

EXEMPLE DE RENDU

Relevé structural d'un versant rocheux

Domaines structuraux, familles de discontinuités, stéréogrammes, faces libres, profils, surplombs et analyse cinématique.

Massif sédimentaire stratifié, versant haut de 400 m

Levé photogrammétrique de façade, été 2025

Exemple anonymisé : ni site ni maître d'ouvrage, coordonnées translattées. Prestation d'investigation : le relevé décrit la géométrie du massif, il ne porte ni dimensionnement ni avis de stabilité.

20,2 ha

de versant vus de face

16 954

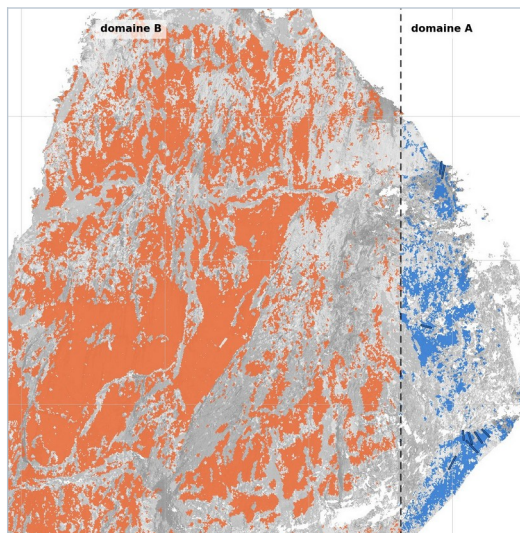
facettes planes analysées

3

domaines structuraux

43/314

litage, commun aux trois domaines



Carte des familles, partie haute du domaine central.

Statut du document

- Prestation d'investigation (relevé) au sens de la NF P94-500 : ses résultats sont des données d'entrée de la mission d'ingénierie géotechnique (G1, G2 ou G5) conduite par le géotechnicien.
- Le relevé dit si une géométrie remplit ou non les conditions d'un mécanisme ; il ne dit jamais qu'un mouvement se produira. Pressions d'eau, cohésion, rugosité, remplissage et ancrages restent au géotechnicien, qui fournit l'angle de frottement.
- Les volumes sont indicatifs : la face arrière d'un bloc n'est pas vue.

1. Ce que montre cet exemple

Ce dossier montre ce que DRONNIT remet à un bureau d'études géotechniques qui étudie un versant, une falaise ou un front rocheux : le versant découpé en domaines structuraux, les facettes planes relevées sur toute la roche visible, leurs familles établies par une méthode objective et reproductible, la visibilité de chaque orientation, les faces libres, des profils dans la pente, et des tests cinématiques faits plan par plan contre ces faces libres.

Le versant de l'exemple, conforme au litage, tourne d'environ 65° sur 650 m : il est découpé en trois domaines. Le litage y est le même partout (A1 45/313, B1 41/318, C1 42/312). Une orientation raide du domaine A est retrouvée par deux découpages sur trois, mais elle se confond avec la face du domaine : elle n'est pas exploitée dans les résultats chiffrés et n'est discutée qu'en annexe. La dissymétrie raide de la distribution du litage, que l'on pourrait prendre pour une famille de ressauts, ne forme pas de pic de densité : elle n'est pas annoncée comme famille.

2. Ce qui est remis

Livrable	Contenu	Format
Stéréogrammes par domaine	Densité des pôles cotée, familles et cônes de variabilité, orientations sous-échantillonnées, plans moyens et face libre médiane	Planche A3 PDF
Carte des familles	Facettes colorées par famille, limites des domaines, traces, nord	Planche A3 PDF
Compatibilités cinématiques	Faces libres, facettes en glissement plan ou en basculement compatibles, tests de Markland par domaine	Planches A3 PDF
Profils, surplombs, dièdres	Ressauts, épaisseur des bancs, surplombs, dièdres robustes	Planche A3 PDF, CSV
Facettes	Centre, normale, pendage, direction, aire, dimensions, domaine, famille et probabilité, incidence de visée, face libre de référence, tests cinématiques	CSV
Familles, faces libres, ressauts	Statistique de Fisher par famille ; faces de référence ; ressauts relevés sur les profils	CSV
Traces et contours	Un calque par famille et un calque non classé, traces 3D et contours	DXF
Nuage classé	Nuage nettoyé, champs famille et facette	LAS / LAZ

3. Acquisition et précision

Élément	Valeur
Drone et caméra	multitrotor à positionnement RTK, capteur 1 pouce de 20 Mpx, focale 8,8 mm
Plan de vol	vols de façade en suivi de terrain à 70 m, caméra inclinée à 45°, recouvrement 80 % et 80 %, plusieurs caps de vol
Clichés	2 551 acquis en deux séries de vol ; le nuage est calculé avec la seule série du premier jour, 993 clichés aux caps 45° et 225° (l'assemblage des deux séries dégradait l'alignement). Les analyses de visibilité n'utilisent que ces clichés
Distance et résolution	distance médiane de la roche aux prises de vue 64 m, soit environ 1,8 cm par pixel ; nuage livré au pas de 10 cm environ
Calage	RTK embarqué seul, sans point d'appui ni de contrôle au sol : site inaccessible à pied
Traitement	photogrammétrie (Agisoft Metashape, qualité haute), puis chaîne d'analyse open source
Bruit du nuage	écart quadratique médian des points à leur facette 4,4 cm
Cohérence de surface	écart médian au nuage LiDAR du même levé 20 cm, 34 cm au 90e centile, sur 200 m x 200 m
Orientations	rapportées au nord géographique, convergence des méridiens et déclinaison magnétique corrigées
Conventions	pendage / direction de pendage ; projection équivalente de Schmidt, hémisphère inférieur
Nettoyage fait	végétation par indice de vert, filtre statistique, banquettes et pistes masquées ; 18,7 millions de points conservés. Éboulis non séparés

4. La méthode

- **Facettes planes** : cellules planes d'un arbre k-d fusionnées tant que le plan réuni tient à 8 cm (méthode Facets, Dewez et al., 2016) ; seules les facettes de 1 m² et plus sont analysées. Une facette n'est pas une discontinuité : un banc découpé en cent facettes compte cent fois.
- **Domaines structuraux** : tranches du versant d'orientation homogène, analysées séparément.
- **Familles** : pics de la densité des pôles (noyau de Fisher, Vollmer 1995) puis mélange de lois de Fisher avec un fond uniforme (Peel et al., 2001), sans fenêtre imposée. Une composante n'est une famille que si un pic de densité la confirme dans au moins quatre réglages sur six (noyau de 30, 60 et 100, poids en nombre et en aire).
- **Visibilité** : pour chaque orientation, l'incidence des prises de vue qui voient la roche, à partir des positions et des axes des caméras.
- **Cinématique** : glissement plan, dièdre et basculement flexionnel testés pour chaque facette contre les faces libres voisines relevées sur le modèle (Markland, 1972 ; Hoek et Bray, 1981 ; limites latérales de 20° et 30°, défauts de Dips d'après Goodman). Le basculement direct n'est pas testé.
- **Robustesse** : le découpage en facettes est rejoué avec deux autres réglages ; seuls les résultats qui tiennent sont publiés.

5. Domaines et familles

Famille	Domaine	Pendage / direction	K (une composante)	Cône 63 %	Effectif	Aire (m ²)	Pic
A1	A	45/313	14 (6)	21°	769	3 628	6/6
B1	B	41/318	30 (11)	15°	4 854	48 524	6/6
C1	C	42/312	76 (8)	9°	373	2 803	6/6

K est estimé dans le mélange, sans fenêtre. Entre parenthèses, K quand toute la dispersion du domaine est attribuée au litage : les deux valeurs encadrent la dispersion réelle, que le géotechnicien choisit pour un calcul probabiliste. Le cône de variabilité à 63 % décrit la population ; le cône de confiance de la moyenne n'est pas donné, les facettes d'un même banc n'étant pas indépendantes. Les 10 580 facettes non classées sont livrées avec les autres.

Composantes du mélange qui ne sont pas des familles (aucun pic de densité stable ne les confirme), avec leur poids : domaine A : 69/264 (34 %), 69/235 (13 %), 77/308 (12 %) ; domaine B : 40/352 (25 %), 66/318 (18 %), 54/283 (15 %) ; domaine C : 56/280 (46 %), 35/266 (19 %), 75/245 (16 %). Dans le domaine C, la composante la plus lourde n'est pas la famille publiée : la distribution y est dominée par une dispersion du litage vers l'ouest, sans pic. Les 10 580 facettes non classées (62 % des facettes analysées) se répartissent ainsi : 2 % de surfaces subhorizontales, 50 % de pendages de 20 à 60°, l'ondulation et la flexure du litage autour de sa moyenne, et 48 % de surfaces raides, ressauts, niches et fronts, qui servent de faces libres à la cinématique.

Domaine	Noyau	Poids	Pics de densité trouvés
A	30	nombre	49/306
A	30	aire	44/309
A	60	nombre	46/308
A	60	aire	45/307 ; 74/261
A	100	nombre	46/308
A	100	aire	46/308 ; 74/261
B	30	nombre	43/320
B	30	aire	39/323
B	60	nombre	42/322
B	60	aire	37/323
B	100	nombre	42/322
B	100	aire	35/327
C	30	nombre	45/295
C	30	aire	40/301
C	60	nombre	42/305
C	60	aire	40/305 ; 3/316
C	100	nombre	43/308
C	100	aire	40/308 ; 1/296

Pics qui ne deviennent pas des familles : 74/261 dans le domaine A ; 3/316 dans le domaine C. Ils n'apparaissent que dans une partie des réglages, ou le mélange ne les retient pas : ils ne sont pas annoncés comme familles et n'entrent dans aucun calcul. L'orientation raide du domaine A, proche de la face du flanc ouest, est discutée en annexe.

Le découpage en facettes est rejoué avec deux autres réglages (angle de fusion 10° et 14°, écart au plan 6 et 10 cm) : A1 retrouvée par les 2 découpages, à 2° au plus ; B1 retrouvée par les 2 découpages, à 0° au plus ; C1 retrouvée par les 2 découpages, à 2° au plus.

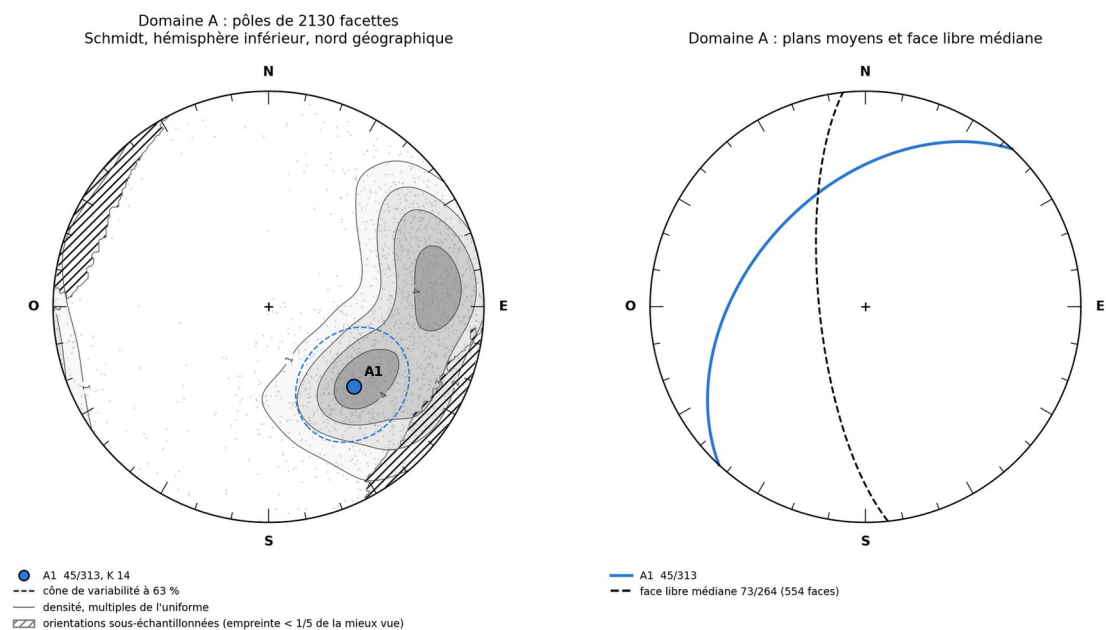


Figure 1. Domaine A : pôles, densité, familles et orientations sous-échantillonnées.

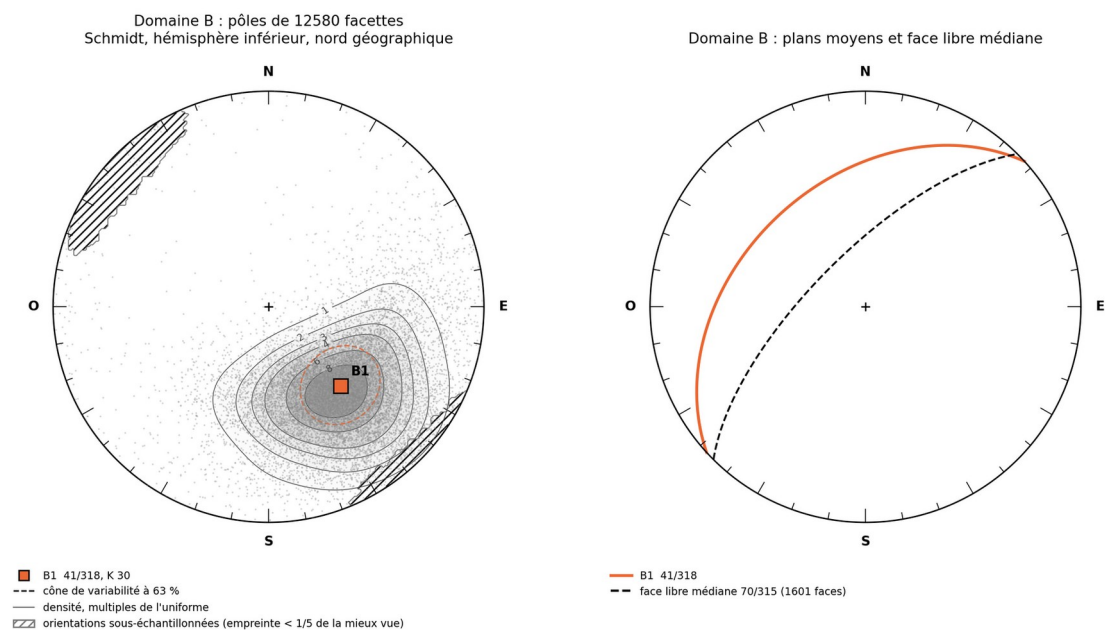


Figure 2. Domaine B : pôles, densité, familles et orientations sous-échantillonnées.

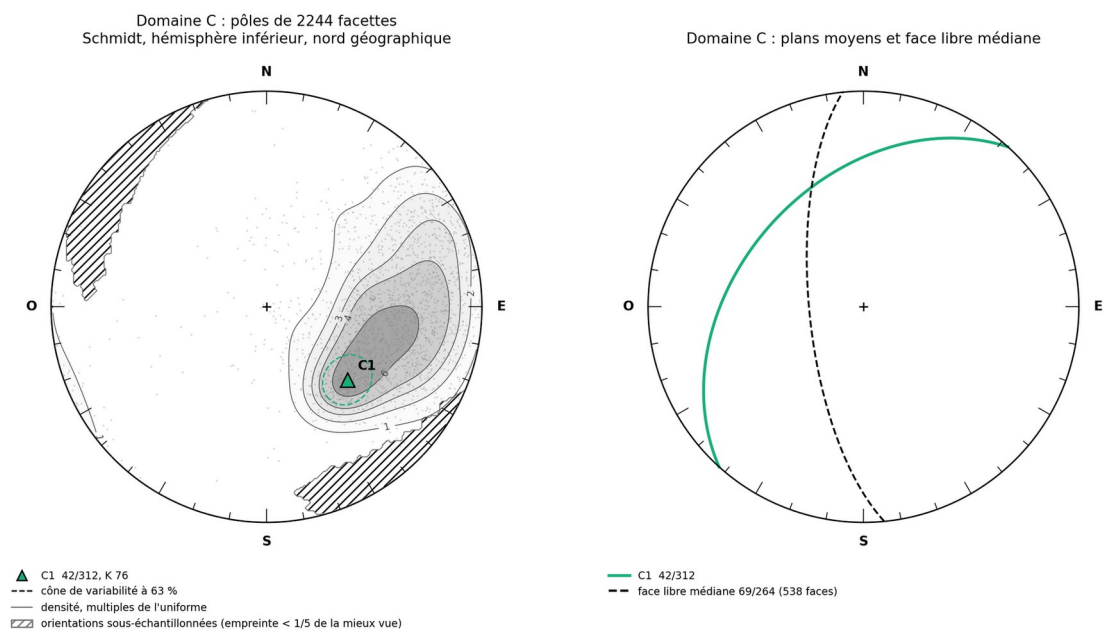


Figure 3. Domaine C : pôles, densité, familles et orientations sous-échantillonnées.

6. Ce que le levé voit mal

Seuls les 993 clichés qui ont servi au calcul comptent, et seules leurs vues de face : une caméra placée derrière un plan ne le voit pas. Pour chaque orientation de plan, l'empreinte est la somme des $\cos(i)/d^2$ des vues de face sous moins de 70° d'incidence, rapportée à celle de l'orientation la mieux vue. Une orientation est sous-échantillonnée si son empreinte relative est inférieure à un cinquième : elle laisse au moins cinq fois moins de points. Le seuil est validé contre les facettes relevées : avec un tiers, un quart des facettes du domaine A tombaient dans la zone dite sous-échantillonnée, ce qui réfutait le critère. Ces orientations sont hachurées sur les stéréogrammes.

Domaine B, clichés	litage 41/318	ressauts 75/301	transversal 80/045	transversal 80/225	transversal 90/045
retenue	0,98	0,36	0,63	0,73	0,63
série 1	0,98	0,36	0,63	0,73	0,63
série 2	1,00	0,63	0,18	0,30	0,20
série 1, cap 45°	0,75	0,41	0,53	0,99	0,77
série 1, cap 225°	0,78	0,12	0,97	0,56	0,77
série 2, cap 0°	0,64	0,13	0,42	0,84	0,59
série 2, cap 45°	0,65	0,36	0,49	0,97	0,72
série 2, cap 135°	1,00	0,82	0,15	0,16	0,13
série 2, cap 315°	0,99	0,01	0,28	0,38	0,18

Empreinte relative moyenne (1 pour l'orientation la mieux vue), avec la série retenue puis série par série et cap par cap, à titre de diagnostic. Orientations sous-échantillonnées et part des facettes relevées qui y tombent (validation du critère : elle doit rester faible) : domaine A : 7 % des orientations, 7,8 % des facettes relevées; domaine B : 6 % des orientations, 2,4 % des facettes relevées; domaine C : 9 % des orientations, 1,1 % des facettes relevées.

- **Plans raides pentant avec le versant (vers 75/301) et joints subverticaux transversaux (80/045, 80/225)** : leur empreinte relative est donnée au tableau. Là où elle est inférieure à un cinquième, une famille de cette orientation serait sous-représentée : le levé ne peut ni l'établir ni l'exclure.
- Un joint qui n'apparaît qu'en trace sur une dalle de litage, sans face d'au moins 1 m^2 , échappe à toute méthode par facettes, quelle que soit la visibilité : le levé ne peut pas exclure une famille de joints transversaux serrés.
- Une visite des pieds de versant, ou un vol latéral rapproché depuis les flancs, lèverait ces doutes.

7. Carte des familles

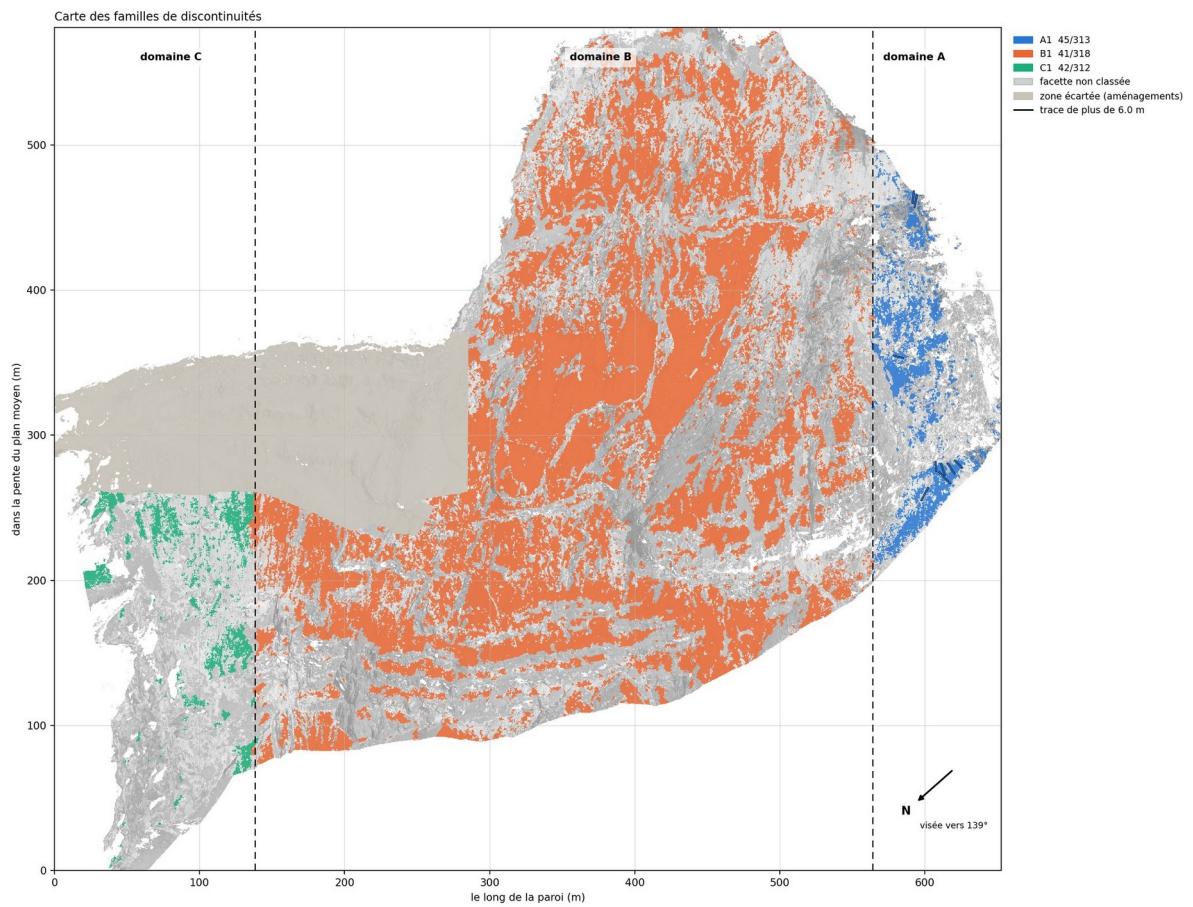


Figure 4. Carte des familles, limites des domaines, traces des plans qui recoupent la paroi.

8. Ressauts, bancs et taille des facettes

Domaine	Profils	Ressauts	Hauteur médiane	Espacement des ressauts le long de la pente	Espacement normal aux ressauts	Épaisseur des dalles (majorant des bancs)
A	7	79	2,6 m	8,1 m (4 à 13)	4,1 m	non mesurable
B	21	302	2,8 m	12,3 m (6 à 27)	6,3 m	2,0 m (1,4 à 3,7), n = 29
C	13	131	2,9 m	7,4 m (4 à 13)	3,9 m	non mesurable

Profils tirés tous les 20 m dans la direction de pente de chaque domaine. Un ressaut est un tronçon plus raide que le pendage apparent du litage dans le profil de 20° au moins, et haut d'un mètre au moins. L'épaisseur est mesurée normalement au litage entre les surfaces de litage dégagées de part et d'autre du ressaut, quand elles sont lisibles sur trois mètres : c'est l'épaisseur d'une dalle, qui peut réunir plusieurs bancs, donc un **majorant** de l'épaisseur des bancs ; ailleurs, elle n'est pas mesurable sur ce nuage au pas de 10 cm. L'espacement des ressauts est une grandeur de morphologie, pas l'espacement ISRM d'une famille.

Profils dans la pente : ressauts (triangles), épaisseur de dalle au droit du ressaut (m, majorant des bancs)

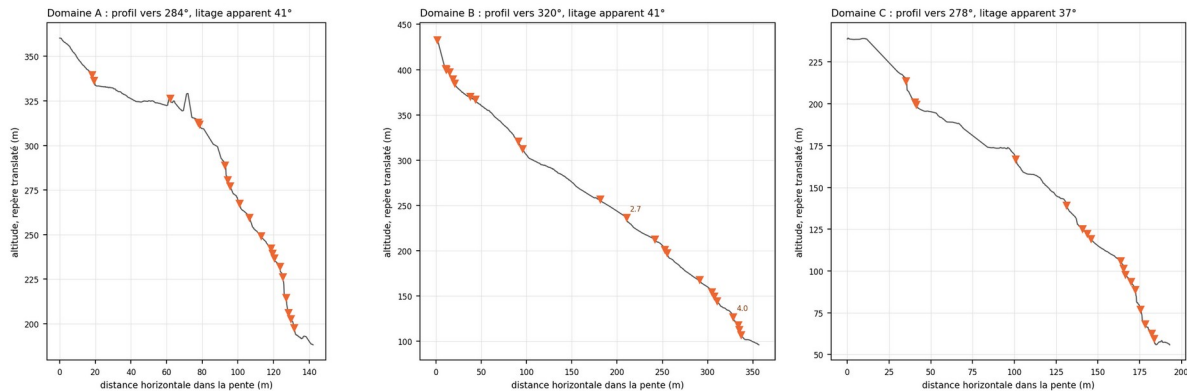


Figure 5. Un profil représentatif par domaine.

Famille	Taille médiane (m)	90e centile (m)	Maximum (m)
A1	2,7	6,7	23
B1	3,7	9,8	50
C1	3,0	8,5	43

Ce sont des tailles de facettes (plus grande dimension), pas des persistances : le découpage fragmente les surfaces ondulées. Le litage forme la surface du versant sur plusieurs centaines de mètres et sa persistance réelle dépasse de loin ces valeurs.

9. Analyse cinématique contre les faces libres

Une face libre est une facette raide (55° et plus, 2 m^2 et plus) tournée vers l'extérieur, qui recoupe le litage de 25° au moins : ressaut, niche ou front ; le modèle en compte 2 693. La queue raide du litage, plus proche que 25° , n'est pas une face de débouchage. Chaque facette, classée ou non, est testée contre les faces libres situées à moins de 6 m, plus bas qu'elle, à l'aval dans sa direction de pendage, et qui la recoupe de 25° au moins. Angle de frottement de référence : 30° , **hypothèse à fournir par le géotechnicien**, rejouée de 25° à 40° , pendage du litage.

Frottement	Glissement plan, toutes	Aire	A1	B1	C1	Basculement
25°	4 %	4 592 m ²	4 %	6 %	4 %	0,5 %
30°	4 %	4 507 m ²	4 %	6 %	4 %	0,4 %
35°	4 %	4 242 m ²	4 %	5 %	4 %	0,4 %
40°	3 %	3 513 m ²	3 %	4 %	3 %	0,4 %

Faces libres à partir de	Toutes les facettes	A1	B1	C1
55°	4,3 %	3,7 %	5,9 %	3,8 %
60°	4,2 %	3,7 %	5,8 %	3,8 %
65°	4,1 %	3,5 %	5,5 %	3,8 %
70°	3,5 %	3,0 %	4,5 %	2,5 %
75°	2,8 %	2,1 %	3,1 %	2,3 %

Sensibilité au seuil de pendage des faces libres, à 30° : le résultat dépend du choix de ce qui est une face, et les ressauts lus en profil pendent de 72° en médiane. Le chiffre à retenir est donc une fourchette, pas une valeur.

Dièdres : seules les familles confirmées d'un même domaine se combinent. Chaque domaine n'en porte qu'une : il n'y a pas de dièdre de familles dans cet exemple.

Le litage pend vers l'extérieur un peu plus raide que le versant : il ne débouche qu'au pied des ressauts et des niches, ce que la carte localise. Les facettes compatibles sont celles dont la géométrie remplit les conditions du glissement plan avec une face voisine ; ce n'est pas une prévision de rupture.

Domaine B : face libre médiane 70/315 (1601 faces, tirée), angle de frottement 30° (hypothèse du géotechnicien), zone de compatibilité géométrique en rouge

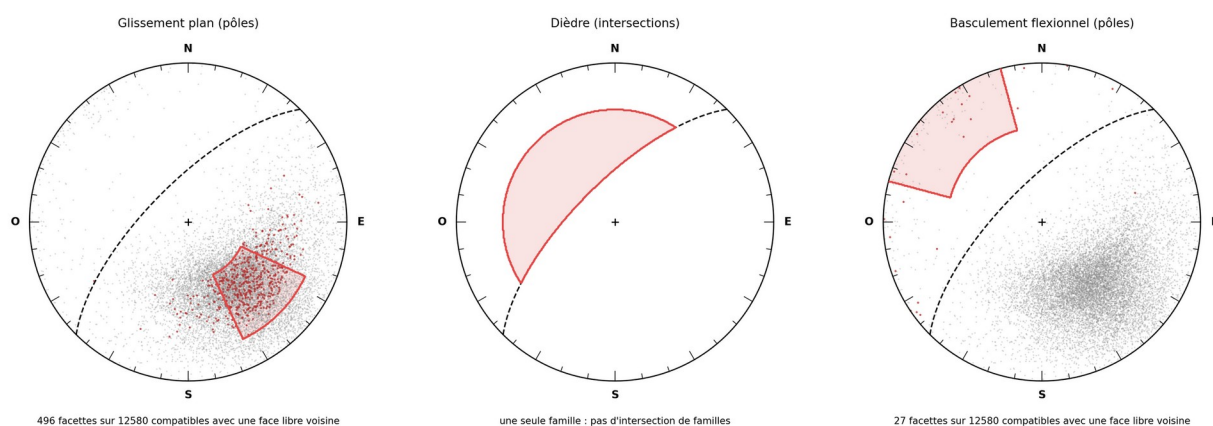


Figure 6. Domaine B : tests de Markland contre la face libre médiane ; points rouges, facettes compatibles avec leur propre face voisine.

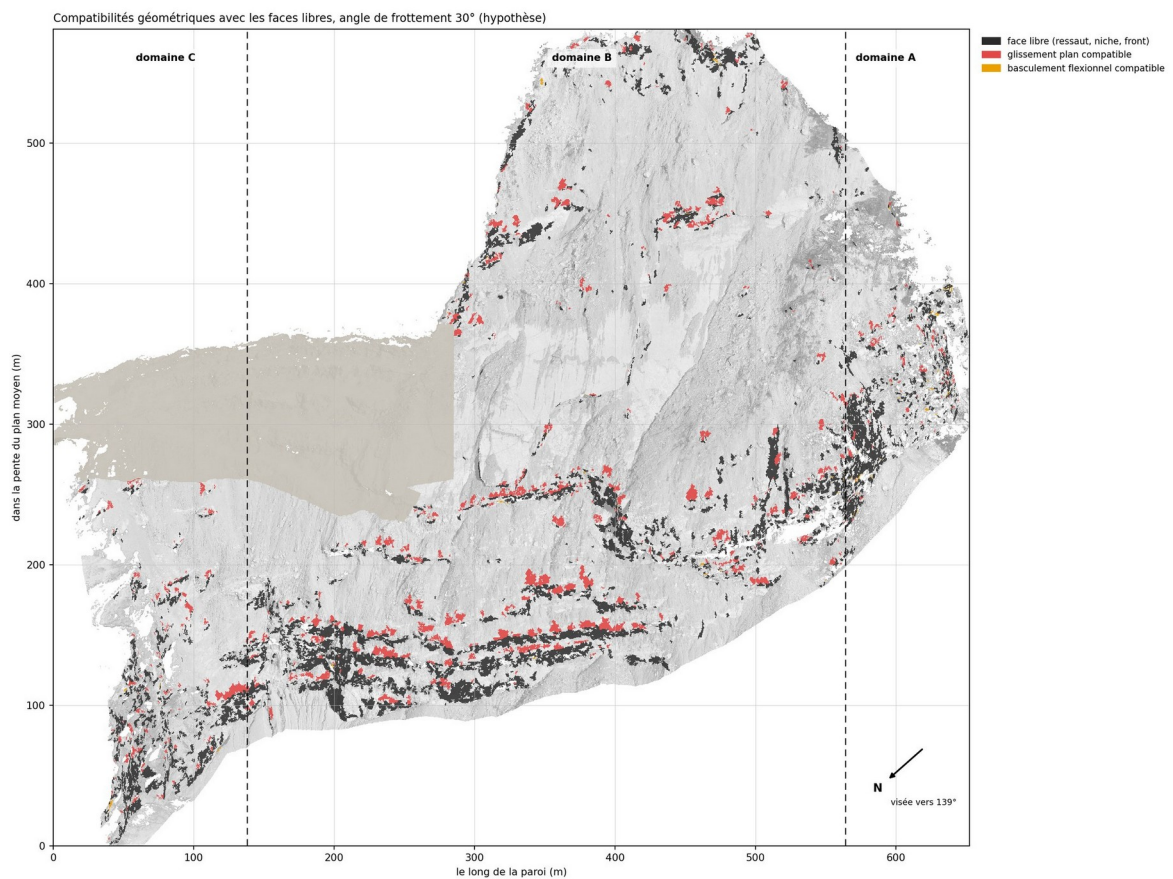


Figure 7. Faces libres et facettes géométriquement compatibles, angle de frottement de 30° (hypothèse).

10. Surplombs et dièdres

79 zones regardent vers le bas sur 4 m² ou plus (772 m²). Avec une seule famille confirmée par domaine, aucun dièdre de facettes ne se forme : seuls les surplombs sont repérés.

Repère	Nature	Aire ou hauteur	Porte-à-faux ou intersection	Volume indicatif	Réserve
S47	surplomb	79 m ²	2,5 m	145 m ³	face arrière non vue
S65	surplomb	42 m ²	6,0 m	117 m ³	face arrière non vue
S50	surplomb	29 m ²	2,3 m	44 m ³	face arrière non vue
S75	surplomb	27 m ²	3,8 m	220 m ³	face arrière non vue
S9	surplomb	24 m ²	4,0 m	209 m ³	face arrière non vue
S76	surplomb	22 m ²	4,0 m	109 m ³	face arrière non vue

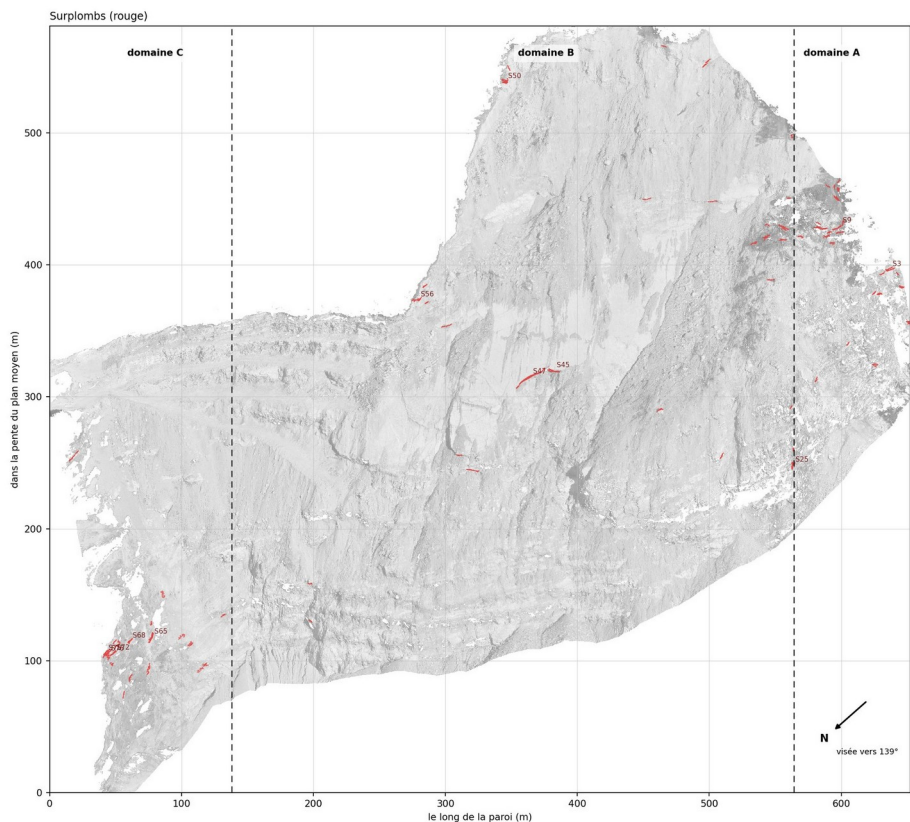


Figure 8. Surplombs repérés.

11. Comparaison avec le LiDAR du même levé

Procédure sans choix de l'opérateur	Photogrammétrie	LiDAR	Écart
Pic de densité	37/324	36/327	1,8°
Pic suivant (à plus de 30°)	73/313	50/274	41,1°

Sur un secteur de 200 m sur 200 m, les deux nuages donnent le même litage à moins de 2° près, et une surface commune à 20 cm près en médiane. Le pic suivant diffère de plus de 40° : le LiDAR, qui vise à la verticale, ne voit pas les ressauts raides sous le même angle. **Ce n'est pas un contrôle indépendant** : deux capteurs du même levé, traités par la même chaîne, mesurent la cohérence du traitement, pas l'exactitude des familles. Le contrôle indépendant est un relevé au compas sur des plans désignés à l'avance, par un second opérateur ; il n'existait pas sur ce site, faute d'accès à pied.

Annexe : orientation raide du domaine A, non exploitée

Une orientation raide ressort dans certains réglages du domaine A (74/261) ; elle est retrouvée par deux découpages sur trois, qui en font une famille (70/263, 68/268), mais pas par le découpage principal. Elle tombe à moins de 15° de la face libre médiane du domaine et se confond avec la face elle-même : une famille confondue avec la face ne se teste pas contre elle. Elle n'entre donc ni dans la cinématique ni dans les dièdres. Ce peut être l'orientation du flanc ouest du versant, face de libération latérale possible : c'est au géotechnicien, sur le terrain, de dire s'il s'agit d'une famille de joints.

12. Limites de l'exemple

- Nuage au pas de 10 cm environ : seules les facettes de 1 m² et plus sont analysées ; un levé rapproché, au millimètre par pixel, descend aux plans décimétriques et aux traces.
- Aucun contrôle au compas ni visite de terrain : familles, faces libres et ressauts sont lus sur le modèle.
- Ressauts naturels, fronts et faces de tir ne sont pas distingués, hors banquettes et pistes masquées ; les éboulis restent dans le nuage.
- Volumes indicatifs, à reprendre par le géotechnicien avant toute trajectographie.