

Note de synthèse générale sur le projet MIROIR Gorges de l'Arly (73) et Haute Vallée du Guil (05)



Note de synthèse générale pour le projet Feder-POIA- CIMA –MIROIR relatif aux glissements de versant à réurrence historique situés dans les Gorges de l'Arly (Savoie) et au Pas de L'Ours (Vallée du Haut Guil– Queyras –Hautes Alpes)

1/ Préambule

Cette note est à destination des acteurs locaux (élus comme techniciens) pour leur transmettre les principales informations utiles résultant du travail réalisé lors du projet MIROIR.

Le projet MIROIR a eu pour objectif l'amélioration des connaissances sur les instabilités de versant présentes dans la zone des Gorges de l'Arly (Savoie) et sur le Haut Guil dans le Queyras (Hautes-Alpes), notamment au niveau du glissement du Pas de l'Ours. En effet, si ces deux vallées alpines connaissent une problématique récurrente de chutes de blocs, avec coupure plus ou moins longue des axes routiers de fond de vallée, elles sont aussi de manière plus épisodique le siège de glissements de versant d'intensité variée (y compris pour des volumes très conséquents de 0,1 à plusieurs millions de m³). Les portions de versant instables présentes restent peu à non habitées et de fait peu étudiées, en dehors des zones d'atteintes occasionnelles des infrastructures. Dans les deux vallées, les seuls coûts de réparation des axes routiers suite à de tels glissements de versant récents subis depuis 2015 ont atteint entre une bonne vingtaine et une cinquantaine de millions d'Euros sur chacune des deux vallées.

On note cependant que les masses glissées pouvant atteindre des volumes très importants, cet afflux soudain de matériels +/- solides dans les cours d'eau à régime torrentiel peuvent être repris par charriage¹ pour ensuite venir envahir des zones de fonds de vallée en aval et y engendrer des dommages indirects. Ce risque torrentiel associé faisait partie du projet MIROIR en début de montage mais il n'a pas pu être conservé faute d'un porteur technique disponible. Le projet MIROIR a néanmoins gardé en considération cette problématique (notamment pour alimenter un éventuel projet fils sur la problématique du risque torrentiel) en s'attachant autant que possible à estimer les potentiels volumes en jeu.

Cette étude des flancs instables de versant de vallée alpine s'appuie sur l'usage de nombreuses disciplines (géologie, hydrogéologie, géophysique...), accompagnées d'acquisitions classiques (levés structuraux par des géologues alpins, suivis hydrogéologiques), comme le recours à des technologies récentes et innovantes (levé LIDAR, suivi satellitaire).

¹ Sans compter le risque de création puis de rupture d'embâcle.

À l'aide des données collectées ou acquises sur le terrain, il a fallu identifier au mieux les différents compartiments instables présents dans les versants étudiés puis essayer de caractériser au mieux la géométrie (contours, profondeur) et la dynamique de ces différents compartiments instables à l'aide des données événementielles (survenue d'une phase de glissement) ou de suivis (inclinométrie, topographie, suivi satellitaire, etc...). L'étude du versant du Pas de l'Ours a confirmé et affiné légèrement le précédent découpage du glissement du Pas de l'Ours en 5 zones homogènes fait par le B.E.T SAGE : le compartiment sommital (en bonne partie non visible depuis le bas de vallée) peu reconnu jusqu'alors, a été plus particulièrement investigué et son activité, en termes de glissement, a été caractérisée sur les 3 ans du projet. De même, il a été défini à hauteur des Gorges de l'Arly un découpage du versant de vallée en 8 zones homogènes distinctes.

Une fois cette phase de caractérisation des compartiments instables réalisée, le projet MIROIR a ensuite essayé de caractériser la sensibilité climatique des glissements de versant pour ensuite simuler des conditions de changement climatique et apprécier d'éventuels modifications de comportement des versants dans ce cadre de changement climatique. On verra que cette tentative a quelque peu abouti plus à une impasse qu'à autre chose et qu'il a fallu revenir à des pratiques de modélisation plus modestes et classiques pour arriver à définir des scénarios de risque illustratifs de possibles situations à venir à plus ou moins brève échéance.

Avec une approche des dommages possibles au regard des scénarios de risques ainsi déterminés, le projet MIROIR a permis d'identifier plusieurs flancs de versant instables pour lesquels une réactivation potentielle, si sollicitation climatique plus ou moins intense (en pics ou dans la durée), serait particulièrement impactante, avec des enjeux directs (bâtiments en nombre réduit uniquement sur l'Arly, mais surtout les axes routiers présents et les rivières Guil et Arly en contrebas) ou indirects (enjeux en aval pouvant être atteints par charriage torrentiel, situation d'embâcle possible confirmée pour le Guil et moins attendue quoique que non totalement écartée pour l'Arly). Si une stricte vigilance et une réactivité d'autant plus forte que la réactivation sera prononcée devrait /pourrait a priori suffire aux acteurs locaux pour faire face aux conséquences plus ou moins dommageables, il demeure encore beaucoup trop d'incertitudes à ce stade sur l'évaluation des possibles dommages d'une réactivation de versant et sur les zones les plus à risques, par conséquent des études locales dédiées pourraient être pertinentes pour anticiper davantage le comportement plausible du compartiment instable et de ses impacts. Ces études ponctuelles plus ciblées devraient s'appuyer sur des données de monitoring de versant existants ou à acquérir sur des durées de quelques années au moins. L'évaluation du risque torrentiel sur les Gorges de l'Arly (voire la réévaluation du risque torrentiel sur le Guil à Aiguilles) pourrait être une suite pertinente à valoriser après le projet MIROIR pour une meilleure gestion intégrée des risques en montagne à titre préventif. Quelques pistes d'actions envisagées suite aux réunions de restitution du projet MIROIR le 7 septembre (Guil) et le 28 septembre 2023 (Arly) seront évoquées dans les conclusions de la présente note.

Ce projet MIROIR, monté fin 2018 puis validé en juillet 2020, s'est achevé en mai 2023. Il a réuni l'ADRGT (Association pour le Développement de la Recherche sur les Glissements de Terrain), le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et le Parc Naturel Régional du Queyras (PNRQ).

2/ Étape de collectes et d'acquisitions des données

Cette étape correspond au WorkPackage² n°2 du Projet MIROIR.

2.1 Phase de collecte des Données

Les données et rapports existants ont été collectés auprès des maîtres d'œuvre publics (CD05, CD73, CCTGQ.....) et autres intervenants publics (notamment l'OMIV³ et le SMBVA⁴), concernés par la problématique glissement de versant. Sur le site du Pas de l'Ours, le PNR du Queyras a missionné le service RTM⁵ Hautes Alpes, acteur clé de la gestion de la crise lors de la réactivation du glissement du Pas de l'Ours de faire le travail de collecte des données existantes et sur cette base de faire un rapide état de situation actualisé du glissement. Plusieurs fiches sur les autres glissements de versant situés dans le Queyras ont été également fournies. Le rapport RTM05 d'avril 2022 constitue un des premiers livrables du projet MIROIR.

Afin de compléter la collecte des données récentes, des études historiques distinctes ont été lancées, respectivement par le PNRQ pour le secteur du Queyras et par le BRGM pour les Gorges de l'Arly. Dans les deux cas, c'est le même prestataire habitué à ce type d'études, ActHys qui a été retenu et a effectué les recherches et consultation des fonds historiques d'archives publiques. Les recherches ont permis d'identifier 163 événements historiques sur l'Arly entre 1774 et 1959 et seulement 9 événements sur le Guil entre 2002 et 2018. Les deux rapports relatifs à ces études historiques correspondantes ont été diffusés en mars 2022 sur la vallée de l'Arly (deux autres des livrables du projet MIROIR) et en juillet 2022 sur le Queyras. Les événements recherchés étaient en priorité les glissements de terrain, mais autant que possible aussi les chutes de blocs et les crues torrentielles.

Le reste de la collecte a été faite en régie par le BRGM et mise à disposition sur un espace partagé TEAMS MIROIR. Il a fallu souvent plusieurs mois, voire plus d'un an pour récupérer une partie des données existantes. On peut notamment citer la consultation et l'utilisation des données d'interférométrie satellitaire mises à disposition gratuite sur Internet⁶ depuis mai 2022 sur le site EGMS (European Ground Motion Service) de Copernicus.

La collecte de ces données a consisté à récupérer l'ensemble des rapports réalisés sur le site (notamment les rapports SAGE), des données numériques (chroniques météorologiques, chroniques de déformations de versant sur le site du glissement de Montgombert, données inclinométriques....). On note toutefois que les données numériques associées aux rapports n'ont en général pas été

² Le premier workpackage est dédié à la gouvernance technico-administrative du projet.

³ OMIV : Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant est un programme national du CNRS/INSU, qui regroupe plusieurs laboratoires et observatoires du monde académique. Sur le site du Pas de l'Ours, c'est le laboratoire EOST de Strasbourg et le laboratoire de l'Université de Besançon qui sont intervenus.

⁴ Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Arly

⁵ Restauration et Travaux en Montagne, service spécialiste pour les zones de Montagne de l'ONF pour les phénomènes torrentiels et autres mouvement de terrain.

⁶ Elles donnent des idées de déformations topographiques de versant.

récupérées car pas forcément archivées pour une mise à disposition aisée. De plus, les données acquises par l'OMIV/EOST de monitoring sur le glissement de versant du Pas de L'Ours, auraient dû être récupérées lors d'une prestation dédiée, prestation qui n'a au final pas pu être réalisée faute de disponibilité du prestataire. Ces données notamment de déformations du versant pendant la crise de 2017 et 2018 mais aussi après cette phase paroxysmale n'ont pas permis de faire le Retour d'Expérience espéré de la crise du Pas de L'Ours et de ses suites ultérieures.

2.2 Acquisitions de données

Les acquisitions faites sont présentées ci-dessous succinctement par thématiques métiers.

2.2.1 Levés géologiques

Une des premières séries d'acquisitions de données concernent les levés géologiques qui ont été réalisés sur les deux sites par le BRGM. Sur le premier site reconnu (vallée de l'Arly), une modélisation numérique 3D des grandes structures géologiques a même pu être faite sous Geomodeller (figure 1).

- La basse vallée de l'Arly en forme de V traduit (figure 2) une capture récente vers Ugine de la haute vallée glaciaire de l'Arly en V qui s'écoulait dans la direction opposée, et les décalages altimétriques ont favorisé une incision marquée de l'Arly à hauteur des Gorges de l'Arly avec une sape soutenue des berges en pied de versant, ce qui entretient un niveau élevé d'instabilité des versants de la vallée.
- Sur le second site du Guil tardivement reconnu (et en partie alors non accessible en partie haute du glissement), le travail de levé n'a pas été aussi abouti. Les reconnaissances soulignent notamment la présence sur le versant opposé (où passe le nouveau tracé de la RD947) d'un glissement de versant +/- stabilisé actuellement (glissement dit des Sagnières) d'un volume bien plus conséquent que celui du glissement du Pas de L'Ours avec la rivière Guil qui reste entre les deux versant nettement encaissée, et dont l'incision en continu des berges de pied de versant maintient un effet de prédisposition à une réactivation à plus ou moins long terme des deux versants. L'ensemble des données géologiques acquises est résumé dans un rapport BRGM dédié⁷, et constitue l'un des livrables du projet MIROIR.

Ceci n'est qu'un aperçu très succinct des données géologiques acquises lors du projet MIROIR et pour plus de précisions sur l'état des connaissances géologiques de chacun des deux sites, il est conseillé la lecture du rapport BRGM, livrable du projet MIROIR.

⁷ Rapport BRGM RP-72686-FR

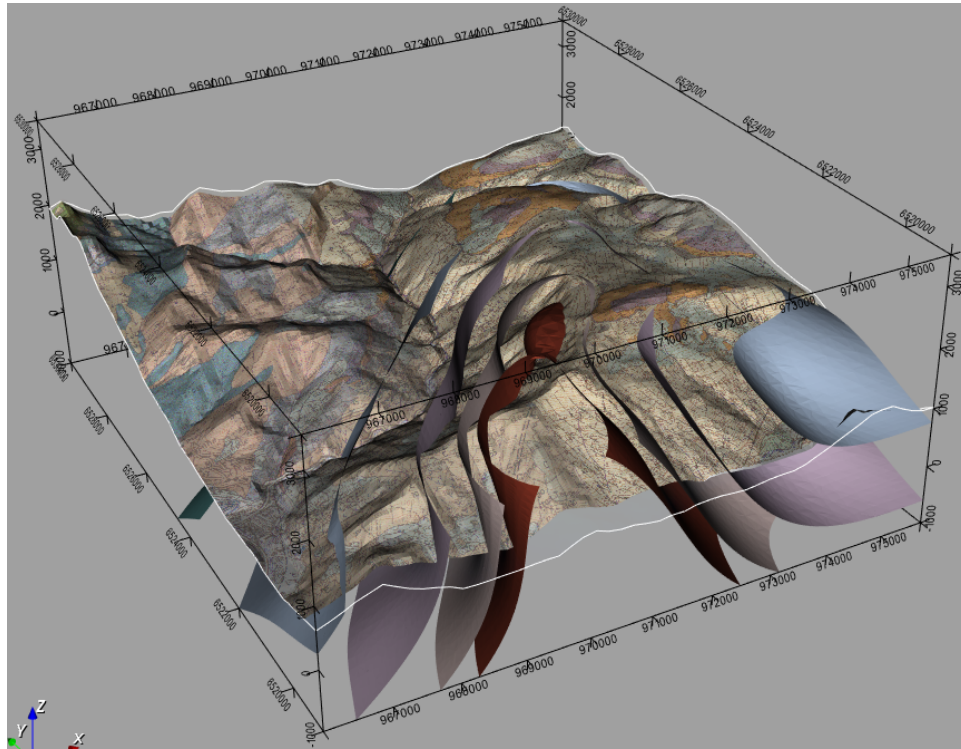
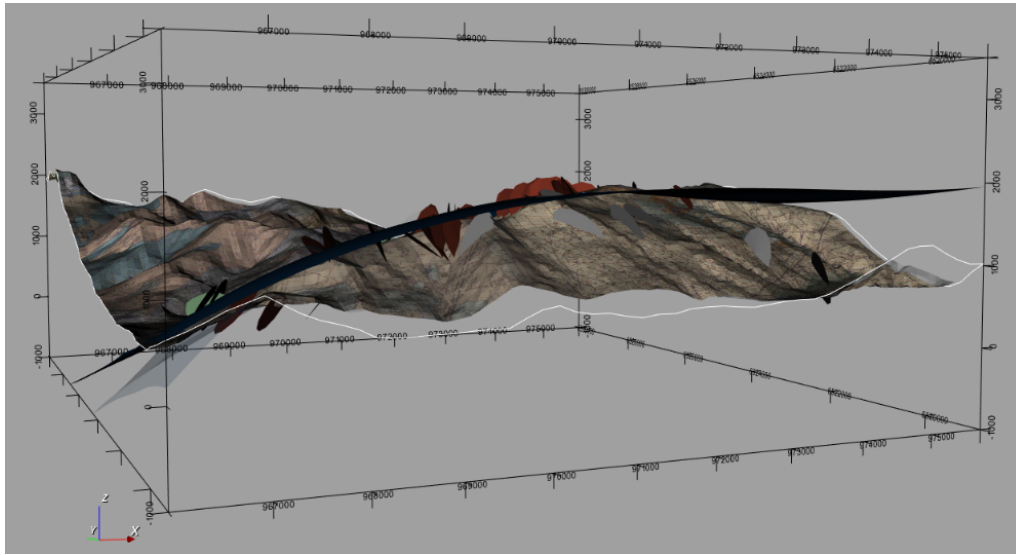


Figure 1 : Blocs diagramme sur les Gorges de l'Arly vus depuis le sud-Ouest et reportés sur la carte géologique en 3 dimensions, représentant en haut l'enveloppe de la discordance du Permo-Trias depuis le sud-ouest, et en bas les trajectoires de schistosité au sein des micaschistes de la Série Satinée (Rapport BRGM RP-72686-FR).

Cadre géologique des sites du Pas de l'Ours (commune d'Aiguilles) et du val d'Arly (la commune de Cohennoz)

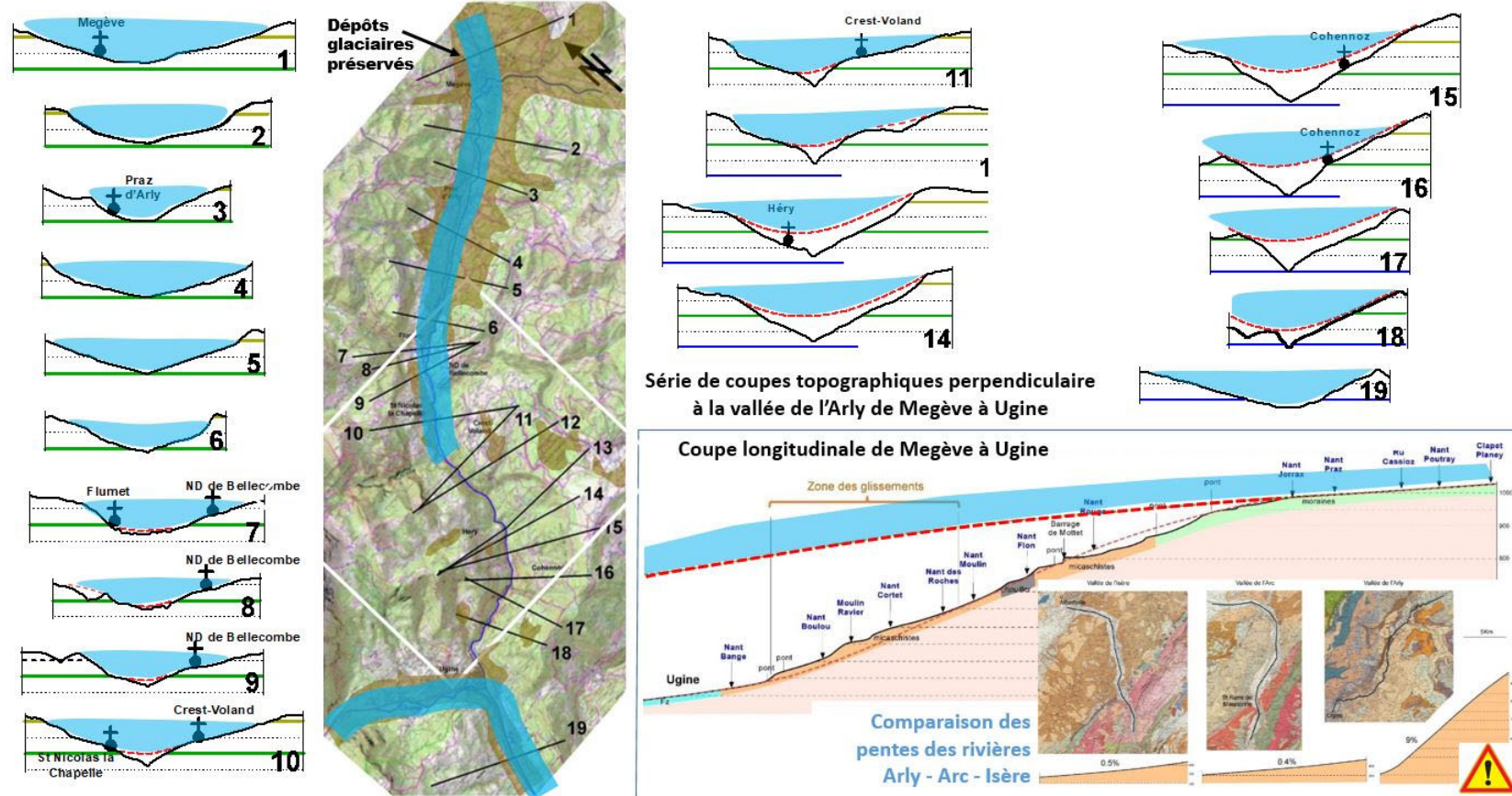


Figure 2 : Portion de vallée l'Arly en V à hauteur des Gorges et sinon en U glaciaire en amont et en aval témoignant de la capture tardive de l'Arly (Rapport BRGM RP-72686-FR)

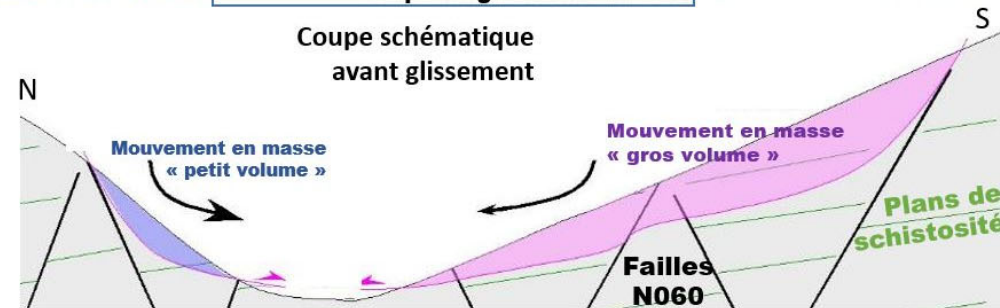
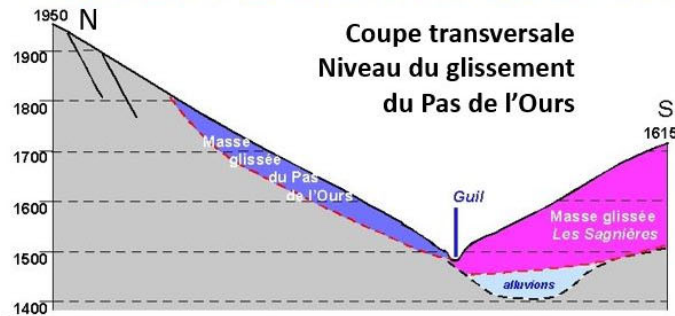
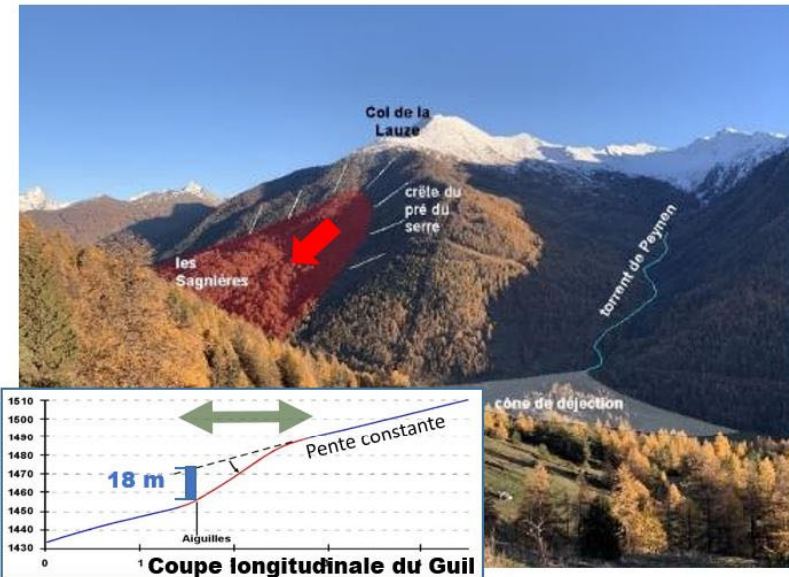
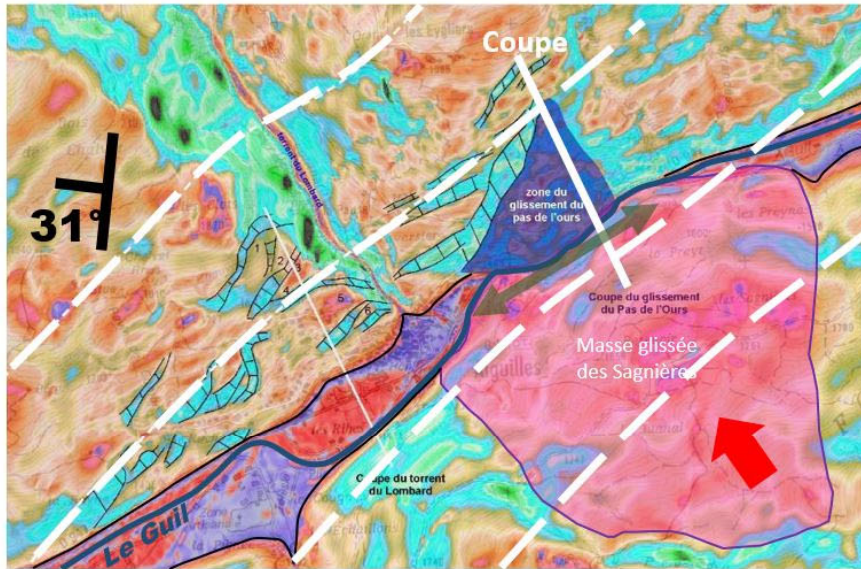


Figure 3 - Coupe de la vallée du Haut Guil à hauteur du secteur du Pas de L'Ours, avec mise en évidence des compartiments instables en vis-à-vis (Rapport BRGM RP-72686-FR)



Avec le soutien de



FONDS NATIONAL D'AMENAGEMENT ET DE DEVELOPPEMENT DU TERRITOIRE Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

2.2.2 Acquisitions hydrogéologiques

En parallèle, des investigations pour une meilleure caractérisation hydrogéologique des versants ont été entreprises par le BRGM, de manière plutôt intensive sur le site de glissement du Pas de l'Ours et de manière plus diffuse sur les Gorges d'Arly (du fait du linéaire de vallée à reconnaître de plus de 12 km de long).

- Sur l'Arly, les actions se sont limitées aux reconnaissances de terrain et deux campagnes de mesures et d'échantillonnage des eaux faites sur 12 points d'eau (Figure 4). Il a été constaté lors des reconnaissances terrain un fort contraste hydrologique, avec des écoulements très voire probablement exceptionnellement abondants en 2021 (pour un mois de juillet) et une situation bien plus proche de la normale en 2022. Ce net contraste observé en termes d'écoulements ne se retrouve par contre pas dans les mesures physico-chimiques, avec des valeurs relativement homogènes d'un point à l'autre, et peu fluctuants d'une des campagnes à l'autre⁸.
- Sur le Guil, dans un contexte climatique de net déficit pluviométrique et de versant en situation de désaturation persistante, il y a eu les mêmes reconnaissances et mesures faites sur 8 points d'eau⁹ et, la réalisation d'un forage piézométrique profond¹⁰, le suivi annuel d'une source (figure 5) et la réalisation d'un multi-traçage hydrogéologique (figure 6). Au sujet de cette dernière action, c'est la présence de nombreux entonnoirs de sous-tirage en tête de glissement qui a fortement motivé cette opération. Malgré des conditions immédiates défavorables (versant particulièrement sec, volume de chasse très limitée, milieu de transfert surtout poreux), l'injection a été néanmoins tentée et des microtraces de restitution ont été constatées sur le point de suivi aval, mais à des valeurs trop basses pour pouvoir être considérée comme significatives (en limite de détection des appareils en contexte turbide).

L'ensemble des données hydrogéologiques acquises, nombreuses mais peu concluantes, a été résumé par le BRGM dans une note dédiée¹¹, qui constitue l'un des livrables du projet MIROIR.

⁸ Campagne de Basses Eaux suivi d'une campagne de Hautes Eaux, avec en réalité des conditions pas autant basses eaux et surtout Hautes Eaux qu'espéré.

⁹ Là encore peu de contrastes constatées et de fluctuations d'une campagne à l'autre.

¹⁰ Co-financé par le projet Européen PITEM RiskGEST et le programme RGF

¹¹ Note synthétique sur la partie Hydrogéologie du projet MIROIR



Géosciences pour une Terre durable

brgm



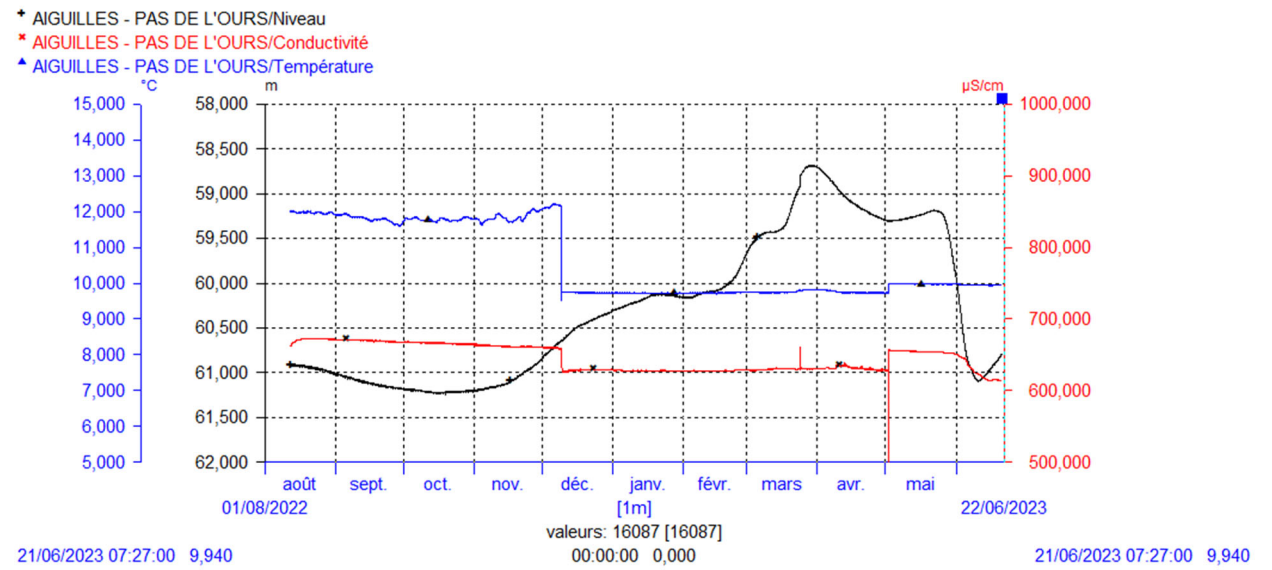
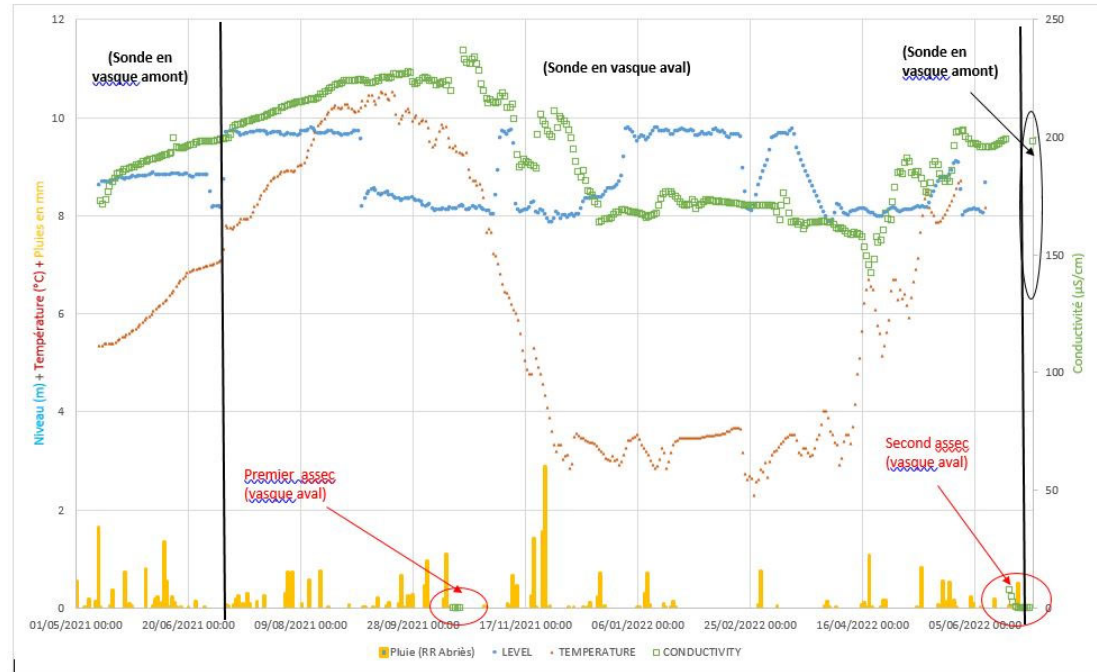
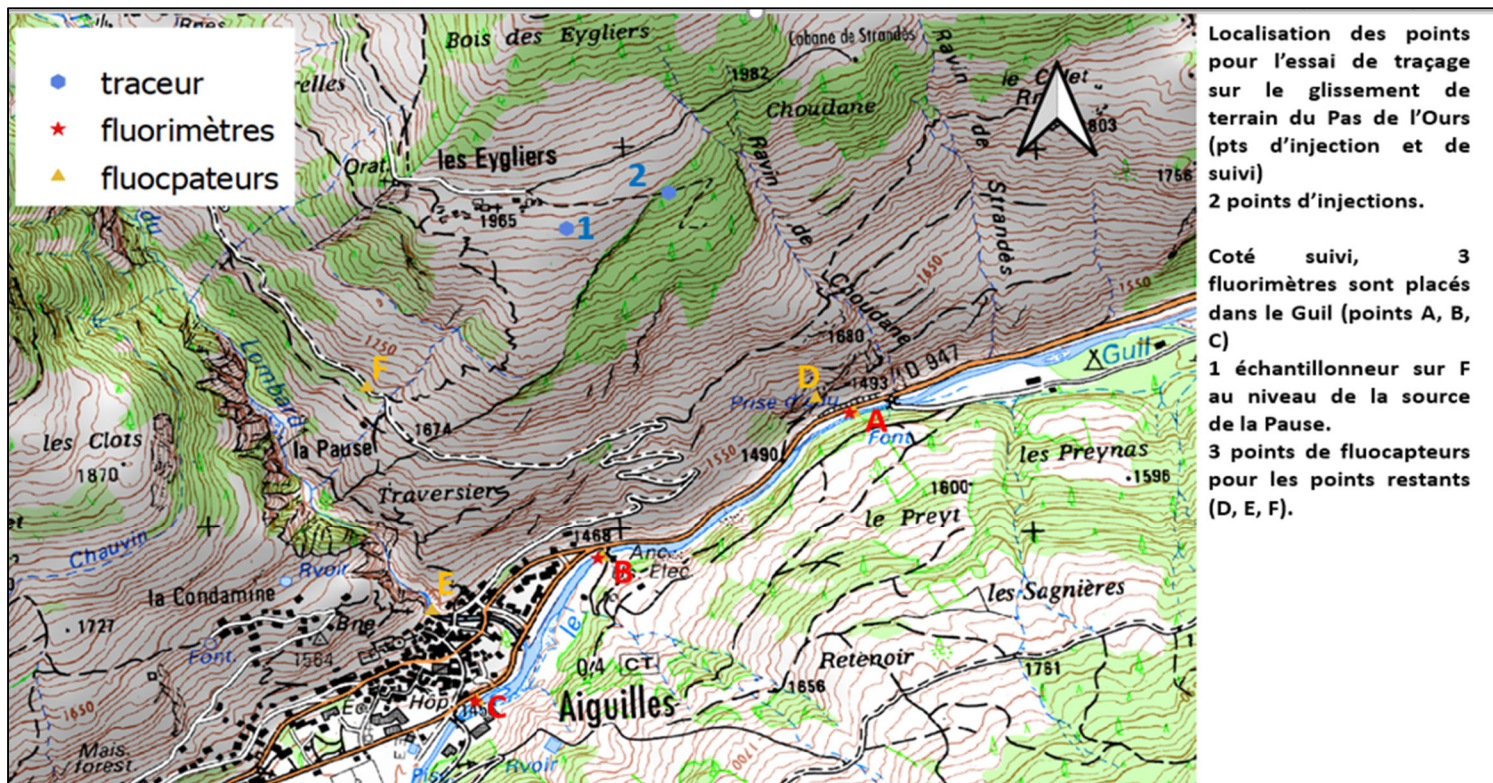


Figure 5 – Vallée du Haut Guil. Suivi multi-paramètres sur un an d'une source aux Eyglies en amont latéral du glissement du Pas de l'Ours à gauche et sur le nouveau forage piézométrique profond en partie ouest aval du glissement à droite



Pose pour suivi du traçage d'un échantillonneur sur la Source de la Pause



Suivi du traçage par fluorimètre sur le Guil

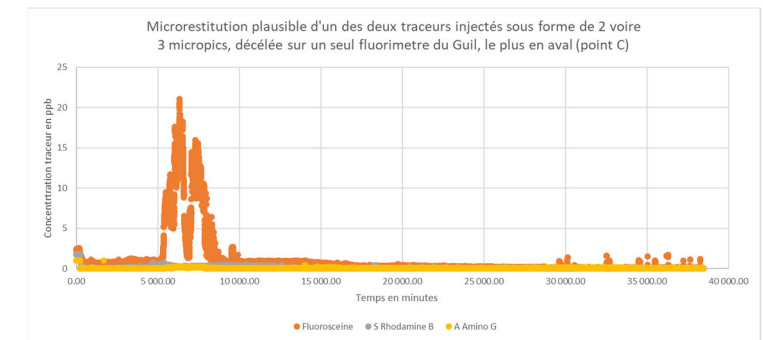


Figure 6 – Essai de traçage hydrogéologique à l'aide de deux fluorocolorants injectés (fluorescéine en 1 et sulfo-rhodamine Ben 2), avec résultat négatif (pas de restitution avérée) quoique peut être pas totalement

2.2.3 Géophysique

Des acquisitions géophysiques nouvelles et spécifiques (Figure 7), ont été entreprises par l'ADRGT sur le site du glissement de Montgombert, site déjà étudié depuis sa réactivation en 2016 et faisant toujours l'objet d'un suivi topographique et surtout visuel par caméra. Les acquisitions géophysiques répétées à diverses saisons contrastées en termes de saturation des terrains superficiels (Figure 8 en haut) montrent que les zones les plus saturées (déterminées par ces acquisitions géophysiques) se corrélient bien (Figure 8 bas) avec les zones les plus actives en glissement (dont le niveau de déformation est caractérisé par le traitement par imagerie des séries temporelles d'image). Ce constat a fait l'objet d'un article scientifique soumis à publication, article qui constitue l'un des livrables du projet MIROIR¹².

Une présentation moins scientifique de ce travail, d'abord plus aisée pour un public non scientifique et pas/peu anglophone, est également jointe en tant qu'autre version de livrable du projet MIROIR.

Etude des circulations préférentielles d'eau par méthodes géophysiques

Trois campagnes : 04/21,
09/21 et 04/22

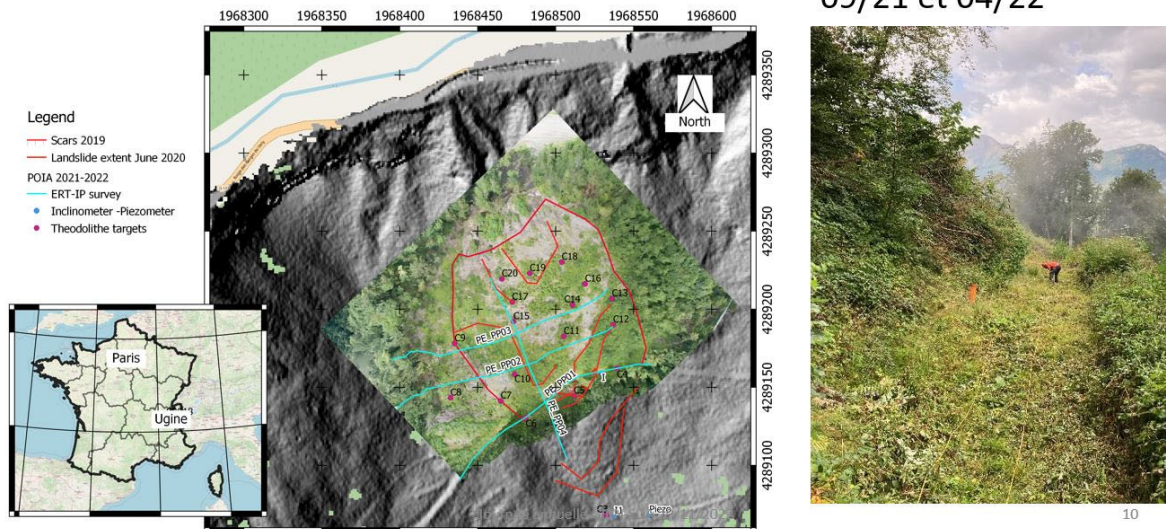


Figure 7: Déploiement des lignes d'acquisitions géophysiques par l'ADRGT sur le glissement de Montgombert sur la commune d'Ugine (73)

¹² Characterizing landslides dynamics from timelapse time domain induced polarization and ground based imaging, case study of Montgombert Landslide (French, Savoie). Submitted to Landslides.

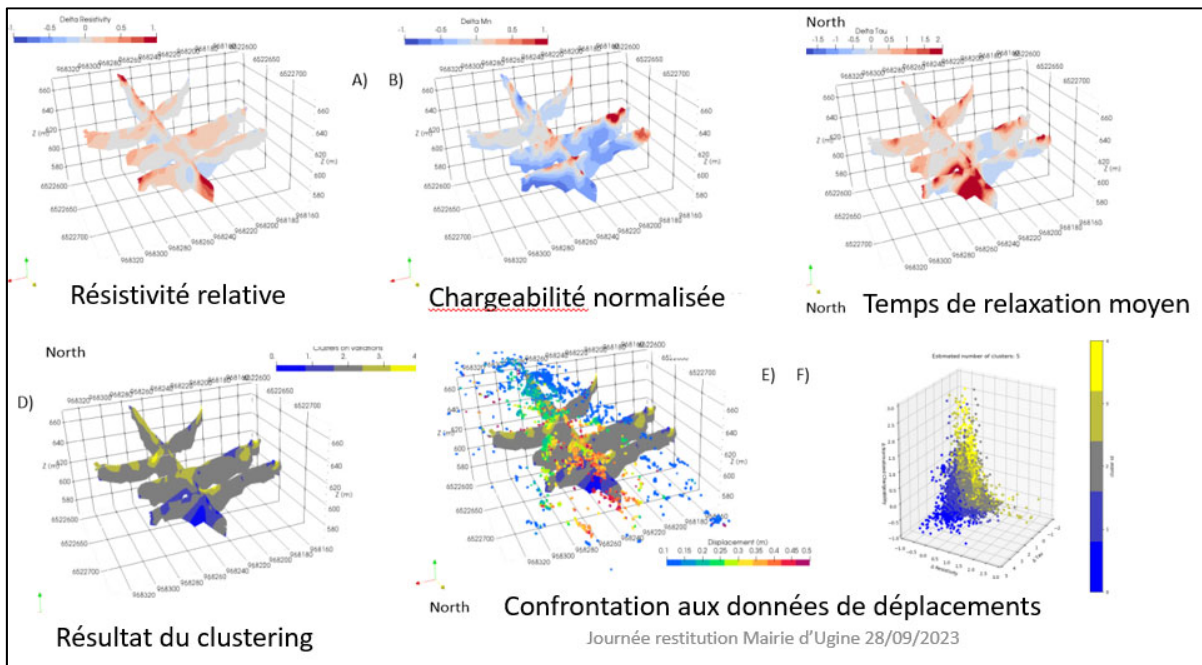
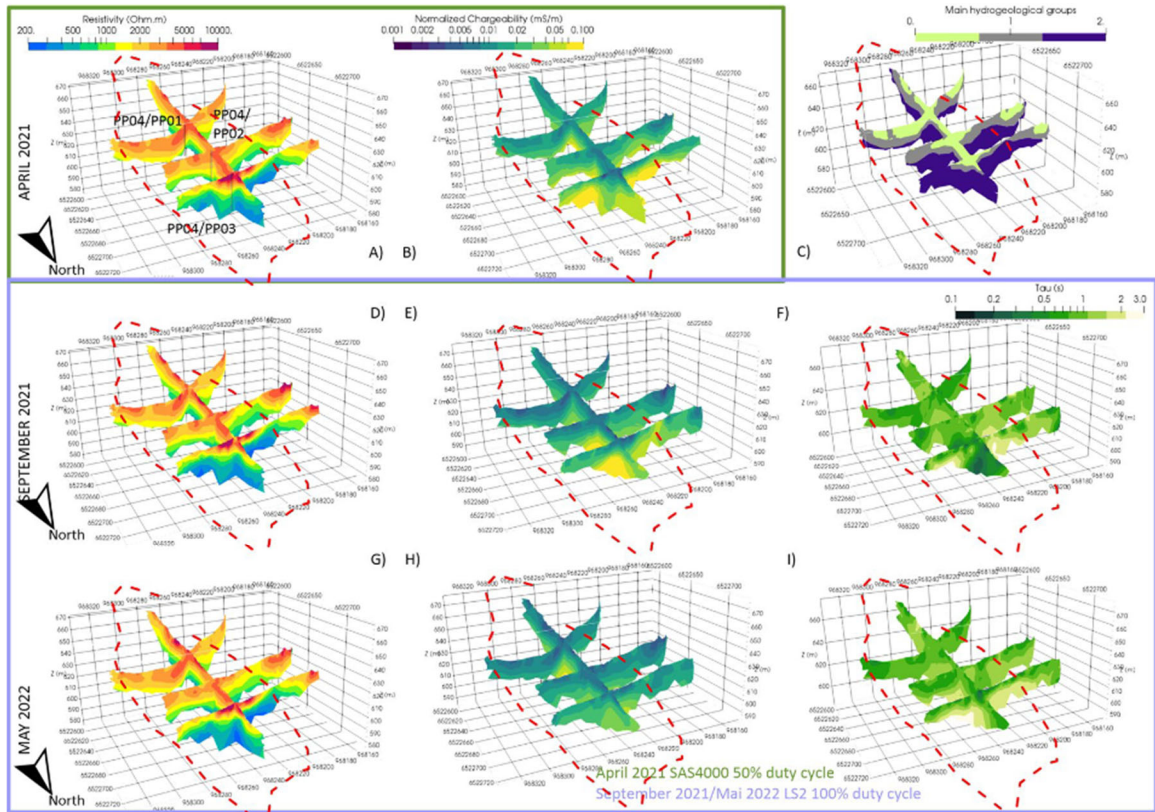


Figure 8 : Résultats multi paramètres obtenus puis mises en relation de ces résultats obtenus avec les mesures de déformations issues du suivi topographique du glissement du Pas de l'Ours

2.2.4 Géomorphologie et activité des versants

Des levés de terrain (indices géomorphologiques, activités) ont permis de compléter les données déjà collectées et caractériser à la fois les zones instables (superficies, profondeur estimée) et leurs activités, ceci sur les deux sites (quelques exemples en Figure 9 et en Figure 10).



Figure 9 : Vallée de l'Arly : glissement de bas de versant par sappe de pied par la rivière Arly en crue en début mai 2015 et glissement superficiel récent sur la rive droite opposée

- Sur les Gorges de l'Arly, un lever MNT LIDAR sur les parties basses de la vallée a été réalisé en avril 2022¹³. Il permet par comparaison avec un MNT de 2013 datant d'avant les événements de 2015 de quantifier les évolutions subies pendant 2015 et après (Figure 11). Une carte géomorphologique complète, réutilisant le MNT a été dressée sur l'ensemble des Gorges de l'Arly (Figure 12). Sur le glissement du Pas de l'Ours, la carte géomorphologique (Figure 13) a été limitée à la zone sommitale non suivie par monitoring et sur les principaux objets observés (fissures et cratères de sous-tirage) ;
- Dans la vallée du Guil, les indices géomorphologiques particulièrement nombreux dans la partie sommitale du glissement du Pas de l'Ours ont été levés lors de la reconnaissance terrain de ce compartiment peu décrit précédemment (Figure 10 et Figure 13) : cratères de sous tirage, fissures et crevasses, panneaux endoréique à contrepente.....Les différents passages sur la zone ont permis d'y identifier une évolution au fil des années, avec une réactivation croissante en 2022 et surtout en 2023 en reflet plus ou moins synchrone du retour plus prononcée des précipitations.

Plus de précisions sur ce volet peuvent être obtenues en consultant les deux livrables fournis par le projet MIROIR, sachant que chaque site a son document spécifique (Gorges de l'Arly d'un part et Guil d'autre part) qui traite aussi de l'acquisition des données mais aussi leur exploitation et valorisation (objet des prochains WorkPackages n°3 et n°4).

¹³ À noter que cette prestation n'avait pas été initialement prévue (notamment budgétairement) et que la zone acquise n'a permis que de couvrir la partie basse du versant en rive gauche (qui matérialise au mieux les Gorges de l'Arly) en remontant en amont que dans la zone urbanisée jusqu'à la RD71 au maximum.



Figure 10 : Pan de versant déjà en partie remobilisé en tête du glissement du Pas de l'Ours en zone sommitale, et panneau en contre-pente préexistant crevassé en amont et avec contexte endoréique, a priori issue de l'activité passée du paléoglisserment

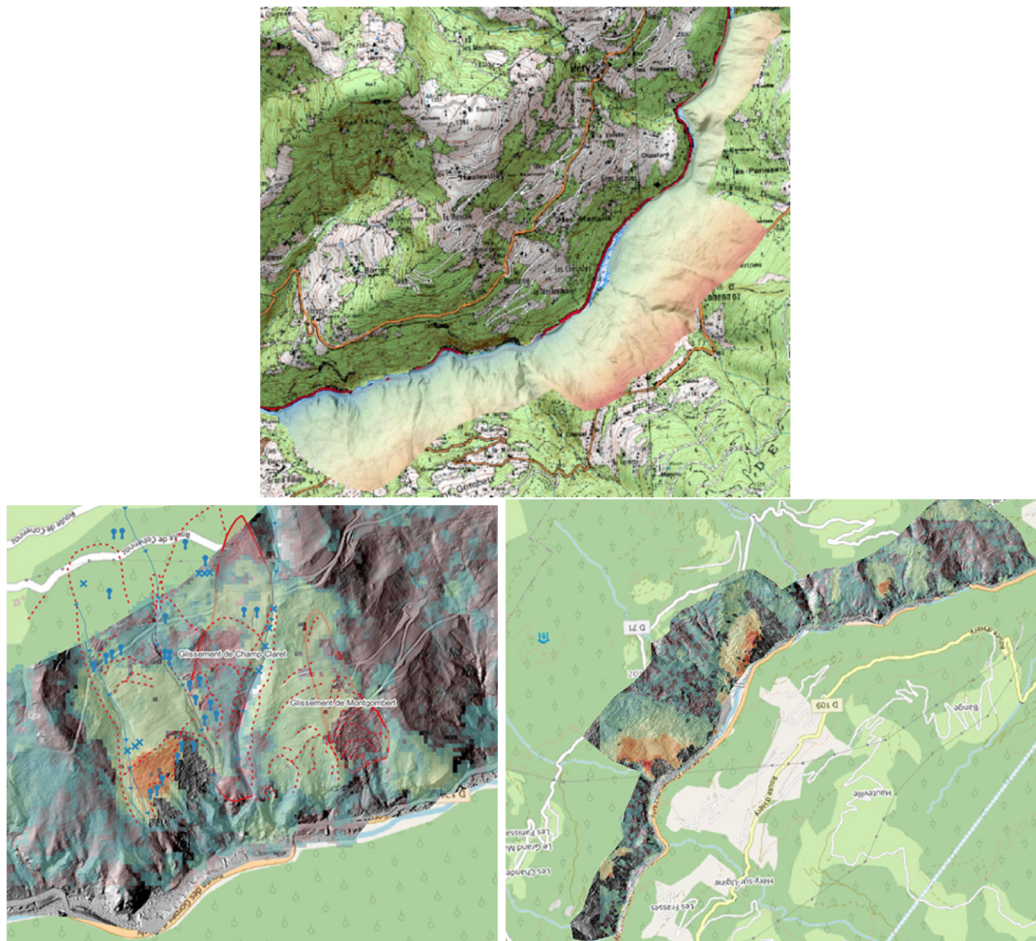


Figure 11 : acquisition MNT LIDAR faite en 2022 sur les Gorges de l'Arly et surtout comparaison avec un précédent MNT datant de 2013 montrant les zones de versants les plus actives des Gorges entre ces deux dates (comparaison ici faite par l'ADRGT).



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de Développement Régional



RÉGION SUD
PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR



l'Europe s'engage
le Massif Alpin

Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

FONDS NATIONAL D'AMÉNAGEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

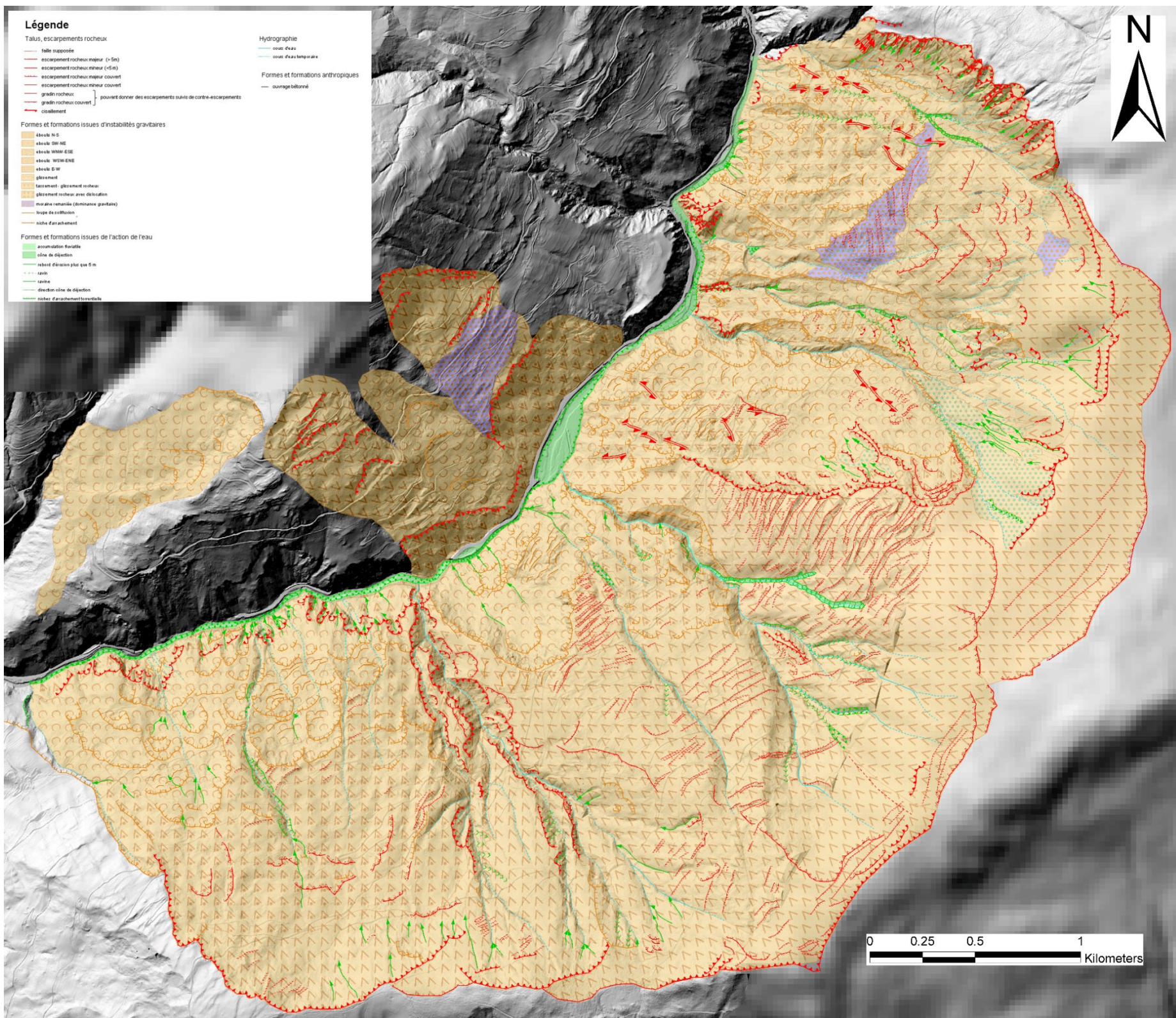


Figure 12 : Carte géomorphologique des Gorges de l'Arly (livrable directe du projet MIROIR)

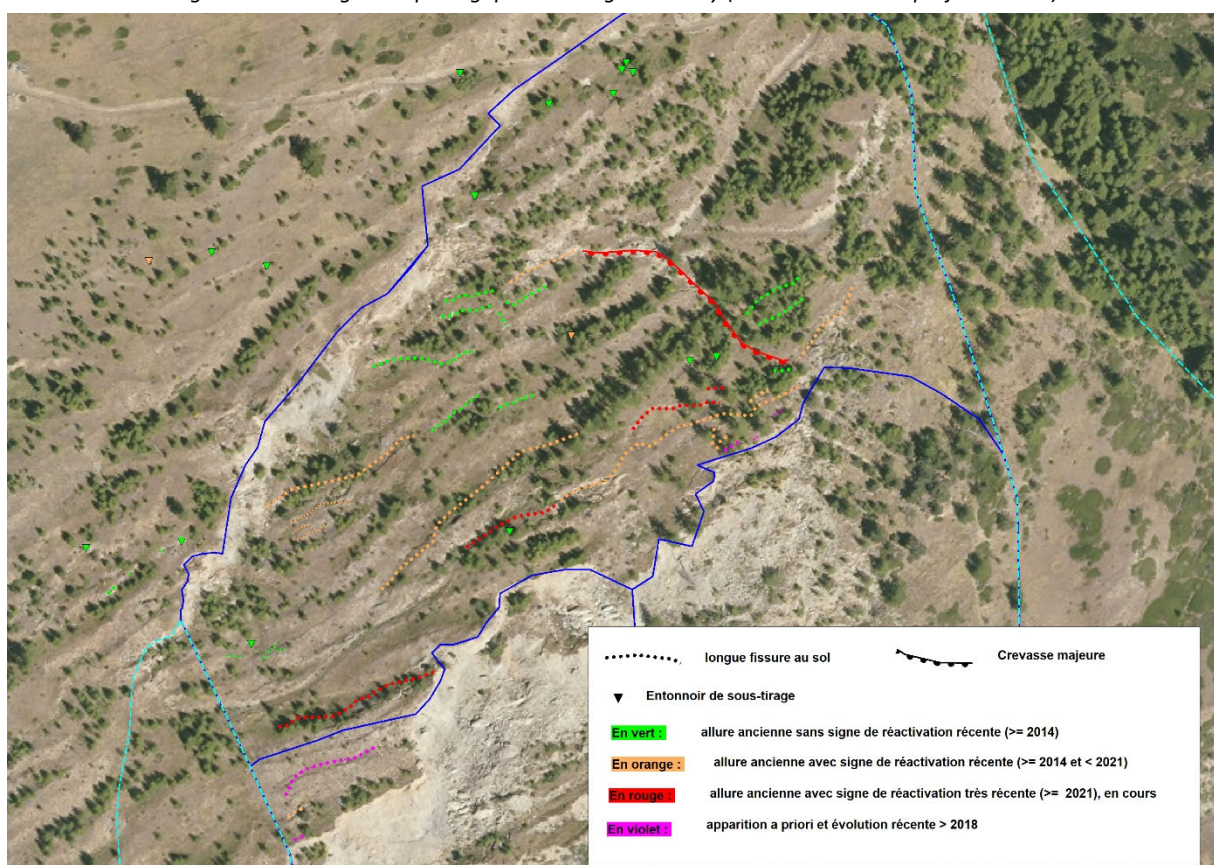


Figure 13 : Levés géomorphologiques en zone sommitale du glissement du Pas de l'Ours (extrait de la note sur la dynamique observée et attendue des différents compartiments du versant du Pas de l'Ours, fournie en livrable du projet MIROIR)





Avec le soutien de



FONDS NATIONAL D'AMÉNAGEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Le document livrable sur le Guil intègre aussi l'aspect chronique évènementielle (inventaire des mouvements de terrain passés connus ou mis en évidence par la photographie aérienne ancienne de l'IGN), là où la chronique des nombreux mouvements de terrain passés dans les Gorges de l'Arly a fait l'objet d'un traitement à des fins de détermination des seuils hydroclimatiques qui fait l'objet d'un autre livrable spécifique à part.

3/ Caractérisation des masses instables et des cinématiques en jeu et instrumentation

Cette étape correspond au WorkPackage n° 3 du projet MIROIR.

3.1 Instabilités de versant.

Pour cette étape, les résultats obtenus sont présentés dans deux livrables différents selon qu'on parle des Gorges de l'Arly ou du Haut Guil (et du glissement du Pas de l'Ours). De plus, les deux livrables couvrent pour chacune des vallées, ce WorkPackage WP3 mais aussi le WorkPackage WP4 suivant, relatif aux perspectives d'évolution et aux scénarios de risque.

3.1.1 Gorges de l'Arly

Dans les Gorges de l'Arly, les instabilités de versant notamment en rive gauche de l'Arly sont historiquement avérées¹⁴ avant même que le principal chef-lieu sur la zone, Cohennoz, ne devienne commune indépendante en 1797 et pour une des plus grandes et actives de ces instabilités de versant dans la durée, le glissement de Cohennoz, il influençait déjà nettement le découpage cadastral sur les mappes savoyardes. Et jusqu'en 2023, des évolutions ont encore été constatées en face du glissement de Montgombert et en amont immédiat de celui-ci dans la vallée, sur la zone de Champclaret.

En intégrant des données plus anciennes d'évènements issues de la consultation des données historiques aux données évènementielles des bases de données plus classiques de la RTM et de la BD-MVT, il a été recensé (Figure 14) entre 1777 et 2022 dans les gorges de l'Arly, 38 épisodes de glissements de terrain¹⁵, 76 épisodes de chutes de blocs¹⁶ et 49 crues ou coulées de boue torrentielle¹⁷.

¹⁴ 1750 pour le plus ancien glissement de terrain signalé dans les archives historiques consultées.

¹⁵ Il a été recherché le plus d'évènement possibles, l'exhaustivité pour la rive gauche, contrairement aux autres phénomènes.

¹⁶ Ce nombre est loin d'être exhaustif de la réalité, avec pas mal d'évènement venant des périodes historiques et seulement les plus gros évènements rocheux depuis les années 1990. Beaucoup d'évènements anciens ne sont de plus pas localisées précisément dans les Gorges.

¹⁷ Là encore, n'ont été comptabilisé que les plus gros évènements anciens et récents. Seul la zone du Nant Cortay peut être considérée comme aussi traitée de manière la plus exhaustive que possible.



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Pour les glissements de terrain de la rive gauche, ils se répartissent sur 3 ensembles différents (figure 14) :

- sur le flanc de versant de Montgombert (partie d'Ugine en rive gauche) sur la moitié ouest (aval) ;
- en bordure ouest du bourg de Cohennoz (principalement représenté par le grand glissement de versant dénudé éponyme) ;
- par le large secteur de Panissats (démarrant à l'est du bourg de Cohennoz pour finir en amont sur le Nant des Roches).

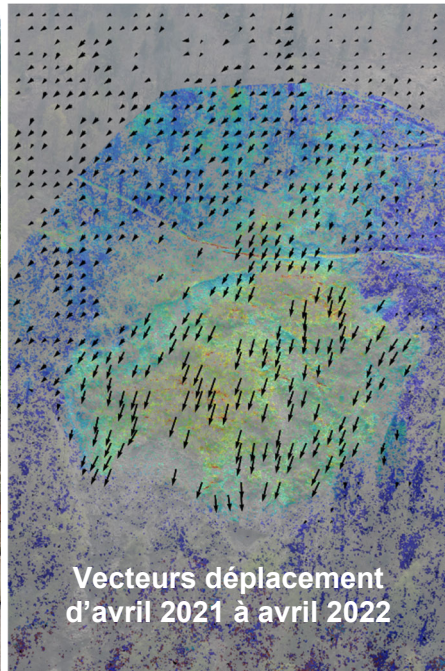
Sur le versant de Montgombert, l'activité y est relativement cyclique avec des périodes plus soutenues (1967-1981, 2016 à 2022) et des phases d'accalmie. Les 11 zones en glissement identifiées sont à chaque fois survenues de manière individuelle mais elles restent souvent suffisamment proches les unes des autres pour pouvoir craindre un jour la possibilité à terme d'une coalescence d'une partie d'entre elles, notamment autour des points de convergence vers Malatrait ou bien encore au niveau de la Mure.

Le dernier mouvement important en date, glissement dit de Montgombert (figure 15), s'était initié en mars 2016 avec une activité décroissante ensuite, malgré un regain d'activité en début 2018, et jusqu'à finir par une activité résiduelle en 2021 et surtout 2022. Le glissement dont la surface est en situation perchée au-dessus de la rivière Arly, s'est vite propagé jusqu'en pied de versant, du fait des écoulements émergents importants concentrés, submergeant la RD1212 de coulées de boue. Le débit décroissant de ces écoulements reste majeur dans la cinématique actuellement à la baisse du glissement. Le suivi topographique automatique avec théodolite du versant depuis la rive opposée a été arrêté le 10 novembre 2021 face à la faible activité résiduelle et à l'occasion d'une panne. Seules les observations photogrammétriques ont été poursuivies par l'ADRGT sur ce site qui lui sert de site expérimental.

Du matériel de suivi de déformation de haute résolution à base de balises GNSS a été posé gracieusement pour test en fin de printemps 2022 par le BET en topographie haut-savoyard HYP-ARC sur ce glissement ainsi qu'en deux endroits du versant des Panissats coté Moulin Ravier¹⁸. Il indiquait (figure 16) en 3 mois et demi un déplacement planimétrique de 5 mm et un mouvement altimétrique à la baisse de 9 mm, sachant que l'année 2022 avait été moins active en générale que les autres années et que le suivi a eu lieu en plein été et début d'automne sec, période saisonnière toujours moins active que dans le restant de l'année.

¹⁸ Coté Panissats, le suivi a été interrompu à peine un mois plus tard. La couverture boisée environnante avait réduit l'alimentation électrique par les panneaux solaires, provoquant des coupures incessantes. Ce problème a depuis été résolu par des capteurs moins gourmands en énergie.

Bas de Montgombert, juillet 2021



Haut de Montgombert, avril 2022



**Haut de Montgombert,
Juillet 2023**

Bas de Montgombert, janvier 2018



Désordre datant de 1967



RD71 entre Benessin et Malatrait



RD 71 entre Benessin et Malatrait



Malatrait, avril 2022



Figure 15 : Glissement de Montgombert et autres traces de glissements plus moins anciens

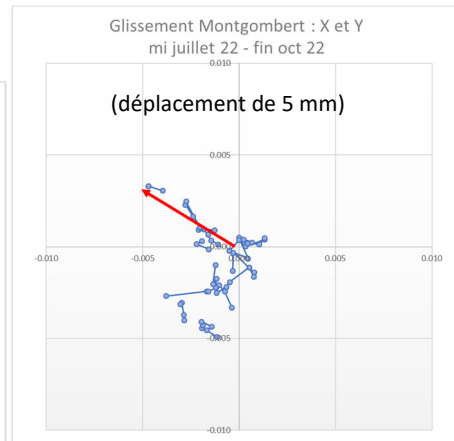
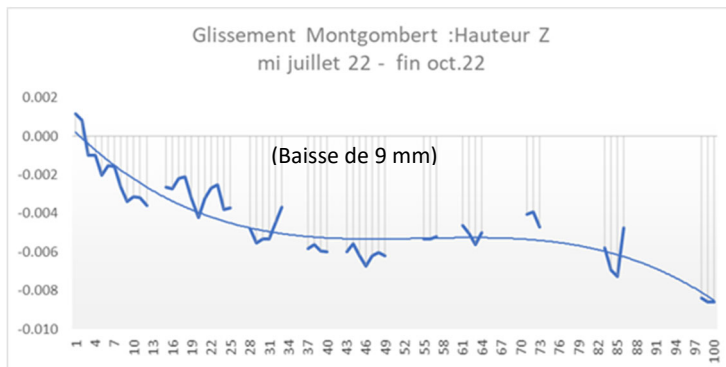


Figure 16 : mesures de déformation spécifiquement faites pour le projet MIROIR durant l'été 2022 sur le glissement de Montgombert

Le glissement de Cohennoz (figure 17) est le plus visible en fond de vallée de tous les compartiments instables car il reste largement dénudé en surface, notamment dans sa moitié inférieure. Il a connu de nombreuses phases d'activité au fil du temps, favorisé par une sape aisée en pied de versant par la rivière Arly en phase de crue dans une berge érosive située au niveau le plus étroit des Gorges. Au début du XVIII^{ème} siècle, il aurait été responsable de la destruction d'une chapelle. Puis la première période d'activité connue et datée avec précision correspond à une phase d'aggravation de l'instabilité avec une extension sur son flanc coté est (amont) dans les années 1931. Il a ensuite été remobilisé dans les années 1954 à 1960, puis à nouveau lors de la crue de 2005 et enfin en mai 2015 où il aurait été un des plus gros fournisseurs en volume solide à la crue torrentielle de l'Arly, pour plusieurs dizaines de milliers de m³ voire plus qu'une centaine de milliers de m³. La tête du glissement remonte jusqu'à 450 m de dénivelé dans des profils de pente très verticalisés, avec une découpe du versant au-dessus de l'escarpement sommitales suivant 0, 1 ou 2 marches étagées selon les endroits. La RD71 passe juste au-dessus en un point qui constitue le point haut de la route (pas d'évolution détectée des fissures anciennes présentes sur la voie bitumée).



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
sur
le Massif Alpin

Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Vue d'ensemble du glissement de Cohennoz près de 6 mois après la crise de mai 2015 (Oct. 15)



ASSOCIATION DÉVELOPPEMENT RECHERCHE GLISSEMENTS DE TERRAIN



Géosciences pour une Terre durable

brgm

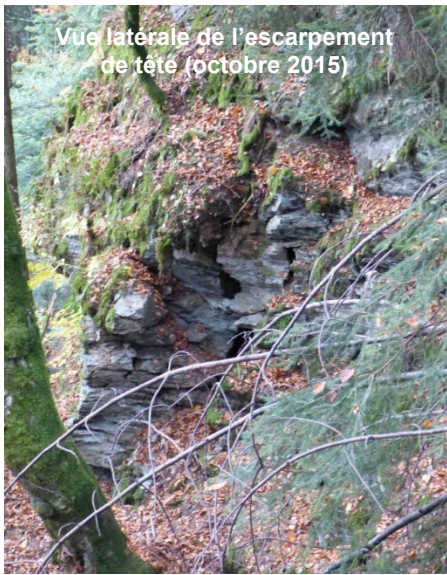


Parc
naturel
régional
du Queyras

**Pied amont du glissement de Cohennoz en
juillet 2021 (zone a priori d'extension de 1931)**



**Vue latérale de l'escarpement
de tête (octobre 2015)**



**Vue oblique de l'escarpement
de tête depuis l'amont (avril 2022)**



**Marche au dessus de l'escarpement
moderne de tête**



Figure 17 : glissement de Cohennoz (Savoie)

Au-dessus de la RD71, le versant à pente régulière autour du lieu-dit Le Vernay ne présente ensuite plus aucun signe d'instabilité significative, ancienne comme récente, jusqu'au moins le Manchu.

Enfin ce glissement de Cohennoz ne montre plus de signes d'instabilités notables depuis 2015 avec une tendance accrue à une végétalisation (en dehors de la zone de pied) généralisée mais cela resterait à confirmer car il n'est pas suivi ni monitoré et même son accès reste problématique, avec une seule voie d'accès repérée et non sécurisée et lors du projet MIROIR, seule une visite en juin 2022 a permis une première reconnaissance préliminaire de terrain à cœur de ce compartiment instable.

Dans le versant instable de Panissats, c'est le secteur du Nant Cortay, cours d'eau situé en milieu de zone, qui est le mieux connu. En effet, il est sujet à de nombreuses crues torrentielles (25 crues torrentielles depuis 1904) et sa gestion domaniale a été confiée à la RTM, qui y a rédigé une monographie dédiée, finalisée en décembre 2014. Ces crues torrentielles ont déstabilisé les berges, qui alimentent en solide les écoulements. Cette déstabilisation est particulièrement importante en rive gauche, juste avant le croisement avec la RD71b, route communale vers Les Panissats et Cernix, qui d'ailleurs n'a été construit que tardivement en 1961 devant la difficulté de maintenir la continuité de passage à hauteur du Nant Cortay même à gué. Sur 250 m de berge en amont et 120 m de large, tout le flanc de versant est instable et évolue depuis au moins les années 1960 à 11 reprises, avec une dernière évolution constatée toujours en cours en juillet 2023.



Figure 18 : vues aval et amont du Nant Cortay à hauteur de la RD71



Figure 19 : vue du flanc de berge en rive gauche du Nant Cortay et enfin de Grangettes)

Au niveau des Grangettes, à 80 m plus à l'ouest, la maison est également concernée par un glissement lent déjà bien visible depuis 2015 et qui semblait toujours actif en 2023.

En dehors de la zone particulièrement active de Nant Cortay, le versant des Panissats est lui aussi concerné par un mouvement global d'ensemble qualifié en 1981 de versant tassé. En effet, il s'agit

d'un cas classique de DSGSD (Deep Seated Gravitational Slope Deformation), soit un compartiment de versant rocheux en déformation continue et profonde, aussi volumineux que lent.

C'est dans les berges boisées de Moulin Ravier et sous la forme de 3 glissements quasiment adjacents de pied de talus (figure 19) qu'on observe le mieux cette instabilité du versant des Panissats qui a durablement coupé la RD1212 de 1954 à 1960, avec la réactivation des 2 des 3 glissements de berge préexistantes (sans doute dans les années 1956-1960), car sapés en mai 2015 par la crue de l'Arly. Le glissement le plus amont (le plus important des deux) atteignait plus de 50 m de dénivelé de versant réactivé. Ces glissements semblent s'être stabilisés (et du moins largement revégétalisés).

Entre octobre 2011 et mai 2015, la déformation du versant de Moulin Ravier en rive gauche a été suivi par inclinométrie avec la réalisation au fur et à mesure d'inclinomètres (7 au total). Les premiers inclinomètres en pied de versant assez courts (15 m de profondeur) ont très vite montré des profondeurs de cisaillement basses entre 4 et 10 m et ils sont devenus très vite inopérants. Au fur et à mesure les nouveaux inclinomètres ayant pris le relais ont été implantés un peu plus haut dans le versant avec des profondeurs jusqu'à 30 m, mais toujours avec des surfaces de rupture par cisaillement rencontrées entre 10 et 20 m. Les vitesses de déformations y sont en moyenne de 2 à 3 cm/an et jusqu'à 5-8 cm/an les années les plus actives (2013 et 2015).

Glissement de berge le plus amont de Moulin Ravier semblant stabilisé et du moins revégétalisé (juillet 21)



Glissement de berge médian de Moulin Ravier venant de se réactiver en mai 2015 (photo octobre 2015).



Figure 20 : Instabilités des versants au niveau des berges de Moulin Ravier en images (au sein du compartiment global des Panissats)

Ces vitesses de déformations de versant sont confirmées par les mesures d'interférométrie radar satellitaires sur la période de 2016 à 2022 (site web de l'EGMS, European Ground Motions Service de Copernicus) qui indiquent à hauteur du hameau de Panissats des vitesses régulières, atteignant sur la seule des composantes planimétriques E-W de près de 2 à 3 cm/an.

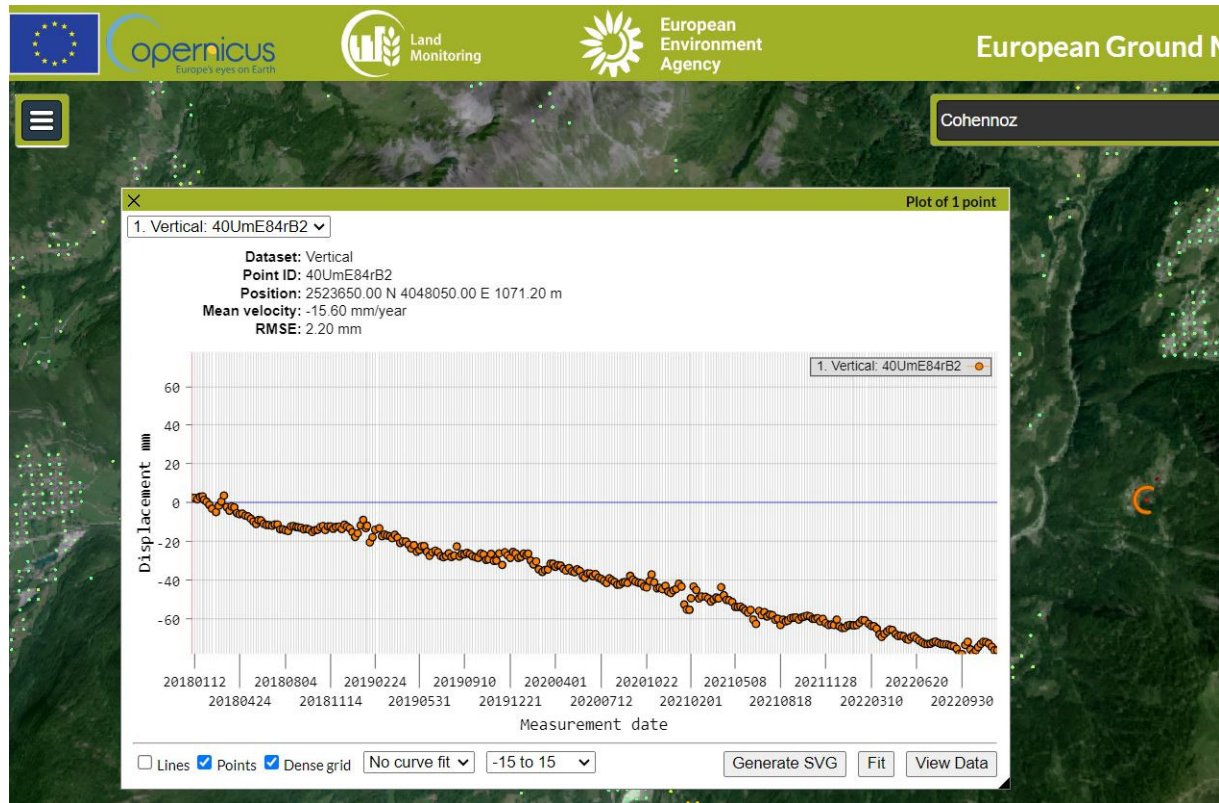


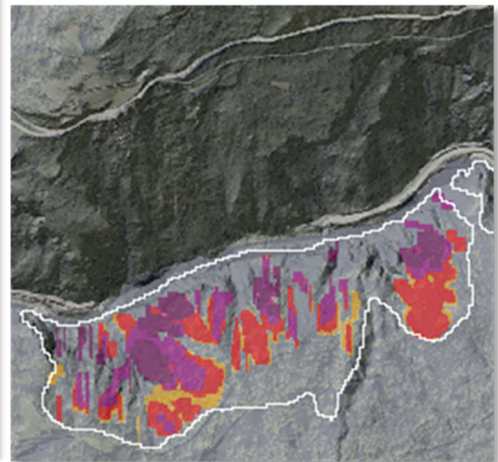
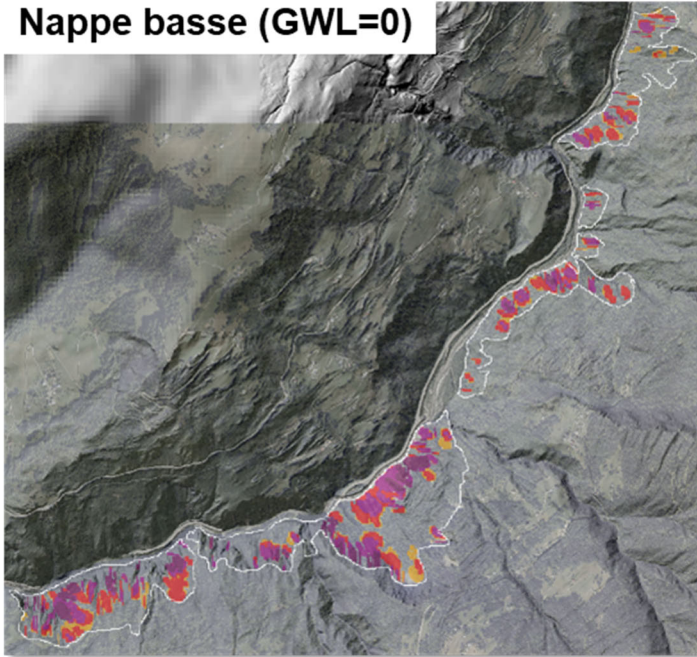
Figure 21 : chronique altimétrique sur le hameau des Panissats avec baisse régulière (1,5 cm /an)

En amont du Moulin Ravier, on retrouve également dans les Gorges de l'Arly plusieurs autres zones ponctuelles d'instabilité visibles depuis la piste forestière menant au pont de fer dont la plus grande concerne une série de 4 glissements superficiels plans voisines à hauteur du hameau de la rive opposée des Métraux, réactivés en 2016 et toujours en situation précaire de possible réactivation rapide, même si a priori peu à plus actifs en 2021-2022.

Une bonne partie de ces instabilités de bas de versant dans les Gorges ont été ensuite redéfinies par modélisation numérique 3D de stabilité de versant à l'aide d'un logiciel dédié, Alice. Compte tenu des incertitudes sur les profondeurs exactes de rupture, les caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques, les résultats obtenus par calage expert restent indicatifs mais ils permettent au moins d'identifier les plages spatiales de versant les plus instables et d'évaluer les ordres de volumes en jeu (selon l'état de saturation des versants). La quasi-totalité des compartiments instables ont été ainsi modélisés entre les Métraux en amont jusqu'au glissement actuel dit de Montgombert en aval. Les zones de glissements en rive gauche sur Ugine (Montgombert et Champclaret principalement), les parties les plus instables du glissement de Cohennoz et celles de Moulin Ravier concernent déjà

chacune des volumes de plusieurs millions de m^3 avec les surfaces de rupture les plus superficielles (de 10 à 15 m). Seule la zone des Métraux implique des volumes un peu plus limités entre 0,7 et 1,8 millions de m^3 . À partir de zones ainsi définies, il sera étudié au chapitre WP4 suivant la propagation jusqu'en fond de vallée des pans instables les plus sensibles.

Nappe basse (GWL=0)



Probabilité de rupture

0 - 0.00001	Nulle à négligeable
0.0000100001 - 0.0001	Très faible
0.0001000001 - 0.001	Faible
0.0010000001 - 0.01	Moderée
0.0100000001 - 0.1	Forte
0.1000000001 - 0.5	Très forte
0.5 - 1	

Nappe modérée (GWL=0.5)

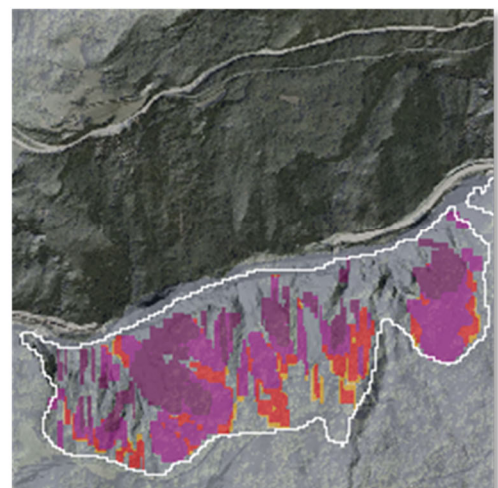
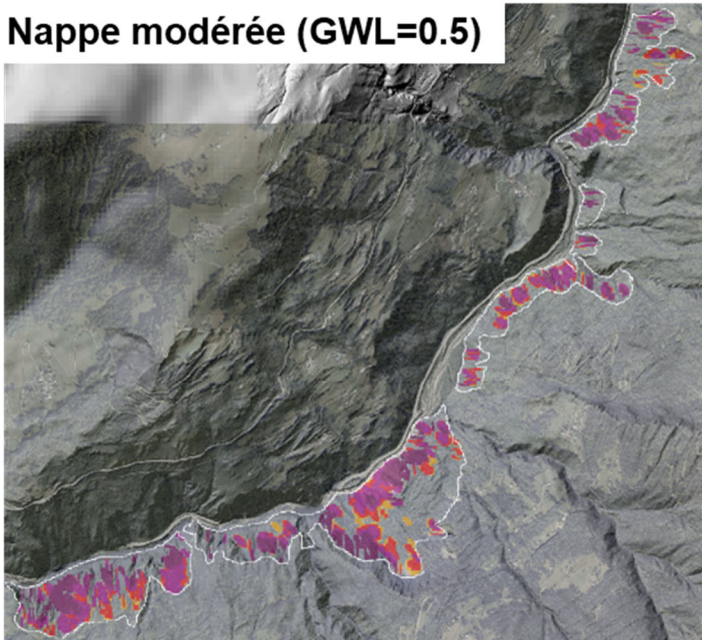


Figure 22 : Zones d'instabilité de versant identifiées à différents états de saturation du versant

Au final, la zone des gorges de l'Arly sur sa rive gauche a pu être découpée, selon le degré d'activité des versants à glisser, en 10 grandes zones homogènes, y compris les zones peu susceptibles à glisser et davantage concernés par des événements torrentiels voire localement de départ rocheux car correspondant à des berges rocheuses très incisées et donc verticalisées (comme le Nant Boulou, le Nant Blanc). Plus la couleur est vive, plus des apports en volume en fond de Gorge sont attendus comme potentiellement importants.

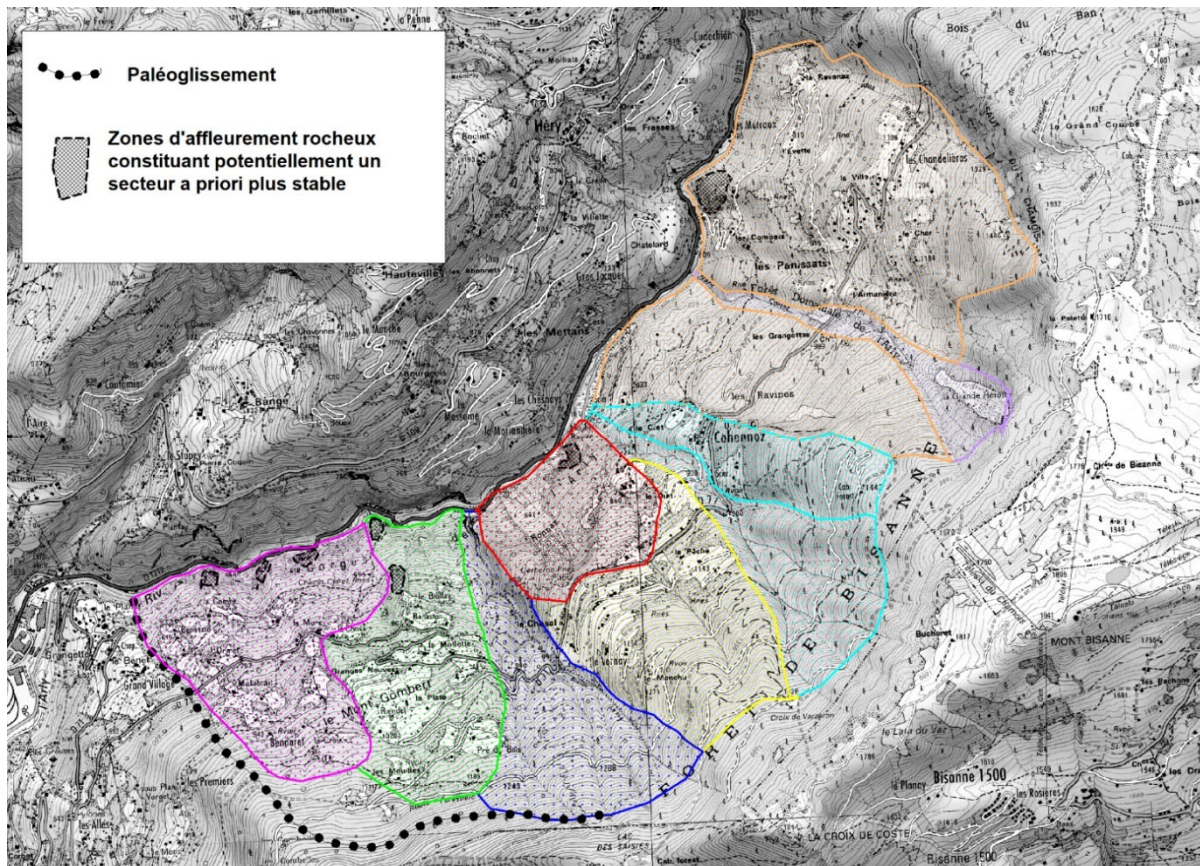


Figure 23 : Découpage du versant de la rive gauche de l'Arly à hauteur des Gorges en 10 zones homogènes

Ce découpage servira de base pour la partie scénarios de risques au WorkPackage 4 suivant.

3.1.2 Haut Guil dans le Queyras

Dans le Haut Guil, si des données (données RTM, suivi satellitaire) ont été collectées sur d'autres instabilités de versant du Queyras, celles-ci n'ont pas été utilisées et les sites n'ont pas été reconnus sur le terrain car la caractérisation du seul versant en glissement du Pas de l'Ours a suffisamment occupé les équipes pour ne pas pouvoir essayer sur ces autres zones d'instabilités queyrassiennes de versant.

Si on se focalise que sur ce seul versant du Pas de l'Ours, et qu'on prend du recul sur le mouvement actuel, repéré comme amorcé dès 2014, avec surtout une forte activité seulement concentrée sur 2017-2018 et basculé ensuite sur un régime d'activité résiduelle en début de projet MIROIR, il a été confirmé qu'il n'existe pas de traces écrites de nets mouvements antérieurs dans les archives historiques. Le premier et unique mouvement moderne signalé dans le versant relève de la mémoire orale locale autour de l'année 1962 lorsque la piste forestière des Lombards fut créée en 1961 (figure 24).

Ceci dit, des indices d'activité locale dans le versant ont été repérés sur les anciennes photos aériennes de l'IGN dès la première prise datant de 1947 et sur les suivantes (figure 23), notamment en 1957 (année de la crue majeure du Guil) et jusqu'aux années 1980. Malheureusement, de telles campagnes de prise de vue aérienne n'ont pas été très nombreuses et certaines des tournées n'ont donné que des prises de vue insuffisamment contrastées pour qu'on puisse en tirer grand-chose.

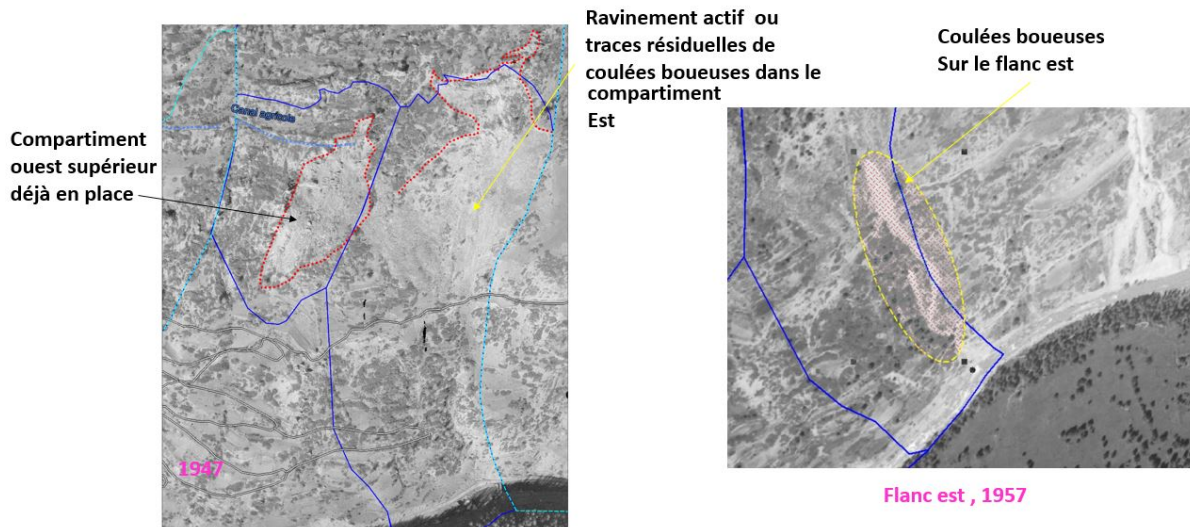


Figure 23 : un versant du Pas de l'Ours déjà largement dénudé dès 1947, avec signes avérés d'instabilité des terrains

La consultation des données historiques a par contre permis de ré-identifier le passage d'un ancien canal agricole dit canal de Villard qui récupérait des eaux depuis la ravine Lombard et qui permettait d'irriguer le versant à hauteur de la zone instable avant le rejet de l'éventuel excédent d'eau dans la ravine Choudanne. Avec l'abandon des cultures, le canal n'a plus été entretenu depuis sans doute la période d'entre-deux guerres sinon avant, et des fuites sur son parcours lorsqu'il restait en fonctionnement se sont probablement produites notamment dans la zone du glissement, où l'ouvrage a été emporté avec les terrains du versant (on ne voit plus que la cicatrice plus ou moins discrète de cet ouvrage dans sa partie amont).

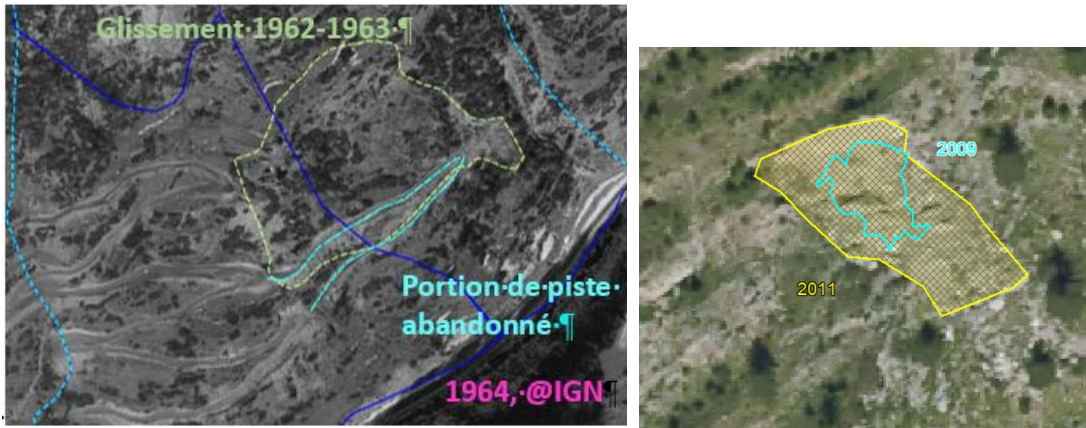


Figure 24 : mouvements des terrains identifiés dans le versant du Pas de l'Ours avant 2011

Il faudra attendre ensuite 1992 pour qu'une activité en pied de versant (poussée sur un mur du talus amont de la RD947) soit signalée et cette fois ci a minima renseignée par des rapports techniques, avant que cela survienne à nouveau en pied de versant en 2002, ceci au sein de la zone du futur glissement.

Avant 2014, deux évènements antérieurs repérés sur les photos aériennes en tête de versant, avec un premier départ significatif entre 2009 et 2011 (figure 24) puis l'apparition d'un nouveau cratère de sous-tirage en 2013 au-dessus du paléo-glissement¹⁹ laissent penser que le mouvement actuel de versant trouve sans doute sa date d'origine davantage en 2011 qu'en 2014.

C'est à l'occasion de chutes de blocs en mars 2014 que la RTM05 découvre la réactivation du versant (Figure 25), avec une évolution concentrée pendant et juste après la période annuelle de fonte nivale (2014, 2015) et qui touche les parties hautes du versant au-dessus de 1600 m NGF (destruction complète du versant avec apparitions de nombreuses niches d'arrachement, remobilisation de blocs rocheux avec propagation atteignant parfois le fond de la vallée). L'année 2016 se démarque ensuite par un certain ralentissement, lié très vraisemblablement au taux d'enneigement hivernal 2015/2016 sensiblement plus bas que les années antérieures déjà pas très élevées.



Figure 25 : Indices d'instabilité des terrains repérés par la RTM 05 de la réactivation

¹⁹ Cet entonnoir de sous-tirage le plus récent a été ensuite utilisé comme point d'injection pour le traçage hydrogéologique réalisées (aucune trace repérée en aval du colorant injecté).



Avec le soutien de



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Puis l'ensemble du versant compris entre 1470 et 1850 m NGF commence à glisser en masse dès mars 2017 sur 350 à 560 m de large, avec des coulées de boue sur son flanc est et des escarpements en tête atteignant près de 10 m en avril 2017 et jusqu'à 35 à 47 m de hauteur en mai 2017. Le glissement de versant se fait notamment coté est suivant deux glissements rotationnels successifs de part et d'autre de la cote moyenne de 1630 m NGF. Sur la moitié ouest, les vitesses atteignent jusqu'à 10 cm/Jour en mai puis baissent à 5 cm/J ensuite. Sur la moitié est, les vitesses de l'hiver à 10 cm/J montent à 30 cm/J en avril, mai 2017. En partie basse, on atteint des vitesses jusqu'à 130 cm/J en mai 2017, puis 50 cm/J en juin 2017 et 10 cm/J en Juillet 2017. Moyennant des moyens de sécurisation et de confortement en renfort (150 KEuros), la RD947 non directement atteinte par le pied de glissement en 2017 reste encore ouverte à la circulation routière, bien que directement menacée (fermée la nuit dès le 21 avril) mais elle est déclarée en sursis d'où l'aménagement d'une piste de secours en rive gauche opposée (800 KEuros).

L'évolution ensuite du glissement, réactivé dès février 2018, est très similaire à 2017 avec parfois même des vitesses accrues (jusqu'à plus de 1m/j en parties hautes pour les zones les plus véloces). Dès mars 2018, la circulation routière sur la RD947 est définitivement coupée, anticipant de peu sa coupure physique qui suit le 10 avril 2018 au niveau du compartiment est.

Après ce printemps de pic paroxysmal d'activité, la dynamique du glissement va très vite ralentir dès la fin avril 2018, sans pour autant s'arrêter et restée d'ailleurs encore active en 2021 et même jusqu'en fin de programme à l'été 2023 : ce sont les marches créées par la poussée active du glissement sur la piste des Lombards²⁰ dans le compartiment ouest qui permettent le plus aisément de se rendre compte de cette activité résiduelle du versant. Dans le compartiment est le plus actif, seule une légère avancée du pied de bourrelet restait perceptible en 2019 et en 2020 la partie aval du mur du soutènement aval de la RD947 dans sa partie encore en place côté est continuait lentement de se déformer. Il était attendu de pouvoir aussi analyser le détail de la cinématique du versant au fil des années post période paroxysmale, mais faute d'avoir eu accès comme escompté aux données de suivi de la déformation du versant acquises dans ces années-là par l'OMIV, on en est réduit aux conjonctures sur les fluctuations climatiques venant moduler le ralentissement du versant : cette période est surtout marquée par des périodes déficitaires en eau plus ou moins prononcées (idem coté neige au moins depuis 2020-2021). Comme on le verra sinon plus bas, l'activité résiduelle déjà constatée n'est pas limitée qu'à la piste du Lombard et elle s'observe aussi dans le plateau sommital et ses bordures aval aussi (comme détaillé par la suite ci-dessous).

Si la crise paroxysmale de 2017-2018 n'a pas clairement d'égale dans le passé historique plus ou moins lointain dans son intensité, on note cependant qu'en termes de surface, l'essentiel du versant affectée par les déplacements depuis 2014 constituait déjà une zone d'éboulis et dénudée en 1947 : l'extension du glissement dans le versant s'est faite depuis 2014 surtout en tête de versant et par régression amont. Cette régression en amont est restée très limitée dans son compartiment est (de 8 à 16 mètres tout au plus, soit 1,5 à 3 % de longueur de versant instable de plus que précédemment), et de manière plus notable dans son compartiment ouest (de 30 à 80 m de plus, soit entre 6 et 15 % de longueur de

²⁰ Ces marches dans les terrains meubles de la piste sont régulièrement rabotées par la mairie d'Aiguille pour maintenir possible la circulation routière de la piste pour les touristes.



Géosciences pour une Terre durable

brgm



versant instable de plus que précédemment). Les flancs du glissement de versant sont matérialisés tant côté ouest que côté est, par des vallons le long de la pente et ils n'ont pas évolué (largeur constante).

À noter qu'à micro-échelle, une des rares personnes durablement présentes pendant des décennies dans ce versant, le berger, a toujours vu la montagne ponctuellement évoluer, année après année, sans jamais voir connu de vraie période d'accalmie.

Donc très tôt, une dissymétrie de comportement du glissement dans le versant s'était faite sentir, notamment entre la partie est et la partie ouest et cela avait amené à découper celui-ci en plusieurs zones homogènes distinctes (figure 26). Ce schéma initial n'a que peu évolué ensuite et il avait été confirmé notamment par les reconnaissances faites ensuite (notamment par la SAGE), montrant un contraste dans les profils de pente et surtout dans l'épaisseur des couches mobilisées (figure 27).

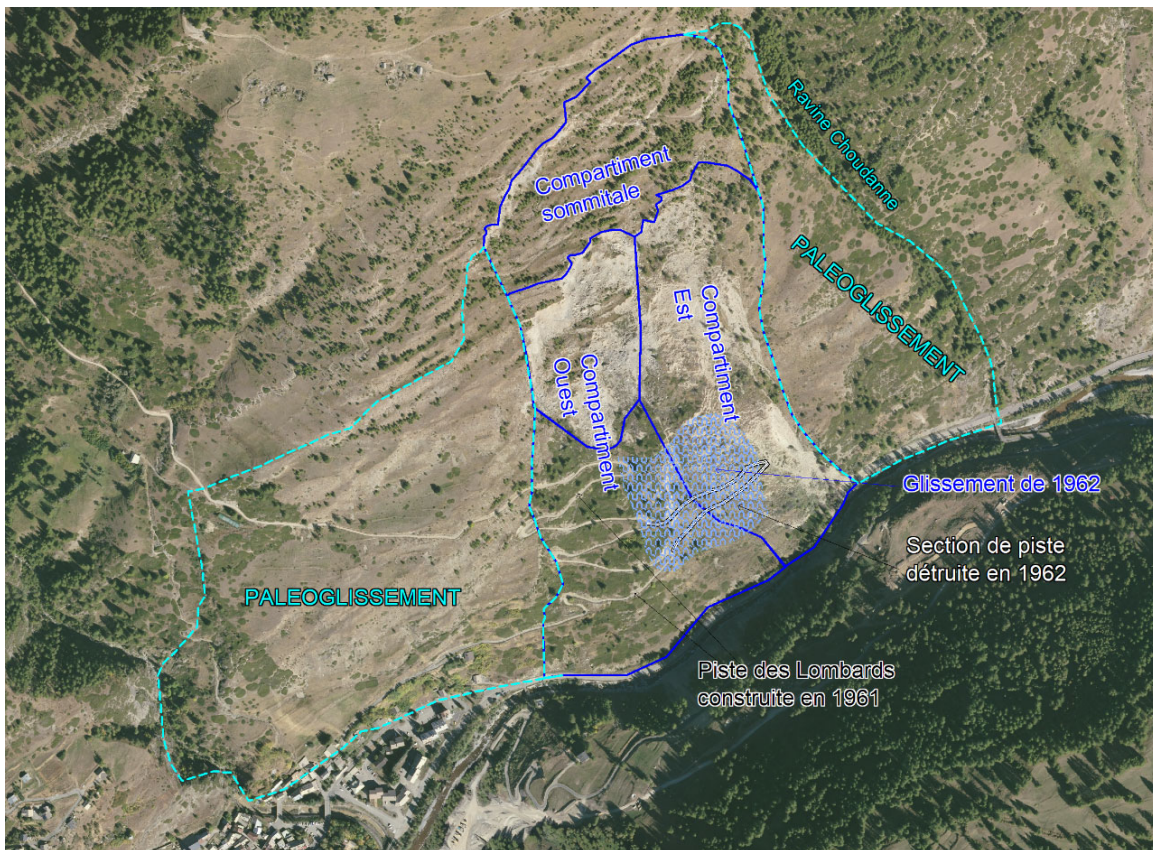


Figure 26 : cartographie des zones homogènes du versant du Pas de l'Ours

Le projet MIROIR n'a permis que d'affiner très marginalement les zones homogènes sur les bordures du versant mais il s'est surtout concentré sur la partie haute du versant au-dessus de l'escarpement principal du glissement, la zone de plateau sommitale jusqu'à l'escarpement de tête du paléoglisement qui n'avait été que peu reconnu, surveillé et caractérisé jusqu'alors. C'est essentiellement dans ce compartiment sommital que des informations nouvelles sur le glissement du Pas de l'Ours ont été acquises.

Un comportement différencié selon les compartiments

Compartiment est

- Secteur le plus réactif, avec les déplacements maximaux les plus importants
- Venues d'eau importantes en tête de versant
- glissement et même coulée en bordure est
- Profondeur de rupture faible (5 à 10/15 m)
- Régression en amont plutôt limitée (< 20 m) coté est et plus importante coté ouest (jusqu'à 40, 50 m)

Compartiment ouest

- Secteur plus lent et surtout plus inertiel
- Profondeur de rupture plus importante (30 m env.)
- Volume en jeu bien plus important.
- Régression en amont importante de 30 à 80 m
- Accumulation d'éboulis en amont de la piste forestière

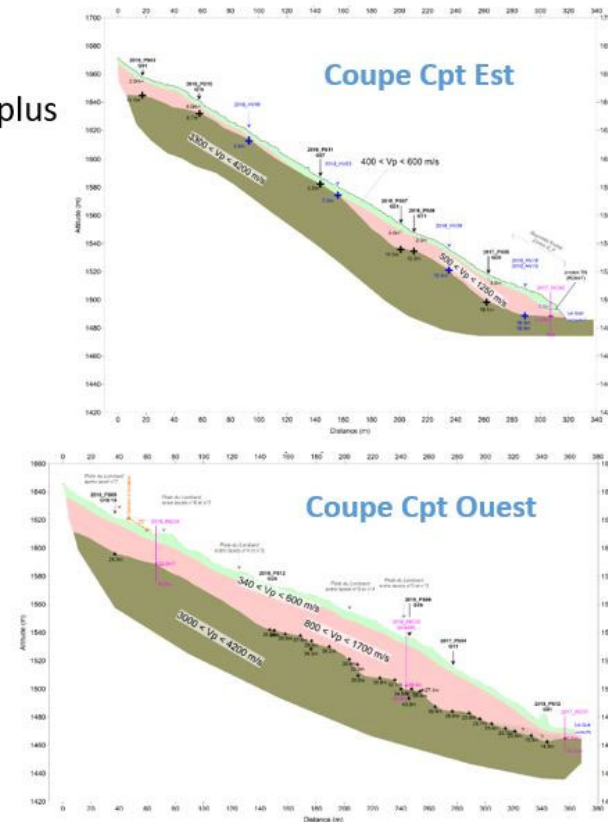


Figure 27 : comportement assez différent dans les moitiés est et ouest du versant glissé

Cette zone sommitale se caractérise (figure 28) par :

- un découpage du versant en étagement successif ;
- la présence en nombres de fissures et d'entonnoirs de sous-tirage.

Sous la falaise de tête, escarpement principal du paléo-glissement, qui remonte du SW au NE dans le versant suivant le pendage des couches, le versant est découpé en une série d'étages parallèles et perpendiculaires à la pente, qui atteignent en milieu de cette zone un maximum de 4 paliers successifs. En partie centrale, ces paliers sont même en contrepente, témoignant du basculement rotationnel passé de ces panneaux hérités *a priori* du paléo-glissement. Les panneaux en contrepente constituent des zones endoréiques, piégeant les eaux de surface (notamment les eaux de fonte nivale) qui n'ont plus comme seule issue que l'infiltration, infiltration facilitée par les fissures présentes au sol perpendiculairement à la pente. La végétation présente est alors celle d'espèces de zones humides (prêles,...).

De très nombreuses fissures au sol, très majoritairement perpendiculaire à la pente sont observées en limites des panneaux observés comme au sein de ceux-ci, atteignant jusqu'à plusieurs centaines de mètres de longueur en continu, pour des ouvertures généralement pluri millimétriques limite centimétrique pour les plus écartées (Figure 13). Elles sont presque toutes recouvertes de branchages morts déposées pour empêcher les animaux sauvages de s'y coincer un membre. Une bonne partie d'entre elles ne sont pas que des indices hérités d'instabilité et elles se sont rouvertes depuis, avec écartement de la fissure bien au-delà des branchages alignés et/ou dans son prolongement. Plus on se rapproche de la tête moderne de glissement, plus cette remobilisation est fréquente et marquée, même si pas systématique partout. Lorsqu'on se rapproche de la tête du glissement moderne, on trouve aussi quelques autres fissures au sol d'allure récente, bien plus courts en général (quelques mètres à quelques dizaines de mètres de longueur maximum) en lien très probable avec le glissement actuel. Et si parfois l'écartement peut parfois dépasser le centimètre d'ouverture localement, il s'agit de crevasses avec un jeu en décrochement au plus à jeu centimétrique au sein des panneaux, ou limités à l'interface des différents panneaux successifs du versant. Par contre, au-dessus du compartiment est, une franche crevasse se distingue nettement car cette entité unique, crevasse majeure, découpe nettement le plateau sommital avec des ouvertures jusqu'à plus d'un mètre de largeur et un décrochement dépassant en son centre 1 à 2 mètres de hauteurs de décrochement vertical. Et comme on le verra par la suite, elle est particulièrement évolutive, de manière perceptible à l'œil depuis les premières observations de mai 2021 (souligné en rouge sur la figure 29).

L'autre particularité, moins couramment rencontrée, est la présence de nombreux entonnoirs de sous tirage, particulièrement en tête de panneau et du côté est du versant. Ils sont déconnectés des lignes de fissures, de forme plus ou moins circulaire (entre 1 à 5 m de diamètre) et la quasi-totalité semble ancienne, aux parois émoussées, partiellement comblés par des branchages. On en trouve même plusieurs au-dessus de la tête du paléoglissement, dont 2 bien circulaires et d'allure récente²¹.

²¹ L'un des 2 (le plus jeune) n'est apparu que sur la photo-aérienne IGN de 2013 (absent de celle de 2009), reportée sur la figure 28

Partie basse de la crevasse majeure en 2023



Étagement du compartiment sommital



Zone endoréique dans un pan de versant à contre pente



Zone de fissuration réactivée mais aussi cône de sous-tirage (zone mixte)



Fissure ancienne, réactivée



Zone de fissuration réactivée mais aussi avec l'ouverture fonctionnant ensous-tirage (zone mixte)



Entonnoir de sous tirage, le plus récent



Bas de la zone sommitale largement mobilisée par le glissement de 2017- 2018, avec actuellement un pan en situation précaire

Figure 28 : Un compartiment sommital très riche en éléments géomorphologiques

Deux d'entre eux ont été d'ailleurs utilisés lors de l'essai de multitraçage hydrogéologique.

À proximité de certaines fissures de panneau, il a été repéré aussi déjà deux orifices de cavité avec des trous circulaires en surface discrets (de 10 à 20 cm de diamètre), profond parfois de plusieurs mètres en haut (jusqu'à 3,7 m ; mesures faites au lasermètre), forme intermédiaire qui témoigne aussi de la dislocation locale du versant superficiel.

Après plusieurs passages en 2021, il a pu être confirmé une évolution lente et discrète, mais néanmoins perceptible de la crevasse majeure dans sa partie basse, avec accentuation de l'ouverture de celle-ci mais surtout une dislocation des terrains accolés en aval (Figure 29). Cette évolution s'est nettement confirmée en 2022 (Figure 30) avec élargissement de la zone impactée et probable évolution similaire sur un vallon voisin (soit un volume impliqué bien plus conséquent).

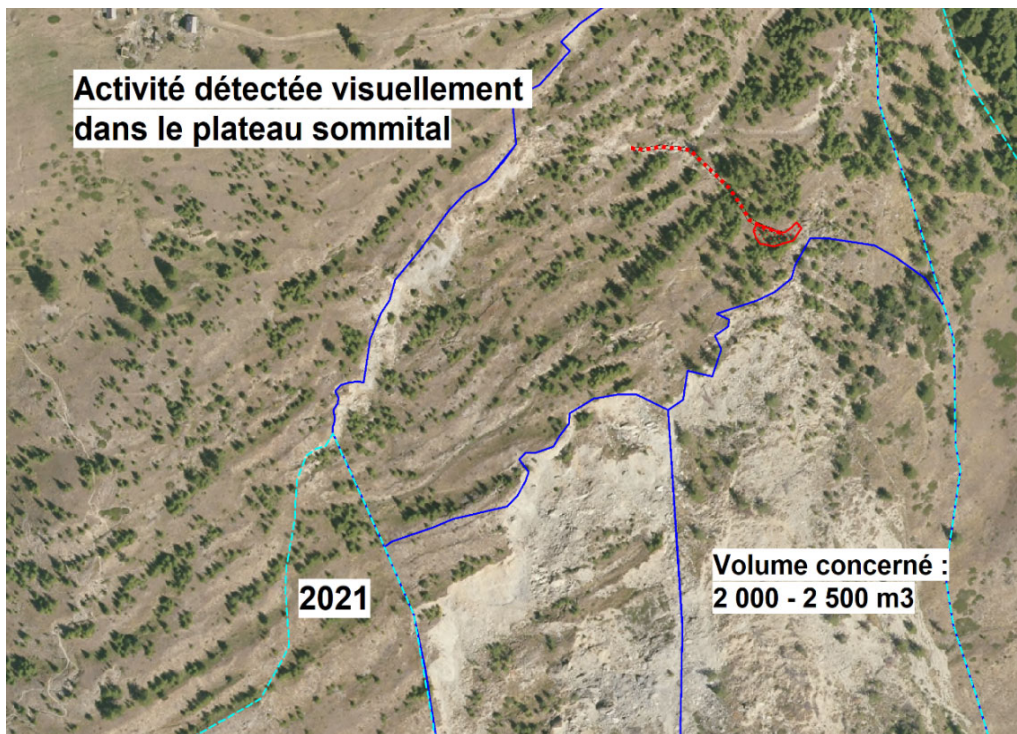


Figure 29 : Activité repérée visuellement en 2021 du compartiment sommital

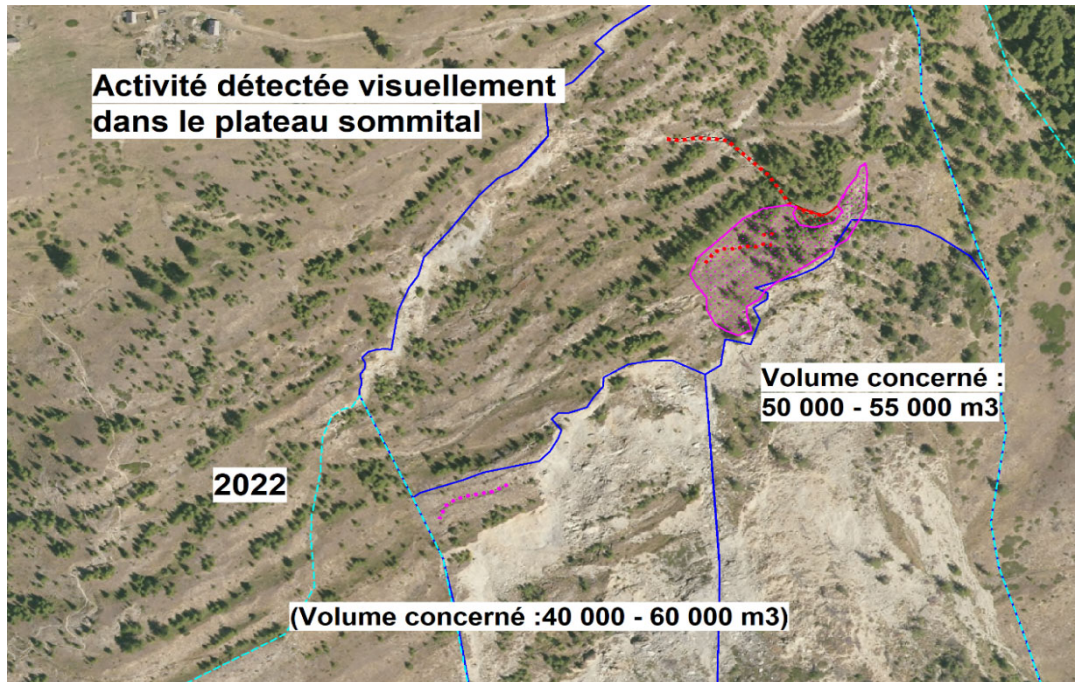


Figure 30 : activité repérée visuellement en 2022 du compartiment sommital

En 2023, dans un contexte climatique bien plus arrosé, ces évolutions se poursuivent (Figure 32), se confirment et s'étendent même à une zone côté ouest du glissement jusque-là stable (zone de crevasses de la figure 31).



Figure 31 : secteur de crevasses sans activité observée en 2021 et 2022 mais significativement évolutif en 2023

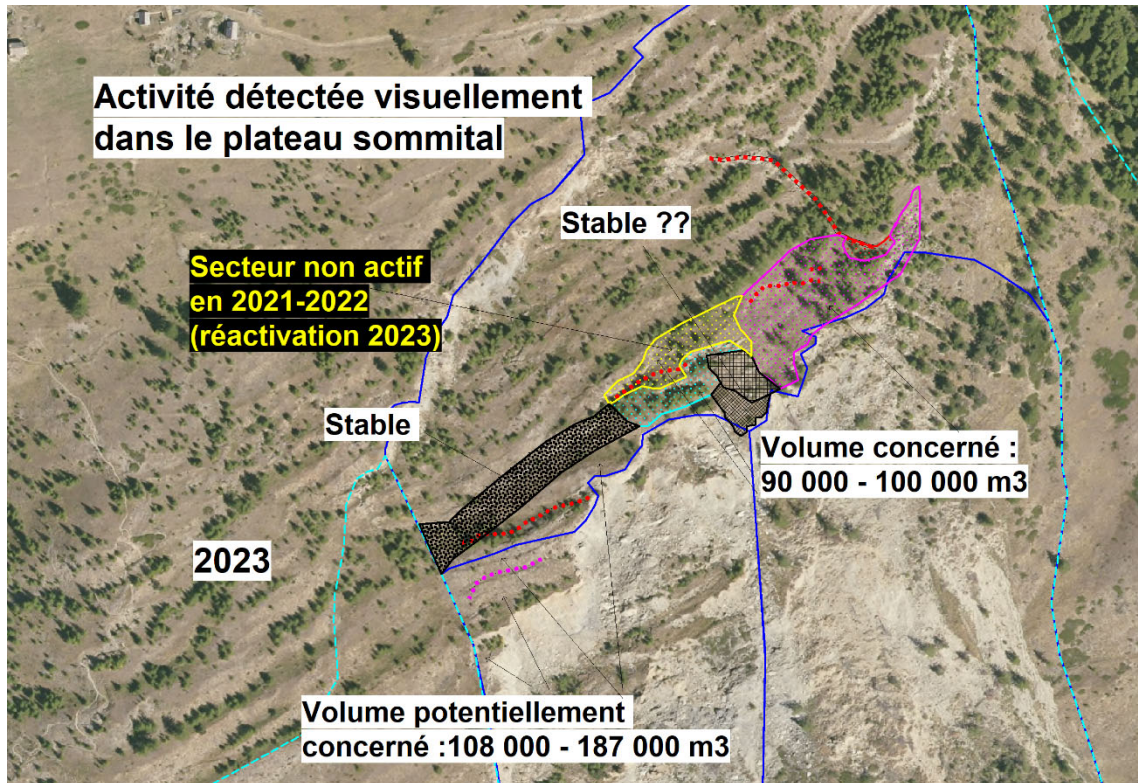


Figure 32 : activité repérée visuellement en 2022 du compartiment sommital

C'est surtout les conditions climatiques qui devraient déterminer à quel rythme le versant en tête de glissement va évoluer et l'ampleur en volume des départs futurs, soit par une série d'à-coups ponctuels ou plus d'un bloc en masse.

3.2 Seuils hydroclimatiques

Tant pour des perspectives immédiates que surtout ensuite pour essayer de percevoir par la suite une prise en compte du changement climatique, il était prévu de chercher à caractériser la sensibilité climatique des instabilités de versant par une détermination de seuils hydroclimatiques. Les seuils hydroclimatiques sont des valeurs de cumuls de précipitations (généralement en mm) pour une période de temps donnée (généralement en jours) à partir de laquelle une activité de versant devient plus susceptible de se produire (seuil de vigilance) voire à partir de laquelle une activité de versant devient attendue de manière imminente (seuil d'alerte). La recherche de ces seuils vise notamment à minimiser d'une part le nombre d'événements non prédits et d'autre part les fausses alertes. Ces seuils peuvent parfois aider les gestionnaires routiers locaux, notamment dans leurs surveillances des tronçons sensibles concernés par les mouvements de terrain, voire même dans l'anticipation des événements à venir lorsque les prévisions météorologiques annoncent des épisodes de précipitations très marquées.

Ces seuils sont obtenus en confrontant les évènements (mouvements de terrain) connus du passé avec les conditions climatiques synchrones de ce même passé.

On ne dispose pas forcément pour cet exercice de stations météorologiques de référence (et parfois les interpolations faites depuis ces dernières ne sont pas toujours bien adaptées, surtout pour les stations les plus anciennes éloignées des Gorges de l'Arly). On dispose par contre ici avec les jeux de données SAFRAN d'un maillage régulier (Figure 33) issu de données radar satellitaires, et qui remontent dans le temps jusqu'en 1958 (3 des points du maillage couvrant la zone des Gorges de l'Arly).

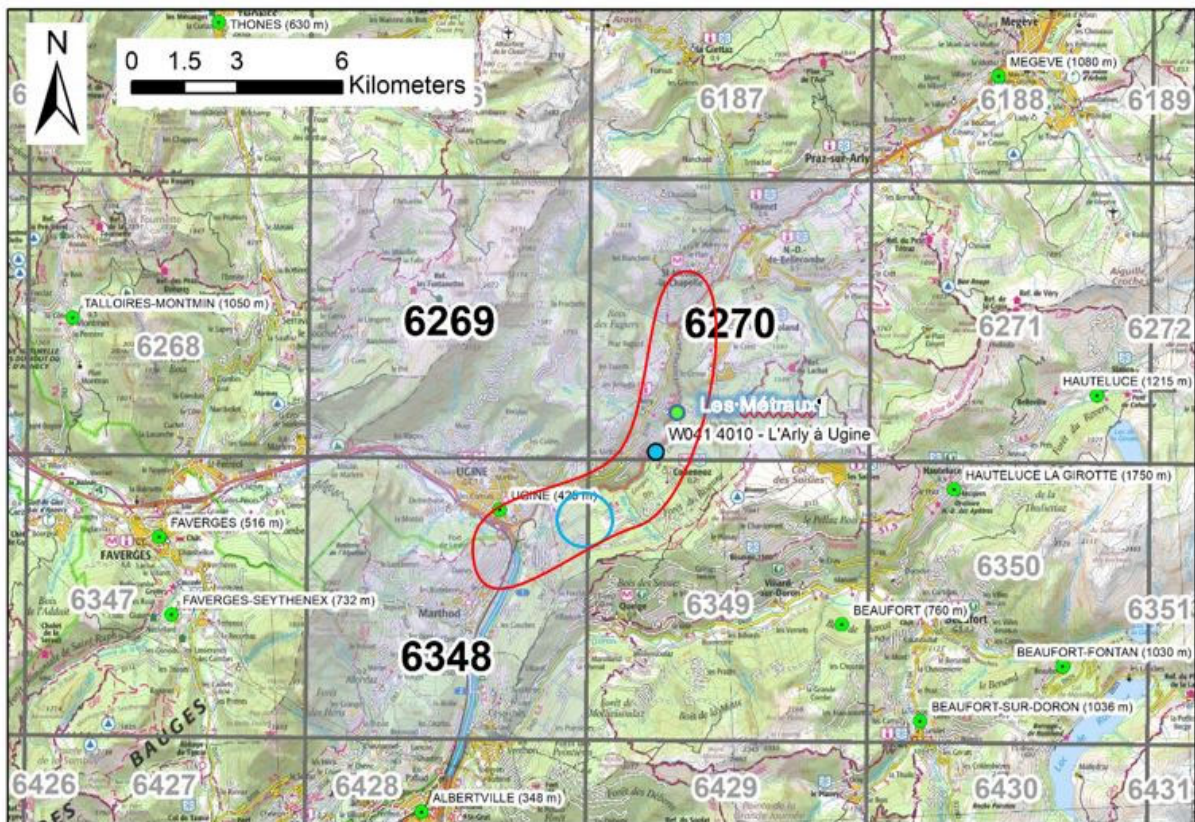


Figure 33 : Localisation du secteur d'étude (Gorges du Val d'Arly en rouge et glissement du Montgombert en bleu) ainsi que des données météorologiques (mailles SAFRAN et stations météorologiques (points verts) et hydrométriques (point bleu).

Les données d'activité des mouvements de terrain à confronter sont bien plus problématiques : la date de démarrage est parfois vite sujette à caution car constatée avec retard et connu approximativement (à la semaine, mois, saison voire année). La période d'activité est souvent encore moins indiquée avec un minima de précision, sans que les phases d'accélération ponctuelle soient clairement déterminées (intensité et temporalité) et discriminées.

En absences des données de suivi du glissement du Pas de l'Ours, les données ponctuelles (moins d'une dizaine) sur ce tronçon de versant de la vallée du Haut Guil restaient trop peu nombreuses et pas assez caractérisées pour essayer d'appliquer une telle méthode de caractérisations de seuils.

Sur les Gorges de l'Arly, on disposait de bien plus d'évènements en glissement (37 en tout sur l'ensemble des versants), mais ces seuls évènements ont montré dans les premiers tests une corrélation insuffisante dans cette approche multi-site pour être traitée telle que et l'échantillonnage des mouvements de terrain a été aussi étendu aux chutes de blocs et aux érosions torrentielles, coulées de boue. La recherche de seuils hydroclimatiques globaux multi-sites multi-aléas sur l'ensemble des Gorges de l'Arly a été alors menée à bout (Figure 34) avec un jeu de 53 mouvements de terrain (rapport BRGM²² livrable du présent programme MIROIR). Des seuils de vigilance et d'alerte ont ainsi été établis, sur 90 jours de cumul de précipitation avec 15 jours de différé, respectivement à 431 mm et à 609 mm. Avec 74 % des évènements prédits sur un temps de 30 % pour le seuil de vigilance et 9 % des évènements prédits sur un temps de 5 %, les performances de ces seuils restent trop faibles pour être retenus au final (difficile aussi de les utiliser à des fins opérationnels).

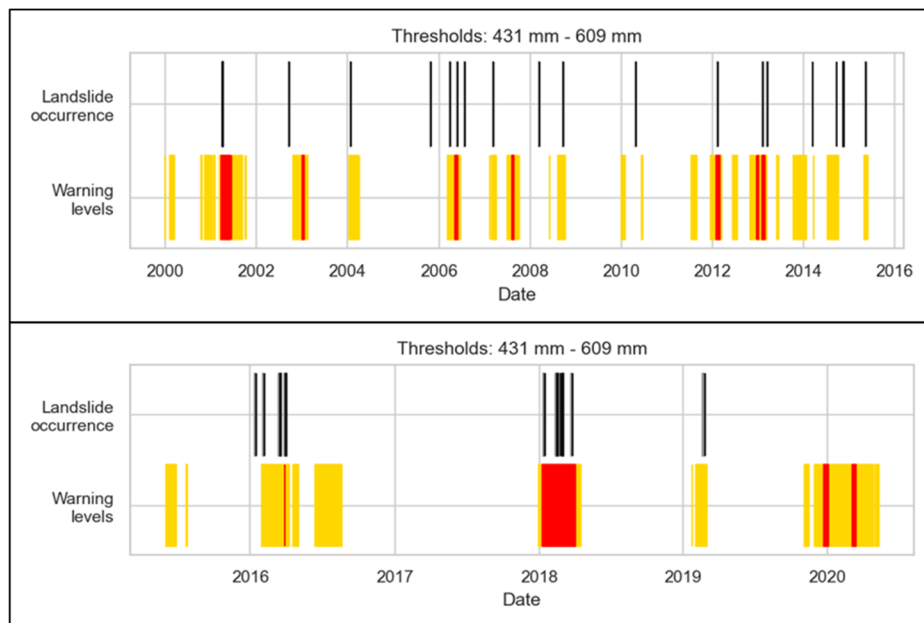


Figure 34 : aperçu graphique sur la période 2000 à 2021 des performances des seuils (warning levels) globaux sur les Gorges de l'Arly (multi-sites multi-aléas) de vigilance et d'alerte par rapport à l'accidentologie réelle (Landslide occurrence)

Lorsque des données de suivi quantitatif et non pas uniquement qualitatif existent, les résultats issus de la détermination de tels seuils sont beaucoup plus robustes et satisfaisants. Ainsi, avec le jeu de données récupérées du suivi journalier du glissement de Montgombert sur la période 2016 à 2021²³, il a été possible en corrélant les phases d'accélération du glissement superficiel sur la période la plus active (2016-2018) et les précipitations d'aboutir à des seuils cumulés sur 3 jours (Illustration 35) sans report atteignant 14,5 mm pour le seuil de vigilance et 35,1 mm pour le seuil d'alerte.

²² Rapport BRGM R-72995-FR

²³ Si les chroniques de suivi de déformations du versant sur le site du Pas de l'Ours avaient pu être récupérées lors du projet MIROIR, le même travail aurait été tenté sur le glissement du Pas de l'Ours, avec a priori quelques bonnes chances de succès, au moins du même niveau que pour le glissement de Montgombert).

Le seuil de vigilance détecte 96 % des évènements pour 27 % du temps en dépassement tandis que le seuil d'alerte sur 10 % de temps de dépassement, détecte 64 % des évènements.

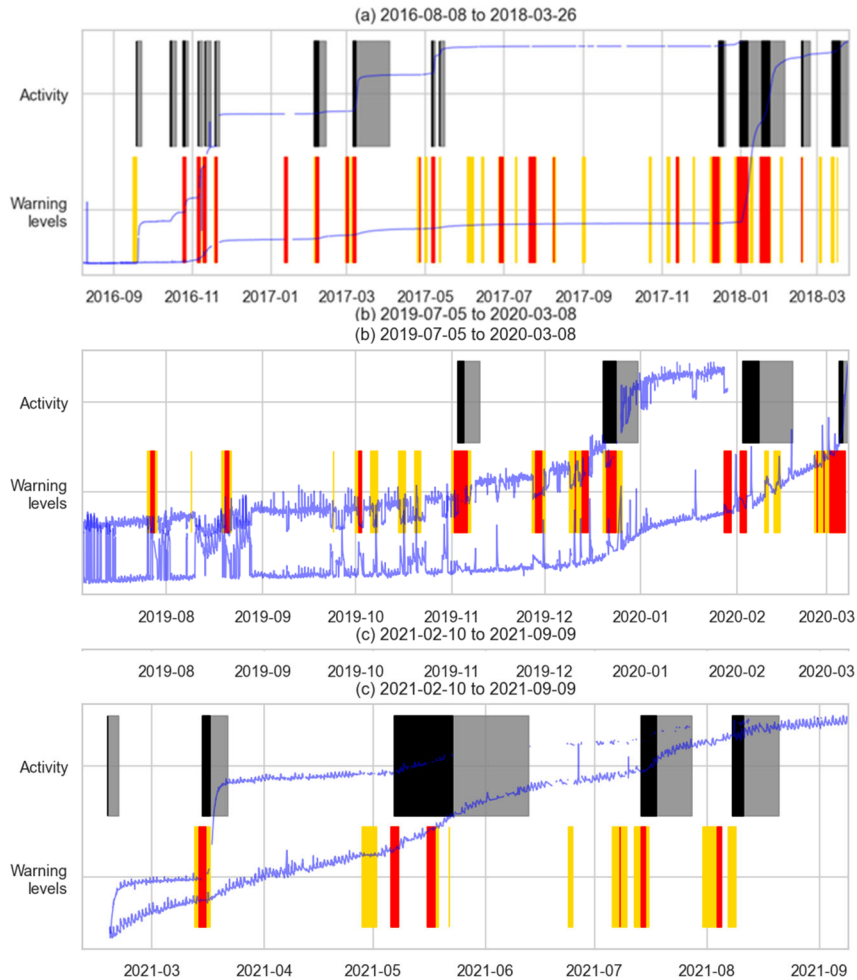


Figure 35 : aperçu graphique d'abord sur la période de calage 2016 à 2018 des performances des seuils (warning levels) de vigilance et d'alerte pour le glissement de Montgombert par rapport à l'accidentologie réelle (Landslide occurrence) puis aperçu sur les deux périodes ultérieures avec dégradation des performances

Avec un seuil limité à 3 jours sans report, et de bonnes performances sans être exceptionnelles, de tels résultats aideront cependant peu un gestionnaire de réseau routier par exemple, au-delà du ressenti à l'immédiat lors du passage des épisodes pluvieux. Ceci est d'autant plus vrai que le glissement de Montgombert encore en plein développement en 2018 n'a pas conservé par la suite un comportement uniforme et que les performances de ces seuils se sont progressivement dégradées par la suite²⁴, tant sur la période 2019-2020 que sur la période finale de 2021.

²⁴ Voir pour cela le rapport dédié RP—72995-FR.



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
du Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

On note aussi que ces résultats ont été obtenus en considérant les précipitations brutes (pluies et neiges) plutôt que les précipitations efficaces (qui aboutissent à de moins bonnes corrélations, dans les deux cas exposées ci-dessous, sans en connaître la raison).

L'approche prévue initialement de détermination des seuils pour caractériser a minima la sensibilité climatique s'est ainsi avérée peu concluante au final avec des données de mouvements de terrain parfois nombreuses mais insuffisamment caractérisées en termes d'activités pour donner des résultats valorisables pour la suite (prise en compte du changement climatique). Même dans l'unique cas isolé (glissement du Montgombert) où la méthode a pu être déployée avec un degré de satisfaction, il reste des verrous scientifiques (hétérogénéité des données climatiques, comportement non durable dans le temps de la cinématique du glissement) et des résultats sans réelle valorisation opérationnelle possible.

Si on ajoute de plus les nombreuses incertitudes propres cette fois-ci à la détermination des scénarios de changement climatique, l'utilisation envisagée initialement de cette méthode des seuils pour ensuite arriver à une prise en compte du changement climatique s'avère ici au bout du compte en pratique une impasse.

Plutôt que persister jusqu'au bout dans une telle voie idoine mais peu pertinente dans sa réalisation, il est alors apparu bien plus raisonnable de se limiter à la seule donnée de saturation en eau des versants pour apprécier la sensibilité des versants à une plus ou moins forte instabilité en masse (saturation décorrélée d'un contexte climatique quelconque, tant d'un point de vue climatique immédiat que futur), tel qu'établi par modélisation sous Alice dans le paragraphe précédent.

3.3 Instrumentation

Pendant le projet Miroir, les actions de suivi par instrumentation déjà engagées (suivi par imagerie sur le site du glissement du Montgombert, suivi visuel du glissement du Pas de l'Ours) se sont poursuivies mais elles ont cessé avant la fin du projet. De même, les dernières actions de suivi du glissement du Pas de l'Ours par instrumentation (radar terrestre) assurée par l'OMIV semblaient évoluer de 2020 à 2023 vers un désengagement partiel, voire aller vers une fin durable, avec la délocalisation temporaire sur des durées de plus en plus longues de l'équipement sur d'autres sites français d'instabilités de versant.

En marge du projet MIROIR, la réalisation d'un piézomètre sur Aiguilles²⁵ préfigure un retour probable des actions de suivi par instrumentation, mais dans un cadre de mise en œuvre plus locale (répondant plus à des besoins locaux et plafonnés par les moyens locaux), ce qui ressort en fin de projet MIROIR en un consensus local commun et partagé dans le cas du Queyras, mais aussi pour les Gorges de l'Arly (où un travail de possible mutualisation entre acteurs locaux reste par contre encore à y construire).

²⁵ Co-financé par le projet Européen PITEM RiskGEST et le programme RGF (Référentiel Géologique Français).



Géosciences pour une Terre durable

brgm



4/ Simulation de scénarios de risques, en prenant en compte le changement climatique

Cette étape correspond au WorkPackage n°4 du projet MIROIR.

La caractérisation des glissements de versant en termes de sensibilité climatique n'a pas été concluante, avec toute une série d'incertitudes et de verrous scientifiques non résolus, sur les incertitudes inhérentes aux scénarios du changement climatique, il est vite apparu illusoire qu'une prise en compte du changement climatique soit ici scientifiquement possible. Et en soi, compte tenu déjà de nombre restreints de données existantes sur les zones étudiées, une première détermination de scénarios de risques constitue déjà en soi une gageure et une avancée majeure sur l'état des connaissances.

Là encore, avec des approches et des moyens déployés différents sur les deux vallées, la détermination de scénarios de risques ne s'appuie pas sur les mêmes méthodes : les scénarios de risques dans les Gorges de l'Arly s'appuient essentiellement sur des modélisations, tandis que sur le glissement du Pas de l'Ours, ils se sont limités aux observations de terrains, une rétrospective sur les événements passés et une détermination préliminaire au final basée uniquement à dire d'expert.

4.1 Gorges de l'Arly

Dans les Gorges de l'Arly, on est en effet reparti de la modélisation sous Alice qui avaient identifiés au WorkPackage précédent les instabilités de versants présentes dans les Gorges de l'Arly (notamment en bas de versant). Pour plusieurs de ces instabilités de versant régulièrement répartis tous le long des Gorges, il a été ensuite examiné une modélisation de propagation sous les zones d'atteintes et les enjeux touchés à l'aide d'un logiciel dédié Shaltop : l'approche utilisée est déjà une simplification en considérant l'ensemble de la masse instable en propagation comme ayant un comportement homogène d'une part et obéissant à une rhéologie de type Coulomb d'autre part, soit des hypothèses avec des écarts +/- prononcés avec la réalité. Ensuite, ces résultats ont été extrapolés pour les scénarios de risques, à l'ensemble des instabilités de versant modélisés en rive gauche de l'Arly dans la zone de Gorges (Figure 36) pour identifier les enjeux concernés et une estimation du niveau d'endommagement potentiellement subi.

Dans tous les essais de propagation simulées, on a toujours eu une atteinte systématique du fond de vallée jusqu'à la RD1212 ou de la rivière Arly, même pour les configurations les plus optimistes (moindre propagation pour des coefficients de friction plus élevés) pour chacune des 5 simulations faites (une d'entre elle, illustrée ici en figure 37). On notera notamment que cette prise en compte de la propagation des masses par Shaltop donne par contre des résultats assez contrastés sur les volumes glissés (en absolus comme en relatif) atteignant les enjeux du fond de vallée (rivière Arly ou RD1212²⁶), variant selon un unique paramètre, le coefficient de friction.

²⁶ Dans certains cas, les deux enjeux peuvent être atteints, le second par débordement au-delà du premier enjeu (débordement ou comblement/embâcle lorsqu'il s'agit de la rivière comme premier enjeu atteint), voire

Plus le sol demeure dans un état de saturation, notamment entretenu par des écoulements de surface, plus ce coefficient de friction évoluera à la baisse et la propagation sera forte.

Coefficient de friction	EXCEP		MOY		PFD10		PFD20		SUP	
	riviere	RD1212	riviere	RD1212	riviere	RD1212	riviere	RD1212	riviere	RD1212
	Volume Total 230 000 m3		Volume Total 15 600 m3		Volume Total 54 800 m3		Volume Total 235000 m3		Volume Total 1 600 m3	
17.3 °	95609.0	3.8	13555.8	405.1	40814.1	23.3	202757.5	16603.7	1556	0
21.7 °	52629.9	2.4	13393.0	735.2	37656.7	0	201067.5	743.1	1440	0
23.9 °	35816.2	0.0	12782.4	1248.3	38489.2	0	192840.9	6.0	1178	0
26 °	25822.9	0	11808.1	1999.9	39576.3	0	179147.1	0.0	725	0
29.8 °	12647.8	0	6674.5	2924.1	36161.0	0	141910.9	0	20	0

Coefficient de friction	EXCEP		MOY		PFD10		PFD20		SUP	
	riviere	RD1212	riviere	RD1212	riviere	RD1212	riviere	RD1212	riviere	RD1212
17.3 °	41.6%	0.0%	86.9%	2.6%	74.5%	0.0%	86.3%	7.1%	97.2%	0
21.7 °	22.9%	0.0%	85.9%	4.7%	68.7%	0	85.6%	0.3%	90.0%	0
23.9 °	15.6%	0.0%	81.9%	8.0%	70.2%	0	82.1%	0.0%	73.7%	0
26 °	11.2%	0	75.7%	12.8%	72.2%	0	76.2%	0.0%	45.3%	0
29.8 °	5.5%	0	42.8%	18.7%	66.0%	0	60.4%	0.0%	1.3%	0

Figure 36 : incidence de variations du coefficient de friction sur les volumes arrivant en fond de vallée de l'Arly (en m3 puis en % de la masse instable)

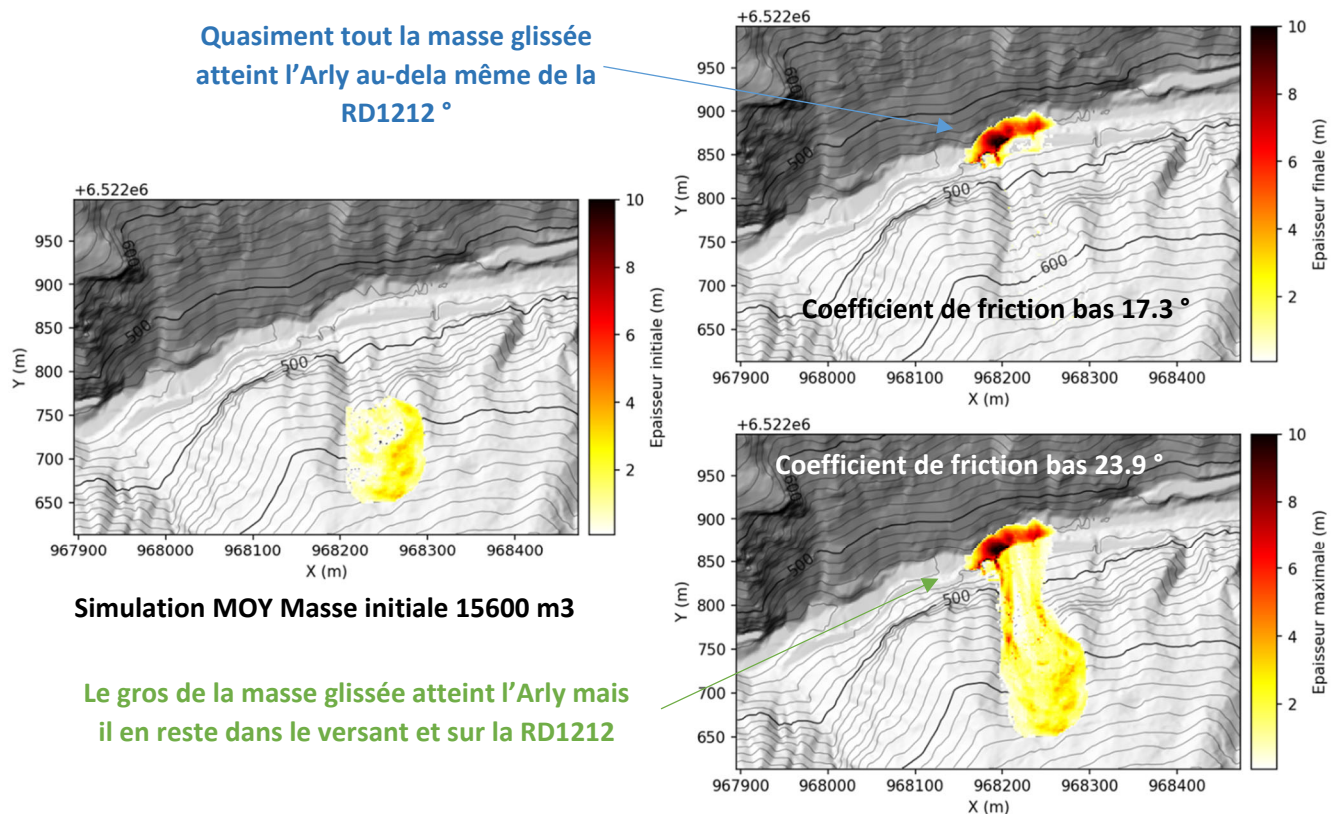


Figure 37 : illustrations relatives au °scénario de simulation de propagation Moy (secteur Montgombert Ugine)

pour des phases les moins visqueuses un possible transit des masses glissées via la RD1212 sans réelle stockage sur le bitume, avant de poursuivre jusque dans la rivière en léger contrebas de la route.



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional
EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



Avec le soutien de



Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

Secteur Benessin à ChampClaret (Ugine)



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional
EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

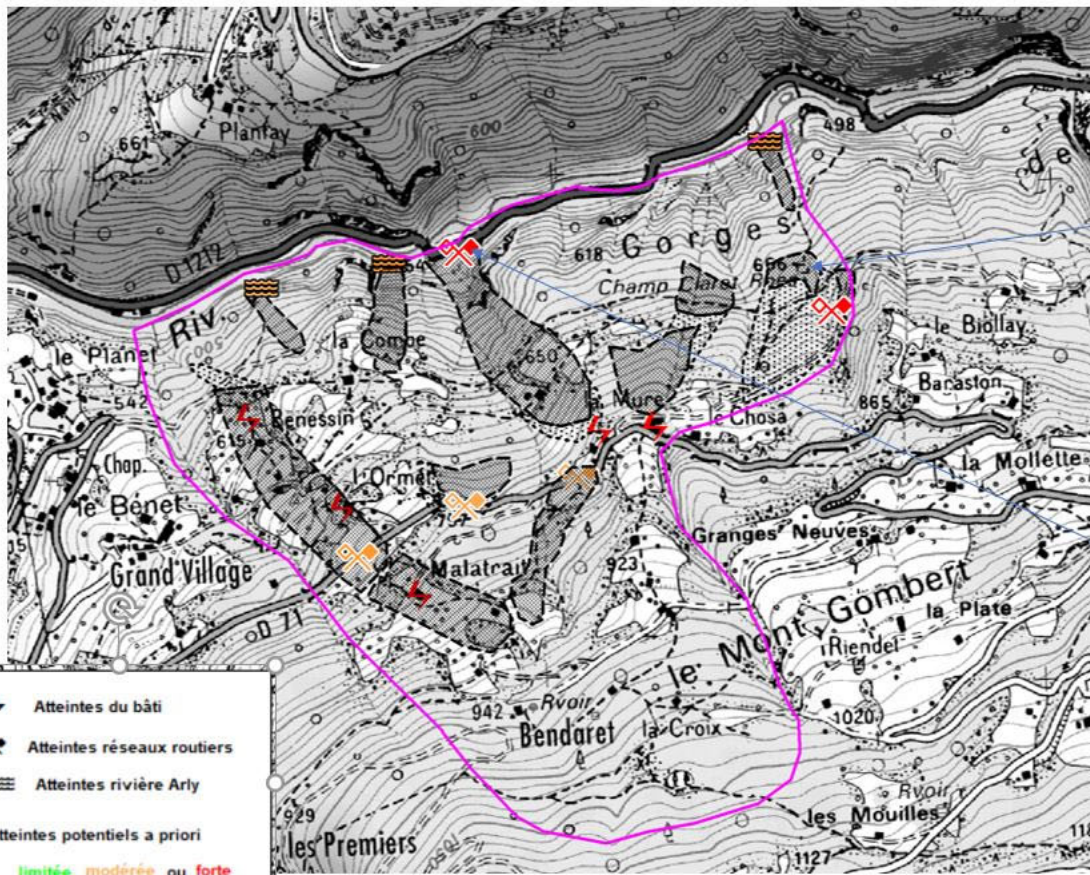


Figure 38 : illustration cartographique des zones à risques identifiées pour une des zones homogènes des Gorges parmi les plus sensibles



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Parc
naturel
régional
du Queyras

Les scénarios de risques ont été ensuite déclinés pour chacune des 10 zones homogènes différentes définies en rive gauche des Gorges de l'Arly. Ils manquent de trop de données en appui et trop d'incertitudes pour pouvoir s'appuyer sur un déploiement méthodologique systématique et leur réalisation n'a été faite qu'à dire d'experts et dans la seule perspective d'être illustratif, plus que s'affirmer comme prédictif. Ces scénarios visent à identifier *a priori* les propagations les plus probables dans les années et décennies à venir, quels enjeux seraient concernés (enjeux directs bâtis ou routiers ou la rivière Arly comme vecteur en relais de potentiels dommages indirects plus aval²⁷), et enfin à quel degré d'intensité (gravité allant de faible à forte).

On présente ci-dessus (Figure 38) le résultat de l'estimation des scénarios de risques pour une de ces zones homogènes des Gorges en termes de zone de risques *a priori* (les autres étant présentées dans la réunion de restitution finale).

Parmi ces 10 zones, 3 ont déjà été impactés de manière avérée dans le passé et elles continueront très vraisemblablement à l'avenir d'évoluer, de se ré-activer et d'engendrer parfois des dommages plus ou moins conséquents.

Sur la commune de Cohennoz, les zones homogènes les plus sensibles concernent le Nant Cortay et le glissement éponyme de Cohennoz.

Sur le Nant Cortay, le travail du cours d'eau nécessite l'attention et l'implication régulière de la RTM. Mais au-delà du lit en lui-même, le principal point de difficulté concerne plus spécifiquement la RD71 en rive gauche du Nant Cortay dont le talus amont notamment (mais pas que), continuait de se déformer en 2023 et qui resterait à pouvoir, si possible, être stabilisé ou du moins pour des coûts raisonnables freiné dans son évolution voire son aggravation possible.

Sur le glissement de Cohennoz, la difficulté principale réside principalement dans des phénomènes attendus à des échéances inconnues de grands volumes impliqués en réactivation de masse, mais qui dans un cadre d'enjeux actuellement limités et peu touchés jusqu'à présent, ne donnent que peu de lisibilité sur le degré de risques à devoir se préparer pour faire face. Ceci d'autant plus que pour l'instant en absence de tout suivi, la dynamique actuelle (donnant l'impression d'une certaine accalmie depuis 2015) reste totalement inconnue.

Sur la ville d'Ugine, c'était et cela sera surtout le flanc ouest du versant de Montgombert qui doit rester sous vigilance soutenue, avec la réactivation toujours plus aisée des zones antérieures en glissement, voire l'apparition de nouvelles zones fragilisées, qui devraient dans leurs volumes et leurs conséquences être proches de ce qui a déjà eu lieu. Mais il s'y ajoute un risque d'une coalescence de ces zones déjà instables individuellement et d'une cinématique alors moins individuelle et plus globale voire plus brutale au sein du versant qui pourrait éventuellement basculer brutalement dans une gamme de volume bien plus importants avec des impacts et conséquences largement plus sévères.

²⁷ Même si non traité dans le projet Miroir, on n'oublie pas le besoin de pouvoir étudier plus avant le risque torrentiel et donc de mettre en exergue a minima les données potentiellement utiles.

A ces trois secteurs de base, le secteur des Panissats, peu impactant jusqu'alors, compte tenu d'une vitesse de déformation restant jusqu'à présent assez réduite et régulière, pourrait aussi à terme sur Cohennoz obliger à des actions de mise en protection plus nécessairement immédiates.

4.2 Glissement du Pas de l'Ours (Guil Amont Queyras)

Pour le glissement du Pas de l'Ours toujours actif (glissement résiduel) en fin de projet MIROIR, ce volet de scénario de risques a été abordé en détails et exposé à la fin de la présente note d'un point de vue cinématique du glissement (livrable du projet MIROIR). En effet, sur ce glissement, 4 différents zones homogènes d'instabilité de versant avaient déjà été établies antérieurement au projet MIROIR et confirmées en cours d'étude : c'est surtout sur la zone sommitale que des informations nouvelles ont été acquises. Sans les données de suivi de déformation du versant non récupérées et leurs valorisations qui restent à faire, il reste difficile de se prononcer sur les perspectives scientifiques à venir d'évolution immédiate en contexte de fin de période climatique nettement déficitaire, mais selon le degré d'ampleur de retour de conditions pluviométriques (défini globalement de manière qualitative et non d'un point de vue quantitative), il reste possible d'en estimer de manière globale l'évolution à venir du versant, selon trois scénarios de gravité croissante mais à probabilité nettement décroissante :

- Scénario 1 : mouvement +/- limité en volume et étendue, dans un contexte climatique plus défavorable que l'actuel mais guère éloigné (contexte pluviométrique excédentaire mais sans être extrême) ;
- Scénario 1bis : intermédiaire entre le scénario 1 et le scénario 2, nécessitant déjà des conditions climatiques largement défavorables. C'est surtout par les volumes en jeu, que ce scénarios 1bis diffère du scénario 1 ;
- Scénario 2 : remobilisation +/- complète du versant avec aggravation attendue potentiellement bien au-delà de la période 2017-2018. Ce scénario sous-entend des conditions climatiques très dégradées, voire extrêmes (type 1957 ou équivalent).

Chacun des scénarios est décrit en deux temps :

- tout d'abord un focus sur les zones potentielles de départ/déclenchement les plus attendues et les conditions circonstanciées d'une telle réactivation significative,
- puis dans un second temps sur la propagation de celles-ci dans le versant et de ces conséquences.

Pour chacun des scénarios, ce sont surtout les conséquences en termes d'atteintes des enjeux qui ont été privilégiées en termes d'objectifs. De manière plus grossière et donc bien plus à titre indicatif qu'autre chose, ce sont aussi des ordres de grandeur de volume en jeu qui ont été associés à chacun des scénarios proposés qu'il semblait utile de présenter plus avant. Contrairement à l'Arly où une zone de glissement peut assez vite se répercuter jusqu'en aval du fait de propagation rapide, il n'est pas attendu au vue de la configuration du versant et des matériaux déjà éboulés et glissés que par propagation, des volumes considérables atteignent massivement la rivière Guil.



Avec le soutien de



FONDS NATIONAL D'AMENAGEMENT ET DE DEVELOPPEMENT DU TERRITOIRE Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Ces scénarios ont été présentés tel que ci-dessous lors de la réunion de restitution finale en début septembre 2023 (illustration 39).



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Scénarios d'évolution à plus ou moins court/moyen terme

Le glissement actuel reste non stabilisé, avec des conséquences non prévisibles possibles en terme de dynamique de versant

Les données de la crise 2017-2018 restent encore à exploiter, ce qui pourrait apporter une vision bien plus précise et + objective que les présents résultats.

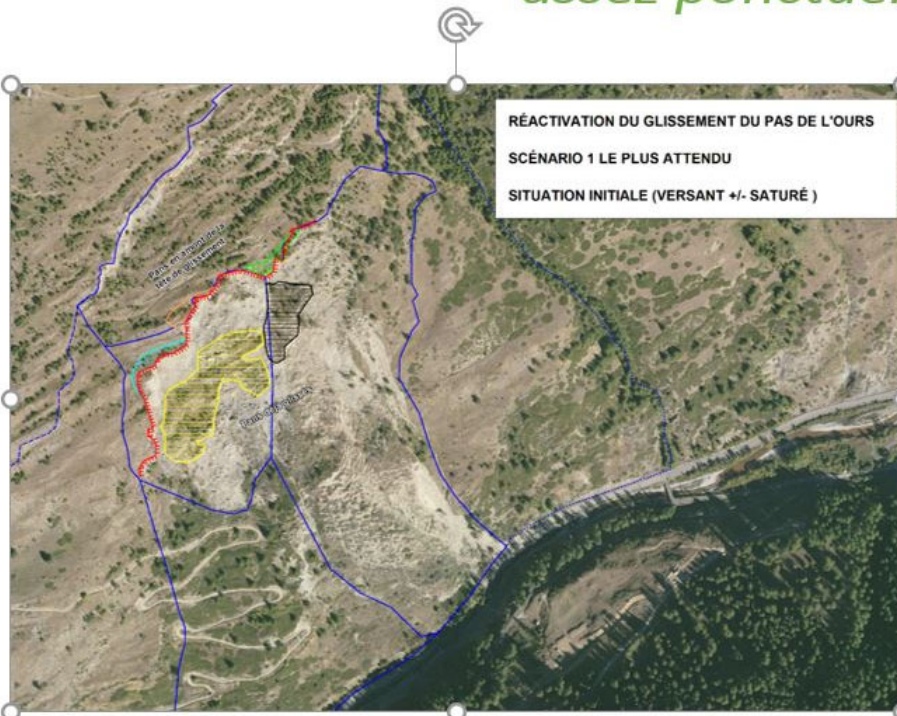
Les panneaux jugés les plus stables le sont ils réellement ?

Plus le glissement en cours sera stabilisé (avec le temps), moins forte devrait être la réaction du versant (donc dépendant largement des conditions climatiques à venir)

Scénarios basés sur plus d'hypothèses et d'incertitudes que sur des faits constatés, et pour des évaluations préliminaires à dire d'expert

Ils gardent le mérite de donner une idée de conséquences attendues, et un ordre de grandeur indicatif sur les volumes en jeu....

Scénario 1 : remobilisation significative mais restant assez ponctuelle et limitée



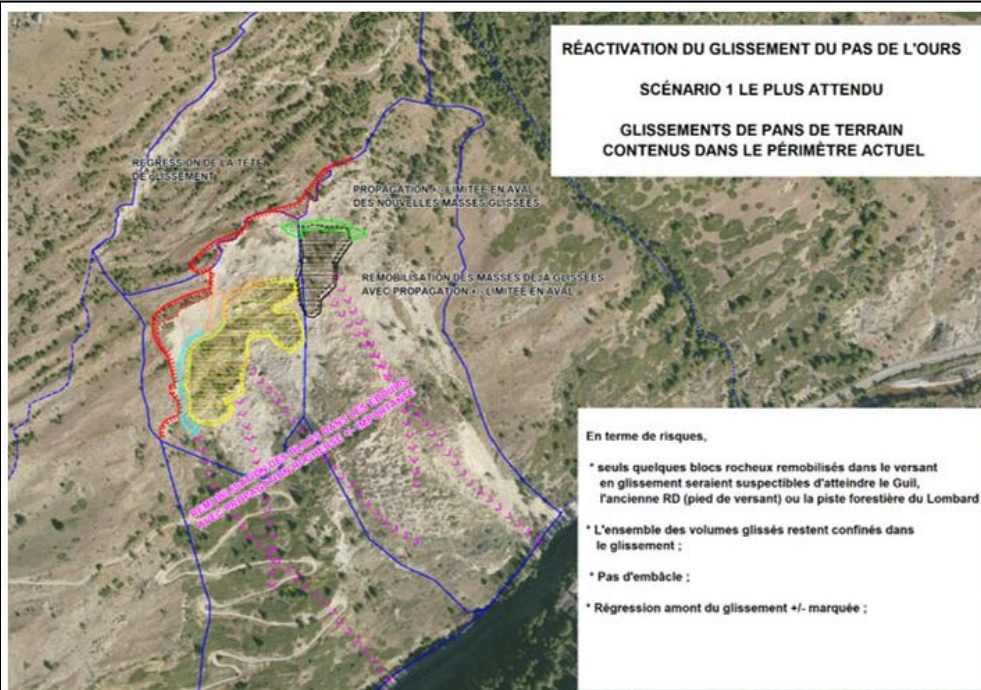
Départs attendus ponctuels, notamment en tête de glissement ou dans les compartiments actifs du plateau sommital

Petite régression amont, propagation limitée, cantonnée dans le corps amont du glissement

Remobilisation ponctuelle avec déplacement très réduite des masses déjà glissées du corps de glissement

Dégradation climatique modérée dans un versant encore assez sec ou plus légère dans un versant s'étant déjà partiellement resaturé

Réactivation attendue qu'en partie haute de versant



Conséquences surtout attendues dans le corps du glissement à part des possibles départs de blocs rocheux (remobilisation et/ ou nouveau départ) pouvant atteindre le Guil ou la piste forestière.

Retour à un versant +/- stabilisé possiblement +/- court

En termes de volumes,

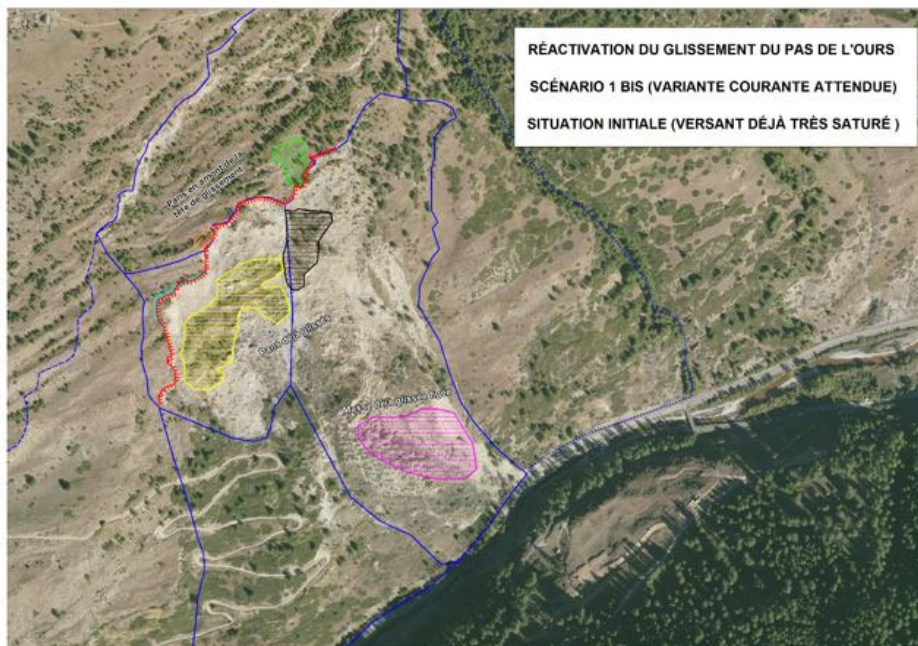
Nouveaux départs en tête par régression amont :
40 000 à 100 000 m³

Remobilisation au sein du corps de glissement :
Possiblement 100 000 m³ sinon +

Fluage du compartiment ouest :
1,2 à 2 Millions de m³

Réactivation attendue qu'en partie haute de versant

Scénario 1 bis : remobilisation partielle du versant mais en masse



Réactivation attendue étendue à une large partie du versant

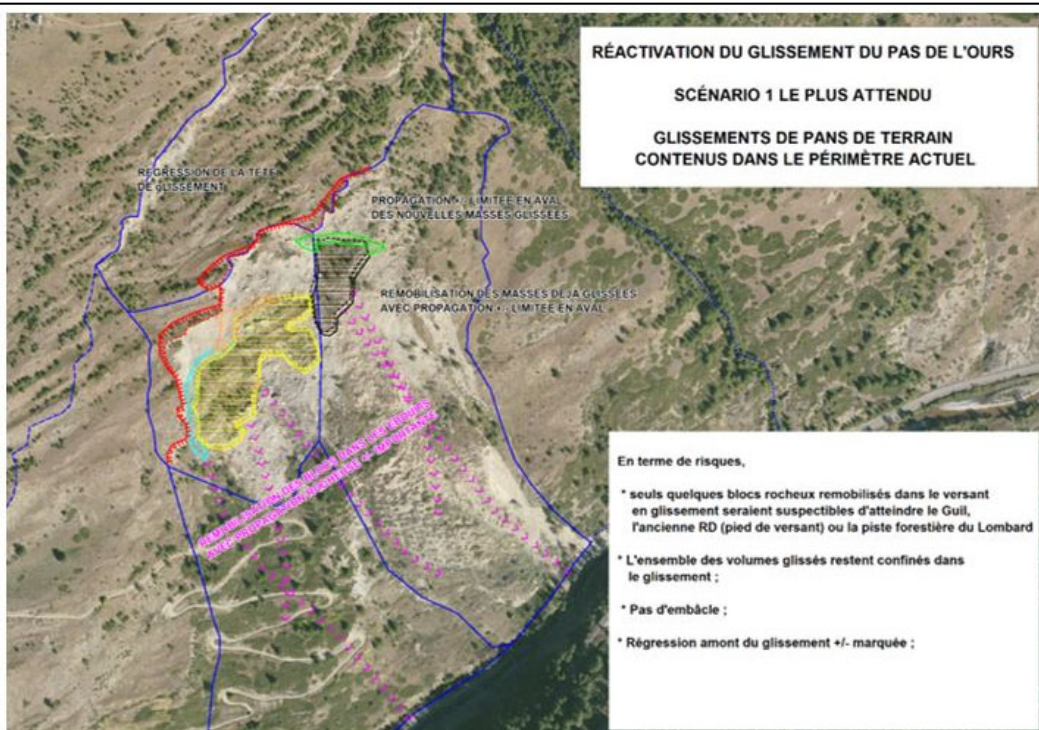
Départs attendus, notamment en tête de glissement ou dans les compartiments les + actifs du plateau sommital

Régression amont dans le plateau, propagation +/- importante mais qui reste cantonnée dans le corps du glissement.

Premières coulées de boues

Remobilisation ponctuelle avec déplacement plus ou moins importantes des masses déjà glissées du corps de glissement (y compris en partie basse)

Dégradation climatique soutenue dans la durée ou dans l'intensité (retour d'est)



Réactivation attendue qu'en partie haute de versant

Conséquences surtout attendues dans le corps du glissement à part des possibles départs de blocs rocheux (remobilisation et/ ou nouveau départ) pouvant atteindre le Guil ou la piste forestière.

Retour à un versant +/- stabilisé possiblement +/- court

En termes de volumes,

Nouveaux départs en tête par régression amont :
40 000 à 100 000 m³

Remobilisation au sein du corps de glissement :
Possiblement 100 000 m³ sinon +

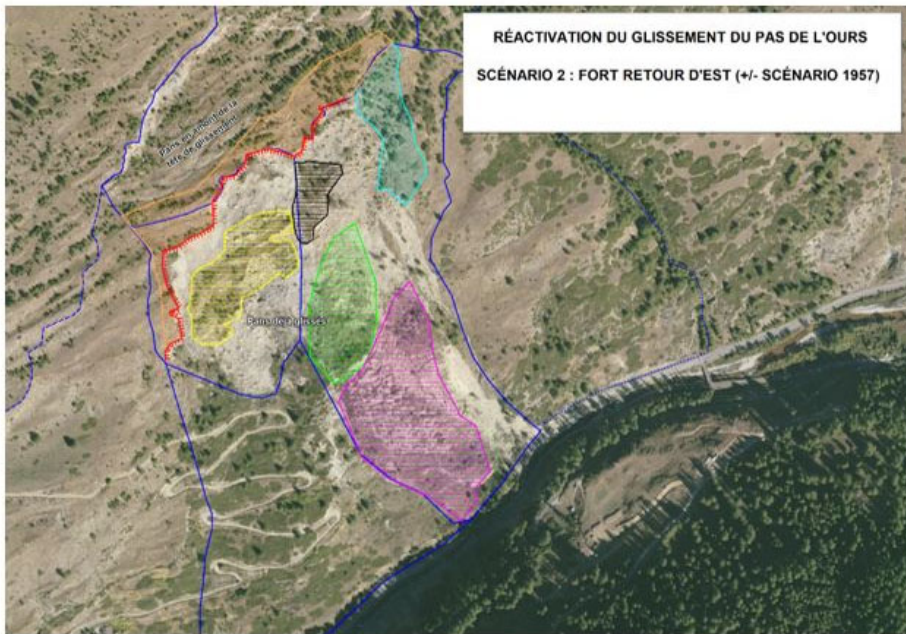
Fluage du compartiment ouest :
1,2 à 2 Millions de m³

Estimation des volumes en ordre de grandeur

- Autour des 200 000 m³ en tête de glissement (venant alimenter le corps de glissement);
- Autour de 700 000 m³ se remobilisant dans le corps de glissement
- Fluage persistant a priori dans le compartiment aval ouest (1 à 1,9 Mm³)

Plus difficile par contre de chiffrer les volumes atteignant la piste forestière ou le Guil (qq milliers, 10 à 20 000 max ??)

Scénario 2: réactivation généralisée du versant



Réactivation attendue généralisée à l'ensemble du versant

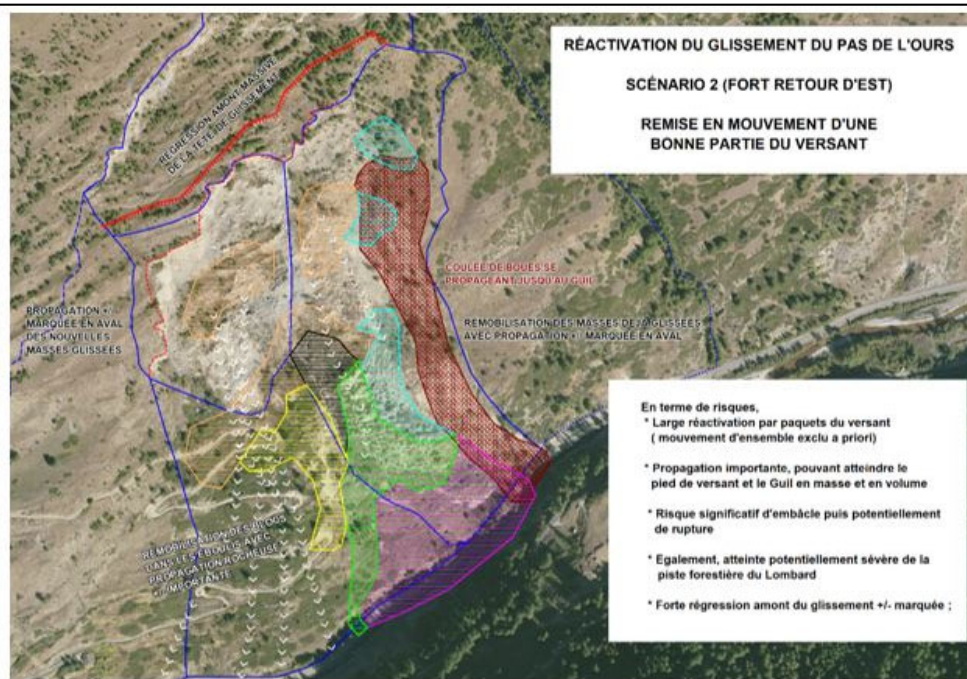
Remobilisation +/- complète du glissement actuel avec nette régression amont dans le plateau sommital et abords

Propagation parfois importante avec crainte de sortie en masse au-delà du glissement actuel dans le Guil (avec risque d'embâcle) et sur la piste forestière des Lombards

Situation paroxysmale identique voire aggravée par rapport à la crise 2017-2018

Dégradation climatique exceptionnelle dans l'intensité (retour d'est type 1957 ou approchant)

Probables signes avant coureurs attendus et espérés (avant ce scénario assez brutal ensuite dès sa survenue) !!



Réactivation attendue généralisée à l'ensemble du versant

Embâcle à craindre sur le Guil (retour à une gestion de crise dans la durée)

Plausible coupure définitive de la piste forestière (nouveau tracé d'accès à prévoir).

Pas de retour avant le moyen terme à l'état précédent (poursuite des mouvements résiduels sur près d'une décennie). Nette dégradation durable de la stabilité accrue du versant post évènement.

Estimation des volumes en ordre de grandeur :

- Jusqu'à environ 475 000 m³ en tête de glissement (venant alimenter le corps de glissement);
- Jusqu'à environ 4,25 Millions de m³ se remobilisant dans le corps de glissement;
- Fluage persistant a priori (une partie non en glissement) dans le compartiment aval ouest (0,9 à 1,5 Mm³).

Plus difficile par contre de chiffrer les volumes atteignant la piste forestière ou le Guil, mais jusqu'à la centaine de milliers de m³ possible ponctuellement sinon plus (< ¼ million de m³ ???).

Figure 39 : les 3 scénarios de risque plausibles estimés pour le site du glissement du Pas de l'Ours à Aiguilles (Hautes Alpes)

Seul le scénario le plus défavorable sur le Guil pourrait a priori conduire à une telle situation d'un apport massif et brutal au point d'obstruer un temps la rivière avec un volume plafond approchant en valeur les 4,5 millions de m³ et donc assez proche du scénario n° 3. Celui-ci avait été considéré par la RTM en 2017 lors de son étude sur l'évaluation des risques hydrauliques induits par une éventuelle rupture de l'embâcle potentiellement créée par le glissement de terrain du Pas de l'Ours à Aiguilles (ces estimations de volume en jeu ont été faites en toutes indépendance de celles faites en 2017 par la RTM mais elles se rejoignent dans leurs ordres de grandeurs et elles se confortent ainsi quelque peu).

5/ Communications, transposition et conclusions du projet

Cette étape correspond au WorkPackage n°5 du projet MIROIR.

5.1 Communication

Chacun des trois partenaires a mené conjointement la publicité du projet MIROIR (affichage réglementaire, pages web du projet sur les sites web des partenaires) ou par des actions de communications ponctuelles (sur les réseaux sociaux (twitter pour le BRGM) ou lors d'évènement comme pour les 50 ans de l'ADRGT).

Sur le glissement du Pas de l'Ours, le PNR Queyras a fait réaliser deux animations vidéo à finalité muséographique, l'une sur l'historique du glissement et l'autre sur les perspectives d'évolution du glissement (selon les 3 scénarios évoqués au chapitre précédent).

Mais la forme principale de communication du projet MIROIR avant la livraison des livrables finales, a été la tenue de réunions :

- Réunions de démarrage ;
- Réunions d'avancement ;
- Réunions de restitution.

Après des réunions de coordination interne pour le lancement du projet MIROIR, une réunion de démarrage du projet a été faite avec les acteurs locaux sur chacune des deux vallées étudiées. Prévues initialement en présentiel pour plus de liens humains, le Covid19 nous a obligé à nous rabattre sur un format de réunion en visio. Celles-ci ont eu finalement lieu le 5 novembre 2020 pour le Queyras et le 11 janvier 2021 pour les Gorges de l'Arly. Dans le format visio, si les acteurs locaux (techniciens surtout) ont pu être présents, les élus des mairies ne l'ont pas été à ce schéma de démarrage mais ceux-ci ont été rencontrés par la suite, notamment lors des premières phases de terrain au printemps ou début d'été 2021.

Des réunions d'avancement, en cours de projet, étaient prévues à rythme annuel mais avec des difficultés à vite démarrer le projet (notamment en phase de collectes de données) cela n'a pas vraiment permis d'organiser systématiquement ce type de rendez-vous²⁸, faute aussi de résultats probants à présenter²⁹. Et c'est plus une information formelle orale, au fil des rencontres lors des phases de terrain, qui a été faite auprès des acteurs locaux rencontrés (surtout acteurs techniciens mais aussi parfois élus, comme avec la mairie d'Aiguilles). Il n'a été fait au final que des rapides réunions d'avancement technique en petit comité réduit que durant août (Guil) et septembre (Arly) 2022. D'autres restitutions d'avancement du projet Miroir ont eu lieu à destination d'un public plus élargi que celui des acteurs locaux, lors des journées SDA-GIRN en novembre 2021 (BRGM) et en novembre 2022 (ADRGT).

À cheval entre réunion d'avancement et les réunions de restitution finales, on peut citer la Journée "Va Vers Ton Risque" organisée par le PNR du Queyras le samedi 22 octobre 2022 à Aiguilles, autour du glissement du Pas de l'Ours (figure 40), associant des visites de terrain, animations spécifiques par des comédiens, ou via le biais de conférences.



Figure 40 : flyer (extrait) de la Journée Va vers Ton Risques, organisée par le PNR du Queyras du 22 octobre 2022

²⁸ Sans compter des contraintes dues aux Covid19 ou autres.

²⁹ Beaucoup de résultats du projet MIROIR n'ont été réalisés ou achevés que tardivement.

Bien qu'organisé en pléines vacances de la Toussaint sur un territoire déjà intrinsèquement enclavé (Queyras), cet évènement a mobilisé sur toute la journée environ une cinquantaine de personnes qui ont assisté à plusieurs animations (Figure 41). Des personnes sont venues seulement aux 3 conférences de fin de soirée à 18h. Soulignons la qualité des présentations et la diversité des animations qui ont plu au public (le tout, conclu entre autres, par un article dédié dans l'édition locale du Dauphiné Libéré).

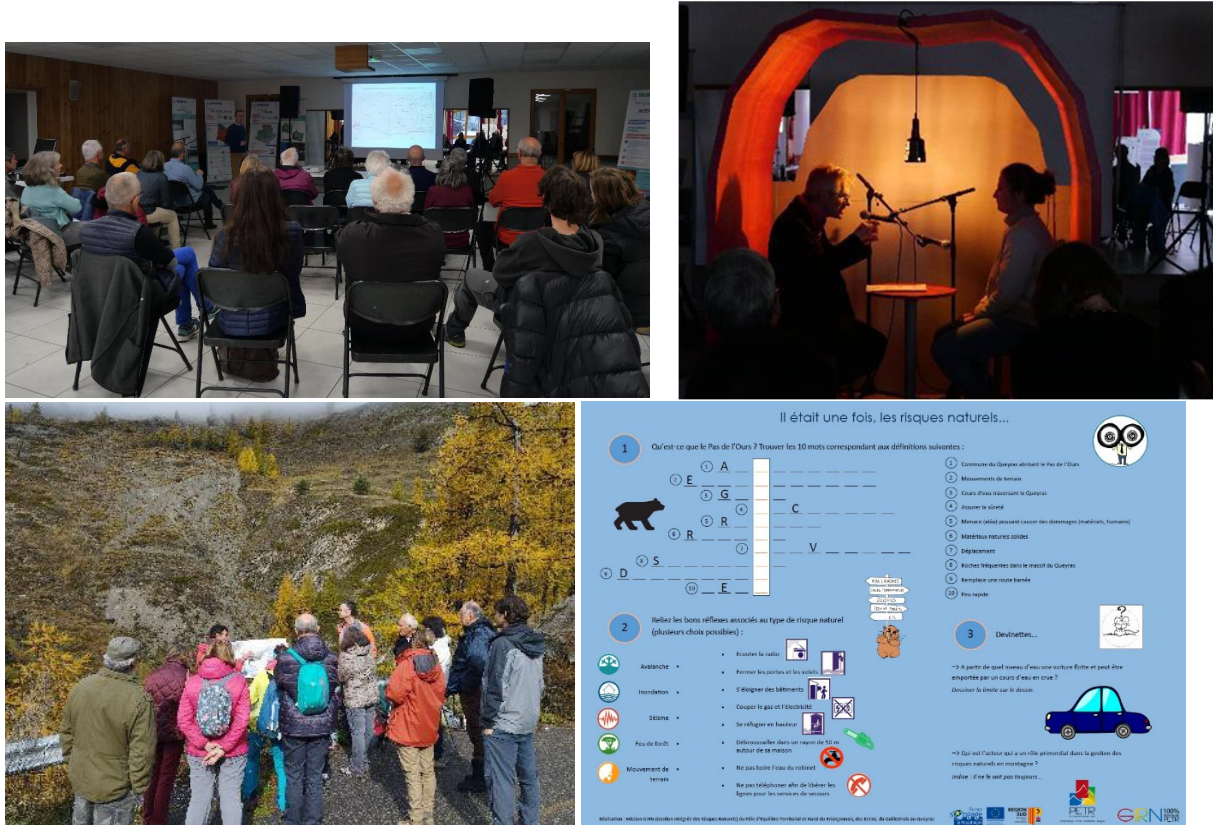


Figure 41 : quelques éléments de la Journée Va vers Ton Risques du 22 octobre 2022 (PNR Queyras)

Pour pouvoir tenir les réunions de restitution du projet MIROIR dans les échéances officielles du projet, les autorités POIA ont aimablement permis au projet MIROIR de déborder sur l'année 2023.

Ces réunions de restitution finale ont été au nombre de 3 :

- réunion de restitution locale sur le Guil le 7 Septembre 2023 à Aiguilles (avec l'aide et le soutien de la mairie d'Aiguilles) ;
- réunion de restitution locale sur l'Arly le 28 Septembre 2023 à Ugine (avec l'aide et le soutien du SMBVA et de la mairie d'Ugine) ;
- webinaire scientifique global sur l'ensemble du projet MIROIR le 7 Novembre 2023.

Les réunions de restitution locale ont d'abord consisté en une longue présentation des résultats acquis par le projet MIROIR se concluant par des pistes proposées d'actions possibles par la suite, avant qu'un échange se soit systématiquement spontanément engagé en fin de présentation par les participants sur ce que pourrait être les suites envisagées par les acteurs locaux, au vu des résultats présentés du projet MIROIR.

Sur Aiguilles en haute vallée du Guil, dans la suite du premier pas déjà franchi d'instrumentation du versant (suite à la réalisation d'un piézomètre durant l'été 2023), les acteurs queyrassins (sinon haut-alpins) se sont montrés favorables à la mise en place d'un dispositif *a minima* de surveillance instrumentée du versant (nouveaux capteurs de déplacements et pérennisation du suivi piézométrique) toujours légèrement en activité, réduit en envergure et portée en local, au moins sur quelques années, en sus des actions de suivi biennuel par survol drone déjà engagées par la RTM05. À leur demande, le BRGM de Marseille leur a ensuite préparé en fin d'année 2023 une base de cahier des charges définissant le contenu technique d'un tel réseau et un chiffrage financier associé. Il a été rappelé sinon que les principales données d'instrumentation du versant pendant la période de crise de 2017 et 2018 (mais aussi après) n'ont pas été récupérées dans le cadre de ce projet MIROIR et qu'elles restaient à valoriser à froid telles qu'envisagées en début de projet Miroir pour venir enrichir les connaissances sur le comportement du versant du Pas de l'Ours et par la même, venir enrichir les discussions sur la gestion du versant, notamment avant une possible nouvelle phase paroxysmale.

Sur Ugine pour les Gorges de l'Arly, les discussions engagées en fin de réunion ont principalement porté sur deux aspects principaux d'actions envisagées à la suite du projet MIROIR ;

- là encore sur des actions de suivi des versants possibles à engager, au regard des enjeux exposés. Le Conseil Départemental de Savoie dans son rôle de gestionnaire routier a des besoins mais une recherche de mise en place d'actions de suivi mutualisées à d'autres partenaires locaux (communes, Communauté d'agglomération Arlysero voire SMBVA) pour des besoins partagés est espérée, pour plus de synergie et de maîtrise globale des coûts. Le sujet reste à murir, notamment à travers l'action envisagée suivante ;
- l'autre action concerne le risque torrentiel notamment au niveau du cours d'eau Arly, qui reste non étudié. Et s'il n'a pas été identifié la possibilité d'apports de masses glissées en fond de vallée laissant craindre une possible obstruction sévère sinon complète de l'Arly (et ses suites : formation d'un barrage jusqu'à la rupture d'embâcle et ses conséquences), il n'en reste pas moins que les volumes d'apport à la rivière pourraient être ponctuellement importants (plusieurs dizaines de milliers de m³ et même au-delà de la centaine de milliers de m³, entre 40 % et plus de 90 % des masses instables de versant) et comme en 2015 engendrer à l'aval des dommages indirects certains. La pertinence de cette étude complémentaire, axée sur le risque torrentiel, pourrait être consolidée par un volet économique en aval, et si besoin en amont par une amélioration de scénarios d'apports des versants à la rivière un peu plus approfondis après MIROIR. Cette action était à l'ordre du jour des actions envisagées du programme PAPI du SMBVA pour les années à venir.

Lors du webinaire du 7 novembre 2023, une grosse partie des résultats les plus scientifiques du projet MIROIR a été présenté dans l'après-midi, sous formes d'un ensemble de 5 présentations distinctes de 15 à 30 minutes chacune (précédées d'une rapide présentation globale du projet MIROIR) :

- Présentation globale du projet MIROIR (Edouard Equilbey, BRGM) ;
- Précisions sur les structures géologiques en jeu dans les instabilités de versant au niveau des Gorges de l'Arly et du glissement du Pas de l'Ours (Frederic Lacquement, BRGM);
- Etude des variations de circulation d'eau par télédétection et méthode géophysique: Cas du site du glissement de Montgombert (Ombeline Meric, ADRGT);
- Etude de seuils statistiques de précipitations déclenchant ou aggravant la stabilité des versants du val d'Arly (Marc Peruzzetto, BRGM) ;
- Glissements de terrains présents dans les Gorges de l'Arly : Géomorphologie, analyse des mouvements de terrain et modélisation préliminaire en stabilité et propagation (Marc Peruzzetto, BRGM) ;
- Quelques nouvelles récentes du glissement du Pas de l'Ours, toujours pas stabilisé à ce jour : (Edouard, Equilbey, BRGM).

Il y a eu un total de 65 personnes venus se connecter au Webinaire.

Le PARN a aidé l'équipe projet MIROIR sur l'animation de cette demi-journée de Webinaire. Les documents de communication en lien avec ce projet MIROIR (réunions, présentations) ont été rendus accessibles rapidement sur une page dédiée de leur site Web (<https://risknat.org/science-decision-action/miroir>).

Les livrables ont été finalisés ensuite, dont la présente note générale de synthèse, intégrant les retours et commentaires lors des réunions de restitution. La liste exacte de l'ensemble des livrables du projet MIROIR (pour très grande partie mentionnés dans la présente note) est fournie en annexe.

À ce stade, le projet MIROIR a déjà généré un article scientifique par l'ADRGT. Un ou deux posters (1 par site ?) restent envisagés à courte échéance pour présentation à l'occasion de futurs colloques scientifiques.

5.2 Transposition

Pour ces études d'instabilités de versant complexes, le recours à des technologies innovantes en appui est de fait un réflexe vite systématique : c'est notamment le cas avec les levés Lidar par vol aérien, méthode qui s'est largement popularisée et devenue plus courante ces dernières années. Miroir a été en effet l'occasion de déployer d'autres méthodes ou logiciels plus ou moins récentes et peu usités en temps normal, ceci ici plutôt avec succès (Shaltop pour la propagation de zones de glissements) ou moins (seuils hydroclimatiques). Mais c'est aussi le développement de méthode totalement innovante, comme ici avec des levés géophysiques H/V qui ont permis une détection indirecte de circulation d'eau et de la perméabilité au sein des glissements, ceci pour une meilleure compréhension des phénomènes gravitaires, et de la localisation des zones à drainer. Cette approche inédite a permis

d'aboutir à un article scientifique (Carrier et al 2023, soumis ISL 2024), valorisé ensuite en colloque (Geofcan 2023).

Mais au-delà des aspects innovants, c'est aussi en attaquant par les aspects les plus amont, notamment une caractérisation plus fine des structures géologiques en jeu levées par un géologue structural alpin qui vient ensuite renforcer tous les résultats et conclusions des autres aspects étudiés plus opérationnellement en aval.

Ensuite, on voit tout l'intérêt sur de tels sites mal renseignés de pouvoir travailler à des multi-échelles spatiales (pas la même richesse d'activité et de données) et de temps (large influence des héritages glaciaires et périglaciaires par exemple). Dans certains cas, il n'a ainsi pas été besoin d'avoir des données solidement étayées en précision pour en déduire des informations utiles.

5.3 Conclusions

Miroir est un projet d'études mené en phase préventive à titre prospectif, et un peu plus à froid que dans la nécessité urgente de la gestion de crise. La finalité était d'apporter des éléments de compréhension sur le comportement des versants hors contexte de crise pour une meilleure appropriation et prise en compte à sa juste valeur par les acteurs locaux lors de la survenue des crises à venir, voire pouvoir inciter le cas échéant à des actions préventives sans attendre que la crise nous y oblige. Et c'est bien ce qui s'est déjà amorcé, au moins en intentions sur les deux vallées étudiées, ceci avant même la fin du projet et de diffusion des derniers livrables, notamment lors des journées de restitution finale en local.

A contrario, les résultats obtenus ont été moins riches qu'espérés, en partie du fait des jeux de données publiques qui n'ont pas pu être récupérés lors de sa réalisation mais pas que (échec plus important que prévu par exemple avec les seuils hydro climatiques). Et il reste encore beaucoup de questions non résolues (sensibilité des instabilités de versant au changement climatique), de points à faire avancer (retour d'expérience sur les années paroxysmales 2017 - 2018 du glissement du Pas de l'Ours par exemple), ou non traitées au final (cinématique du glissement de Cohennoz par exemple, test de scénarios climatiques dégradés), et compte tenu de ces premiers résultats c'est une grande vigilance qui demeurera nécessaire pour la suite au moindre signe de reprise d'activité. De plus, on pourra toujours compter sur la nature pour nous surprendre, mais en étant un peu plus aguerris faire face plus sereinement aux défis immédiats posés, comme le voulait un des objectifs principaux du projet MIROIR.

La pertinence du projet MIROIR se jugera a posteriori au regard des actions qu'il aura réussi à déclencher à l'avenir.



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

Annexe : Liste des livrables du projet MIROIR

N°	Intitulé	
1	Caractéristiques géologiques des sites d'études du Guil (commune d'Aiguilles) et de l'Arly (commune de Cohennoz), Alpes - projet Miroir. Rapport final. BRGM/RP-72686-FR	BRGM
2	Note de synthèse sur la partie hydrogéologie du projet MIROIR	BRGM
3	Projet Miroir. Synthèse et analyse des données existantes sur le glissement du Pas de l'Ours. Rapport RTM Hautes Alpes	PNRQ
4	Projet Miroir. Etude historique sur le glissement du Pas de l'Ours (Aiguilles, 05) et sur les autres glissements des communes limitrophes. Rapport Acthys	PNRQ
5	Projet Miroir. Etude historique sur les instabilités de versant dans les gorges de l'Arly sur les communes d'Ugine et de Cohennoz. Rapport Acthys	BRGM
6	Characterizing landslides dynamics from timelapse time domain induced polarization and ground based imaging, case study of Montgombert Landslide (French, Savoie). Preprint submitted to Landslides Review.	ADRGT
7	Comparaison Lidar –Gorges de l'Arly - Val d'Arly	ADRGT
8	Levé Lidar des parties basses de versant des Gorges de L'Arly (Hélimap, 2022)	BRGM
9	Étude de seuils statistiques de précipitations déclenchant ou aggravant la stabilité des versants du val d'Arly (Projet MIROIR). Rapport BRGM/RP-72995-FR	BRGM
10	Carte géomorphologique des Gorges de l'Arly	BRGM
11	Projet MIROIR. Schéma conceptuel Temps court, temps long décliné plus spécifiquement pour les Gorges de l'Arly.	BRGM
12	Apprentissage du métier d'ingénieur Risques Naturels et Hydrogéologie. Etude de cas : Projet MIROIR, étude de grandes instabilités de versant à activités récurrentes au niveau des Gorges de l'Arly (Savoie) et de la vallée du haut Guil (Hautes-Alpes). Rapport de projet de fin d'études effectué du 15 Juillet 2021 au 3 décembre 2021	BRGM
13	Glissements de terrain dans le Val d'Arly (Géomorphologie, analyse des glissements de terrain et calcul de la susceptibilité)	BRGM
14	Note sur la dynamique observée et attendue des différents compartiments du versant du Pas de l'Ours, site de la haute vallée du Guil sur Aiguilles (05) dans le Queyras (projet MIROIR).	BRGM
15	Panneaux explicatifs du glissement du Pas de l'Ours (*2) installé sur le parcours sonore mise en place sur la commune d'Aiguilles	PNRQ
16	Vidéos explicatives sur le glissement du Pas de l'Ours (*2)	PNRQ
17	Journée Va Vers Ton Risque organisée le 22/10/2022 (conférences (*3), Vol Drone, visites terrain,)	PNRQ
18	Restitution aux Journée SDA-GIRN 2021 et 2022	BRGM, ADRGT
19	Réunion de restitution finale Vallée de l'Arly	BRGM, ADRGT



Géosciences pour une Terre durable

brgm





Avec le soutien de



FONDS NATIONAL
D'AMENAGEMENT
ET DE DEVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

20	Réunion de restitution finale Vallée du Haut Guil	BRGM, PNRQ
21	Webinaire scientifique (6 présentations)	BRGM , ADRGT
22	Note de synthèse générale du projet MIROIR	BRGM



Géosciences pour une Terre durable

brgm

