

# Analyse de la fracturation des parois rocheuses du glacier rocheux des Clots de la Menera

## Fracture analysis of the rockwalls sources of Clots de la Menera rock glacier

Alaïs GAUDRY<sup>1</sup>, Muriel GASC-BARBIER<sup>1,\*</sup>, Florence MAGNIN<sup>2</sup>

*1 Géomatériaux et géomécanique : couplages et dynamique en géotechnique, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Aix-en-Provence, France*

*2 Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne, Université Savoie-Mont-Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble, Le Bourget du Lac, France*

\* [muriel.gasc@cerema.fr](mailto:muriel.gasc@cerema.fr)

**RESUME :** Dans le contexte de changement climatique, la dégradation du pergélisol, observée notamment par l'approfondissement de sa couche active (qui gèle et dégèle de façon saisonnière), entraîne une modification de l'intensité et de la fréquence des cycles de gel-dégel et des processus de gelifraction au sein de cette dernière. Dans le cadre du projet EU Interreg POCTEFA Permapyrénées (EFA 063/01), une étude de terrain a été réalisée sur les parois fournissant les matériaux (débris rocheux) au glacier rocheux des Clots de la Menera en Andorre, pour évaluer l'état de leur fracturation et installer des capteurs de température en proche surface des parois. Les données de température serviront à modéliser son évolution en proche surface et en profondeur entre 1960 et l'actuel dans différentes zones, pour mieux caractériser la dynamique des cycles de gel-dégel. Cette étude s'est déroulée sur 3 zones du site. D'abord, chaque zone a été photographiée puis reconstruite par photogrammétrie afin d'avoir une vue d'ensemble des parois. Les nuages de photogrammétrie ont ensuite été géoréférencés et projetés sur un modèle numérique de terrain du site. Dans chacune des 3 zones, l'orientation des principales fractures a été relevée à la boussole et la résistance à la compression simple des roches a été mesurée au scléromètre (marteau de Schmidt de type N). L'évaluation de l'état général des parois a été réalisée selon les classifications GSI (Geological Strength Index) et RMR (Rock Mass Rating). Des roches ont également été collectées sur place pour réaliser par la suite des essais de laboratoire sur les impacts de cycles répétés de gel-dégel sur celles-ci. Le travail présenté ici décrit la campagne de terrain réalisée en juillet 2025, ainsi que son analyse, qui correspond à la première étape de l'étude de la fourniture en matériau du glacier rocheux.

**ABSTRACT:** In the context of climate change, the degradation of permafrost, notably observed through the deepening of the active layer (which freezes and thaws seasonally), leads to changes in the intensity and frequency of freeze-thaw cycles and gelifraction processes in it. As part of the EU Interreg POCTEFA Permapyrénées project (EFA 063/01), a field study was conducted on the rock wall supplying material (rock debris) to the Clots de la Menera rock glacier in Andorra to assess their state of fracturing and install temperature sensors. These sensors will be used to model changes in near-surface temperatures and at depth at different zones in order to better characterize the dynamics of freeze-thaw cycles. This study is a description of the fieldwork carried out in July 2025. Three sites on the rock glacier were selected and analyzed in detail. First, each area was photographed and the images were processed using photogrammetry to obtain an overview of the rockwalls. The images were then georeferenced and pasted onto a digital terrain model of the site. In each of the three areas, the orientation of the main fractures was measured using a compass and the simple compressive strength of the rocks was measured using a sclerometer (Schmidt hammer type N). The general condition of the rockwalls was assessed according to the GSI (Geological Strength Index) and RMR (Rock Mass Rating) classifications. Rocks were also collected on site for subsequent laboratory testing on the impacts of repeated freeze-thaw cycles on them.

This article focuses on the July 2025 field campaign work and its analysis as a first study of the material supply to the rock glacier.

**Mots-clés :** fractures, glacier rocheux, caractérisation in-situ, marteau de Schmidt, RMR

### 1 INTRODUCTION

Le changement climatique, particulièrement renforcé depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle, provoque des varia-

tions de température et de régime hydrique différents selon les endroits du globe (Rifai et al., 2015; Cantet et Arnaud, 2008; Planton et al., 2004). En particulier,

les hausses de température de l'air provoquent la dégradation du pergélisol (Liu et al., 2021; Noetzli et al., 2024; Biskaborn et al., 2019). Dans les terrains de montagne, la dégradation du pergélisol peut avoir des conséquences importantes en augmentant la fréquence voire l'intensité des déstabilisations rocheuses (Magnin et al., 2023). En effet, la présence de glace dans les fractures des versants rocheux et l'état de gel de la roche intacte augmentent la stabilité des versants. Son dégel implique donc une fragilisation des parois en affectant les contraintes de cisaillement le long des plans de fracture avec, par exemple, la diminution de la cohésion ou l'endommagement des contacts roche-glace et une diminution de la résistance de la roche intacte (Krautblatter et al., 2013).

Par ailleurs, la dégradation du pergélisol en profondeur s'accompagne d'une modification de la fréquence et de l'intensité des cycles de gel-dégel de proche surface, dans la couche active, affectant ainsi les processus d'ébouilisation et la production sédimentaire.

Le projet Interreg Poctefa Permapyrenees (EFA 063/01) (01/01/2024 – 01/01/2027) porté par l'Université de Barcelone, en collaboration avec divers organismes espagnols (CTTC - Centre Technologique des Télécommunications de Catalogne, IPE - Institut Pyrénéen d'écologie, la fondation Kilian Jornet), français (Université de Perpignan, CEREMA) et andorran (AR+I - Andorre Recherche + Innovation) vise à mettre en place une surveillance du pergélisol dans plusieurs zones des Pyrénées. Des capteurs de température vont notamment être installés en surface et en profondeur sur les 6 sites sélectionnés pour le projet, réparties entre la France, l'Espagne et Andorre. Seule une partie de ces sites est équipée à ce jour, leur étude permettra de mieux identifier les aléas, sources de risques naturels, associés à la dégradation du pergélisol et à la modification des processus périglaciaires.

Dans ce projet, le CEREMA est plus particulièrement en charge de l'étude du comportement mécanique des parois à permafrost et glaciers rocheux, afin de mieux comprendre les risques de déstabilisation (chutes de blocs, etc). Pour cela une triple approche sera menée: terrain (caractérisation mécanique des parois rocheuses sur site), laboratoire (réalisation d'essais de gel-dégel) et numérique (modélisation thermo-mécanique des effets des cycles répétés de gel-dégel sur la fracturation des roches).

Ce travail a été initié par une étude de terrain conduite en juillet 2025 sur le site des Clots de la Menera en Andorre, afin de décrire l'état de fracturation des parois rocheuses et installer des capteurs de

température en proche surface. Cet article se concentre sur la description des mesures réalisées et des méthodes non destructives qui ont été utilisées.

## 2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE ET METHODES UTILISEES

Le cirque des Clots de la Menera, a été sélectionné parmi les 6 sites du projet en raison de son accessibilité : en effet, une piste nous amène à moins d'1km du glacier rocheux, les autres sites n'étant accessibles que par hélicoptère. Il présente de plus l'avantage d'être l'un des premiers sites qui a été instrumenté par les autres partenaires du projet.

### 2.1 Description géographique et géologique de la zone d'étude

Le cirque des Clots de la Menera est un glacier rocheux qui se situe au cœur des Pyrénées, à Andorre, à 3km au Sud-Ouest du Pas de la Case et à proximité de la triple frontière entre Andorre, l'Espagne et la France. Ce cirque de 1.5 km<sup>2</sup> orienté vers le Nord, se trouve à proximité du cirque de Pessons, sur la partie haute de la vallée de la Valira. Son altitude varie de 2400 m à 2822 m (sommet du Pic Negre d'Envalira). D'un point de vue géologique on trouve des granodiorites à biotite datant de l'Hercynien sur la majeure partie de la zone et des schistes très altérés datant du Cambrien-Ordovicien sur le flanc Ouest.

Dans le cadre du Projet Permapyrénées, différentes données ont déjà été collectées dans ce cirque (Oliva et al., 2025; Echeverria, 2025), avec notamment la mesure de la résistivité électrique grâce à un sondage électrique vertical (VES) qui permet d'identifier les parties gelées en subsurface. Des capteurs de température et des réflecteurs d'angles ont également été installés en 2024 pour permettre un suivi thermique et la mesure précise des mouvements du glacier rocheux. En juillet 2025, de nouveaux capteurs de température ont été installés à distance régulière dans des forages, jusqu'à 14.7m de profondeur, pour comparer les températures en surface et en profondeur et analyser la distribution et la dynamique du pergélisol.

### 2.2 Description des 3 zones d'étude

Trois zones d'étude spécifiques ont été sélectionnées dans le cirque pour réaliser des analyses mécaniques (Figure 1). Ces zones ont été choisies pour leur accessibilité, leur proximité avec certains capteurs de température ainsi que leur diversité lithologique et structurale.

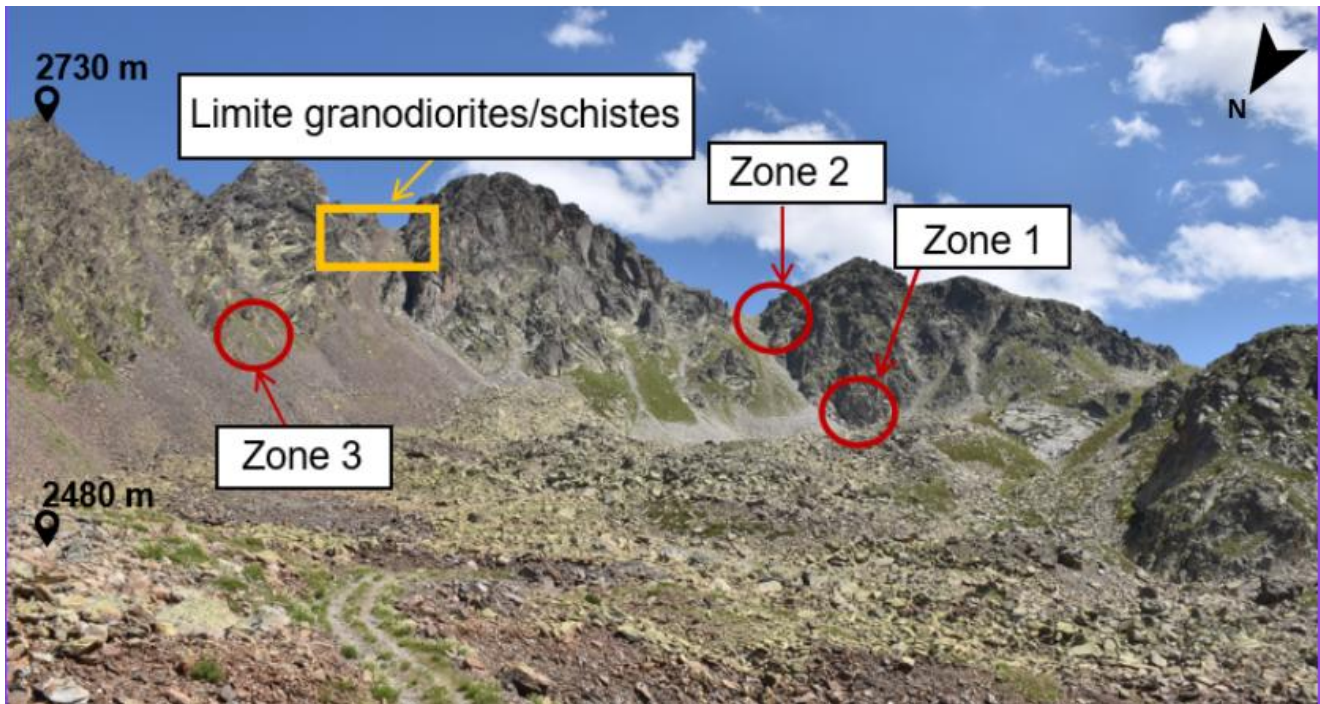


Figure 1. Emplacement des différentes zones d'études

### 2.2.1 Description de la zone 1

La première zone d'étude (N 42.516302 E 1.718623, Figure 2), se trouve sur le flanc Nord du cirque, en pied de paroi, à environ 2600m d'altitude. Cette zone orientée vers le Nord-Ouest a été choisie car elle a une surface accessible relativement importante et elle se trouve à proximité de capteurs de température (I-Buttons, (Mouser Electronics, s. d.)) placés au même moment. Cette paroi d'environ 300 m<sup>2</sup> est constituée de granodiorites, et est traversée par deux failles principales d'orientation Est-Ouest.



Figure 2. Photographie de la zone 1

Le nuage photogrammétrique de la zone 1 a d'abord été superposé sur un modèle numérique de terrain (Figure 3) issu de données LIDAR, fourni par AR+I, pour faire des analyses de fracturation. La précision du nuage de points n'étant pas suffisante

(1m), des analyses complémentaires sur les plans de fractures ont été faites.

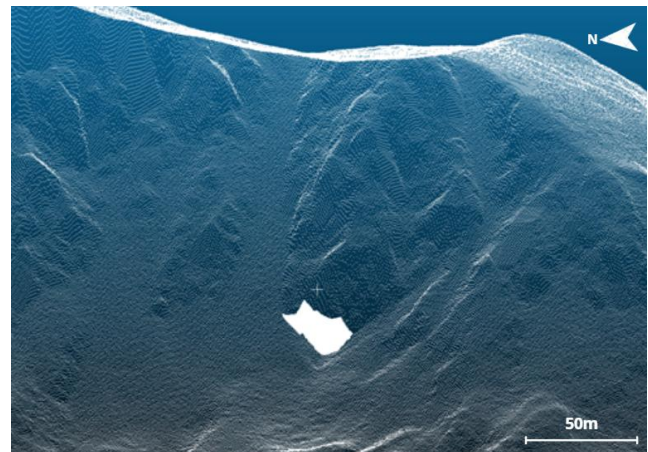


Figure 3. Superposition du nuage de photogrammétrie sur le modèle numérique de terrain

### 2.2.2 Description de la zone 2

La zone 2 (N 42.515557 E 1.720455, Figure 4) se situe sur la crête du cirque, à l'Est du pic d'Engaït et au dessus de la zone 1. Elle est orientée vers le Nord-Est à environ 2750 m d'altitude. La paroi étudiée est composée de granodiorites. Elle présente une distribution de fractures différentes de celle de la zone 1 puisqu'il y a une plus grande densité de discontinuités et elles sont en moyenne moins longues.



Figure 3. Photographie de la zone 2

### 2.2.3 Description de la zone 3

La zone 3 (N 42.519535 E 1.719811, Figure 5) se trouve sur le flanc Ouest du cirque dans la formation schisteuse. Elle est orientée vers le Sud et se trouve à environ 2650 m d'altitude. Cette zone d'environ 12m<sup>2</sup> est intéressante pour l'étude puisqu'elle a une lithologie différente des autres zones, permettant de comparer le comportement du schiste à celui des granodiorites.



Figure 5. Photographie de la zone 3

## 2.3 Méthodes non destructives utilisées pour évaluer l'état des parois rocheuses

Différentes méthodes non destructives ont été utilisées pour décrire l'état de fracturation des parois rocheuses.

### 2.3.1 Photogrammétrie

La reconstruction d'images par photogrammétrie a été utilisée pour obtenir une représentation de chaque zone dans son entièreté et permettre une analyse plus approfondie et représentative de la distribution des fractures sur les parois. Des photographies ont été prises sur le terrain à distance constante d'une cible

désignée sur la paroi avec des angles de vue permettant un recouvrement suffisant. Les réglages de l'appareil photo ont été conservés durant toute l'acquisition. Chaque photographie a été géolocalisée à l'aide d'un GPS Garmin Montana 380t. Les photographies ont ensuite été importées dans le logiciel 3DF Zephyr Free (3DFlow, s. d.) pour être reconstruites par photogrammétrie, en nuage de points puis en maillage texturé.

### 2.3.2 Orientation des fractures principales

Quelques mesures de l'orientation (dip direction/dip) des plans de fractures ont été faites à l'aide d'une boussole, autour des discontinuités accessibles en pied de paroi. De plus, une estimation de l'orientation des fractures a été menée à partir du maillage de photogrammétrie, pour avoir une estimation de l'orientation des plans de discontinuité sur la zone d'étude complète. Ces dernières ont été réalisées sur les logiciels gratuits Cloud Compare (Cloud Compare, s. d.) et Stereonet (Rick Allmendinger's Stuff, s. d.) : D'abord, le maillage texturé a été nettoyé, orienté et converti en nuage de points. Ensuite, la direction des normales en chaque point a été calculée. Pour plus de précision, la planéité des surfaces du nuage de points a été estimée afin de lisser les angles et la densité de points de ce même nuage a été analysée pour trouver une valeur de rayon et un nombre de proches voisins optimal pour paramétrer le calcul des normales. Les normales résultantes ont ensuite été converties en un champ scalaire.

Ensuite, les plans de fractures (facettes) approchant les directions des plans des différentes surfaces ont été extraits grâce au plugin *facet/fracture detection* (Dewez et al., 2016) du BRGM. Au sein de ce *plugin*, l'utilisateur a le choix entre deux méthodes de calcul. D'abord, le Kd-tree crée des petits plans qui sont ensuite fusionnés en facettes plus grandes, l'utilisateur choisit alors l'angle maximal entre deux plans voisins qui seront fusionnés ainsi que la distance maximale entre un plan et le centre de la facette finale. La deuxième méthode est le Fast Marshing, l'utilisateur peut choisir la précision du maillage (octree) utilisée pour faire le calcul de facette. Pour les deux méthodes, certains paramètres sont entrés par l'utilisateur : la distance maximale entre deux points d'une même facette, le nombre minimal de points par facette et la distance maximale entre chaque point et le contour de la facette.

Les orientations de ces facettes ont ensuite été exportées sur le logiciel Stereonet, afin de les séparer en familles principales, grâce à un stéréogramme. A travers une distribution de Fisher, la moyenne des pôles de chaque famille a été calculée et convertie en plan moyen.

### 2.3.3 Description mécanique des parois rocheuses

**Mesure au marteau de Schmidt** : L'essai au scléromètre ou essai au marteau de Schmidt est un essai fréquemment utilisé en laboratoire (marteau de Schmidt de type L) et sur le terrain (marteau de Schmidt de type N) pour étudier la résistance à la compression uniaxiale d'un matériau (roche ou béton). Dans cette étude, un marteau de Schmidt de type N (Proceq, 2023) avec une énergie d'impact de 2.207Nm a été utilisé pour mesurer la valeur de rebond d'une masse, perpendiculairement à la surface étudiée (Elkharrat et al., 2025). Cette valeur de rebond a ensuite été convertie en force de compression uniaxiale in situ grâce à la courbe de conversion décrite par (Katz et al., 2000). Un facteur de correction (Aydin, 2008) a été appliqué pour calibrer les valeurs obtenues par rapport à celles mesurées grâce à l'enclume portable, avant les premières mesures. Ce facteur est a été choisi égal à 1 pour toutes les mesures de l'étude.

**Geological Strength Index (GSI)** : Le GSI est un paramètre décrit initialement par (Hoek et Brown, 1997) pour donner une indication sur la qualité générale de la paroi rocheuse en fonction de la structure de ses fractures et de ses conditions de surface. Un GSI faible est par exemple attribué à une surface très altérée et une roche très fracturée tandis qu'une roche très peu fracturée avec une surface peu altérée a un GSI élevé.

**Rock Mass Rating (RMR)** : Introduit par (Bieniawski 1989), le RMR est un outil très utilisé pour caractériser une paroi et ses discontinuités. Il se base sur différents paramètres : A1- les valeurs de résistance à la compression uniaxiale mesurées au marteau de Schmidt, A2- le RQD (Rock Quality Designation), décrivant le degré de fracturation du massif rocheux, A3- l'espacement des discontinuités, A4- la nature des discontinuités (le remplissage, l'ouverture, la rugosité et l'altération), et A5- les conditions hydrogéologiques des fractures. Une note est attribuée à chacune de ces classes pour obtenir une note totale de RMR sur 100. Un RMR supérieur à 80 décrit une roche de très bonne qualité tandis qu'un RMR inférieur à 20 est attribué à une roche de qualité médiocre.

### 2.3.4 Mesure de la température de proche surface

Des capteurs de température de type I-Buttons (Mousers®, DS1925L-F5#, accuracy  $\pm 0.5$  °C, resolution 0.065 °C) ont été installés en proche surface à proximité des 3 zones d'étude et autour du cirque des Clots de la Menera. Ces capteurs enregistrent une valeur de température toutes les heures, ce qui permet d'obtenir des informations précises sur les cycles de gel-dégel

et permettra de calibrer un modèle de bilan d'énergie qui servira à modéliser l'évolution de cette température et des cycles de gel-dégel sur plusieurs décennies.

### 2.3.5 Collecte d'échantillons pour essais de laboratoire

On peut noter que des blocs de granodiorites et de schistes ont été collectés dans le cirque pour être carottés et être étudiés en laboratoire. L'objectif principal de cette étude sera de reproduire le processus de gélifraction de ces roches, en fonction des conditions d'essai, pour remonter à une loi d'endommagement.

## 3 RESULTATS

Les résultats présentés dans cette section sont uniquement ceux issus de l'étude de la zone 1.

### 3.1 Orientations et familles de fractures

Après étude de la densité du nuage de points, un rayon de 40 cm et un nombre de proches voisins de 7 ont été pris en compte pour le calcul des normales. Pour déterminer l'orientation des facettes, la méthode de Fast Marshing a été choisie et les paramètres décrits dans le Tableau 1 ont été utilisés.

Tableau 1. Paramètres utilisés pour l'extraction des facettes par Fast Marshing

Paramètre	Valeur
Niveau d'Octree	7
Distance max (99%) [m]	0.2
Nombre de points minimum par facette	10
Distance maximale au bord de la facette [m]	1.0

La figure 6 présente les différentes facettes qui ont été extraites du nuage de photogrammétrie.

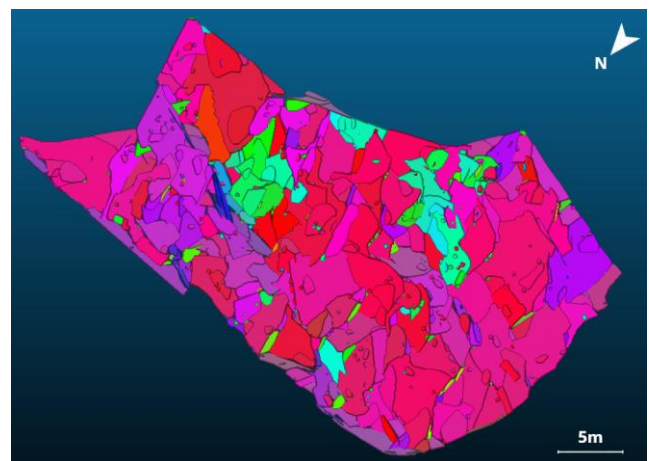


Figure 6. Facettes extraites du nuage de photogrammétrie

La figure 7 présente le stéréogramme de synthèse sur lequel 749 pôles des facettes identifiées par photogrammétrie ainsi que les pôles des plans de fractures mesurés sur le terrain (croix rouges) sont représentés. Ce stéréogramme permet d'identifier trois familles, elles aussi représentées sur la figure 8 et reprises dans le Tableau 2. On remarque que la majorité des plans dont les orientations ont été mesurées sur le terrain ne se trouvent pas dans les principales familles de fractures. Ceci souligne l'importance de l'étude du nuage de photogrammétrie pour avoir des données représentatives de la zone.

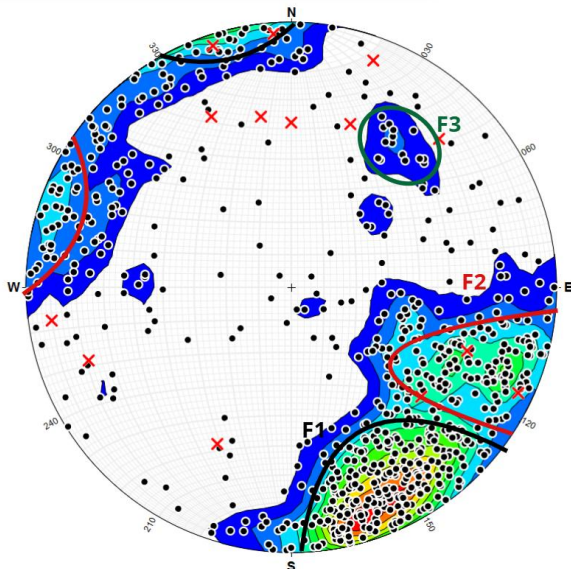


Figure 7. Stéréogramme de la répartition des pôles en familles

Tableau 2. Orientation des 3 familles extraites du jeu de données de la zone 1

Paramètre	Famille 1	Famille 2	Famille 3
Azimut [°]	246	202	127
Direction de pendage moyenne [°]	336	292	217
Pendage moyen [°]	73	61	56
% nombre total plans de fracture	41.8	33.1	2.1

La figure 8 présente les plans moyens des 3 familles de fractures, l'orientation du plan de talus ( $325^{\circ}/73^{\circ}$ ) ainsi que les angles de frottements définis entre  $35^{\circ}$  et  $65^{\circ}$ . On peut observer sur ce stéréogramme que le plan de talus se trouve à proximité du plan moyen de la famille 1. De plus, on remarque qu'on peut potentiellement trouver une instabilité, définie par l'intersection du plan de talus

avec les familles 2 et 3 (points rouges) dans l'intervalle de valeurs de l'angle de frottement.

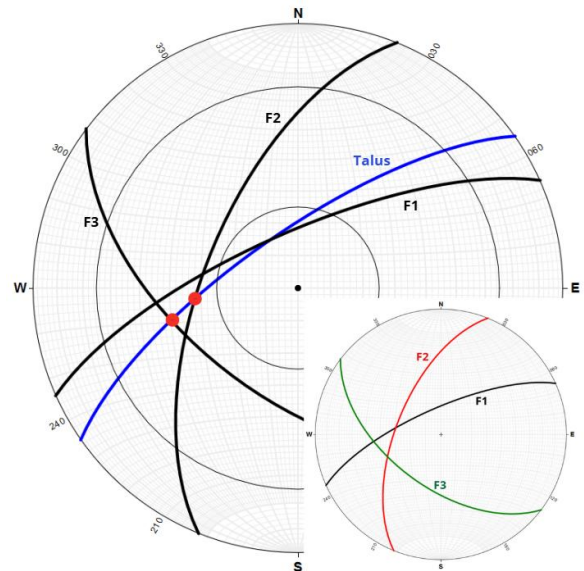


Figure 8. Stéréogramme des plans moyens de chaque famille de fracture avec le plan de talus et les angles de frottement

## 3.2 Description mécanique

### 3.2.1 Geological Strength Index (GSI)

Le Geological Strength Index de la zone 1 a été estimé entre 65 et 70. Ceci correspond à une paroi de bonne qualité, avec une surface peu altérée et des fractures bien ordonnées. La méthode d'estimation du GSI est globale pour chaque zone et ne permet pas d'estimer des variations locales.

### 3.2.2 Rock Mass Rating (RMR)

Les estimations de résistance à la compression uniaxiale faites au marteau de Schmidt donnent une résistance à la compression uniaxiale entre 22 et 256 MPa avec une moyenne de 96 MPa sur toute la zone. Cette donnée permet d'attribuer une note de 10 au paramètre A1 du RMR. La valeur de RQD de la paroi est égale à 100%, ce qui donne une note de 20 pour A2. L'espacement des fractures principales entre elles est de l'ordre du mètre donc une note de 18 a été attribuée pour A3. Ensuite, les fractures ont des longueurs comprises entre 1 et 10m, ne sont pas à très peu altérées et ont une rugosité légère à moyenne. De plus celles-ci ont une ouverture moyenne supérieure à 5mm et sont remplies par de la terre et de la végétation. Au vu de toutes ces observations, la note attribuée à A4 est 14. Enfin, les discontinuités sont complètement sèches, ce qui attribue une note de 15 pour A5. Toutes ces données réunies donnent en moyenne une valeur de RMR de 77 qui correspond à une roche de classe II, de bonne qualité.

Pour aller plus loin, le RMR a également été estimé au droit de chaque point de mesure au marteau de Schmidt. Leur répartition est donnée sur la figure 9. On remarque que les valeurs de RMR sont légèrement plus faibles sur la partie gauche de la zone et légèrement plus élevées sur sa partie basse et à sa droite.

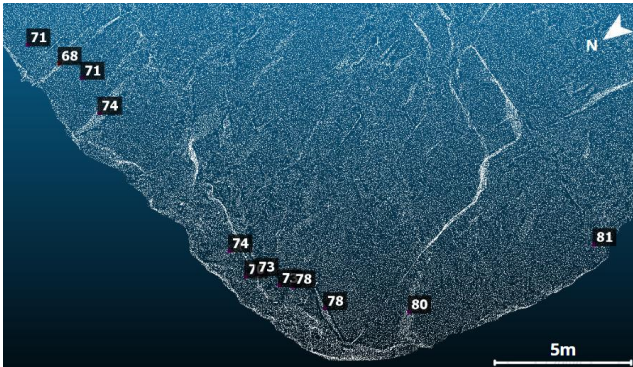


Figure 9. RMR aux points de mesure au marteau de Schmidt

Le Tableau 3 présente certaines mesures de marteau de Schmidt avec leurs RMR respectifs. On remarque que ce paramètre a un impact mineur sur la valeur de RMR globale. En effet, pour une différence considérable de mesure au marteau entre 22 et 256 MPa, le RMR varie seulement de 68 à 81.

Tableau 3. Tableau bilan des mesures au marteau de Schmidt et RMR pour la zone 1

Mesure Marteau de Schmidt (MPa)	Note paramètre A1	RMR
112	12	78
256	15	81
90	10	76
202	14	80
133	12	78
53	7	73
82	8	74
32	4	70
22	2	68

#### 4 DISCUSSION – LIMITES DE L'ETUDE

L'étude présentée ci-dessus a été menée avec beaucoup de soin, mais elle présente néanmoins quelques limites qu'il convient de préciser. Tout d'abord, du fait de la position du site d'étude (plus de 2000 m d'altitude), le GPS utilisé possède une précision limitée avec une incertitude estimée à 3,65 m sur les mesures (*Montana® 610/680 Manuel d'utilisation*, 2015). Du fait de cette imprécision, les photographies n'ont pas pu être strictement prises à distance cons-

tante du repère choisi à causes des conditions de terrain et de l'accessibilité. Le recouvrement est majoritairement acceptable mais n'est malheureusement pas suffisant sur les bords du maillage texturé qui présente donc des zones floues non exploitables. Ensuite, les mesures n'ont été réalisées qu'en pied de parois, dans des zones accessibles à pied, limitant le nombre et la représentativité des mesures par rapport à l'ensemble de la paroi.

La superposition de la zone 1 de photogrammétrie sur le modèle numérique de terrain a une précision assez faible puisque le MNT n'a une densité que d'un point par mètre. De plus, la surface étant subverticale, la densité de points y est encore plus faible, ce qui réduit davantage la précision.

Néanmoins, ce travail a permis d'obtenir les premiers éléments permettant de caractériser la fracturation du massif, et on retrouve une bonne concordance entre les orientations des fractures mesurées directement sur le terrain et les estimations issues du traitement par photogrammétrie.

#### 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette première étude dans le cirque des Clots de la Menera a permis de comprendre la structure globale du massif rocheux de plusieurs zones du site. Cette étude a également permis de mettre en place des capteurs de température en proche surface tout autour du cirque pour avoir un suivi continu sur au moins une année de la température de la roche.

Les descriptions mécaniques des zones 2 et 3 vont par la suite être analysées comme la première et superposées sur le modèle numérique de terrain. Une deuxième étude de terrain dans ce cirque va être réalisée au cours de l'été 2026 pour acquérir des données de terrain sur d'autres zones du site. Les données de la première année de suivi thermique vont être collectées pour modéliser le bilan d'énergie sur la période 1960-2026. Les données de température de proche surface modélisées, celles sur la résistance des roches et les principales familles de fractures seront ensuite intégrées au modèle thermo-mécanique de la zone. Enfin, des essais de laboratoire sur les impacts des cycles répétés de gel-dégel vont être menés sur les roches collectées aux Clots de la Menera.

#### 6 REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée dans le cadre du projet PERMAPYRENEES (EFA063/01). Ce projet est cofinancé à 65% par l'Union Européenne à travers le programme Interreg VI-A Espagne – France – Andorre (POCTEFA 2021-2027). L'objectif de Poctefa est de renforcer l'intégration économique et sociale de la zone frontalière Espagne – France – Andorre.

## 7 REFERENCES

- 3DFlow. s. d. *3DF Zephyr*. Disponible à l'adresse: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/>. Consulté le 14 novembre 2025.
- Aydin, A. 2008. « ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version ». *Orange Book R*. Ulusay (ed.), The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. John Wiley&Sons. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64994-7>
- Biskaborn, B. K., Smith, S.L., Noetzli, J. et al. 2019. « Permafrost Is Warming at a Global Scale ». *Nature Communications* 10 (1): 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>.
- Cantet, P., et Arnaud, P. 2008. *Impact du changement climatique sur le risque hydrologique*. <https://hal.inrae.fr/hal-02594338v1>. Consulté le 25/11/ 2025
- Cloud Compare. s. d. *CloudCompare 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project*. <https://www.cloudcompare.org/>. Consulté le 24 novembre 2025.
- Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C. et Rohmer., J. 2016. « Facets: A Cloud Compare Plugin to Extract Geological Planes from Unstructured 3D Point Clouds ». *ISPRS - Int Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sc* XLI-B5 (juin): 799- 804. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016>.
- Echeverria, A. 2025. *Première perforation du projet PermaPyrenees aux Clots de la Menera, Andorre*. <https://permapyrenees.eu/fr/premiere-perforation-du-projet-permapyrenees-aux-clots-de-la-menera-andorre/>
- Elkharrat, K., Lafuerza S., Homberg C., et Gasc-Barbier M.. 2025. *Rock Mass Strength Characterisation from Field and Laboratory: A Comparative Study on Carbonate Rocks from the Larzac Plateau*. *Applied Sciences* (15, 12956). <https://doi.org/10.3390/app152412956>
- Hoek, E., et Brown, E. T. 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *Int J of Rock Mech and Mining Sc*. 34, Issue 8, pp 1165-1186 [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Katz, O., Reches, Z. et Roegiers, J. C. 2000. « Evaluation of Mechanical Rock Properties Using a Schmidt Hammer ». *Int J of Rock Mech and Mining Sc* 37 (4): 723- 28. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00004-6).
- Krautblatter M., Funk, D. et Günzel, F. K. (2013). « Why Permafrost Rocks Become Unstable: A Rock–Ice– mechanical Model in Time and Space ». *Earth Surface Processes and Landforms* 38 (8): 876- 87. <https://doi.org/10.1002/esp.3374>
- Liu, L., Zhao, D., Wei, J. et al. 2021. « Permafrost Sensitivity to Global Warming of 1.5 °C and 2 °C in the Northern Hemisphere ». *Env Res Letters* 16 (3): 034038. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd6a8>
- Magnin, F., Ravanel, L., Ben-Asher, M. et al. 2023. « From Rockfall Observation to Operational Solutions: Nearly 20 Years of Cryo-Gravitational Hazard Studies in Mont-Blanc Massif ». *Revue de Géographie Alpine* 111- 2. [doi.org/10.4000/rga.11703](https://doi.org/10.4000/rga.11703)
- Montana® 610/680 Manuel d'utilisation. 2015. Disponible à l'adresse: [Montana® 610/680 Manuel d'utilisation](https://www.montana.com/fr/manuel-d-utilisation). Consulté le 4 décembre 2025.
- Mouser Electronics. s. d. *I-Buttons*. Disponible à l'adresse: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS1925.pdf>. Consulté le 4 décembre 2025.
- Noetzli, J., Isaksen, K., Barnett, J. et al. (2024). « Enhanced Warming of European Mountain Permafrost in the Early 21st Century ». *Nature Communications* 15 (1): 10508. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54831-9>.
- Oliva, M., Ventura, J., Turu, V. et al. (2025). « Climate Warming and the Persistence of Buried Ice in the Pyrenees: Multi-Proxy Evidence from Clots de La Menera Cirque (Andorra) ». *Quaternary Sc Rev* 368 109564 [doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109564](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109564)
- Planton, S., Déqué, M., Douville, H. et Spagnoli, B. (2004). « Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique ». *Comptes Rendus. Géoscience* 337 (1- 2): 193- 202. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.003>
- Proceq. (2023). *Original Schmidt OS8000*. Disponible à l'adresse: <https://www.screeningagle.com/fr/products/original-schmidt-os8000>. Consulté le 24 novembre 2025.
- Rick Allmendinger's Stuff. s. d. *Stereonet 11*. Disponible à l'adresse: <https://www.rickallmendinger.net/stereonet>. Consulté le 24 novembre 2025.
- Rifai, N., Khattabi, A. et Rhazi, L. (2015). « Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d'une méthode de descente d'échelle statistique ». *Vertigo* 14- 3. <https://doi.org/10.4000/vertigo.15474>