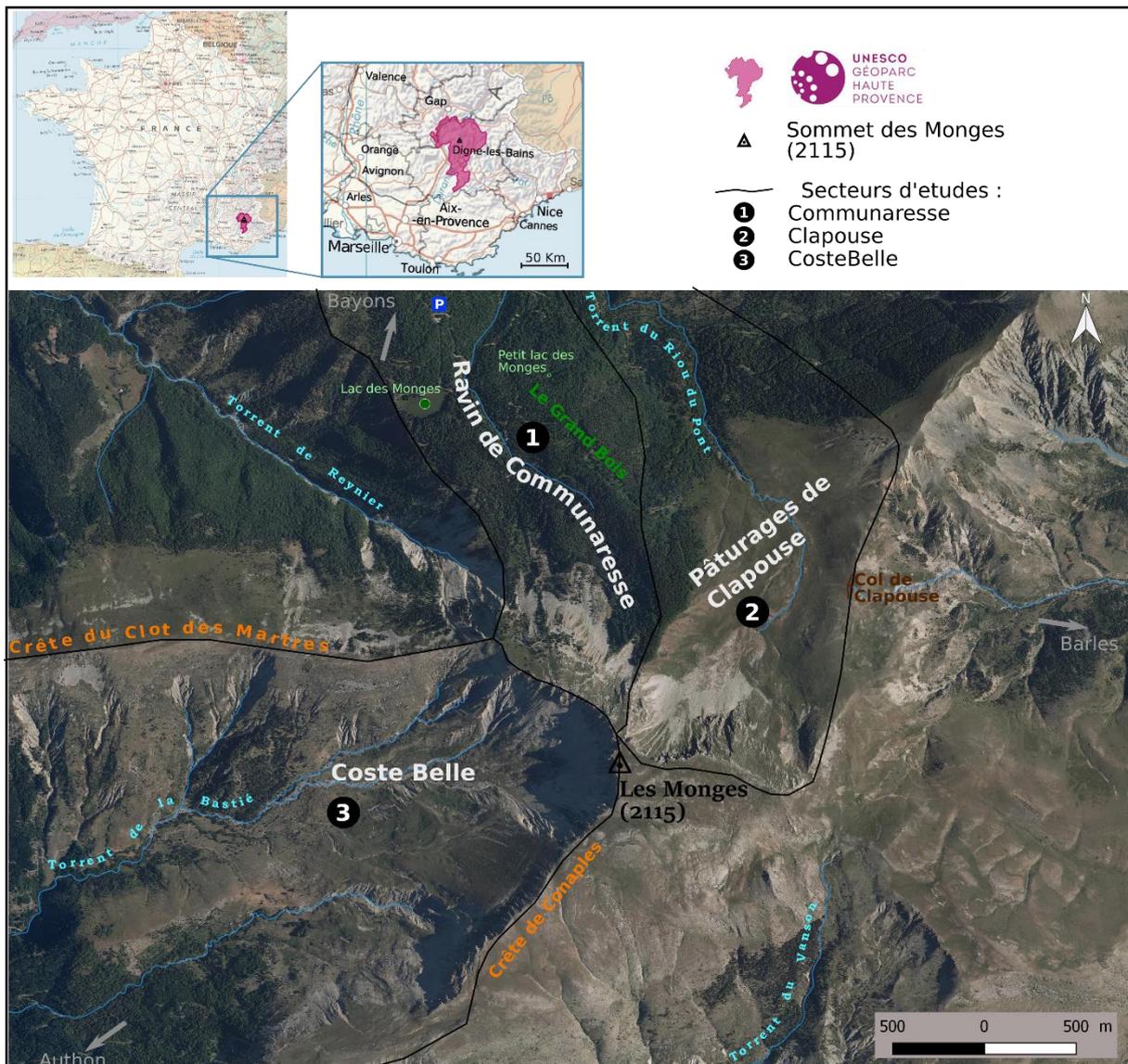


Figure 1 : Carte de présentation du site d'étude des Monges

Fond de carte : Orthophoto IGN
Réalisation : Armando Théo

2) Description du site d'étude

La montagne des Monges est un anticlinal qui s'est formé suite au plissement survenu lors de l'orogénèse alpine récente (Gidon, 1997). Ce qui caractérise ce secteur et contribue à en faire un site remarquable, c'est la présence de deux cirques glaciaires qui se sont formés d'un côté et de l'autre du sommet des Monges (2215m). Ces cirques sont donc dos à dos, séparés par un fin plateau sommital. Le premier cirque est orienté nord-est et surplombe les pâturages de Clapouse, le second est orienté ouest-sud-ouest et appartient au secteur de Coste Belle. Deux crêtes prolongent l'arc de cercle formé par le cirque de Coste Belle (Fig.1). De chaque côté de ces crêtes, les versants sont réglés, c'est-à-dire que l'érosion a effacé les escarpements, ce qui donne des pentes régulières. La crête arrondie qui descend à l'est des Monges en direction du col de Clapouse présente la forme d'un mont. Du côté de Communaresse une crête molassique descend en direction du lac des Monges.

Le paysage des Monges est fortement marqué par le pastoralisme qui maintient de grandes surfaces ouvertes (Pâturages de Clapouse et Coste Belle). Le minéral est néanmoins présent avec les talus d'éboulis qui recouvrent les versants des cirques ainsi que les ravinements dans les terres noires du côté de Coste Belle. A l'amont du lac des Monges une forêt de hêtres et de mélèzes plantés recouvre le quart nord du secteur ; cela complique l'interprétation géomorphologique. S'étagant entre 1450 et 2115 mètres le site se situe entre l'étage montagnard et subalpin.

D'un point de vue climatique, les Monges sont à la jonction de plusieurs influences. Le climat peut être qualifié de méditerranéen altéré par des influences montagnardes dues au relief et aussi continentales (Joly, 2010). Les étés y sont doux et les hivers froids, les précipitations sont modérées et tombent souvent de manière intense à l'occasion d'orages. Le cumul des précipitations annuelles est d'environ 1000 mm (Fig. 2).

Les Monges sont dominés par une corniche tithonique, mais sous cette strate calcaire, la géologie est assez différente entre les secteurs. La lithologie de Coste Belle raconte l'histoire d'une mer profonde au fond de laquelle se sont formées les marnes noires qui couvrent la majorité des versants les rendant très sensibles à l'érosion. Alors que du côté de Clapouse ou Communaresse la lithologie raconte l'histoire d'un bassin post-orogénique dans lequel s'est formée la molasse rouge durant l'Oligocène. Cette différence lithologique a des conséquences sur l'évolution géomorphologique des versants. L'histoire et la description de la lithologie sont présentées en [annexe 1](#).

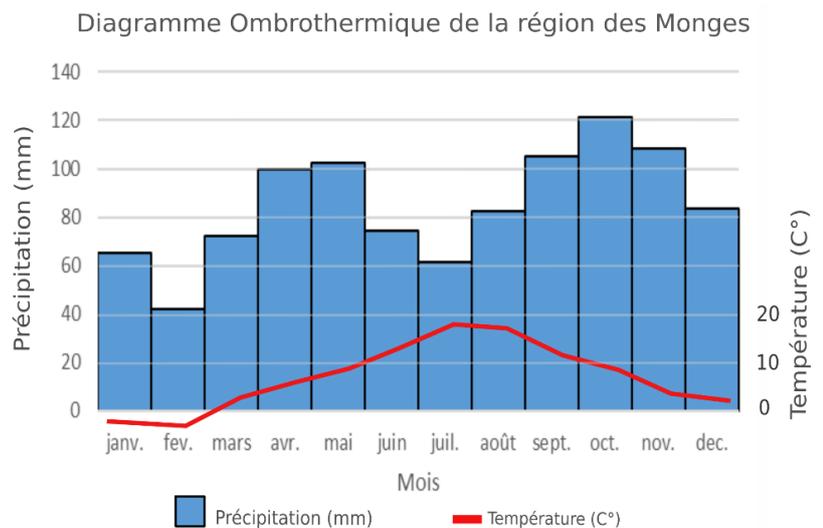


Figure 2 : En l'absence de station météo aux Monges, ce diagramme ombrothermique a été construit en croisant les données de la station météo de Seyne (1347) et de Chabanon (1720).

3) Etat des connaissances sur la géomorphologie glaciaire

Au cours du Quaternaire, des glaciers se sont à plusieurs reprises étendus dans la vallée de la Durance, de l'Embrunais et de l'Ubaye qui jouxtent les Monges. Le glacier de la Durance atteignait plus de 1000 mètres d'épaisseur à l'emplacement actuel de Briançon, ce qui a favorisé la production de nombreuses langues de diffluence et de transfluence vers les vallées adjacentes (Cossart, 2005, 2008). Mais aucun glacier régional n'est remonté assez haut pour affecter notre secteur d'étude. Durant la glaciation du Riss (240 -180 ka), une diffluence du glacier de la Durance a traversé le col de Sagnes pour atteindre la vallée de la Sasse. Puis lors de la glaciation du Würm une diffluence emprunta le même trajet, mais s'arrêta avant, au niveau des Tourniquets (BRGM, 1991), soit à moins de 10 km des Monges.

M. Jorda (1983) a repéré des dépôts glaciaires au nord-est des Monges du côté de Communasse et de Clapouse. Ces dépôts dateraient du Würm. Etant donné qu'aucune diffluence glaciaire n'a atteint les Monges, ces dépôts viennent forcément de glaciers locaux. Ainsi, lors des glaciations du Quaternaire, un ou plusieurs glaciers locaux recouvraient les Monges. Les Monges constituaient alors un îlot glaciaire isolé des grandes vallées glaciaires de la Durance et de l'Ubaye. Il n'existe pas d'étude spécifique aux glaciations dans les Monges. La plupart des études concernent les Alpes du Sud dans leur globalité. Il ressort de ces études que la ligne d'équilibre glaciaire lors du dernier maximum würmien dans les Alpes du Sud se situerait entre 1800 et 2000 mètres (Guillien, 1962 ; Julian, 1980 ; Jorda, 1975,1980 ; Cossart *et al.*, 2011). D'après M. Jorda, l'extension maximale des glaciers du Würm est atteinte au Pléniglaciaire würmien supérieur (stade isotopique marin 2) (Jorda, 1980 ; Jorda *et al.*, 2000). Puis, dès le début du Tardiglaciaire [18 000 – 11 000 ans BP], les glaciers fondent rapidement. La déglaciation est très rapide dans le sud et particulièrement pour les glaciers locaux, comme aux Monges, très réactifs aux variations des conditions climatiques (Brisset, 2014). Néanmoins, d'après les études existantes, cette déglaciation s'est faite par étapes. Trois « stades » glaciaires attribuables au Tardiglaciaire ont été distingués (Dijkstra *et al.*, 1990 ; de Beaulieu *et al.*, 1977). Les deux « stades » les plus anciens correspondent à des fronts morainiques souvent avachis situés entre 1700 et 2200 mètres d'altitude en exposition nord. Il s'agissait sûrement de stades de stagnation du glacier ou peut-être de légères réavancées. D'après les études, toute trace de glaciers locaux a disparu de la région environ 15 000 ans BP (Brisset, 2014). Ainsi comme l'écrit Jorda (1994) : « Aucun héritage morainique n'a pu être attribué au Dryas moyen »

Durant le Dryas récent (13 000 – 11 700 ans BP) une diminution des températures fait chuter la ligne d'équilibre suivi d'une autre phase de réchauffement (le Préboréal). Mais selon Jorda (1975-80) ce refroidissement n'a pas été suffisant pour permettre la récurrence de glaciers aux Monges. La ligne d'équilibre était alors entre 2300 et 2500 mètres d'altitude en Ubaye (Jorda, 1994). Dans les Alpes-Maritimes, à une latitude proche de celle des Monges, la LEG se situait aux alentours de 2900 mètres dans les années 1960. (Sweizer, 1968).

Les résultats présentés dans la suite de ce document ne concordent pas tous avec les éléments exposés ci-dessus. En effet, l'estimation de 1800 à 2000 mètres de LEG lors du dernier maximum glaciaire est revue à la baisse. De plus M.Jorda évoque trois stades de retraits glaciaires dans les Alpes du Sud, mais dans les Monges, des formes correspondant à plus de trois stades ont été repérées.

Partie 2 : Approches méthodologiques et géomorphologiques mobilisées

1) Création des supports numériques utiles à l'analyse cartogéomorphologique

Le support privilégié pour faire ressortir les formes composant un paysage est le MNT (Modèle Numérique de Terrain). Un MNT est une représentation 3D de la surface d'un terrain, créée à partir des données d'altitude du terrain. Dans les zones végétalisées comme les Monges, l'obtention d'un MNT nécessite l'emploi de la technique LIDAR, qui permet de discriminer les reliefs liés au sursol (végétation, bâtiment), pour garder uniquement le relief du sol (Nuninger, 2008). En l'absence de données LIDAR, les modèles numériques créés sont dits de surface (MNS). Les MNS créés sur le massif des Monges sont donc exploitables uniquement sur les secteurs libres de couvert forestier. En complément d'un modèle numérique, il est très utile d'obtenir des orthophotographies, qui sont des photos aériennes géoréférencées. Les orthophotos ont l'avantage de faire ressortir les différences de texture et de couleur qui peuvent aider à la cartographie.

Plusieurs MNS et orthophotos ont été créés à partir de photos captées par différents vecteurs d'acquisition (avion, drone, appareil au sol). La première combinaison MNS et orthophotos obtenue vient de photos aériennes d'une résolution de 20 cm issues de la campagne aéroportée de 2012 de l'IGN. Ces images ont été téléchargées depuis la plateforme Géoportail. Les autres MNS ont été créés à partir d'images de 5 cm de résolution captées par drone ou bien de photos prises manuellement depuis le sol.

La construction des supports cartographiques que sont les MNS et les orthophotos, est réalisée grâce à l'outil Photoscan d'Agisoft. Pour obtenir ces données, il faut charger dans le logiciel les photos prises du terrain, puis noter les coordonnées géographiques (x, y, z) pour plusieurs points de contrôle appelés « markers » présents sur les photos. Ces points de contrôle peuvent être des blocs, l'angle d'un bâtiment ou tous autres éléments fixes, car chaque point de contrôle doit être identifié sur plusieurs photos. Puis le logiciel reconstitue les points de vue des photos à partir de la parallaxe calculée pour les « markers » ; enfin, l'algorithme de corrélation relie les photos en s'appuyant sur leur niveau de gris. C'est pourquoi un MNS de qualité doit être fait à partir de photos prises dans de bonnes conditions de nébulosité. La présence d'ombres projetées par un nuage risque de fausser les MNS. Un taux de recouvrement des images élevé est aussi favorable à un bon résultat (Henry, 2001). Des documents à très haute résolution spatiale (THRS), essentiels dans le processus de cartographie, ont ainsi été créés.

Même dans les paysages de prairie, le MNS est moins performant que le MNT, car la végétation herbeuse masque ou biaise une partie des formes. Pour chacun des MNS obtenu, un nuage de points 3D a également été créé (Fig. 3) dans lequel il est possible de naviguer depuis des logiciels adaptés (PhotoScan, 3DReshaper...). Grâce au modèle 3D et au logiciel PhotoScan, le volume de dépôt gravitaire ou le volume de roche prélevé par le ravinement peut être estimé.

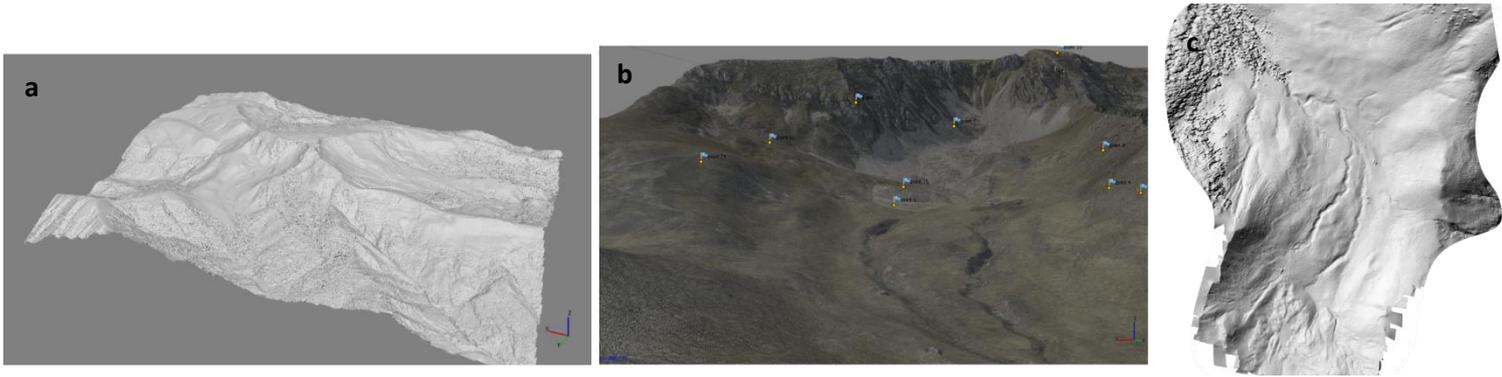


Figure 3 : **a)** Représentation en 3D du modèle numérique de surface de 76 cm de résolution et 50 km² créé à partir des images IGN. **b)** Vue du cirque de Clapouse sous forme d'un nuage de points denses ; les markers (points de coordonnées) sont symbolisés par les drapeaux bleus. **c)** Modèle numérique de surface (MNS) du pâturage de Clapouse de 30 cm de résolution obtenu par drone en juillet 2020.

Les données obtenues servent de fonds cartographiques dans les systèmes d'information géographique. Un Système d'Information Géographique ou SIG « est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques » (Auda, 2018). Pour ce stage, le logiciel libre QGIS a été privilégié, mais certains traitements ont nécessité l'emploi du logiciel payant ArcGIS. Ces outils sont employés pour la visualisation des données, mais aussi pour la création de nouvelles données comme des courbes de niveau (Fig. 4a) ou des modèles de pentes (Fig. 4b) ou encore des cartes d'exposition (Fig. 4c). Toutes ces données sont dérivées du MNS de base.

D'autres données furent créées comme une carte de la température du sol pour repérer les éboulis froids, grâce à une image landsat8 et au logiciel ENVI. Mais le résultat ne présente pas d'intérêt du fait du manque de précision de la résolution spatiale (30 m) et de l'existence de biais d'interprétation liés à l'exposition.

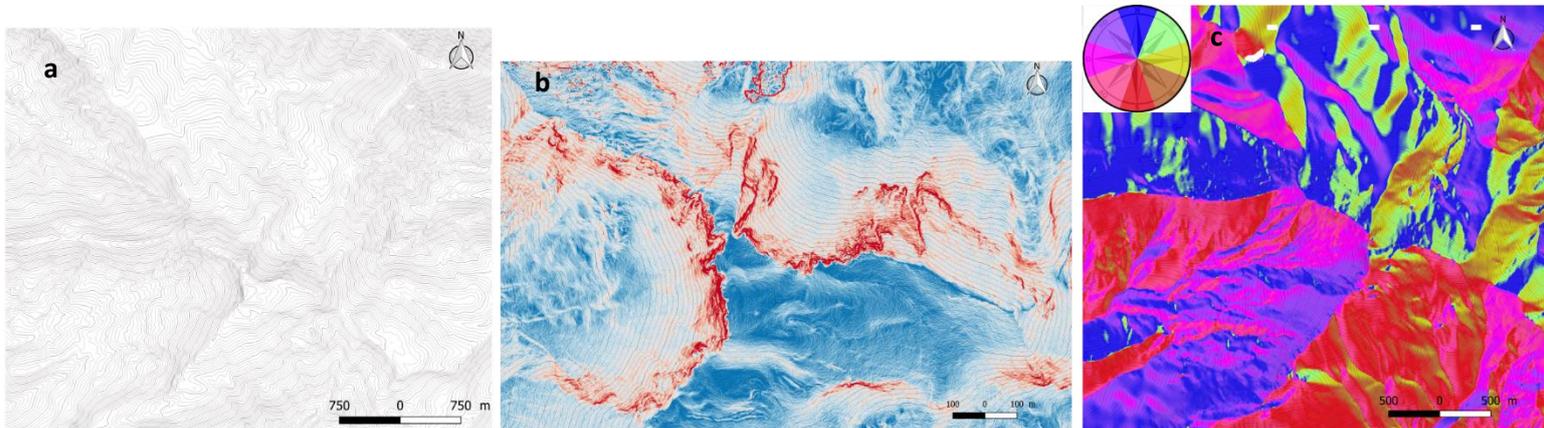


Figure 4 : **a)** Courbes de niveau de 50 m et 10 m couvrant la montagne des Monges, des courbes de niveau de 5 m, 2m et 1m furent également créées. **b)** Carte des pentes au niveau du sommet des Monges, on distingue les deux cirques glaciaires, ainsi que les contours d'un glissement du côté de Coste Belle et d'autres éléments intéressants. **c)** Carte d'exposition du site d'étude.

2) Travail de cartographie combinant outils SIG et mission terrain

Après avoir ajouté dans QGIS les supports cartographiques utiles, le travail de cartographie peut commencer. Cela passe par la délimitation des unités géomorphologiques. C'est dans ce travail de délimitation des formes que la diversité des supports se révèle très utile. Les supports présentent divers modes de représentation faisant ressortir des éléments différents. Par exemple, l'orthophoto est optimale pour repérer les éboulis ou les blocs erratiques, alors que le MNS est plus performant pour faire ressortir les moraines et les mouvements de terrain ; quant à la carte de pente, elle marque les gradins rocheux et autres escarpements. Ainsi, en croisant les différents supports cartographiques, l'analyse est plus fine (Fig. 5a).

C'est grâce à l'outil QGIS que l'objectif de créer une carte géomorphologique a été rempli. Cela passe par la digitalisation des formes et processus repérés sur les supports cartographiques. La digitalisation consiste à dessiner des formes à partir d'un support visuel. Les formes digitalisées étant spatialement référencées, cela permet de travailler à plusieurs échelles en ayant la garantie que les éléments cartographiés s'adaptent automatiquement. Grâce à ces outils numériques, il est donc plus facile de repérer les unités morphologiques qui composent le paysage. Repérer des unités morphologiques est nécessaire, mais l'objectif est d'identifier les processus et dynamiques à l'origine de leurs formes. Pour des formes simples comme les éboulis, il est possible à distance d'attribuer le processus géomorphologique à son origine, mais la plupart du temps, le terrain est indispensable à leur compréhension et leur identification.

Ainsi, rien ne remplace les observations terrain, qui sont fondamentales pour une identification robuste des processus à l'origine de formes et dépôts (Fig. 5b). Les éléments digitalisés à distance via les SIG sont toujours vérifiés sur le terrain. Au cours de ce stage, plusieurs missions terrain ont été organisées entre septembre 2019 et juillet 2020.

Une première mission terrain d'une semaine s'est déroulée en septembre 2019 au cours de laquelle j'ai découvert mon secteur d'étude en compagnie de mes encadrants Philip Deline et Laurent Astrade et de la commanditaire de l'étude, Myette Guiomar qui représente la Reserve Géologique de Haute-Provence. Durant ces sept jours nous avons arpenté les Monges avec l'objectif de repérer des formes puis d'identifier l'origine de ces formes à partir de la nature de leur dépôt, de leur positionnement, etc. Ainsi, l'identification d'un dépôt se fait sur le terrain à une échelle locale, puis si possible, ce dépôt est rattaché à une forme plus grande repérée sur SIG. Le terrain et les SIG sont donc complémentaires. L'arpentage du terrain s'est fait avec un extrait de carte TOP25 (IGN) et une orthophoto imprimée en A3, sur lesquelles ont été reportées les observations (Annexe 2). Elles ont servi de base pour la construction de l'ébauche de la carte géomorphologique numérique. En complément des supports papier, une application portable a été utilisée permettant de géolocaliser et commenter des points d'intérêt. Environ 90 points d'intérêt ont fait l'objet de commentaires. Ces points ont ensuite été exportés sur le SIG. Le maillage assez complet de ces points a aidé à la cartographie (Annexe 3). Ce maillage a notamment aidé à la délimitation de l'emprise glaciaire grâce à de nombreux points d'intérêt concernant la présence de till ou au contraire d'affleurement rocheux sans till.

Une seconde mission terrain fut menée en octobre pour continuer à arpenter le terrain et également pour capter des images avec le drone. La présence de planeurs à basse altitude et une erreur de pilotage ont avorté la campagne de récolte de photos.

Puis, une autre mission terrain a été menée en juin 2020, après le confinement, dans l'objectif de vérifier les éléments cartographiés. Lors de cette mission terrain, l'identification des formes était déjà bien avancée. Grâce aux connaissances acquises, il était alors possible d'interpréter les dynamiques qui ont mené à la formation de certains géosystèmes (Fig. 5c). En plus de Philip Deline et Laurent Astrade, l'encadrant de ce stage Philippe Schoeneich a eu la gentillesse de participer à cette mission terrain. Philippe Schoeneich a apporté un point de vue neuf et des débats salvateurs sur la nature des formes. Ainsi, le croisement des points de vue est primordial dans une discipline comme la géomorphologie où les analyses s'appuient certes sur des observations terrain concrètes, mais aussi sur une perception des formes que l'on sait subjective et sur des connaissances qui évoluent. De plus, la géomorphologie touche à des disciplines diverses et les formes peuvent résulter de processus et dynamiques tellement variés, qu'il est essentiel de s'appuyer sur les connaissances de plusieurs chercheurs pour affiner son analyse.

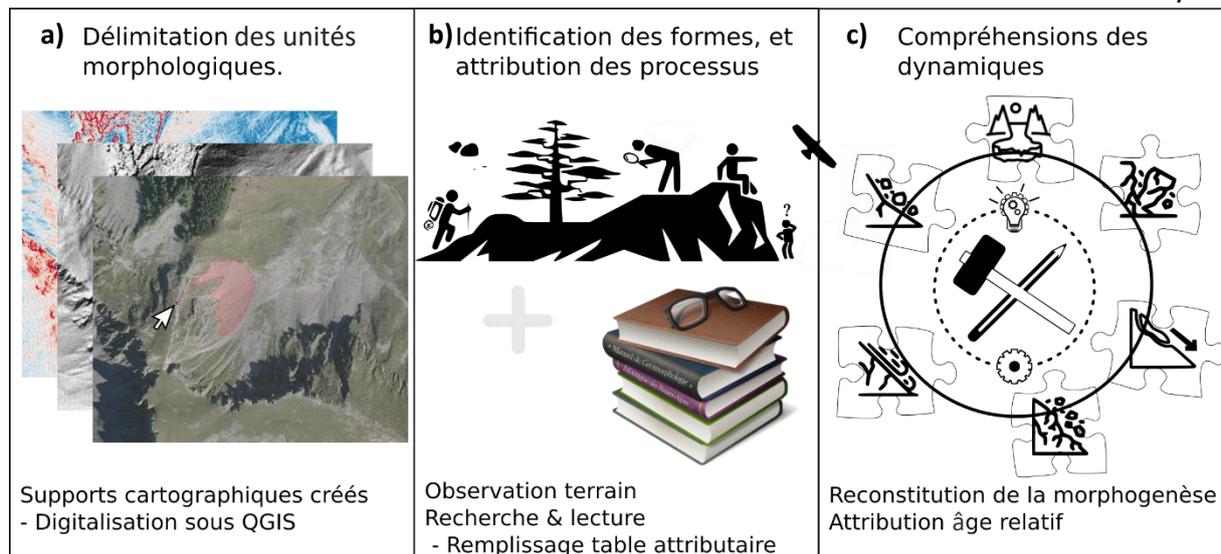


Figure 5 : Ce triptyque illustre les étapes de l'étude carto-géomorphologique. **a)** Une première partie de cartographie des formes à partir des supports créés (principalement à distance). **b)** Puis une phase d'identification des formes et de validation des éléments cartographiés, qui passe par beaucoup d'observation terrain ainsi que des lectures. **c)** Enfin, une phase d'articulation des éléments cartographiés et des observations terrain pour interpréter les dynamiques passées.

3) Légende de la cartographie géomorphologique

La cartographie géomorphologique consiste à représenter sur une carte les formes du relief. Il existe différents systèmes de légende. Dans le cadre de ce travail, la référence est la légende UNIL qui met l'accent sur la genèse des formes (cartes morphogénétiques). Les formes sont classifiées selon les processus qui leur ont donné naissance. (Exemple : Reynard, 1997 ; Schoeneich, 1998 ; Schoeneich et al., 1998). Une couleur est associée à chaque processus. Dans cette légende les à-plats de couleurs correspondent aux processus et les figurés

interprétatifs soulignent les formes ; ceux-ci sont dessinés de la même couleur que le processus qui leur a donné naissance. La carte géomorphologique accompagnée de sa légende est visible en [annexe 4](#).

Les éléments digitalisés peuvent prendre la forme de polygones qui délimitent les unités morphologiques, ou bien de lignes et autres figurés ponctuels qui aident à l'interprétation en soulignant l'empreinte laissée par un processus dans le paysage ([Fig. 6](#)). Chaque forme et dépôt représenté par des polygones, des lignes ou des points constitue une entité à laquelle peuvent être rattachés des attributs.

La table attributaire de la couche regroupant les polygones, est composée de six colonnes apportant des informations sur la forme, son processus, son âge approximatif etc. Un extrait de la table attributaire est visible en [annexe 5](#).

Compte tenu de l'objectif d'avoir une carte détaillée, l'échelle de digitalisation est précise ($> 1/5000$). Plus de 1000 polygones ont été digitalisés ainsi que de très nombreux figurés interprétatifs.

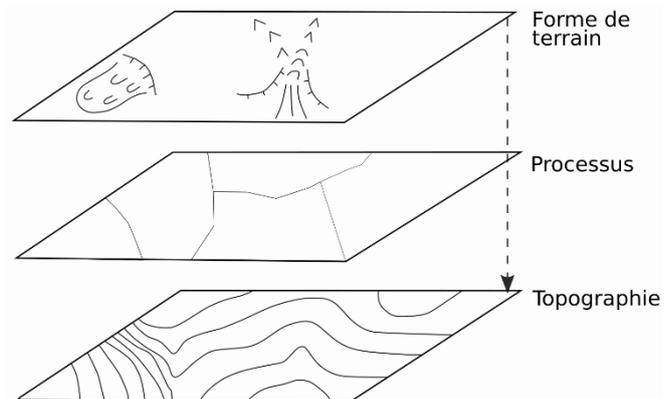


Figure 6 : Superposition de différentes couches SIG nécessaire à la construction d'une carte géomorphologique. (Inspiration UNIL réalisation Armando)

4) Reconstitution des stades glaciaires et des lignes d'équilibre des paléo-glaciers

Au départ, les connaissances sur la répartition des dépôts glaciaires étaient très réduites. Néanmoins, différentes méthodes nécessitant peu de connaissances du paléo-glaciaire ont permis d'estimer l'altitude de la ligne d'équilibre glaciaire pour le maximum würmien.

Par exemple, la méthode de Lichtenecker-Visser, selon laquelle la limite des neiges correspond à l'altitude de l'apparition des moraines latérales ([Paterson, 1981](#) ; [Munroe & Mickelson, 2002](#)) ; ou bien la méthode THAR qui permet de reconstituer les LEG à partir d'un rapport de dénivellation et les altitudes minimales et maximales atteintes par le glacier ; cette dernière a été appliquée sur le secteur de Communaresse. ([Meierding, 1982](#) ; [Burbank & Fort, 1985](#) ; [Nesje, 1992](#) ; [Munroe & Mickelson, 2002](#)).

D'autres méthodes ont été testées pour estimer la position du front des glaciers. Par exemple, la méthode de [Corbel \(1962\)](#) permettant d'estimer la position du front glaciaire grâce au dépôt existant a été testée à Clapouse ([Lliboutry, 1965](#)). Enfin, une méthode expérimentale a été testée sur Coste Belle qui déduit un intervalle dans lequel a dû se stopper le glacier en croisant les valeurs de pente moyennes des glaciers ([Gardent, 2014](#)) avec la pente topographique actuelle. Le croisement des résultats de ces différentes méthodes a permis d'avoir une première idée de l'importance de la glaciation aux Monges.

Vers la fin du stage, le nombre de moraines repérées étaient bien plus nombreuses et l'étendue glaciaire mieux connue. Ces connaissances supplémentaires ont permis d'utiliser les outils ELA et GlaRe ([Pellitero et al., 2015, 2016](#)) qui sont des applications ArcGIS novatrices et scientifiquement reconnues, très utiles pour mieux connaître les paléo-glaciers ([Fig. 7](#)).

ELA estime à partir d'une emprise glaciaire et d'un MNT la ligne d'équilibre glaciaire par différentes méthodes ([annexe 6](#)). Les reconstitutions de glaciers sont largement utilisées dans les études paléo-environnementales, et GlaRe est une nouvelle méthode semi-automatisée pour générer des reconstitutions de glaciers. GlaRe, est une boîte à outils codée en Python et fonctionnant sous ArcGIS. Cette boîte à outils fournit des outils pour générer l'épaisseur de la glace à partir de la topographie du lit (MNT) le long d'une ligne d'écoulement paléo-glaciaire (flow line). Pour cela, il faut appliquer aux « flow lines » la loi d'écoulement standard pour la glace, qui prend en compte des contraintes de cisaillement spécifiques à chaque glacier. Au final, cet outil génère la surface 3D du glacier sous la forme d'un raster ([Annexe 7](#)).

La limite de cette méthode est que l'on ne connaît pas précisément la topographie du lit à l'époque où s'étendait le glacier que l'on souhaite reconstituer. Néanmoins, la carte géomorphologique réalisée apporte des connaissances sur la localisation des dépôts d'accumulations glaciaires. Bien que l'épaisseur de ces dépôts ne soit pas connue précisément, il est possible d'estimer approximativement le nombre de mètres à retirer pour que la topographie ressemble plus à la topographie du Pléniglaciaire. Des outils SIG permettent de modifier le MNT.

Le calcul de la ligne d'équilibre glaciaire (LEG) a été fait pour chaque stade glaciaire. Les stades glaciaires sont obtenus en reliant de manière logique les moraines restantes. L'utilisation de GlaRe pour la reconstitution 3D du glacier s'est fait uniquement pour le maximum glaciaire sur les 3 sites (Communaresse, Clapouse, Coste Belle).

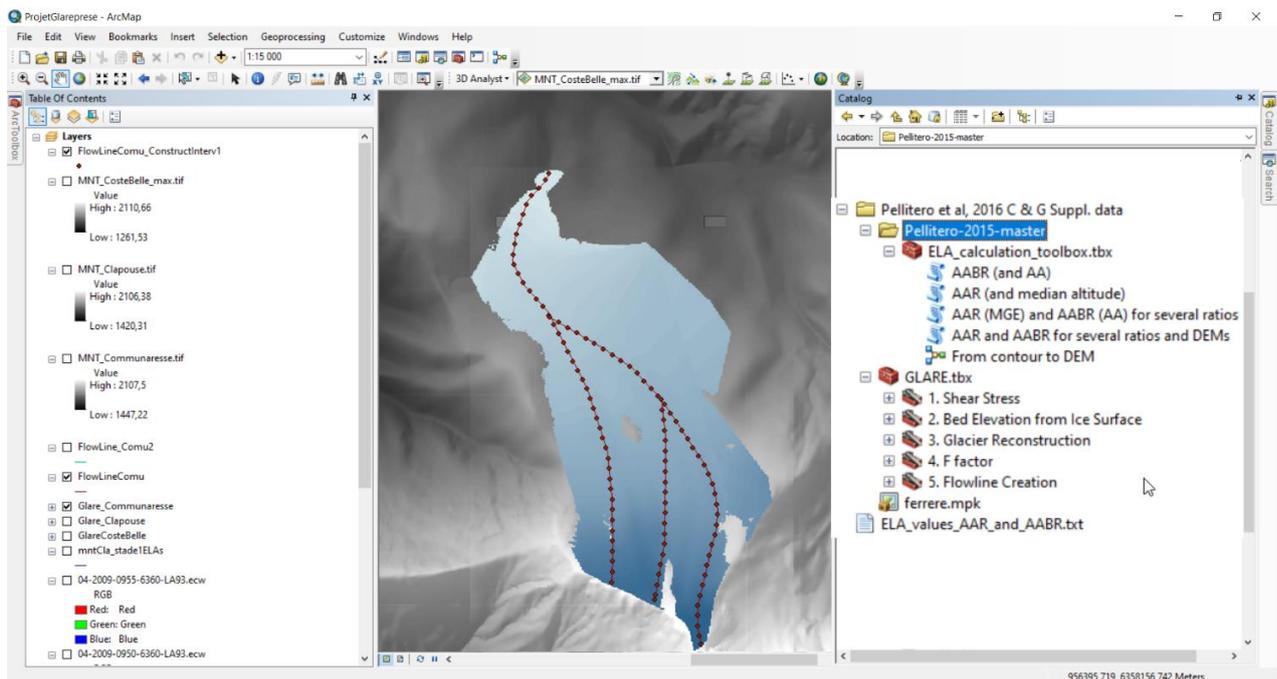


Figure 7 : Capture d'écran montrant l'interface d'ArcGIS avec à droite la combinaison d'outils créés par Pellitero et al (2015 & 2016) pour reconstituer un paléo-glacier en 3D et estimer des lignes d'équilibre glaciaire.

Partie 3 : Présentation des formes et processus modelant le paysage des Monges

Dans un esprit de synthèse, la présentation des unités morphologiques ne sera pas exhaustive ; de plus l'impact de l'homme sur le paysage ne sera pas développé.

La partie suivante regroupe dans trois parties distinctes les formes et processus qui composent les Monges. La première partie regroupe les formes et processus issus d'une évolution sous climat froid. La deuxième partie regroupe les formes et processus qui modifient ou ont modifié les versants. Enfin, la troisième partie regroupe les formes et processus d'érosion et l'évolution récente du paysage.

1) Formes et processus issus d'une évolution sous climat

froid (moraines, glaciers rocheux, solifluxion)

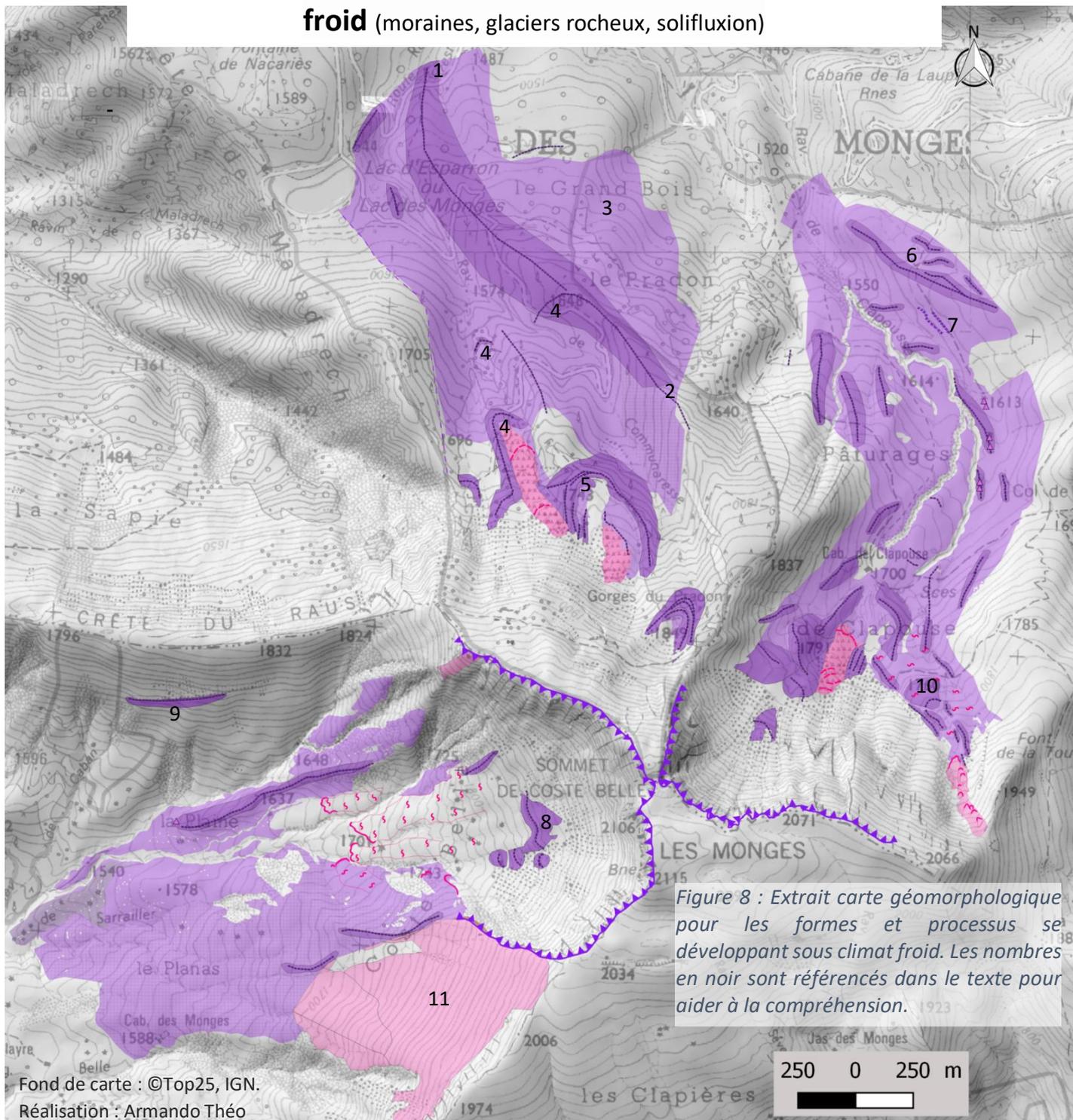


Figure 8 : Extrait carte géomorphologique pour les formes et processus se développant sous climat froid. Les nombres en noir sont référencés dans le texte pour aider à la compréhension.



Les formes liées à une évolution sous climat froid tiennent une place importante et expliquent beaucoup du relief actuel. La présence de trois bassins glaciaires dont deux cirques, l'élargissement des vallées ainsi que de nombreuses moraines et dépôts de till témoignent de l'importance du processus glaciaire dans cette région. L'étude cartographique révèle néanmoins que le processus périglaciaire occupe une part non négligeable du paysage actuel en remaniant entre autres les dépôts glaciaires.

Plus de vingt moraines ont été identifiées et les dépôts glaciaires couvrent environ un quart de la carte géomorphologique. La moraine la plus basse identifiée atteint 1475 mètres d'altitude (Fig.8_(1)), et les moraines frontales les plus hautes se situent vers 1860 mètres pour les trois secteurs (Communaresse, Clapouse et Coste Belle).

Du côté de Communaresse une grande moraine latérale droite descend jusqu'à 1480 mètres d'altitude, elle prend appui sur une crête molassique structurale. Les premiers blocs calcaires « allochtones » apparaissent sur cette crête structurale vers 1750 mètres (Fig.8_(2)). Il ne reste plus de trace du pendant gauche de cette moraine. Néanmoins, la limite d'extension glaciaire du côté gauche a pu être déterminée dans un intervalle entre une coupe présentant une pétrologie diversifiée (calcaire + molasse), considérée comme étant du till et un affleurement structural (annexe 8). La limite glaciaire du côté gauche peut également se déduire par correspondance des altitudes avec la moraine latérale droite. Plus bas, à l'ouest du lac des Monges il n'existe aucune trace de till. D'après les dépôts de till le glacier a empiété sur la bordure est de l'actuel lac, puis tourné en direction du Ravin des Goures (Nord) (Fig.8_(1)).

A l'est de la grande moraine latérale droite, s'étend le Grand Bois dans lequel du till est présent (Fig.8_(3)). Ce till a pu être déposé avant que la grande moraine latérale droite n'ait été construite ou bien le glacier a débordé la moraine latérale une fois celle-ci érigée. Au centre du secteur, il y a des moraines latéro-frontales (Fig.8_(4)). Vers 1760 mètres un replat est encerclé par une grande moraine latéro-frontale ; il est probable que ce replat résulte d'une accumulation de dépôts glaciaires qui bute contre un éperon molassique (Fig.8_(5)). Une grande partie des observations commentées précédemment sont illustrées dans la Figure 9 ci-dessous.

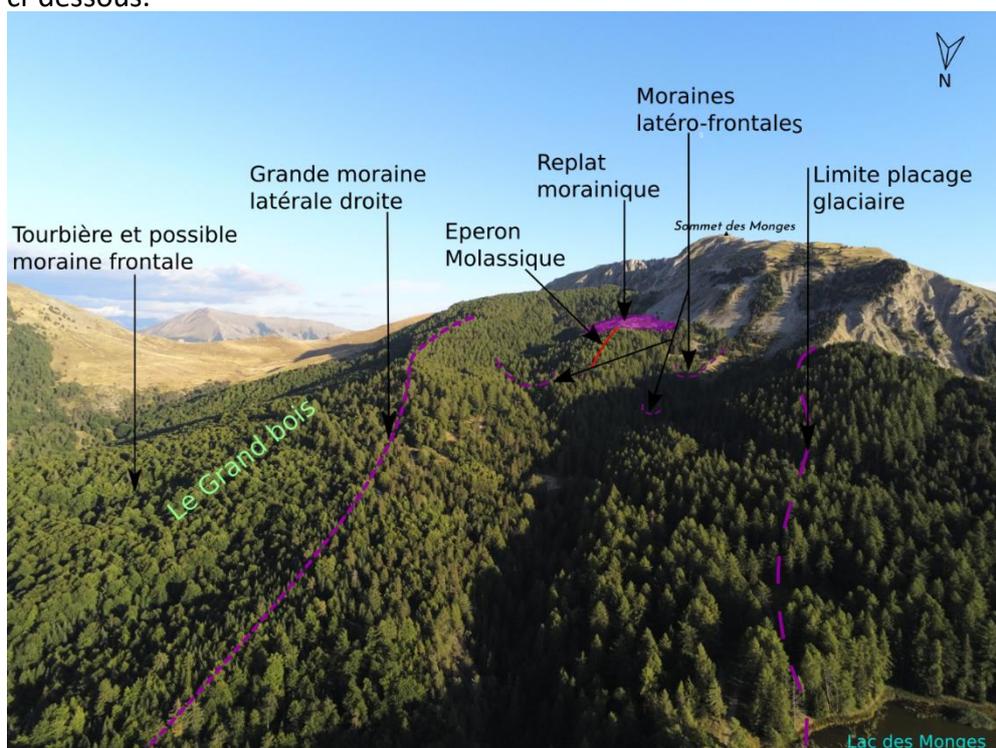


Figure 9 : Le glacier de Communaresse a débordé dans le secteur du Grand Bois, mais même lors du maximum glaciaire l'éperon molassique (trait rouge) était trop haut pour être couvert par le glacier, d'ailleurs son sommet ne présente aucune trace de till.

Du côté de Clapouse, les moraines sont nombreuses. A l'extrémité nord du pâturage de Clapouse des moraines et des blocs calcaires se situent sur un replat environ 30 mètres au-dessus de la vallée ; cette formation correspond vraisemblablement à un maximum glaciaire (Fig.8_(6)). Sur le bord de cette forme, des alignements de blocs témoignent d'un niveau glaciaire inférieur (Fig.8_(7) ; Fig. 10). Il est probable que ces blocs aient été transportés à la surface du glacier, puis déposés sur le bord de cette accumulation lors du retrait glaciaire.

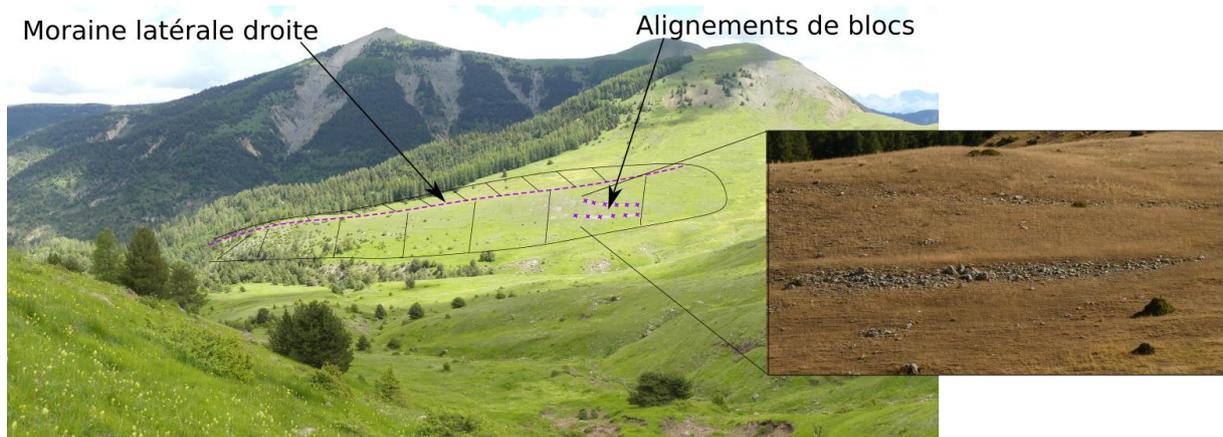


Figure 10 : Vue depuis la crête ouest du pâturage de Clapouse.

En remontant vers le cirque de Clapouse, six blocs erratiques sont également positionnés du côté droit de la vallée. Quatre de ces blocs se situent au sommet de moraines, ils marquent donc les limites de l'emprise glaciaire du stade auquel ils appartiennent.

Au pied des cirques, plusieurs moraines frontales peuvent être qualifiées de bastions compte tenu de leur taille. Du côté de Clapouse, le bastion nommé « Bast2 » repose sur un affleurement structural (Fig. 11). Du côté de Coste belle, il y a également une grande moraine frontale qui témoigne d'une période où le glacier était confiné sur les versants du cirque (Fig.8_(8)).

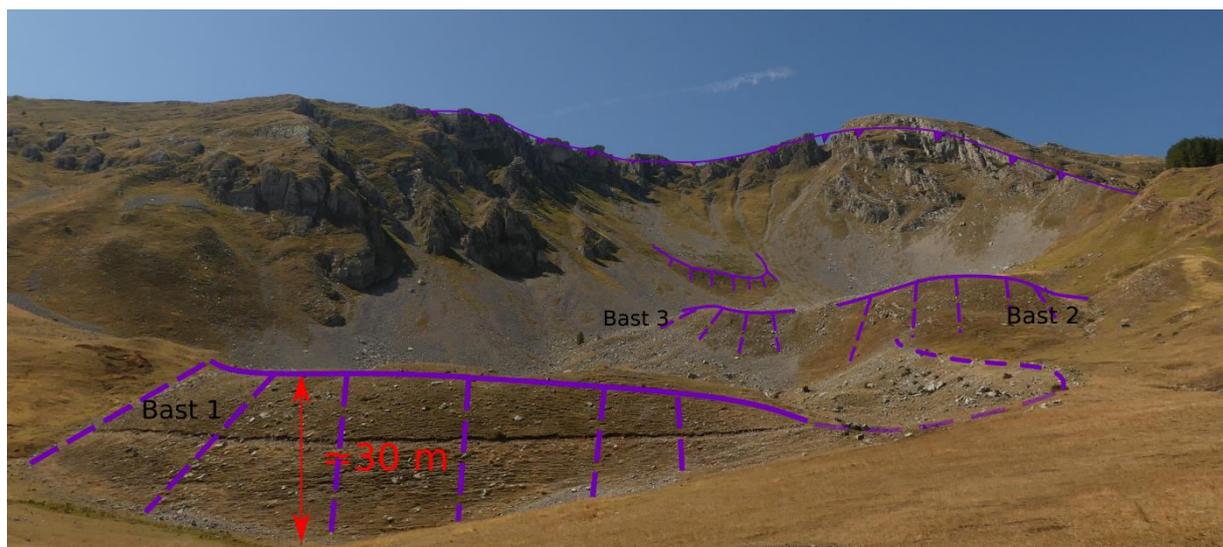


Figure 11 : Cirque de Clapouse avec à ses pieds plusieurs moraines frontales (bastion) témoignant des phases de recul glaciaire.

Hormis l'impressionnant cirque glaciaire, les indices d'une présence glaciaire sont rares du côté de Coste Belle. Le substrat marneux très sensible à l'érosion est probablement la cause principale de la rareté des moraines. Néanmoins, c'est sur ce secteur qu'a été identifiée la moraine latérale la plus périphérique par rapport au lit du glacier (Fig.8_(9) ; Fig. 12). Cette moraine latérale gauche se situe plus de 130 mètres au-dessus de l'ancien lit glaciaire. Elle présente un talus externe d'environ 180 cm de haut, mais son flanc interne est dans la continuité de la pente.



Figure 12 : Photographie de la moraine latérale droite la plus périphérique du secteur de Coste Belle.

Dans cette étude géomorphologique, l'identification des formes périglaciaires a posé quelques problèmes. En effet, des processus comme la solifluxion se surimposent à d'autres dépôts et il est parfois difficile de déterminer quel processus mettre en avant entre la solifluxion superficielle ou le processus responsable du dépôt originel. La distinction entre les dépôts de glacier et ceux de glacier rocheux est également source de confusion, car ces formes se développent au même endroit à des périodes proches et possèdent des dynamiques communes incluant la glace.

Il semble y avoir deux glaciers rocheux fossiles du côté de Communaresse (Fig. 13a) et un autre dans le cirque de Clapouse (Fig. 13b) ; ils se sont propagés dans des dépôts glaciaires au milieu de moraines. L'identification repose sur une présence importante de blocs, ce qui limite le développement de végétation. De plus, ces dépôts sont allongés en forme de langue et leur surface est affectée par des bombements (Fig. 8).

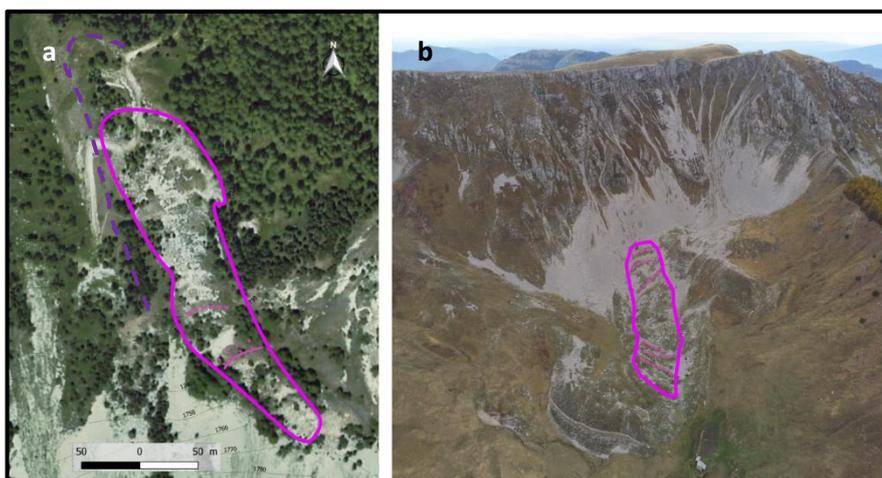


Figure 13 : **a)** Glacier rocheux du côté de Communaresse; la forme entourée en rose est le glacier rocheux, son aspect chaotique et minéral le distingue de la moraine à sa gauche qui est lisse et végétalisée. **b)** Le glacier rocheux de Clapouse présente de nombreux bombements qui témoignent de son déplacement dans le sens de la pente.

Parmi les processus associés au climat froid, il y a **la solifluxion**, mais contrairement au glacier ou au glacier rocheux ce processus est toujours actif. La solifluxion correspond à un déplacement lent de formations détritiques meubles sur une pente sous l'effet des cycles gel-dégel (Bertran & Coutard, 2004). Ce processus est souvent lié à la présence glaciaire car les dépôts de till et un climat froid sont propices à l'apparition de ce phénomène. Aux Monges, il y a plusieurs coulées de solifluxion qui forment des lobes (Fig. 14a). Les fronts de ces lobes font de 50 centimètres à 1 mètre. Du côté de Coste Belle le déplacement de ces formes a été mesuré en comparant l'évolution de la position de points de repère entre 1949 et 2012. Il en ressort que le déplacement n'est pas uniforme, mais en moyenne cette masse s'est déplacée de 4.2 mètres (± 1 m) en 60 ans environ, soit 7cm/an (Annexe 9). Parfois, la solifluxion ne produit pas de lobe, pourtant une couche superficielle est mise en mouvement. C'est le cas dans le vallon à l'est du cirque de Clapouse, qui est en grande partie soumis à la solifluxion en nappe ce qui donne un aspect fluant aux dépôts de ce vallon (Fig. 14b). Des moraines latérales et frontales sont présentes dans ce secteur (Fig.8_(10)), la solifluxion les a donc remaniées. Cette mise en mouvement superficielle est révélée par la couverture de l'extrémité droite de la moraine frontale (1740 m).



Figure 14 : A gauche photos de lobes de solifluxion. A droite photo montrant la solifluxion en nappe donnant un aspect fluant aux dépôts descendant du vallon est de Clapouse. La solifluxion a drapé l'extrémité droite du bastion morainique (1705m).

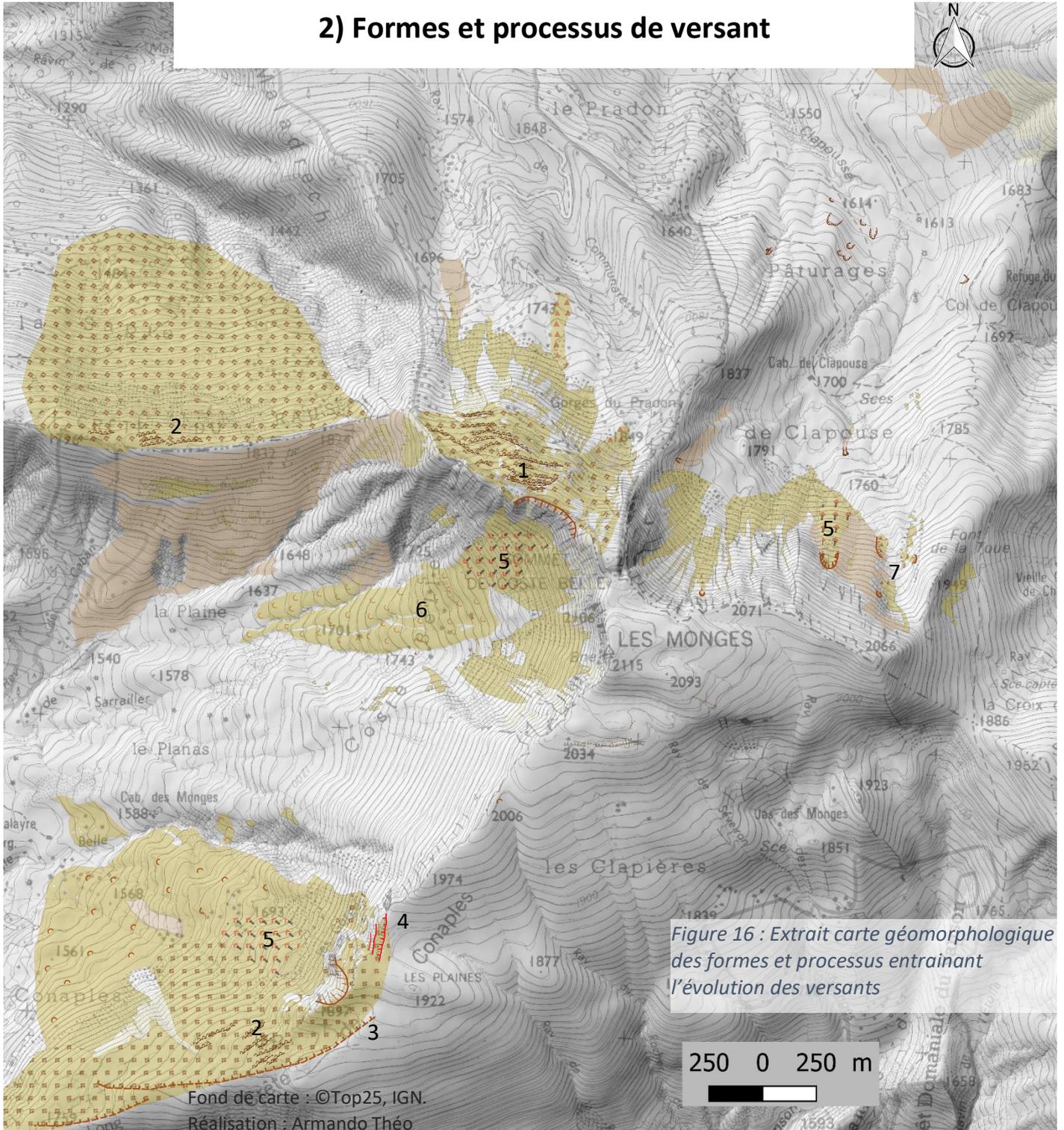
Un versant régularisé d'environ 25 ha se développe à la base de la corniche tithonique de Coste Belle (Fig.8_(11)). Cette forme topographique se caractérise par une pente régulière d'environ 27°. Ce versant régularisé est constitué de blocs cimentés de taille hétérogène. L'induration de ce dépôt par un ciment calcitique témoigne d'une certaine ancienneté du processus, bien que la cimentation soit rapide dans le calcaire (Lehmann, 1959). Compte tenu de la dureté du dépôt, il est assimilable à une brèche de pente. Il semble exister une stratification révélée par l'érosion qui individualise des strates. Cette formation a une épaisseur pluri-métrique (Fig. 15).



Figure 15 : A gauche, photo du versant régularisé au sud de Coste Belle. Photos du dépôt de brèche constituant le glacis du versant sud de Coste Belle.

La faiblesse de la pente (27°) amène à penser que cet éboulis consolidé n'est pas uniquement gravitaire ; en effet, une pente d'éboulis devrait être d'environ 35° . L'hypothèse retenue est que cet éboulis a été soumis à des processus de solifluxion, la grande fréquence de cycles gel-dégel et des apports de neige renouvelés fournissant l'eau nécessaire à une cryoclastie et à une cryoreptation actives. La formation des pentes d'éboulis soliflués se situerait donc pendant les phases froides et humides qui ont été les plus durables au cours du dernier cycle glaciaire (Bertrand *et al.*, 1992). Ce type de condition froide et humide est favorable pour la production de matériaux éboulisés et aussi pour l'affirmation de processus de solifluxion.

2) Formes et processus de versant



Les formes et processus entraînant l'évolution des versants

	DGPV (Déformations gravitaires profondes de versant)		Talus d'éboulis		Crestal graben
	Glissement rocheux		Colluvion et éboulis végétalisé		Niche de glissement
	Glissement coulée		Zone en érosion		Gradin de glissement
	Dépôt d'éroulement		Erosion scarp		Fissure
	Dépôt d'éboulement		Niche d'arrachement		

Les versants des Monges sont affectés par divers mouvements de terrain. Le versant au sommet du secteur de Communairesse est marqué par plusieurs gradins de glissement pouvant dépasser un mètre de haut, avec à leur base des blocs calcaires éjectés qui témoignent d'une déformation profonde de ce versant (DGPV) (Crosta *et al.*, 2013) (Fig.16_(1) ;Fig.17).

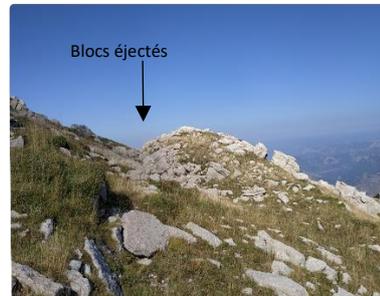


Figure 17 : Gradin de glissement sur le versant de Communairesse.

Le versant sud de Coste Belle et du Reynier présentent également des contre-pentes qui témoignent très certainement d'une instabilité du versant rocheux (Fig.16_(2)). En plus des contre-pentes, d'autres formes témoignent de l'instabilité du versant sud de Coste Belle. En effet, ce versant est dominé par une crête dédoublée (graben de crête) (Fig.16_(3)). De plus, une partie de la paroi est en basculement ce qui conduit à la formation de colonnes rocheuses ; ce basculement est précédé par la formation de fissures et d'affaissements qui créent des gradins rocheux pluri-métriques (Fig.16_(4) ; Fig. 18).

Ainsi, les déformations profondes de versants rocheux semblent toujours actives aujourd'hui, il s'agit de processus lents mais avec une continuité qui leur confère un fort pouvoir morphogène à long terme. Certaines études expliquent l'apparition de ces phénomènes comme une réponse à l'état de déséquilibre causé par la déglaciation. (Hormes *et al.*, 2008, McColl, 2012 ; Ballantyne *et al.*, 2014 ; Coquin *et al.*, 2015 ; Blondeau, 2018).

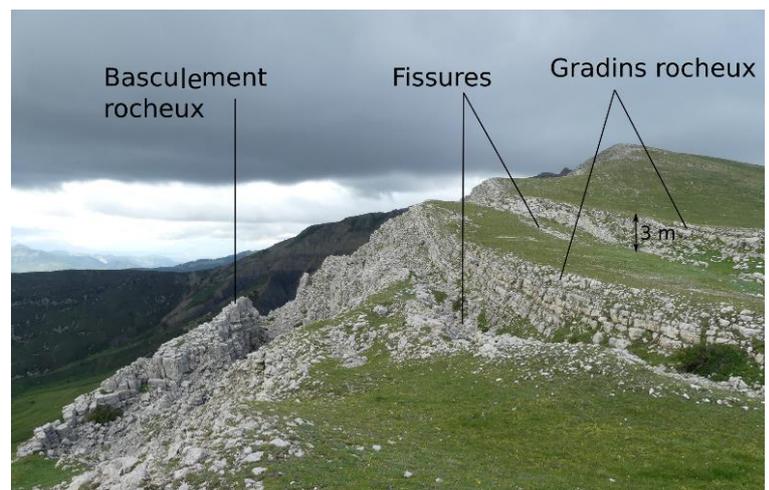


Figure 18 : Combinaison des formes traduisant l'instabilité du versant rocheux. (Versant sud de Coste Belle)

Les versants des Monges sont aussi marqués par des glissements rocheux qui présentent des surfaces de rupture continues et bien délimitées contrairement aux déformations gravitaires profondes où les surfaces de rupture sont plus diffuses. A Clapouse et Coste Belle figurent des dépôts de glissements rocheux (Fig.16_(5)). La différence de netteté de leur dépôt et surtout de leur niche d'arrachement indique qu'ils ne se sont pas déclenchés à la même époque. Ces dépôts se caractérisent par une forme convexe parfois déformée par des bombements. Le glissement rocheux aux formes les plus nettes se situe sur le versant sud de Coste Belle ; son dépôt compact surplombé d'une zone plane suggère qu'il s'agit d'un glissement rotationnel.

Le glissement à banc rocheux du cirque de Coste Belle a été identifié comme tel, car cette masse est composée de quelques gros blocs calcaires (<20 m³) ayant gardé leur intégrité structurale bien qu'ils soient à plus de 170 mètres de la corniche calcaire. Ainsi, ces blocs n'ont pas pu se déplacer par éboulisation car les chocs auraient détruit leur intégrité structurale ; un glissement dans la terre noire imbibée est donc plus plausible. A la base de ce glissement à banc rocheux, s'étend un glissement-coulée d'environ 1150 mètres

(Fig.16_(6)). L'identification de cette forme repose sur plusieurs arguments. D'une part, la présence troublante d'un talus de 3 mètres qui délimite la partie sud-est de ce dépôt ; le glissement-coulée est la seule explication trouvée pour expliquer ce talus (Fig. 19a). D'autre part, l'érosion torrentielle a profondément incisé ces dépôts faisant ressortir une stratification, avec à la base une couche de glissement composée exclusivement de marnes noires délitées et au-dessus une couche transportée de

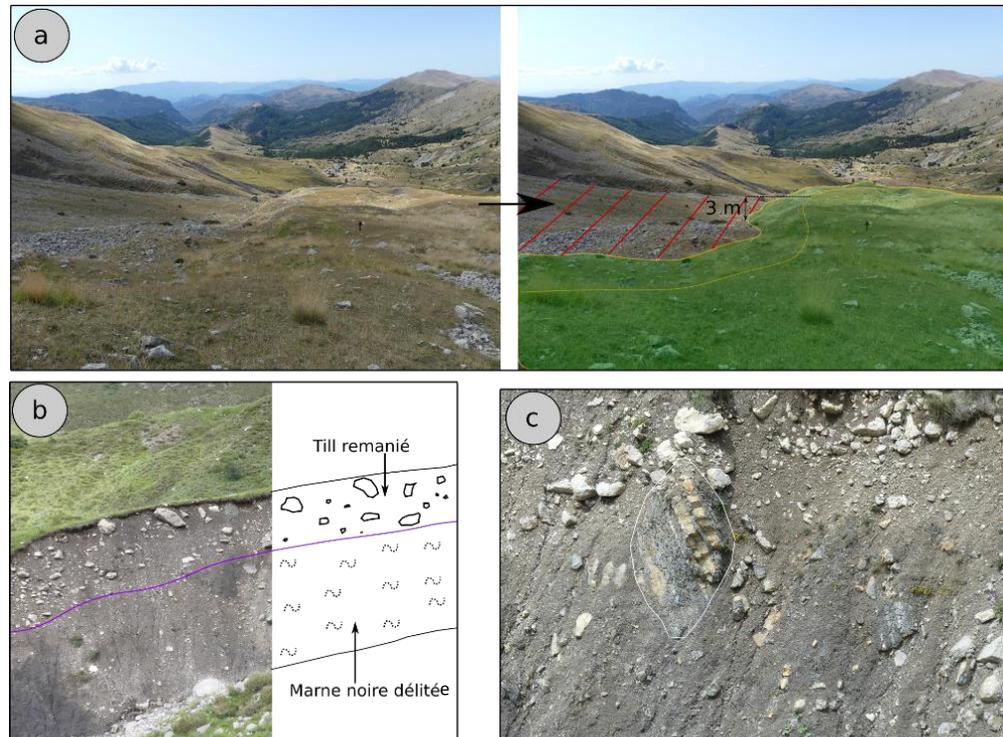


Figure 19 : Indices d'un glissement coulée.

blocs emballés dans une matrice (Fig. 19b). Dernier argument en faveur d'un glissement-coulée, la présence d'un bloc marno-calcaire emballé qui a gardé son intégrité structurale (Fig. 19c) ; seul un déplacement lent dans une masse meuble a pu transporter ce bloc sur des centaines de mètres en préservant la fragile stratification marno-calcaire. Il est probable que ce glissement ait remanié des dépôts glaciaires. Il est bien connu que la terre noire est très favorable au glissement (Bondeau, 2018). Le déplacement de la partie amont de cette masse a été mesuré entre 1949 et 2012, le résultat est un déplacement de 7 cm par an en moyenne. Il est possible que ce déplacement concerne uniquement la couche superficielle affectée par la solifluxion (Annexe 9).

Sur le replat à l'aval du DGPV de Communairesse s'étend un écroulement rocheux. Compte tenu du rapport H/L anormalement bas au vu du volume (< 100 00 m³), il est possible que cet écroulement se soit propagé sur de la neige ou de la glace (Annexe 10).

Enfin, les versants des Monges évoluent de manière lente mais chronique par l'éboulisation. L'intérieur des cirques glaciaires sont couverts de tabliers d'éboulis sur lesquels se propagent des éboulements. Quelques éboulements affectent aussi la roche faiblement cohésive du vallon à l'est de Clapouse (Fig16_(7)). Les dépôts meubles comme le till sont affectés par de petits glissements superficiels ou bien des coulées boueuses comme dans le pâturage de Clapouse (Annexe 11).

3) Erosion et évolution récente du paysage

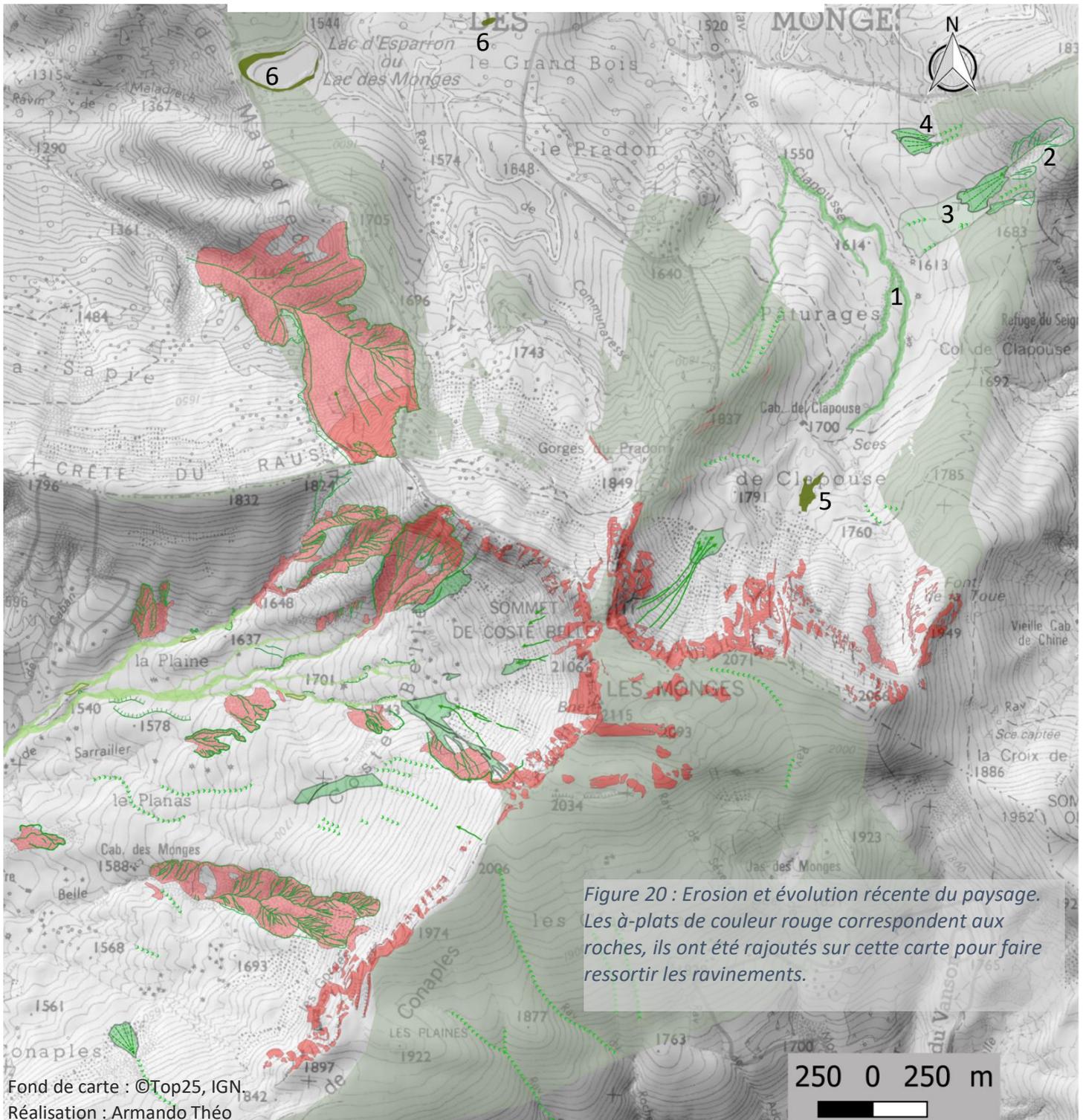


Figure 20 : Erosion et évolution récente du paysage. Les à-plats de couleur rouge correspondent aux roches, ils ont été rajoutés sur cette carte pour faire ressortir les ravinelements.



Des processus érosifs et des évolutions récentes ont modifié le paysage des Monges. En matière d'érosion la différence est flagrante entre Coste Belle et les deux autres secteurs du fait de leur lithologie variée.

Du côté de Clapouse et de Communairesse la circulation de l'eau est beaucoup moins prégnante. L'incision des cours d'eau est bien moins importante, les berges sont moins raides et leur lit n'est pas composé de gros blocs comme à Coste Belle. L'eau circule de manière intermittente dans des ravines à lit étroit (Fig.20_(1)). Ces secteurs étant principalement calcaires, il est probable que la circulation de l'eau se fasse en grande partie de manière souterraine. En témoignent plusieurs sources présentes à Clapouse et Communairesse et absentes du côté de Coste Belle. Du côté de Coste Belle, les marnes noires imperméables limitent les circulations souterraines de l'eau. Ainsi, quand on compare l'hydromorphologie de Coste Belle aux autres secteurs, on pourrait croire qu'ils n'ont pas subi les mêmes conditions climatiques ; en réalité, le climat est similaire, mais la réponse morphologique a été différente car le substrat est différent (Fig. 21).



Figure 21 : Photos illustrant la différence hydromorphologique entre Coste Belle et Clapouse.

Aux Monges, la majorité des traces de ravinement se développe dans les marnes noires et forme donc des badlands (Bryan *et al.*, 1998). La seule exception se trouve dans le secteur de Clapouse, où la roche composée d'argilite et de dolomie présente un profil de ravinement (Fig.20_(2)). Sinon les ravinements de type badlands aussi appelés roubines sont spécifiques au secteur de Coste Belle (Annexe 12).

A l'aval du ravinement de Clapouse s'étend un large dépôt de ravinement totalement végétalisé sur lequel s'est surimposé un autre dépôt de ravinement plus récent, en grande partie végétalisé (Fig.20_(3)). Ces dépôts témoignent de périodes où le ravinement était plus actif qu'aujourd'hui. A l'ouest de ce ravinement, le versant est incisé par deux petites ravines qui ont alimenté des cônes de déjection (Fig.20_(4)). La couverture végétale importante suggère là encore que ces cônes ne sont plus trop alimentés en matériaux.

Les tabliers d'éboulis du cirque de Clapouse et Coste Belle sont parcourus par des processus appelés coulées de débris (Hétu *et al.*, 1995). Une coulée de débris peut se former suite à des précipitations intenses ou plus rarement par la fonte brutale de neige. C'est pourquoi il s'agit d'un phénomène essentiellement estival. Ces écoulements sont assez bien chenalisés dans leurs parties amont mais ont tendance à s'étaler en aval. Les coulées de débris se caractérisent

par un chenal bordé par des levées et se terminent par un dépôt de débris en forme de langue ou d'éventail ([Annexe 13](#)).

Le ravinement, les coulées de débris et les ravines prélèvent des matériaux qu'ils déposent à l'aval. Ces dépôts ont été réunis sous une même légende sous le nom de dépôt de ravinement. Dans les évolutions récentes, il y a les processus organogènes qui comprennent la formation de sol sur de la roche en place et le comblement par la végétation (atterrissement) de zones humides. Ces processus se poursuivent aujourd'hui. La montagne des Monges accueille deux zones humides et un lac fossile (1720 m) posé sur des dépôts morainiques à l'arrière du grand bastion de Clapouse ([Fig20_\(5\)](#)). L'emplacement du lac fossile est rendu bien visible grâce à la sédimentation qui a aplani le terrain dans une zone présentant de nombreux bombements ([Annexe 14](#)).

Ensuite, il y a le lac des Monges qui était à l'origine un pré humide, et à la même altitude (1541 ± 2m) mais environ 700 mètres plus à l'est se trouve une deuxième zone humide intacte nommée petit lac des Monges ([Fig.20_\(6\)](#)). Tous deux se situent dans une dépression de molasse rouge.



Figure 22 : Photos montrant à gauche la tourbière aussi appelée « Petit lac des Monges » ; à droite le grand lac des Monges.

Tout le plateau sommital des Monges, ainsi que les crêtes sont nommés « sols sur roche en place ». En effet, toutes les zones sommitales où l'effet de dominance est faible sont peu soumises au colluvionnement, de ce fait, le sol se développe principalement sur une couche d'altération de la roche en place. Plus généralement le figuré « sol sur roche en place », en vert clair sert à cartographier des zones recouvertes d'un sol, voire même de forêts quand la roche-mère se trouve à faible profondeur ([Fig 23](#)). Cette dénomination concerne les zones qui ont été épargnées par la présence glaciaire ou tout du moins par les dépôts glaciaires. Ces zones de végétation recouvrent parfois des surfaces qui ont subi l'érosion glaciaire, karstique ou gravitaire, mais ces processus n'étant plus actifs, le processus « organogène » est considéré comme dominant.



Figure 23 : Photo illustrant la légende : "sol sur roche en place".

Partie 4 : Reconstitution de la Morphogenèse

1) Reconstitution des stades glaciaires, calcul des LEG et tentative de calage chronologique

Le calcul des lignes d'équilibre glaciaire repose sur l'outil ELAs (Pellitero *et al*, 2015). Cet outil calcule les lignes d'équilibre par différentes méthodes (MGE, AAR, AA, AABR). Pour cette étude, la LEG a été calculée en faisant la moyenne des résultats obtenus par les différentes méthodes. La LEG a été calculée pour chaque stade glaciaire reconstitué. Ces stades ont été reconstitués à partir des relevés cartographiques (moraine et till) ; de plus, le stade maximal (stade1) s'appuie également sur les résultats de modélisation 3D (GlaRe). La reconstitution des stades consiste à relier les moraines qui sont supposées appartenir à la même « époque » (Annexe 15 & 15a). La reconstitution de l'emprise des glaciers n'est pas une science exacte, mais il semble que du côté de Clapouse, le glacier ait connu plus de cinq stades, du côté de Communaresse les relevés suggèrent cinq stades bien indépendants, du côté de Coste Belle il ne reste plus que les vestiges morainiques appartenant à quatre ou cinq stades. Le nombre important de stagnations voire de réavancées s'explique par une réponse quasi-immédiate des petits appareils glaciaires lors des changements de conditions climatiques. Pour Clapouse et Communaresse, les stades 2, 3 et 4 semblent être des stades de stagnation glaciaire ; en témoigne l'absence ou la taille réduite des moraines frontales, ainsi que les dépôts des linéaires de blocs et des méga blocs erratiques. Les stades 5, 6, 7 présentent les signes de légères récurrences, en effet les moraines frontales sont plus marquées, elles forment même parfois des bastions morainiques. Du côté de Coste Belle, la récurrence correspond au stade4.

Les résultats obtenus sur l'altitude des LEG sont difficiles à interpréter du fait d'un manque de stade daté dans les glaciers locaux de la région. La rareté de données de référence complique le calage chronologique. La montagne des Monges est assez exceptionnelle dans la région, c'est le plus haut sommet des Préalpes du Sud et l'un des seuls où les traces d'un glacier soient identifiées. Cette singularité complique fortement l'estimation de l'âge des stades. Les données existantes concernent en majorité les grands appareils glaciaires régionaux (Durance, Ubaye) dont les dynamiques sont bien différentes des petits glaciers locaux comme les Monges. Les connaissances sur les glaciers de la Durance peuvent aider à interpréter les dynamiques dans les Monges mais la comparaison s'avère tout de même assez hasardeuse.

D'après les résultats obtenus pour les différents stades reconstitués, les lignes d'équilibre glaciaire se situent entre 1615 et 1952 mètres. Cependant des réserves s'imposent quant au résultat d'une LEG à 1615 m du côté de Coste belle ; ce résultat vient de la reconstitution d'un stade glaciaire qui s'appuie sur l'observation d'une unique formation considérée comme morainique. Bien que l'étude de cette forme semble bel et bien indiquer qu'il s'agisse d'une moraine, l'absence d'autres indices concordants impose la prudence. Pour le stade maximal reconstitué sur les 3 secteurs, la LEG va de 1615 à 1736 mètres. Cet intervalle d'altitude correspond à peu près à celle du LGM estimé à partir de l'étude du lac d'Allos (Brisset *et al*, 2014). En effet, au lac d'Allos, la LEG à la fin du Tardiglaciaire (stade 3) est à 2600 m, or les études montrent qu'à la fin du Tardiglaciaire (Dryas récent), la LEG était environ 1000 mètres en dessous du maximum glaciaire (LGM), donc la LEG pour le LGM serait à environ 1600 mètres.

De façon plus globale, les résultats montrent que la majorité des moraines correspondent à des stades où la LEG se situe entre 1700 et 1900 mètres. Ainsi pour de nombreux stades, la LEG se situe en dessous de 1800 mètres, altitude de la LEG au maximum glaciaire wurmien dans les Alpes du Sud selon plusieurs auteurs (Guillien, 1962 ; Julian, 1980 ; Jorda, 1975,1980 ; Cossart *et al.*, 2011). Le fait que de nombreux stades reconstitués aient une LEG inférieure à 1800 m ne signifie pas forcément qu'ils sont antérieurs au maximum würmien. Comme évoqué ci-dessus, les glaciers locaux sont très rares dans la région, les connaissances sont donc limitées, ainsi, il n'est pas possible d'être affirmatif sur une LEG à 1800 mètres pour le maximum würmien. Si les dépôts glaciaires des Monges étaient antérieurs au Würm, de facto ils dateraient du Riss (300-130 ka), ce qui est fortement improbable. Compte tenu de la lithologie marno-calcaire et du climat méditerranéen-montagnard il est peu probable que des dépôts datant de plus de 130 ka aient résisté à une érosion qu'on sait très forte dans la région (Descroix ; 1994). Donc les moraines présentes aux Monges datent très probablement du Pléniglaciaire würmien supérieur (stade isotopique marin 2) (Jorda *et al.*, 2000). L'altitude des moraines les plus hautes du secteur d'étude (≈ 1860 m), correspond à l'altitude d'autres moraines relevées dans la région attribuée au Dryas ancien (≈ 16500 BP). (Dijkstra *et al.*, 1990 ; Beaulieu, 1977 ; Finsinger & Ribolini, 2001 ; Brisset, 2014). Le croisement des sources atteste que la déglaciation était totale 15 000 ans BP (Montjuvent & Nicoud, 1988). Ainsi les dépôts glaciaires présents aux Monges furent probablement déposés dans l'intervalle 30 000 – 15 000 ans BP. Les calculs des LEG et toutes les interprétations qui en découlent, supposent des glaciers de cirque simple ; mais compte tenu du sommet plat des Monges, il est envisageable qu'il ait porté une calotte dont les chutes de séracs pouvaient alimenter les cirques. Si cette hypothèse est correcte, les LEG « remonteraient ».

2) Reconstitution morphogénique des Monges

Cette reconstitution morphogénique débute à partir des dépôts glaciaires les plus anciens observés aux Monges (Annexe 16). Le placage de till présent au nord-est de la grande moraine latérale droite de Communaresse, aussi appelé secteur du Grand Bois, pourrait faire partie des dépôts glaciaires les plus anciens. La reconstitution 3D du maximum glaciaire montre que la glace franchissait la grande moraine latérale droite vers 1750 mètres puis descendait dans le Grand Bois. Cette modélisation 3D du glacier confirme les observations faites sur le terrain de blocs calcaires déposés au sommet de la crête molassique à partir de 1750m puis s'étendant en contrebas dans le Grand Bois. Bien qu'il n'y ait pas d'absolue certitude sur la période glaciaire responsable des dépôts aux Monges, il est probable qu'ils datent du Würm (stade isotopique marin 2) (Jorda *et al.*, 2000). Ainsi, le dernier maximum würmien étant estimé entre 30 000 et 20 000 ans BP dans les Alpes du Sud (Montjuvent & Nicoud, 1988), il est probable que le till du Grand Bois date de cette période ; de même, que la moraine (1730m) posée sur le haut du versant nord de Coste Belle, ainsi que les traces morainiques à l'extrémité nord du pâturage de Clapouse.

Passé le maximum glaciaire, la déglaciation fut rapide, mais les nombreuses moraines retrouvées aux Monges témoignent de nombreux stades de stagnation voire de récurrence glaciaire. Ainsi en remontant les secteurs anciennement englacés, les dépôts glaciaires

s'échelonnent entre environ 30 000 BP pour les dépôts les plus bas ou les plus périphériques, et 15 000 BP au minimum pour les moraines frontales les plus hautes (≈ 1860 m).

Durant la déglaciation du Tardiglaciaire, d'autres processus géomorphologiques ont pu apparaître, notamment les processus périglaciaires. Les glaciers rocheux de Clapouse et Communairesse ont dû être actifs sous les conditions froides du Dryas (16 000 – 11 000 BP). Du côté de Coste Belle les conditions périglaciaires ont probablement été favorables à la régularisation des versants par une production importante de gélifracsts qui constituent l'éboulis consolidé (brèche) du versant sud. Avant de se consolider l'éboulis était affecté par la solifluxion qui a diminué l'inclinaison de la pente. Ces processus apparaissent dans les conditions très froides qui régnaient dans la région entre 30 000 et 10 000 ans. Il se pourrait même que cet éboulis consolidé soit antérieur au maximum würmien, car ce versant semble avoir été profondément incisé par le cirque glaciaire. Il est donc possible que le versant régularisé précède la dernière phase de réincision du cirque par le glacier würmien. Le versant régularisé serait alors la plus ancienne forme géomorphologique relevée sur le secteur. Dans tous les cas, l'éboulis consolidé est antérieur au ravinement qui incise les versants, or les ravinements ont commencé entre 5 000 et 12 000 BP (Descroix, 1994).

Durant le Tardiglaciaire, les glaciers libèrent les versants et remontent progressivement le long des anciens lits glaciaires. Des processus apparaissent alors sur ces nouvelles zones libres de glace. Par exemple, le glissement-coulée de Coste Belle a dû se déclencher à cette époque. Des éléments permettent d'être plus précis dans la chronologie des événements. En effet, la moraine frontale (1860 m) se tient au sommet du glissement-coulée ; à cet emplacement, il devrait normalement y avoir la niche d'arrachement du glissement-coulée. L'absence de cette niche d'arrachement suggère que la moraine a été construite après le déclenchement du glissement-coulée. En effet, si cette moraine frontale était antérieure au glissement-coulée, elle aurait été en grande partie détruite lors du glissement. L'hypothèse retenue est que le glissement-coulée s'est produit lors d'une phase du recul du glacier au-dessus de 1860 mètres puis une récurrence glaciaire a comblé la niche d'arrachement laissée par le glissement puis construit le bastion morainique visible aujourd'hui. Il est possible que le grand glissement-coulée de Coste Belle se soit déclenché suite à une saturation des marnes noires par les eaux de fonte glaciaire. Le côté nord du bastion (1860 m) de Coste Belle est partiellement couvert par un glissement rocheux. Ainsi l'enchaînement des phénomènes serait le suivant : suite au retrait glaciaire, le glissement-coulée se déclenche puis une récurrence glaciaire crée le bastion (1860 m), enfin la partie nord de ce bastion est ensevelie sous un glissement rocheux. Il est également probable que les autres instabilités de versant soient apparues dans les 5 000 ans qui ont suivi la fin du maximum glaciaire. (Ballantyne *et al.*, 2014 ; Coquin *et al.*, 2015). En effet, la disparition des glaciers crée un déséquilibre qui conduit à la mise en mouvement des versants pour trouver un nouvel état d'équilibre. Par exemple, l'écroulement du côté de Communairesse a dû se produire peu après la déglaciation des versants ; en effet, compte tenu de la distance anormalement élevée parcourue par l'écroulement, il est probable qu'il se soit propagé sur de la glace. Ainsi cet écroulement date possiblement du début du Tardiglaciaire. A partir de la fonte des glaciers l'eau sous forme liquide a pu commencer à sculpter le paysage. D'après les travaux de Cécile Miramont, les cours d'eau des Alpes du sud ont été ponctués de crises érosives et sédimentaires. Au Tardiglaciaire un phénomène d'érosion régressive débutant de la Durance remonte jusque dans les petits bassins versants. Cette érosion

régressive forme des vallons dans lesquels peuvent se développer des pins. Mais le climat froid et humide avec des précipitations intenses favorise le transport de matériaux qui remblaient les vallons nouvellement créés, ce qui fossilise les arbres de la reconquête post-glaciaire. Ainsi, l'étude des arbres fossiles de Coste belle a révélé un pin enseveli il y a environ 10 075 ans BP (Miramont, 2011). La fossilisation de ce pin correspond probablement au début du remblaiement post-glaciaire principal (RPP). Des phases d'incision et de remblaiement de moindre ampleur se succèdent avec une tendance générale au remblaiement qui s'achève vers 6500 BP. A cette période le climat change pour devenir plus sec. Les modifications du climat et l'évolution de l'occupation du sol entraînent un encaissement de 5 à 20 mètres des cours d'eau au cours des derniers millénaires. A Coste belle les incisions sont au maximum d'une dizaine de mètres. Le processus fluviatile peut être considéré comme le plus morphogène depuis la fin de la glaciation. Mais son impact reste minime par rapport à celui laissé par les glaciers. Du côté de Coste Belle l'eau a produit de grands ravinements et de profondes incisions. Les grands ravinements encaissés de 50 à 100 mètres sous les corniches de calcaires tithoniques, ont probablement commencé à se former au début de l'Holocène, « cette profondeur d'encaissement correspondant à un travail débuté entre 5000 et 12000 BP » (Descroix, 1994). Par contre du côté de Clapouse et Communairesse, l'impact de l'eau reste modeste.

On peut se demander si certains arbres étudiés par Cécile Miramont ont pu être ensevelis par le glissement coulée et non par sédimentation torrentielle comme évoqué dans l'article de C. Miramont (2011). Les arbres fossiles en périphérie du glissement coulée ont été ensevelis entre 7200 et 5600 BP. Ces dates ne sont pas en adéquation avec l'hypothèse soutenue d'un glissement-coulée se déclenchant avant la déglaciation totale vers 15 000 BP. Mais il est possible que nos interprétations des formes et/ou de chronologie soit fausses. D'autres processus ont pu ensevelir les arbres fossiles les plus hauts (Bast22/23/24) (annexe 17) ; par exemple, des glissements superficiels ou l'avancée de lobes de solifluxion.

Les processus gravitaires communs, comme les éboulis et éboulements ont dû reprendre dès que les parois ont été libérées des glaces. Lors de la déglaciation, les talus ont d'abord évolué dans un environnement que l'on qualifie de paraglacière (Church & Ryder, 1972). Ils ont ensuite poursuivi leur évolution sous le climat périglaciaire et enfin depuis un peu plus de 10 000 ans ils évoluent dans un climat plus tempéré avec néanmoins quelques sursauts comme au PAG où la production et le transport de matériaux ont été particulièrement importants. Les éboulis et les processus qui les parcourent comme les avalanches et laves de débris sont toujours actifs aujourd'hui. De même pour les processus périglaciaires comme la solifluxion qui flue le long des pentes depuis plusieurs millénaires.

Des carottages ont été faits dans les deux zones humides de Communairesse, malheureusement ils n'ont pas permis de remonter jusqu'à la période glaciaire. Ces carottages ont montré que le lac des Monges était à l'origine un pré humide et que l'actuel petit lac des Monges était un lac plus profond entre 800 et 1745 BP environ (IMBE, 2019).

Dans les années 1960, le pré humide a été transformé en lac par un agent de l'ONF qui a endigué les exutoires (Annexe 18). Enfin, l'homme a modifié le paysage de manière superficielle en construisant des terrasses agricoles et des clapiers pour aider aux travaux agricoles. L'homme a également modifié le paysage en construisant des bâtiments et en favorisant les milieux ouverts par le pastoralisme ou bien les milieux fermés par la sylviculture.

Conclusion

En conclusion, la réalisation d'une carte géomorphologique a été très utile pour mieux comprendre les dynamiques passées des Monges. Grâce à la création de divers supports cartographiques et de plusieurs missions terrain, certaines dynamiques quaternaires ont pu être interprétées.

L'étude géomorphologique a également révélé une présence glaciaire bien plus importante que ce que les travaux locaux et régionaux laissaient penser (Jorda, 1980-83 ; Guillien, 1962 ; Julian, 1980). La littérature évoque des glaciers locaux du côté de Clapouse et de Communaresse, avec des moraines atteignant 1600 mètres au plus bas (Jorda, 1983). Les campagnes terrain menées entre 2019 et 2020 confirment la présence de glaciers du côté de Clapouse et Communaresse, mais attestent également d'un glacier du côté de Coste Belle aux dimensions impressionnantes. De plus, la moraine la plus basse recensée disparaît vers 1480 mètres, soit plus de 100 mètres en dessous des précédents relevés. Après avoir relié les vestiges morainiques entre eux et en prenant en compte la limite du placage glaciaire, la géométrie approximative des glaciers a pu être reconstituée, et cela, pour plusieurs stades glaciaires. Ce travail a révélé de nouveaux éléments qui enrichissent les connaissances sur les glaciations du Quaternaire dans les Alpes du Sud. En effet, la ligne d'équilibre glaciaire (LEG) a été calculée à partir de la reconstitution des glaciers (Pellitero *et al*, 2015). Il en ressort, que pour l'expansion glaciaire maximale, la LEG se situerait entre 1600 et 1700 m ; alors que les travaux portant sur les Alpes du Sud estimaient cette LEG entre 1800 et 2000 mètres (Guillien, 1962 ; Julian, 1980 ; Jorda, 1975,1980 ; Cossart *et al*, 2011). De plus, le travail de raccordement des moraines a révélé un nombre de stades plus élevé qu'attendu. La littérature évoque deux à trois stades au Pléniglaciaire pour les Alpes du Sud, alors qu'on peut affirmer sans risque l'occurrence d'au moins quatre stades bien distincts aux Monges.

La montagne des Monges constituait bien un atoll glaciaire au milieu de la Provence (Jorda & Miramont, 2008). Les évolutions post-glaciaires sont également très intéressantes avec notamment les nombreux mouvements de versant qui pourraient être une conséquence de la déglaciation.

Ainsi, le secteur des Monges présente bel et bien un intérêt géomorphologique, particulièrement en ce qui concerne son histoire glaciaire. Compte tenu de ces découvertes, il conviendra d'étudier si le secteur des Monges est un cas particulier au sein des Alpes du Sud, ou bien s'il faut revoir à la baisse l'estimation de la LEG dans toute la région.

Pour poursuivre cette étude, il conviendrait d'organiser des campagnes de datation afin d'estimer l'âge des dépôts morainiques. Bien que le travail de cartographie soit bien avancé, la réalisation d'un MNT LIDAR pourrait dévoiler de nouvelles formes notamment dans le secteur forestier de Communaresse. Une autre perspective est d'identifier les moraines appartenant au même stade de chaque côté des Monges, puis, une fois les correspondances établies, reconstruire les stades de manière cohérente entre les secteurs. Enfin, la présence éventuelle d'une calotte glaciaire pouvant alimenter les cirques depuis le sommet des Monges mérite une poursuite des recherches.

Sources

- ABRY C., (1964). - Contribution à l'étude géologique de la région de Bayons-Astoin (Basses-Alpes) : feuilles au 1/20000e, Seyne 1-2, 5-6. *Tectonique*, 111p.
- AUDA Y., (2018). - Systèmes d'information géographique « Avec les logiciels libres GRASS et QGIS », IRD Éditions/Dunod, 202p.
- BALLANTYNE C.K., GRAEME F., SANDEMAN J., STONE O., WILSON P., (2014). - Rock-slope failure following Late Pleistocene deglaciation on tectonically stable mountainous terrain., *Quaternary Science Reviews*, Volume 86, pp. 144-157.
- BERTRAN P., COUTARD J.-P., (2004). – Dépôts de pente continentaux. Dynamique et faciès., *Quaternaire*, hors-série no 1, pp. 84-109.
- BERTRAN P., COUTARD J.-P., FRANCOU B., OZOUF J.-C. TEXIER J.-P. (1992). - Données nouvelles sur l'origine du litage des grèzes : implications paléoclimatiques., *Géographie physique et Quaternaire*, 46 (1), pp. 97–112.
- BLONDEAU S., (2018). - *Ruptures de Versant Rocheux (RVR) à l'échelle des Alpes occidentales : inventaire systématique, analyse spatiale, perspectives patrimoniales.*, Géographie. Université Lyon 2 Lumière, Français, 588p.
- BRISSET E., MIRAMONT C., GUITER F., ARNAUD F., ANTHONY E., DELHON C., GUIBAL D., CARTIER R., POHER Y., CHAUMILLON E., (2014). - Données nouvelles sur la chronologie de la déglaciation dans la vallée du Haut-Verdon (lac d'Allos, Alpes françaises du sud), *Quaternaire*, vol. 25/2, pp. 147-156.
- BRYAN R.B., HAWKE R.M., ROCKWELL D.L., (1998). - The influence of subsurface moisture on rill system evolution., *Earth, Surface, Processes and Landforms* 23 : pp. 773-789.
- BURBANK D., FORT M., (1985). - Bedrock control on glacial limits : examples of the Ladakh and Zaskar ranges, North-western Himalaya, India., *Journal of Glaciology*, Vol. 31, n°108, pp. 143-149.
- CD04., (2019). - CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES, Massif des Monges : Etudes géomorphologiques Réserve naturelle géologique de Haute Provence. Pdf, 3p.
- CHURCH M., RYDER J., (1972) - Paraglacial Sedimentation: A Consideration of Fluvial Processes Conditioned by Glaciation., *GSA Bulletin* ; 83 (10): pp. 3059–3072.
- COQUIN J., MERCIER Q., BOURGEOIS Q., COSSART E., DECAULNE A., (2015). - Gravitational spreading of mountain ridges coeval with Late Weichselian deglaciation: impact on glacial landscapes in Tröllaskagi, northern Iceland., *Quaternary Science Reviews*, Volume 107, pp. 197-213.
- CORBEL J., (1962). – Neiges et glacier, Paris, A. Colin, 224p
- COSSART E., (2005). - *Evolution géomorphologique du haut bassin durancien depuis la dernière glaciation : contribution à la compréhension du système paraglaciale.*, Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII. Français, 437p.

- COSSART E., BOURLES D., BRAUCHER R., CARCAILLET J., FORT M., SIAME L., (2011). - L'englacement du haut bassin durancien (Alpes françaises du sud) du Dernier Maximum Glaciaire à l'Holocène : synthèse chronologique., *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 17 - n° 2 |. pp. 123-142.
- CROSTA G., FRATTINI P., AGLIARDI F. (2013). Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*. 605p.
- DE BEAULIEU J. Q., JORDA M., (1977). - Tardiglaciaire et Postglaciaire des Alpes de Haute-Provence. Le glaciaire de la Blanche, Trois évêchés., *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, vol. 14, n°3. pp. 3-15.
- DESCROIX L., (1994). - *L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud*. Lyon (FRA)., Université Lumière Lyon 2 ; ORSTOM, 353 p
- DIJKSTRA T., CORNELIS ROELOF J., MIDDELKOOP H., SALOME ABRAHAM I., (1990). - Observations concerning the extent and chronology of the Late-Glacial déglaciation stages in the Southern French Alps on the basis of two pollen diagrams., *Quaternaire*, vol. 1, n°2, pp. 123-137.
- EDYTEM., (2015). - Environnements DYnamiques et TErritoires de la Montagne. pdf
- FINSINGER W, RIBOLINI A. (2001). - Late glacial to Holocene deglaciation of the Colle del Vei del Bouc – Colle del Sabbione area (Argentera Massif, Maritime Alps, Italy-France)., *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Comitato Glaciologico Italiano, 24, pp.141-156.
- GARDENT M., (2014). - *Inventaire et retrait des glaciers dans les alpes françaises depuis la fin du Petit Age Glaciaire*. Géographie. Université de Grenoble. Français, 455p.
- GIDON M., (1997). - Les chaînons subalpins au nord-est de Sisteron et l'histoire tectonique de la nappe de Digne., *Géologie Alpine*, pp. 23-57.
- GIDON M., MOULLADE M., MONJUVENT C., FLANDRIN J., (1991). - Carte géol. France (1/50 000), feuille Laragne-Montéglin (893) et notice explicative — Orléans : BRGM.
- GUILLIEN Y., (1962). - Néoglaciaire et Tardiglaciaire : géochimie, palynologie, préhistoire., *Annales de Géographie*, t. 71, n°383, 1962. pp. 1-35.
- HACCARS D., BEAUDOIN B., GIGOT P., JORDA M. et al., (1989). – Carte géol. France (1/50 000), feuille LA JAVIE (918) et notice explicative – Orléan : BRGM.
- HENRY J B., GRUSSENMEYER P., MALET J P., MAQUAIRE O., (2001). - Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze. *Revue de l'Association Française de Topographie*. pp.42-50.
- HETU B., VAN STEIJN H., BERTRAN P., (1995). - Le Role des Coulées de Pierres Sèches dans la Genèse d'un Certain Type d'Éboulis Stratifiés., *Permafrost Periglacial. Processes.*, 6 : pp. 173-194.
- HORMES A., IVY-OCHS S., KUBIK P W., FERRELI L., MICHETTI A., (2008). - Be exposure ages of a rock avalanche and a late glacial moraine in the Alta Valtellina, Italian Alps., *Quaternaire.*, pp. 136-145

- IMBE., (2019). - ETUDE DES ZONES HUMIDES DES MONGES ET DES GISEMENTS DE BOIS SUBFOSSILES Sur le territoire de la Réserve Géologique. Pdf, 87p.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M., WAVRESKY P., (2010). - Les types de climats en France, une construction spatiale., *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- JORDA M., (1975). - Les montagnes du haut Verdon, étude géomorphologique., *Méditerranée*, 1, pp.37-38.
- JORDA M., (1980). - Morphogenèse et évolution des paysages dans les Alpes de Haute Provence depuis le Tardiglaciaire. Facteurs naturels et facteurs anthropiques. *Bulletin de l'Association de géographes français*, N°472, 57e année, Juillet-octobre 1980. pp. 295-304.
- JORDA M., (1983). - Éboulis et glaciers rocheux (Talus and rock-glaciers). *Bulletin de l'Association de géographes français*, N°491, 60e année, 1983. pp. 15-24.
- JORDA M., (1983). - Le glaciaire quaternaire des Alpes-de-Haute-Provence. *Montagnes et montagnards*, RGA, pp.183-194.
- JORDA M., MIRAMONT C., (2008). - Les Hautes Terres : une lecture géomorphologique du paysage et de ses évolutions. In Michel-d'Annville N., de Leeuw M. : Les Hautes Terres de Provence. Itinérances Médiévales, ed Asso. Des Hautes Terres de Provence, pp23-39.
- JORDA M., ROSIQUE T., (1994). - Le Tardiglaciaire des Alpes françaises du sud : rythme et modalités des changements biomorphoclimatiques, Colloque CNF-INQUA-AFEQ, Montpellier, *Quaternaire*, vol. 5, 34, pp.141-149.
- JORDA M., ROSIQUE T., (2000). - Données nouvelles sur l'âge du dernier maximum glaciaire dans les Alpes méridionales françaises, C.R. Acad. 5c/., Paris, 331p.
- JULIAN M., (1980). - *Les Alpes Maritimes franco-italiennes. Etude géomorphologique*. Thèses, Univ. de Lille III, 836 p.
- JULIAN M., (1997). - Les glaciations des Alpes Maritimes : Géographie physique et Méditerranée., *Géo-méditer*, Paris : Éditions de la Sorbonne, pp. 245-261.
- LEHMANN H., (1959). - Stüdien uber Poljen in den Venezianischen Voralpen und im Hochapennin, *Erdkunde* 13 (3), pp. 258-289.
- LLIBOUTRY L., (1965). – *Traité de Glaciologie*, Paris, Masson, 1040 p.
- MC COLL S T., (2012). - Paraglacial rock-slope stability *Geomorphology*, 153–154, pp. 1-16
- MEIERDING T.C., (1982). - Late Pleistocene equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range : a comparison of methods., *Quaternary Research*, Vol. 18, pp. 289-310.
- MIRAMONT C., SIVAN O., GUIBAL F., KROMER B., TALAMO S., KAISER K.F., (2011). - L'étalonnage du temps du radiocarbone par les cernes d'arbres. L'apport des séries dendrochronologiques du gisement de bois subfossiles du torrent des Barbiers (Alpes françaises du sud). *Quaternaire*, 22, (3), pp. 261-271.

- MONTJUVENT G., NICOUD G., (1988). - Modalités et chronologie de la déglaciation würmienne dans l'arc alpin occidental et les massifs français : synthèse et réflexions. In: *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, vol. 25, n°2-3, pp. 147-156.
- MUNROE J. S., MICKELSON D. M., (2002). - Last Glacial Maximum equilibrium-line altitudes and paleoclimate, northern Uinta Mountains, Utah, U.S.A. *Journal of Glaciology*, 48: pp. 257–266.
- NESJE A., (1992). - Topographic effects on the equilibrium-line altitude on glaciers. *GeoJournal*. 27. pp. 383-391.
- NUNINGER L., OSTIR K., KOKALJ Z., MARSETIC A., (2008). - Lidar. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental., pp.95.
- PATERSON W.S.B., (1981). - *The Physics of Glaciers*. Pergamon international library of science, technology, engineering, and social studies. Pergamon Press, 380p.
- PELLITERO R., REA B R., SPAGNOLO M., BAKKE J., HUGHES P., IVY-OCHS S., LUKAS S., RIBOLINI A., (2015). – A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes., *Computers & Geosciences*, Volume 82, pp 55-62
- PELLITERO R., REA B.R., RENSSSEN H., (2016). - GlaRe, a GIS tool to reconstruct the 3D surface of palaeoglaciers., *Computers and Geosciences* 94, pp.77–85.
- REYNARD E., (1997). - Carte géomorphologique des Lapiés de Tsanfleuron (Hautes Alpes Calcaires, Valais), *Bull. Soc. Neuch. Géographie* 41. pp. 23-38.
- SALOMON J N., HOFFMANN F., (2007). - Cônes d'éboulis, de déjection, glacis et piémonts : essais de définition., *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 240, pp. 405.
- SCHOENEICH P., (1998). - *Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Étivaz (Préalpes vaudoises)*. Lausanne: Institut de géographie. Travaux et Recherches 14. 483p.
- SCHOENEICH P., REYNARD E., PIERREHUMBERT G., (1998). - Geomorphological mapping in the Swiss Alps and Prealps., *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie* 11: pp. 145-153.
- SWEIZER G., (1968). - Le tardiglaciaire et le niveau des neiges per-manentes dans les hautes montagnes des Alpes-Maritimes. L'exemple du bassin supérieur de la Tinée., In: *Méditerranée*, n°1, pp. 23-40.

Table des Figures

Figure 1 : Carte de présentation du site d'étude des Monges	5
Figure 2 : En l'absence de station météo aux Monges, ce diagramme ombrothermique a été construit en croisant les données de la station météo de Seyne (1347) et de Chabanon (1720).	6
Figure 3 : a) Représentation en 3D du modèle numérique de surface de 76 cm de résolution et 50 km ² créé à partir des images IGN. b) Vue du cirque de Clapouse sous forme d'un nuage de points denses ; avec les markers (points de coordonnées) symbolisés par les drapeaux bleus. c) Modèle numérique de surface (MNS) du pâturage de Clapouse de 30 cm de résolution obtenu par drone en juillet 2020.	9
Figure 4 : a) Courbes de niveau de 50 m et 10 m couvrant la montagne des Monges, des courbes de niveau de 5 m, 2m et 1m furent également créées. b) Carte des pentes au niveau du sommet des Monges, on distingue les deux cirques glaciaires, ainsi que les contours d'un glissement du côté de Coste Belle ainsi que d'autres éléments intéressants. c) Carte d'exposition du site d'étude.	9
Figure 5 : Ce triptyque illustre les étapes de l'étude carto-géomorphologique. a) Une première partie principalement à distance de cartographie des formes à partir des supports créés. b) Puis une phase d'identification des formes et de validation des éléments cartographiés, qui passe par beaucoup d'observation terrain ainsi que des lectures. c) Enfin, une phase d'articulation des éléments cartographiés et des observations terrain pour interpréter les dynamiques passées.	11
Figure 6 : Superposition de différentes couches SIG nécessaire à la construction d'une carte géomorphologique.....	12
Figure 7 : Capture d'écran montrant l'interface d'ArcGIS avec à droite la combinaison d'outils créés par Pellitero et al (2015 & 2016) pour reconstituer un paléo-glacier en 3D et estimer des lignes d'équilibre glaciaire.	13
Figure 8 : Extrait carte géomorphologique pour les formes et processus se développant sous climat froid. Les nombres en noir sont référencés dans le texte pour aider à la compréhension.	15
Figure 9 : Le glacier de Communairesse a débordé dans le secteur du Grand Bois, mais même lors du maximum glaciaire l'éperon molassique (trait rouge) était trop haut pour être couvert par le glacier, d'ailleurs son sommet ne présente aucune trace de till.	16
Figure 10 : Vue depuis la crête ouest du pâturage de Clapouse	17
Figure 11 : Cirque de Clapouse avec à ses pieds plusieurs moraines frontales (bastion) témoignant des phases de recul glaciaire.	17

Figure 12 : Photographie de la moraine latérale droite la plus périphérique du secteur de Coste Belle.....	18
Figure 13 : a) Glacier rocheux du côté de Communairesse; la forme entourée en rose est le glacier rocheux, son aspect chaotique et minéral le distingue de la moraine à sa gauche qui est lisse et végétalisée. b) Le glacier rocheux de Clapouse présente de nombreux bombements qui témoignent de son déplacement dans le sens de la pente.....	18
Figure 14 : a) A gauche photo de lobes de solifluxion. b) A droite photo montrant la solifluxion en nappe donnant un aspect fluant aux dépôts descendant du vallon est de Clapouse. La solifluxion a drapé l'extrémité droite du bastion morainique (1705m).....	19
Figure 15 : A gauche, photo du versant régularisé au sud de Coste Belle. Photos du dépôt de brèche constituant le glacis du versant sud de Coste Belle	20
Figure 16 : Extrait carte géomorphologique des formes et processus entraînant l'évolution des versants	21
Figure 17 : Gradin de glissement sur le versant de Communairesse.....	22
Figure 18 : Combinaison des formes traduisant l'instabilité du versant rocheux. (Versant sud de Coste Belle)	22
Figure 19 : Indices d'un glissement coulée.....	23
Figure 20 : Erosion et évolution récente du paysage. Les à-plats de couleur rouge correspondent aux roches, ils ont été rajoutés sur cette carte pour faire ressortir les ravinements.	24
Figure 21 : Photos illustrant la différence hydromorphologique entre Coste Belle et Clapouse.....	25
Figure 22 : Photos montrant à gauche la tourbière aussi appelés « Petite lac des Monges » ; à droite le grand lac des Monges.....	26
Figure 23 : Photo illustrant la légende : "sol sur roche en place"	26

Table des Annexes

Annexe 1 : Histoire et description de la lithologie des Monges	39
Annexe 2 : Carte Topo utilisée sur le terrain.....	43
Annexe 3 : Carte des tracés empruntés et des points d'intérêt commentés sur l'application portable ViewRanger	44
Annexe 4 : Carte géomorphologique du site d'étude accompagnée de sa légende	45
Annexe 5 : Extrait de la table attributaire de la couche surface	48
Annexe 6 : Exemple de résultat obtenu grâce à la boîte à outils ELAs.	48
Annexe 7 : Résultat de la reconstitution 3D des glaciers obtenue grâce à la boîte à outils GlaRe pour le maximum glaciaire (Pelliterro <i>et al</i> , 2016).....	49
Annexe 8 : Illustration montrant l'intervalle entre une zone avec du till et sans till pour justifier le positionnement de la limite supérieure gauche du glacier de Communaresse.....	50
Annexe 9 : Vitesse et sens de déplacement de points de repère entre 1949-2012 à Coste Belle	51
Annexe 10 : Distance anormalement élevée parcourue par l'écroulement de Communaresse.....	52
Annexe 11 : Photos processus de versant superficiel	52
Annexe 12 : Photos de ravinement dans les marnes noires ou badlands du côté de Coste Belle.....	53
Annexe 13 : Coulée de débris (Cirque de Clapouse).....	54
Annexe 14 : Lac fossile de Clapouse	54
Annexe 15 : Reconstitution de quelques stades glaciaires et calcul de la LEG pour chacun.	55
Annexe 15a : Altitude des LEG obtenue avec les différentes méthodes pour les différents stades.....	56
Annexe 16 : Reconstitution de la chronologie relative des unités morphologiques des 3 secteurs des Monges	57
Annexe 17 : Cartographie du gisement d'arbres subfossiles du secteur de Bastié (C. Miramont, 2011).....	60
Annexe 18 : Formation du lac des Monges	61

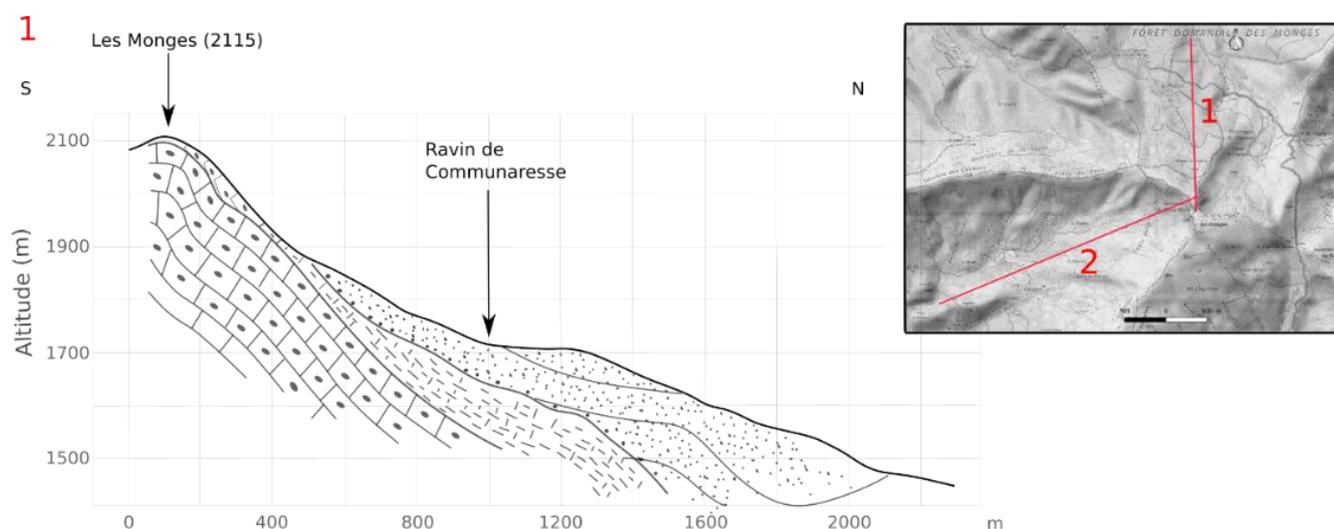
Annexes

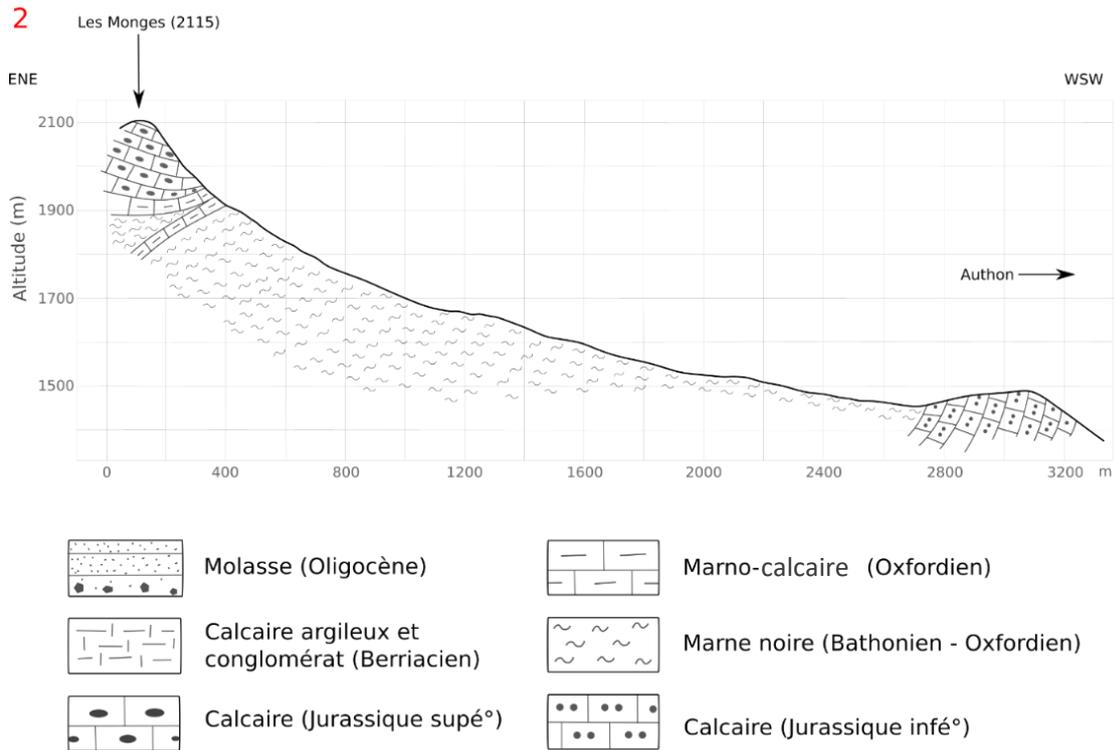
[↑ Retour Texte](#)

Annexe 1 : Histoire et description de la lithologie des Monges

Du côté nord-est des Monges, la superposition des roches est normale mais le pendage supérieur à la pente fait apparaître des affleurements de roches de plus en plus jeune. Ainsi le calcaire tithonique (146 – 135 Ma) qui constitue le sommet des Monges est au-dessus d'une couche de calcaire argileux et conglomérat plus récente, datant du Berriasien (135 -130 Ma). En dessous de 1800m une grande partie du nord-est du secteur est recouverte de molasse rouge Oligocène (34 – 23 Ma).

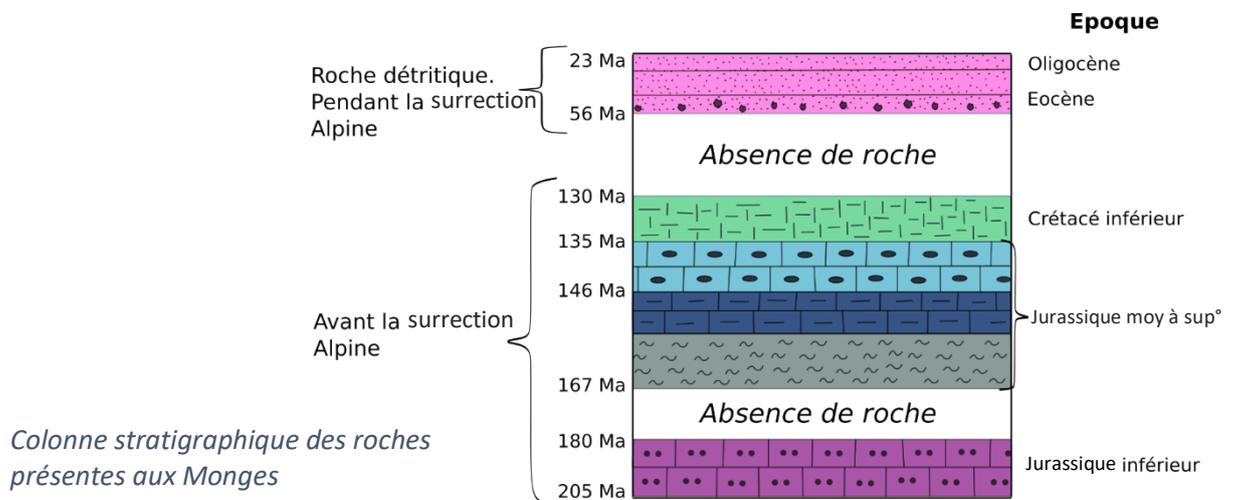
Du côté de Coste-Belle, la disposition chronologique est respectée avec au sommet le calcaire Kimmeridgien-Tithonique (146 -135) qui repose sur une faible épaisseur de roche marno-calcaire plus ancienne (Oxfordien, 154-146 Ma), qui repose elle-même sur une grande épaisseur de marnes noires encore plus ancienne. Vers 1500 m d'altitude, la vallée de Coste belle est séparée en deux par un éperon rocheux (Mont Chauvet) constitué de roche calcaire datant du Jurassique inférieur (205 -180 Ma). (BRGM, 1983)





Coupes géologiques montrant la diversité et la disposition des couches lithologiques avec des roches de natures et de périodes différentes. La coupe n°1 est du côté nord-est des Monges alors que la coupe n°2 est du côté sud-ouest. (Réalisation Armando d'après travaux de Claude Abry (1964)).

Il existe des lacunes dans la chronologie de constitution des roches. Par exemple, dans le secteur des Monges, aucune roche n'a entre 180 et 170Ma ni entre 130 et 60 Ma. Cette lacune peut avoir plusieurs explications, soit l'absence de roche s'explique par l'absence de mer permettant leur constitution ; ou bien les roches de cette période ont été totalement érodées, ne laissant aucune trace ; ou encore des roches de cette période sont présentes, mais n'ont pas encore été identifiées car elles n'affleurent pas.



A partir des connaissances sur la période de formation des roches composant les Monges, il est envisageable de reconstituer approximativement l'histoire géologique du secteur. En s'appuyant sur les travaux de modélisation de C. Scotese (1997), voici une proposition de reconstitution des derniers millions d'années :

- **245 – 180 Ma** : La fracturation du supercontinent de la Pangée permet la formation de l'océan Thétis. Dans une mer peu profonde, s'est formé le calcaire constituant le mont Chauvet (1500m) à l'ouest de Coste Belle. C'est à cette époque que les ammonites qui occupaient la région à profusion se sont fossilisées pour donner la fameuse dalle aux ammonites.
- **180 – 170 Ma** : L'absence de roche datant de la fin du Jurassique inférieur amène à penser qu'à cette période, la région des Monges est émergée, empêchant la formation de nouvelles roches et entraînant l'érosion des roches émergées.
- **170 – 150 Ma** : Ensuite, une mer profonde se forme, dans laquelle se déposent des centaines de mètres de sédiments qui forment l'actuelle marnes noires ; puis des conditions favorables à l'apport de matière organique permet la formation de roches marno-calcaire.
- **150 – 130 Ma** : A la faveur d'une diminution de la hauteur d'eau et d'une augmentation de la biodiversité marine, se déposent les sédiments qui constituent le calcaire (tithonique) dur du sommet des Monges.
- **130 – 60 Ma** : Progressivement l'océan Thétis se referme car la plaque Africaine se rapproche de la plaque Européenne. Un océan peu profond dépose des coraux et des éponges puis la région émerge. Aux Monges, l'érosion a effacé les roches datant de cette époque, d'où leur absence.
- **60 – 30 Ma** La collision des plaques accélère la fermeture de la Thétis Alpine puis propulse des lambeaux de l'océan alpin en altitude. Le mouvement tectonique déforme les couches rocheuses, les unités structurales se complexifient en étant charriées les unes sur les autres. En parallèle, la collision des plaques favorise la formation d'un bassin en périphérie des Monges. Dans ce bassin la molasse rouge se forme à partir des produits d'érosion des roches émergées soumises au climat tropical. Ainsi, la molasse est dite post-orogénique car elle se forme après que des montagnes soient sorties de mer.
- **30 – 3 Ma** Au Miocène l'orogénèse s'accroît. La pression tectonique plisse les roches et forme l'anticlinal des Monges. Puis le déplacement de la nappe de Digne constitué de roches datant du Trias au Lias recouvre de manière anormale des roches plus jeunes. La nappe de Digne s'est arrêtée juste à côté des Monges, en témoigne la couche de gypse qui affleure au nord-est du pâturage de Clapouse. Cette roche qualifiée de « savon tectonique » par les géologues souligne la limite du chevauchement de la nappe.

1 Mer peu profonde favorable à la constitution de roche calcaire

3 Mer profonde, pauvre en dépôt organique favorable à la constitution de roches marneuses

5 Le secteur est émergé, les roches sont érodées

220 Ma

180 Ma

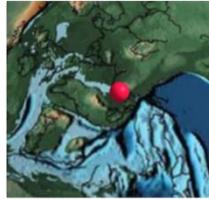
170 Ma

150 Ma

130 Ma

60 Ma

30 Ma



2 Le secteur est émergé, les roches sont érodées

4 Mer peu profonde et foisonnante donc riche en dépôt organique favorable à la constitution de roches calcaires

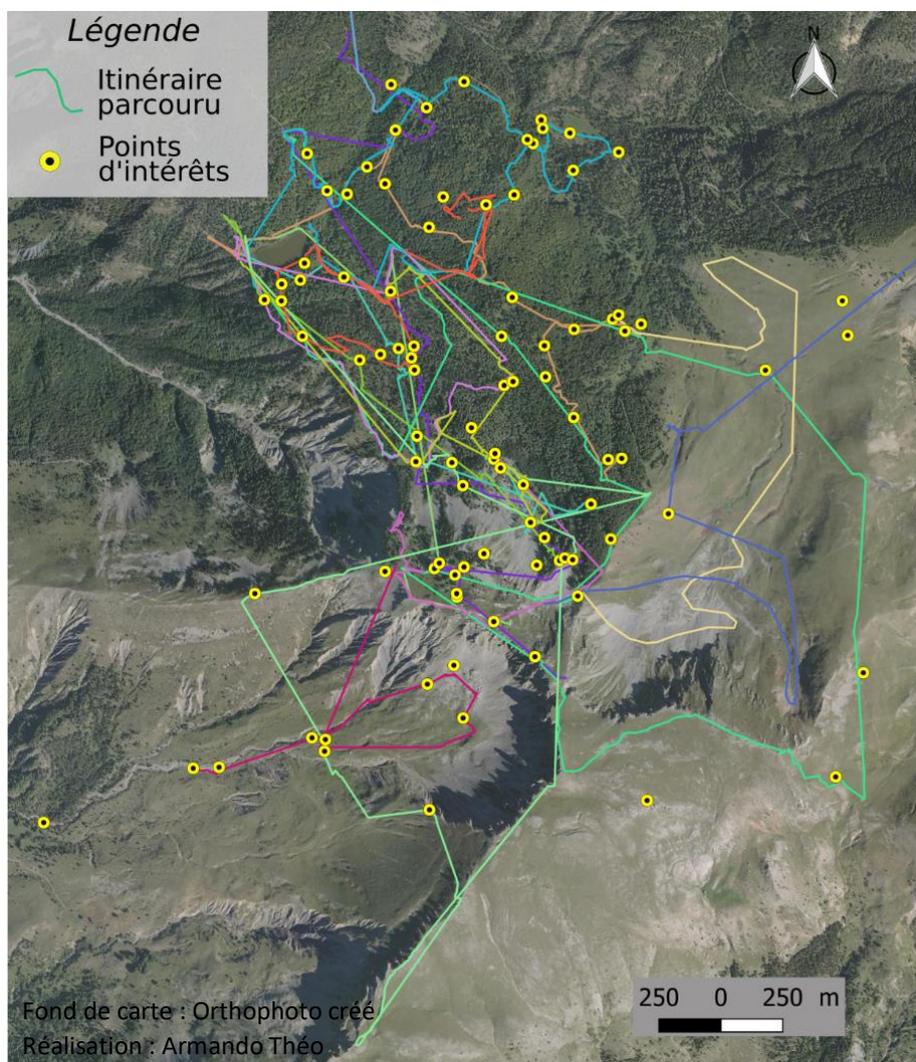
6 Bassin marin, les dépôts venant de l'érosion des roches émergées forment la molasse

Frise résumant et simplifiant les grandes dynamiques tectoniques qu'ont connu les Monges et qui ont permis la formation de différentes roches. Le point rouge correspond à l'emplacement des roches constituant les Monges. (Frise réalisé à partir des modélisations de C. Scotese (1997)).

Annexe 3 : Carte des tracés empruntés et des points d'intérêt commentés sur l'application portable ViewRanger

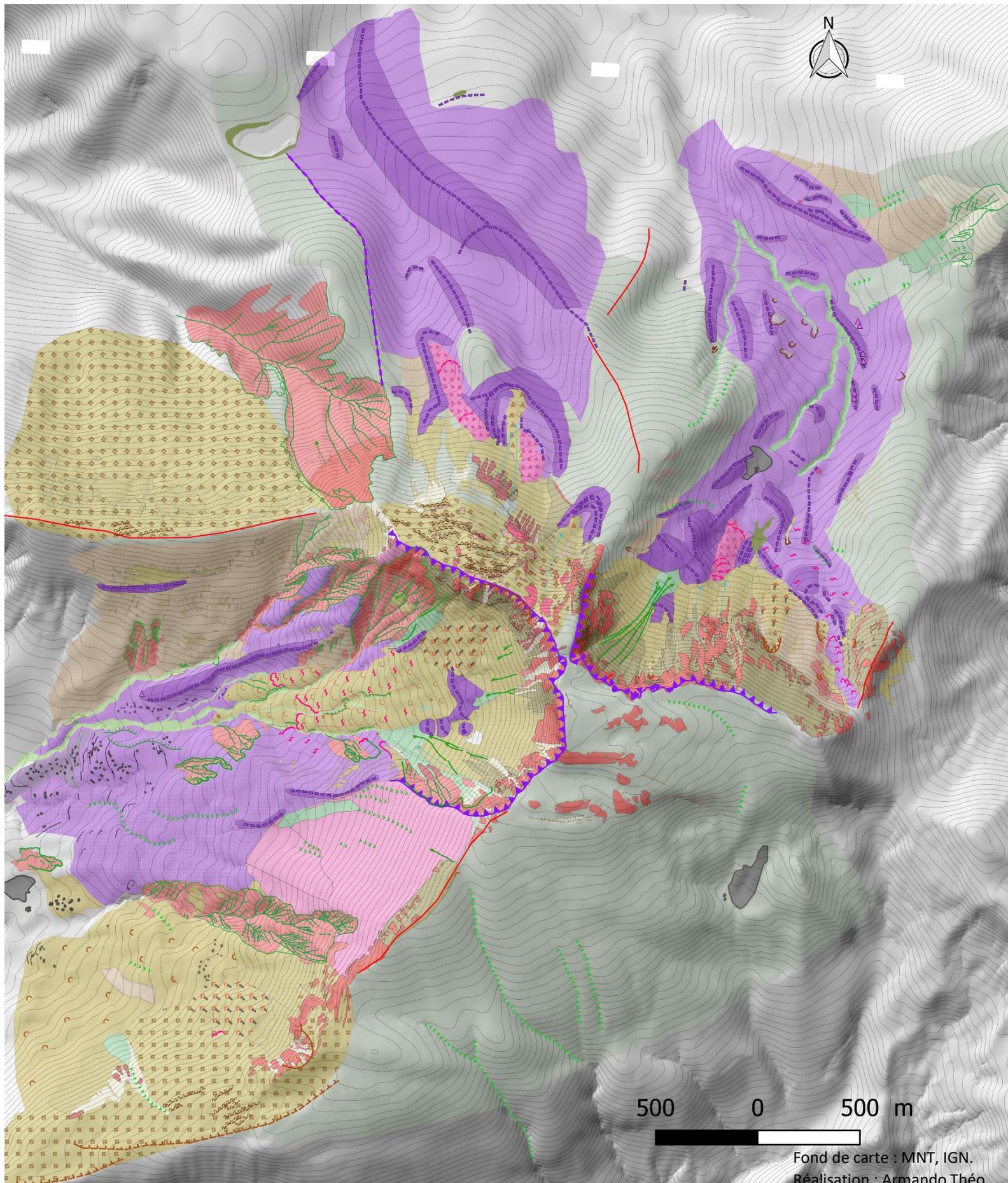
[↑ Retour Texte](#)

Chaque trait de couleur sur la carte représente la trace GPS parcourue au cours des nombreuses excursions terrain ; tous les tracés n'ont pas été enregistrés et certains relevés GPS sont approximatifs. A chaque point d'intérêt est associé un commentaire visible dans la table attributaire.



Annexe 4 : Carte géomorphologique du site d'étude accompagnée de sa légende

[↑ Retour Texte](#)



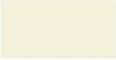
Fond de carte : MNT, IGN.
Réalisation : Armando Théo

Légendes

Roches

	Roche calcaire cohésive (Calcaire Tithonique)		Roche sédimentaire peu cohésive (Terre noire, Marno-calcaire, Conglomérat, Molasse)
	Roche calcaire altérée		Roche calcaire démantelée
	Banc rocheux démantelé		
	Gradin rocheux		Crête rocheuse

Gravitaire

	Deformation profonde de versant (DGSD)		Talus d'éboulis
	Glissement rocheux		Eboulis grossiers
	Glissement coulée		Dépot d'éboulement
	Dépot d'écroulement		Glissement superficiel dans till
	Zone en érosion		Niche de glissement
	Niche d'arrachement		Gradin de glissement
	Erosion scarp		Méga-bloc
	Crestal graben		Fissure

Dépôt superficiel et organogène

	Colluvion et éboulis végétalisé		Altérite et colluvion
	Sol sur roche en place		Accumulation d'origine végétale

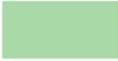
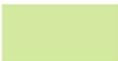
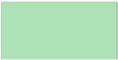
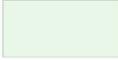
Glaciaire

	Till		Moraine
	Cirque glaciaire		Crête moraine
	Contour dépôt (moraine)		Bloc erratique
	Ligne de blocs		

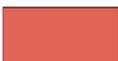
Périglaciaire et nival

	Versant régularisé		
	Front de lobe de solifluxion		Contour lobe de solifluxion
	Solifluxion		Couloir d'avalanche

Fluvatile

	Ravine		Lit torrentiel
	Dépôt de ravinement		Dépôt de ravinement ancien
	Terrasse alluviale		
	Ravine		Ravinement
	Coulée de débris		Rebord d'érosion

Anthropique

	Zone de chôme		Bâti
	Clapier		Ancienne terrasse agricole
	Enclos de pierre		Sente

Annexe 5 : Extrait de la table attributaire de la couche surface

[↑ Retour Texte](#)

Surface_Geomorphos :: Total entités: 889, filtrées: 889, sélectionnées: 0

id	DESCRIP	FORME	PROCESSUS	DYNAMIQUE	PERIODE	CODE	CERTITUDE	HYPOTHESE
10	zone de cape par le glissement	Glissement superficiel	Gravitaire		Holocene			
11	1 zone de fauchage calcaire creant des bourr...	DGCVR	Gravitaire		Tardiglaciaire-Holocene			Déformation
12	1 versant destabilisé parssemé de bourrelet...	DGCVR	Gravitaire		Tardiglaciaire-Holocene			Déformation
13	1 versant destabilisé parssemé de bourrelet...	DGCVR	Gravitaire		Tardiglaciaire-Holocene			Déformation
14	1 versant destabilisé parssemé de bourrelet...	DGCVR	Gravitaire		Tardiglaciaire-Holocene			Déformation
15	Versant bombe peut etre glissement versant	colluvion et eboulis v...	Gravitaire		Tardiglaciaire-Holocene			
16	Vallee glaciaire	Till	Glaciaire		Wurme			
17	Vallee glaciaire	Moraine	Glaciaire		Wurme			
18	Vallee glaciaire	Till	Glaciaire		Wurme			
19	Vallee glaciaire	Till	Glaciaire		Wurme			

Montrer toutes les entités

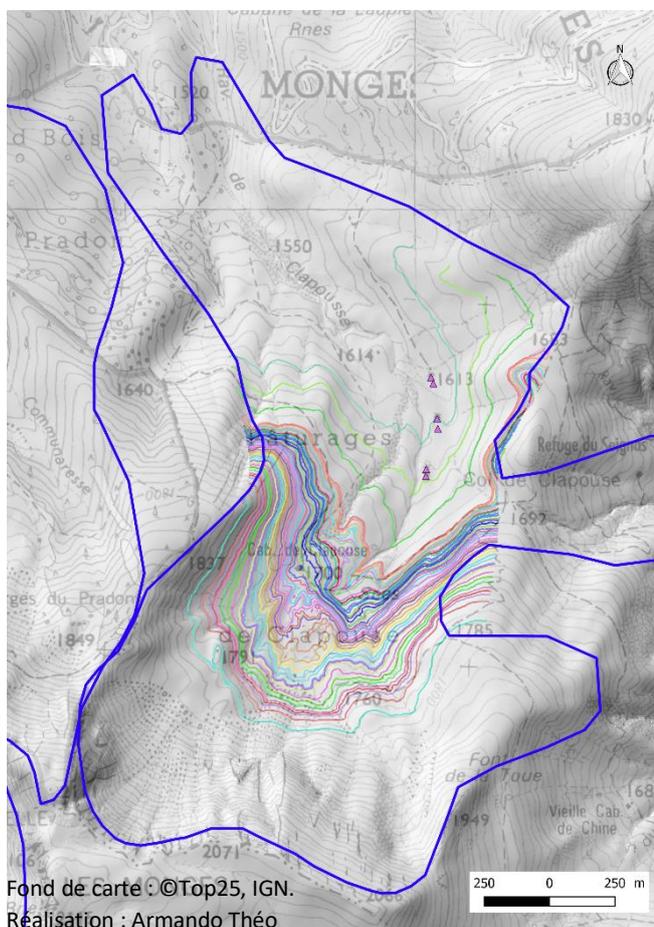
Annexe 6 : Exemple de résultat obtenu grâce à la boîte à outils ELAs.

[↑ Retour Texte](#)

La carte ci-contre montre l'emprise approximative du glacier de Clapouse pour le maximum glaciaire. Chacun des traits colorés à l'intérieur de cette emprise correspond à une ligne d'équilibre glaciaire calculée par une des nombreuses méthodes que mobilise la boîte outils ELAs (Pellittero *et al*, 2015).

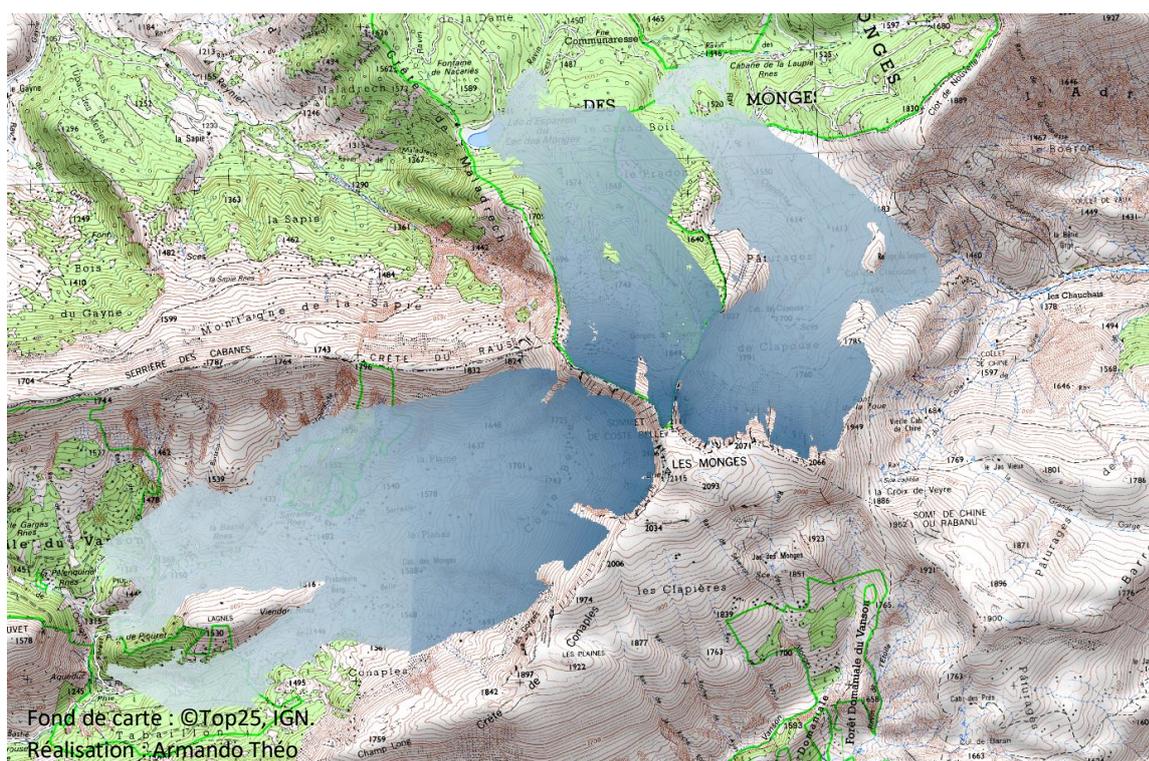
Les méthodes sont les suivantes :

- Toe to Headwall Altitude Ratio (THAR)
- Accumulation Area Ratio (AAR),
- Median Glacier Elevation (MGE)
- Area-Altitude Balance Ratio (AABR).



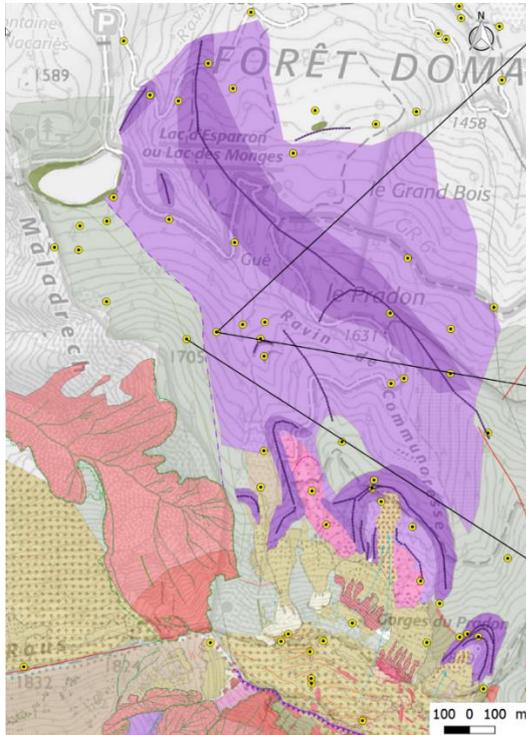
Annexe 7 : Résultat de la reconstitution 3D des glaciers obtenue grâce à la boîte à outils GlaRe pour le maximum glaciaire (Pellittero *et al*, 2016).

[↑ Retour Texte](#)



Annexe 8 : Illustration montrant l'intervalle entre une zone avec du till et sans till pour justifier le positionnement de la limite supérieure gauche du glacier de Communairesse

[↑ Retour Texte](#)



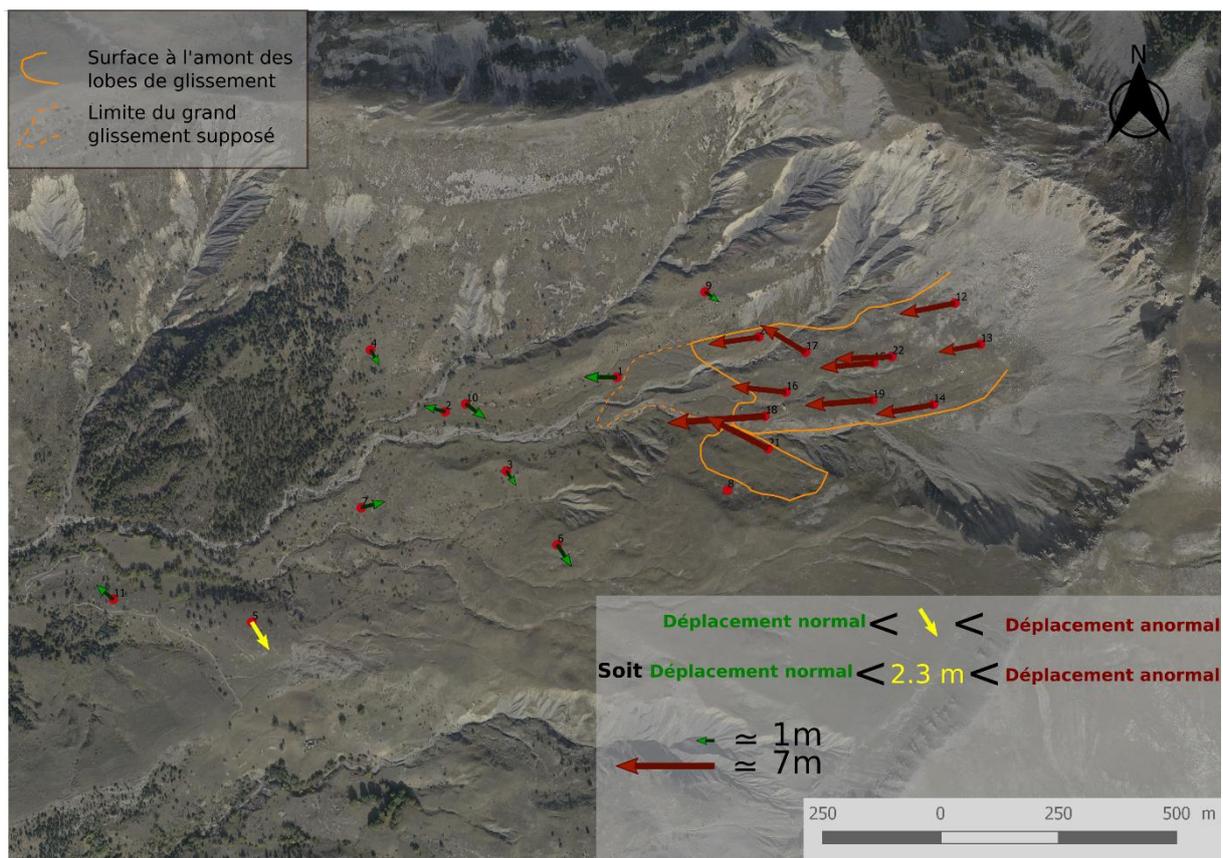
Dépôts hétérométriques de pétrologie diversifiée considérés comme étant du till.

Affleurement structural. Absence de till.

Annexe 9 : Vitesse et sens de déplacement de points de repère entre 1949-2012 à Coste Belle

[↑ Retour Texte](#)

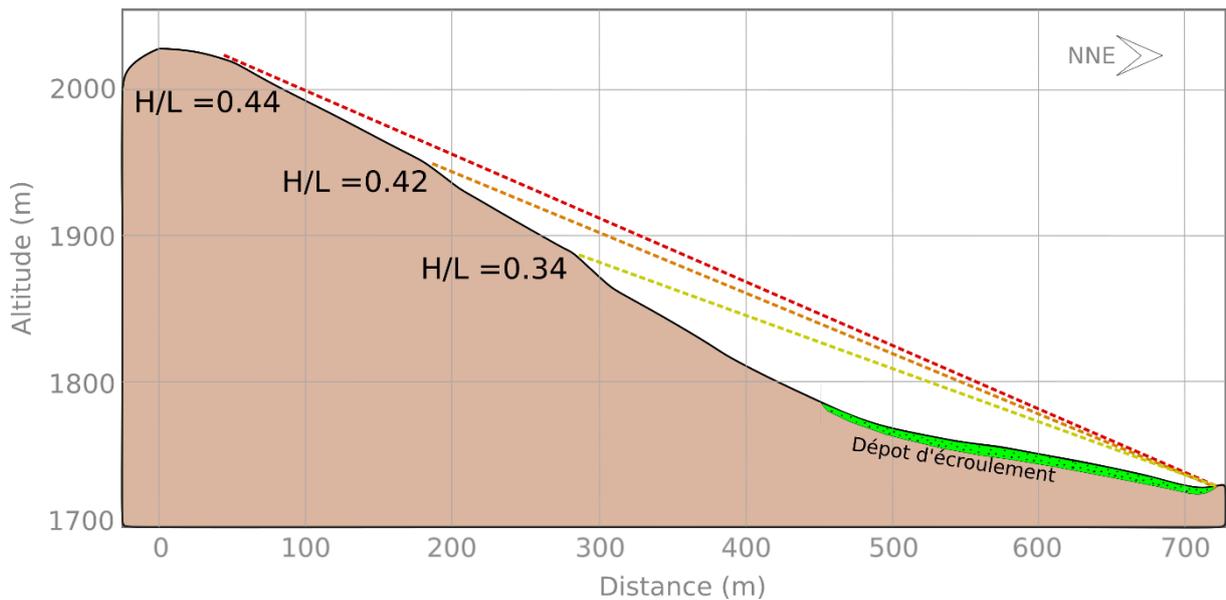
La longueur et la direction des flèches montrent de manière relative l'importance et le sens de déplacement des points de repères entre 1948 et 2012. La méthode pour estimer le déplacement du sol consiste à identifier sur l'orthophoto de 1948 des points de repère normalement fixes comme des gros blocs ou des clapiers, puis d'identifier à nouveau ces points de repères, mais cette fois-ci sur le l'orthophoto de 2012. Ensuite, il suffit de mesurer la distance entre l'emplacement du point de repère en 1948 et en 2012. A cause des petites erreurs d'orthorectification les points ne tombent jamais tout à fait au même endroit, néanmoins l'écart entre les points dans les zones supposées sans glissement est au maximum de 2.3 m. Ainsi, lorsque l'écart des points dépasse cette valeur de 2.3 m, il est probable que la cause soit une réelle mise en mouvement du sol et non les conséquences d'une erreur d'orthorectification. La zone à l'amont des lobes de solifluction semble bel et bien en déplacement ce qui valide notre hypothèse. De plus, le sens des flèches en direction de la pente correspond au mouvement d'un glissement. Néanmoins, il n'a pas été défini si le déplacement est seulement dû à la solifluxion de surface ou bien si le glissement-coulée est aussi responsable.



Annexe 10 : Distance anormalement élevée parcourue par l'éroulement de Communaressse

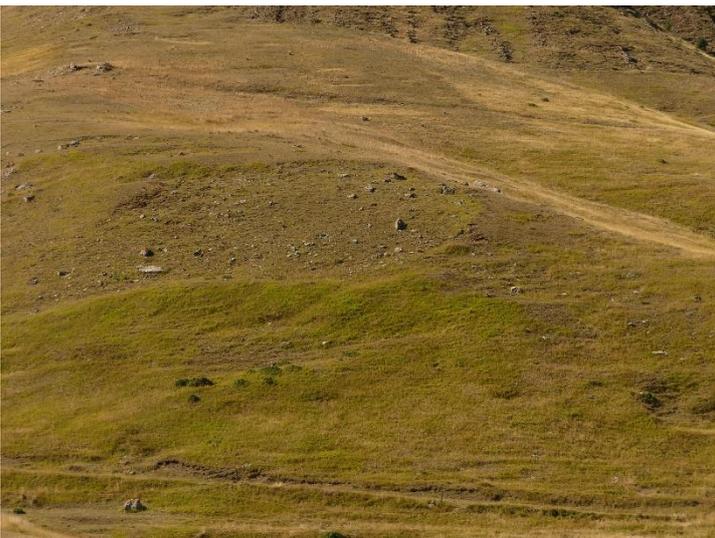
[↑ Retour Texte](#)

En faisant l'estimation exagérée que le volume de l'éroulement est de 100 000 m³, le rapport H/L devrait dépasser 0.5 (Mitchell et al, 2018). Malgré la surestimation du volume de l'éroulement, quelle que soit la zone de départ, le rapport H/L reste bien inférieur à 0.5. Ce déplacement anormalement grand de l'éroulement est probablement dû à la présence de neige ou de glace qui a diminué le frottement et permis une propagation plus lointaine.



Annexe 11 : Photos processus de versant superficiel ...

[↑ Retour Texte](#)



Glissement superficiel dans du till. (Pâturage de Clapouse)



Coulée boueuse à l'est du bastion morainique le plus bas de Clapouse

Annexe 12 : Photos de ravinement dans les marnes noires ou badlands du côté de Coste Belle



[↑ Retour Texte](#)



Annexe 13 : Coulée de débris (Cirque de Clapouse)



[↑ Retour Texte](#)

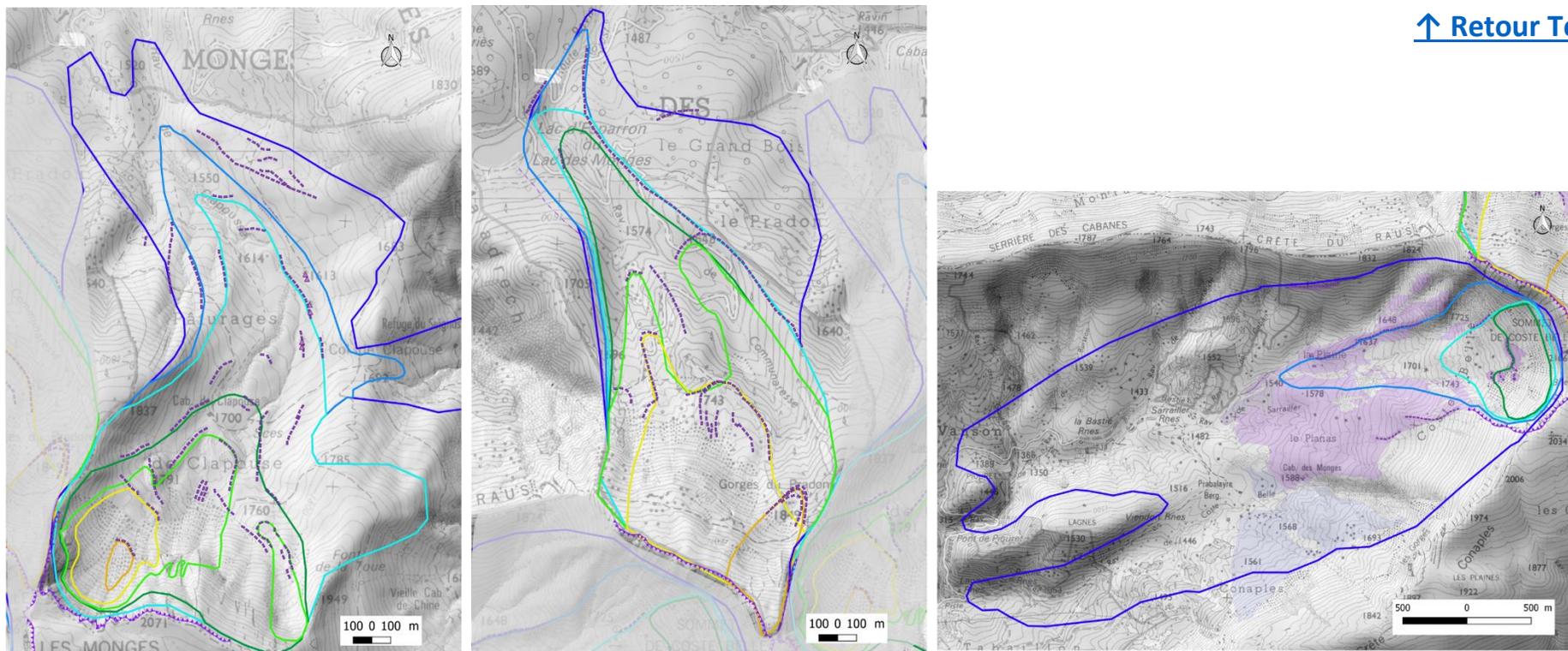
Annexe 14 : Lac fossile de Clapouse



[↑ Retour Texte](#)

Annexe 15 : Reconstitution de quelques stades glaciaires et calcul de la LEG pour chacun.

[↑ Retour Texte](#)



Secteurs	
Methodes	
Stades	
Stade 1	
Stade 2	
Stade 3	
Stade 4	
Stade 5	
Stade 6	
Stade 7	

Clapouse	
Moy ELAs	Ecart type
1727	± 34
1769	± 33
1798	± 31
1832	± 21
1832	± 17
1874	± 13
1899	± 5

Communaresse	
Moy ELAs	Ecart type
1694	± 27
1712	± 28
1721	± 28
1733	± 26
1786	± 24
1852	± 26
1952	± 20

Coste Belle	
Moy ELAs	Ecart type
1615	± 37
1711	± 28
1875	± 57
1890	± 6

Annexe 15a : Altitude des LEG obtenue avec les différentes méthodes pour les différents stades

Secteurs		Clapouse						
Methodes	¹	²	³	⁴	⁵	⁶	Moy Methodes (1,3,4,6)	Ecart type
	MGE	AAR (ratio: 0,4 - 0,8)	AAR (ratio = 0,65)	AA	AABR (ratio 0,9 - 4,4)	AABR (ratio = 1,8)		
Stades								
Stade 1	1736	1787 - 1629	1680	1763	1770 - 1680	1728	1727	34
Stade 2	1788	1828 - 1665	1723	1800	1807 - 1717	1765	1769	33
Stade 3	1814	1854 - 1699	1755	1827	1833 - 1748	1794	1798	31
Stade 4	1848	1880 - 1751	1803	1849	1854 - 1792	1826	1832	21
Stade 5	1845	1872 - 1768	1810	1846	1851 - 1798	1827	1832	17
Stade 6	1882	1900 - 1827	1856	1885	1888 - 1852	1871	1874	13
Stade 7	1903	1910 - 1881	1892	1903	1905 - 1890	1898	1899	5
Secteurs		Communaresse						
Methodes	¹	²	³	⁴	⁵	⁶	Moy Methodes (1,3,4,6)	Ecart type
	MGE	AAR (ratio: 0,4 - 0,8)	AAR (ratio = 0,65)	AA	AABR (ratio 0,9 - 4,4)	AABR (ratio = 1,8)		
Stades								
Stade 1	1706	1741 - 1605	1657	1722	1729 - 1648	1692	1694	27
Stade 2	1724	1755 - 1632	1674	1740	1746 - 1669	1711	1712	28
Stade 3	1731	1760 - 1641	1682	1749	1755 - 1680	1720	1721	28
Stade 4	1743	1773 - 1649	1697	1761	1767 - 1692	1732	1733	26
Stade 5	1796	1836 - 1709	1753	1811	1816 - 1749	1785	1786	24
Stade 6	1874	1907 - 1765	1818	1871	1876 - 1809	1846	1852	26
Stade 7	1968	1994 - 1886	1925	1967	1971 - 1921	1948	1952	20
Secteurs		Coste Belle						
Methodes	¹	²	³	⁴	⁵	⁶	Moy Methodes (1,3,4,6)	Ecart type
	MGE	AAR (ratio: 0,4 - 0,8)	AAR (ratio = 0,65)	AA	AABR (ratio 0,9 - 4,4)	AABR (ratio = 1,8)		
Stades								
Stade 1	1631	1684 - 1498	1563	1652	1660 - 1560	1614	1615	37
Stade 2	1729	1773 - 1612	1673	1737	1743 - 1661	1706	1711	28
Stade 3	1865	1884 - 1798	1833	1959	1862 - 1820	1843	1875	57
Stade 4	1897	1907 - 1866	1882	1894	1896 - 1874	1886	1890	6
Stade 5								
Stade 6								
Stade 7								

Annexe 16 : Reconstitution de la chronologie relative des unités morphologiques des 3 secteurs des Monges

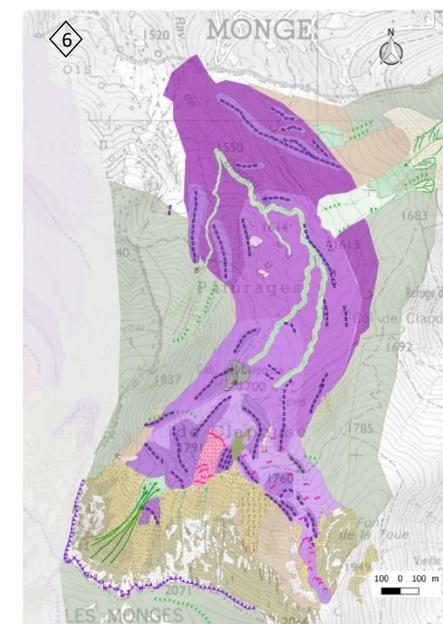
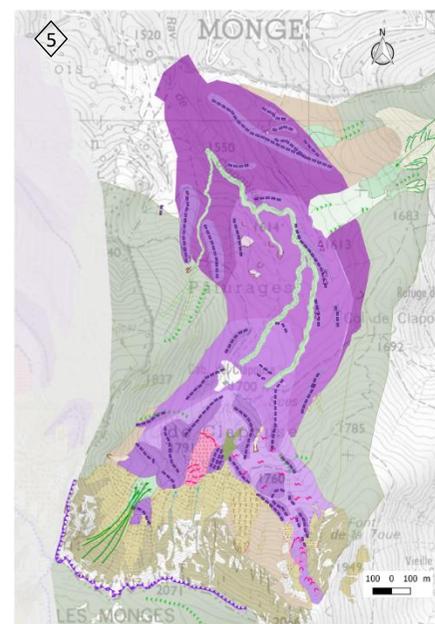
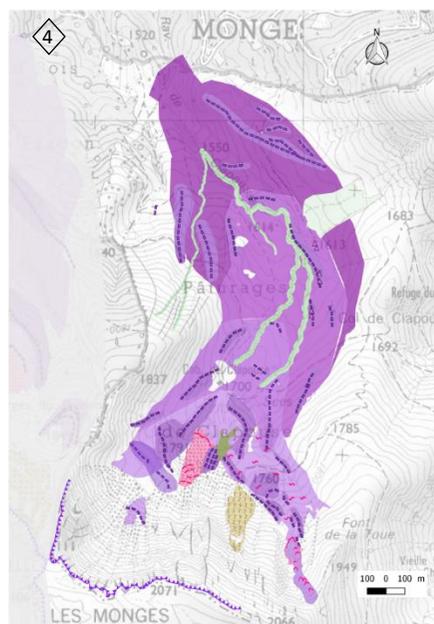
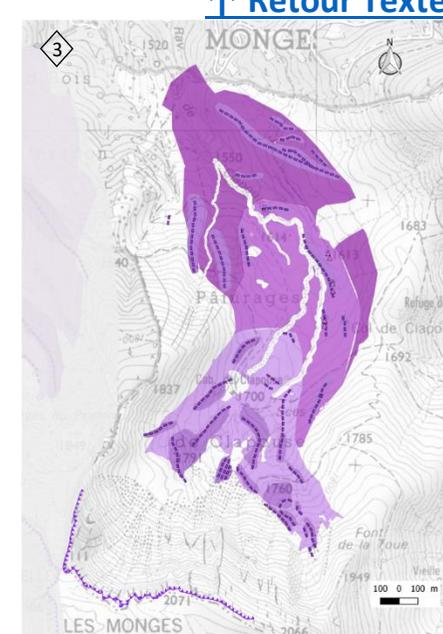
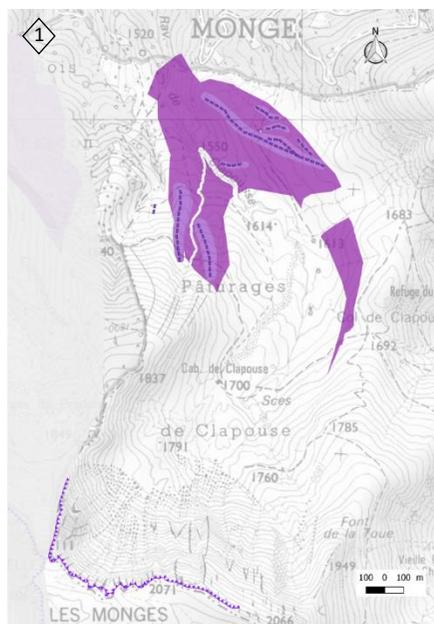
CLAPOUSE

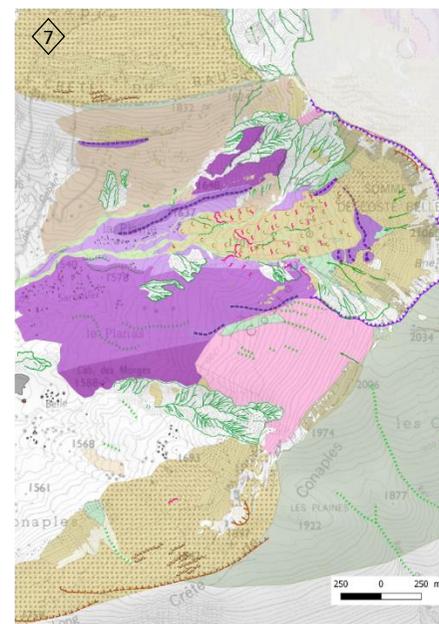
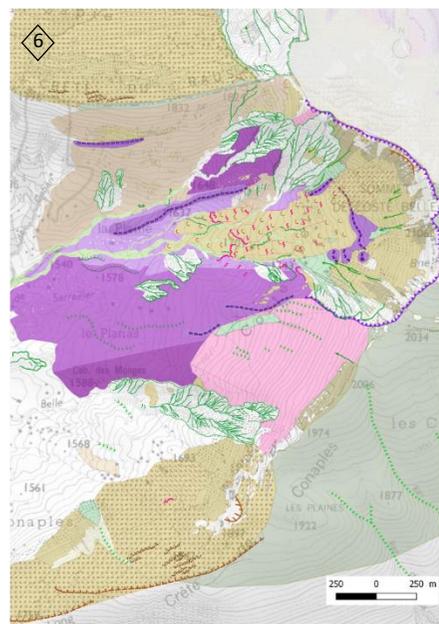
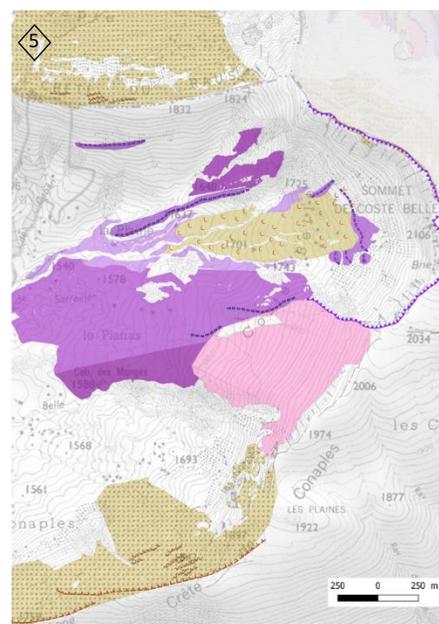
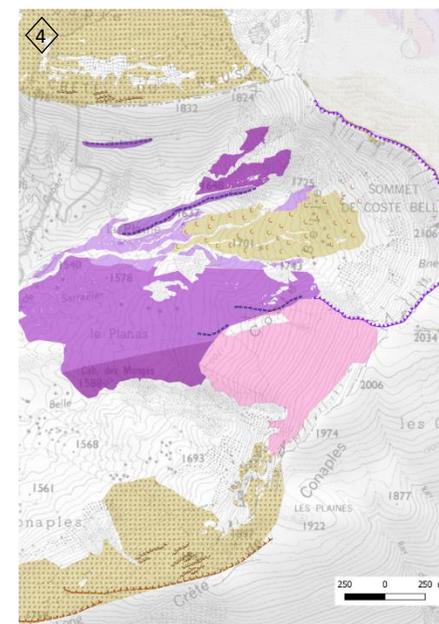
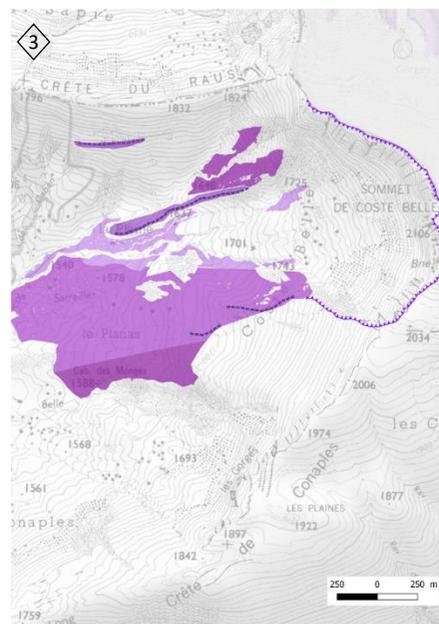
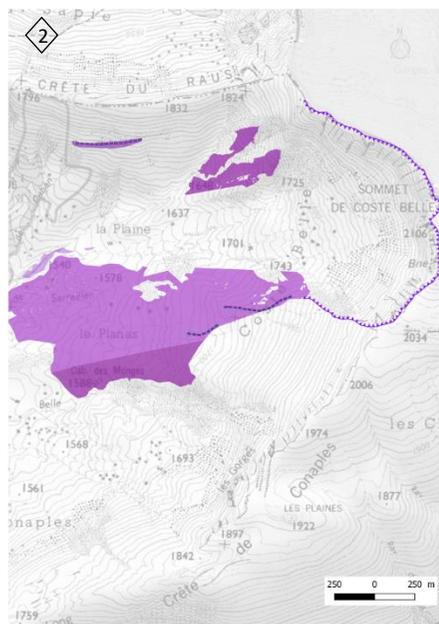
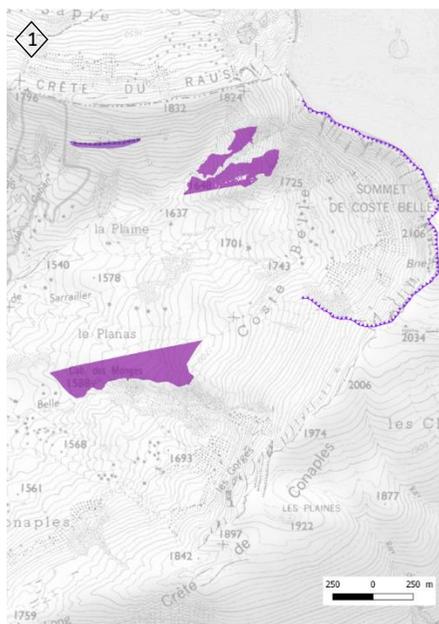
1-3 : Dépôt de till et formation des moraines au fil des différents stades würmiens.

4 : Dernier stade Tardiglaciaire et activation des processus périglaciaires (Glacier rocheux et solifluxion). Les eaux de fonte commencent à former des ravines au centre de l'ancien lit glaciaire. Déclenchement du glissement rocheux.

5 : Evolution morphogénique marginale par rapport aux dynamiques passées. Fin des processus glaciaires et périglaciaires à l'exception de la solifluxion. Eboulement continu et éboulement ponctuel. Propagation saisonnière des laves de débris et des avalanches. Développement de sol sur roche en place.

6 : Anthropisation par le développement du pastoralisme et de la sylviculture.





Coste Belle

1-3 : Dépôt de till et formation des moraines au fil des différents stades würmiens.

4 : La déglaciation déstabilise les versants et rend possible le déclenchement de glissements de terrain favorisés par la saturation du sol par les eaux de fonte. Condition froide favorisant la régularisation des versants et la solifluxion.

5 : La récurrence glaciaire construit les moraines frontales au-dessus de 1850 m.

6 : Déstabilisation de versant paraglaciaire. Développement du ravinement dans les marnes noires et de l'incision des dépôts par les cours d'eau. Continuité des processus d'ébouillement, de lave de débris et de solifluxion.

7 : Impacts anthropiques, construction de clapiers et de terrasses agricoles puis développement du pastoralisme.

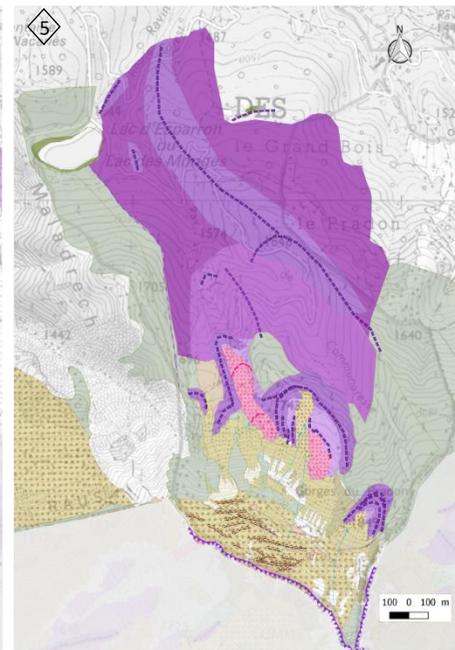
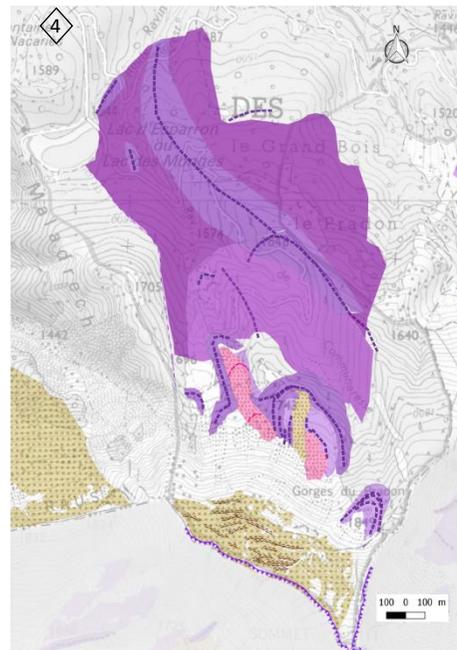
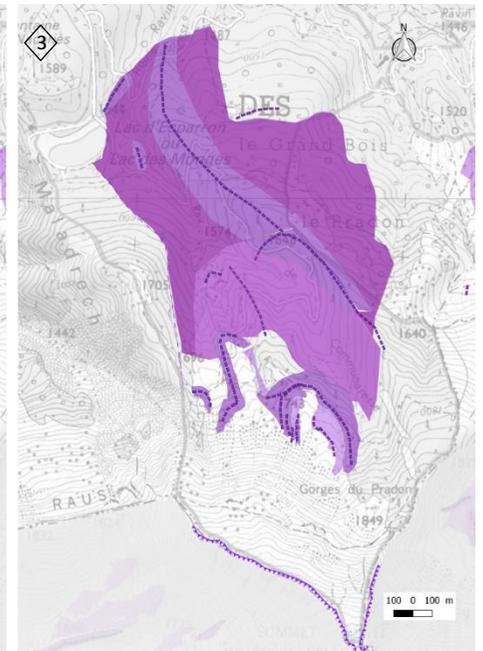
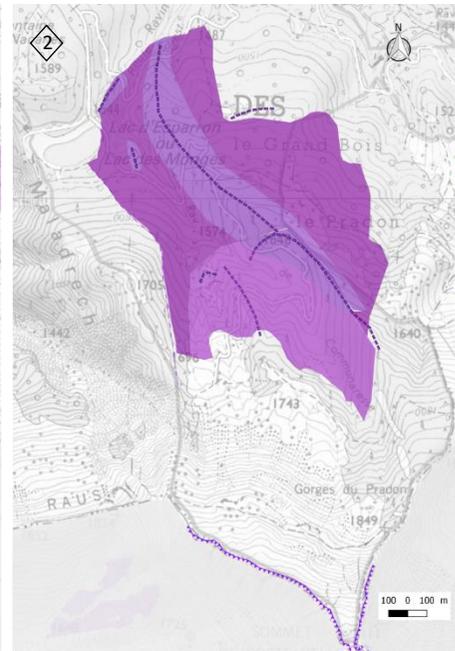
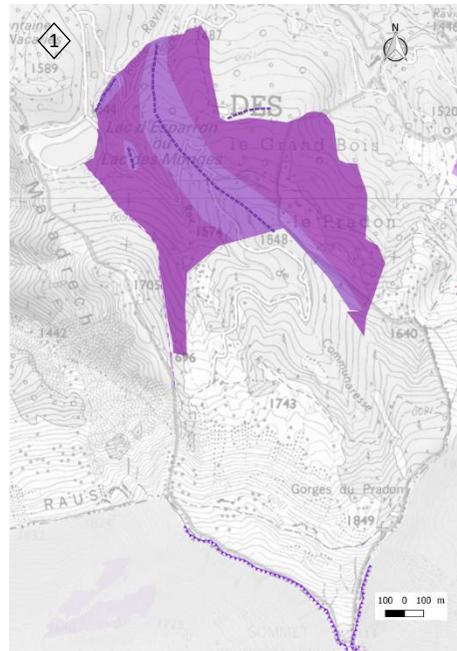
COMMUNARESSE

1 : Débordement du glacier du côté du Grand Bois (NE) et formation de la grande moraine latérale droite.

2-3 : Des récurrences ou des stades de stagnation créent les moraines latéro-frontales.

4 : Vers la fin de la glaciation des glaciers rocheux s'activent en parallèle des déstabilisations de versant paraglaciale.

5 : L'ébouilisation devient le processus dominant avec la formation de sol sur roche en place et l'atterrissement des zones humides.



Fond de carte : ©Top25, IGN.

Réalisation : Armando Théo

Annexe 17 : Cartographie du gisement d'arbres subfossiles du secteur de Bastié (C. Miramont, 2011).

Le cercle rouge entoure les arbres fossiles qui auraient pu être ensevelis par le glissement-coulée, mais plus probablement par d'autres processus comme la solifluxion ou de petits glissements superficiels.

[↑ Retour Texte](#)



Annexe 18 : Formation du lac des Monges

[↑ Retour Texte](#)

