RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne

INRAE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, DE LA BIODIVERSITÉ, DE LA FORÊT, DE LA MER ET DE LA PÊCHE
Liberté
Égalité
Fraternité

Changement climatique et glissements de terrain : Note de synthèse sur l'état des connaissances

Avril 2025

Historique de la diffusion

Version	Date	Commentaires
V0	25/04/2025	Version initiale
V1	25/06/2025	Version diffusée à la DGPR

Rédacteur(s) et relecteur(s)

Rédacteurs du rapport	Relecteurs
Antoine Blanc (Référent CC, RTM 38) Rémy Martin (référent technique RTM national) Robin Mainieri (RTM 38) Nicolas Eckert (INRAE)	Yann Queffelean (Responsable technique national RTM, DRN-Pôle RTM) Valideur Pierre Verry (chef de service RTM 38)

Avant-propos

Ce travail a été financé par le ministère en charge de l'écologie, DGPR/SRN/SDAOH/BRNT (Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels, Sous-Direction des Aléas et des Ouvrages Hydrauliques, Bureau des Risques Naturels Terrestres), dans le cadre du programme de travail 2024.

Photo en couverture : Destruction de barrages RTM sur le torrent du Palps à Risoul (05) suite à la concomitance d'une crue (2 décembre 2023) et d'un glissement de terrain (source ONF-RTM).

1. Cadre

Cette note de synthèse a été produite par l'ONF-RTM et l'INRAE dans le cadre du programme de travail 2024 financé par la DGPR. Elle synthétise les connaissances disponibles sur l'évolution des glissements de terrain dans le contexte du changement climatique en cours. D'autres notes ont été produites pour les autres phénomènes naturels en montagne générateurs de risques (crues torrentielles, phénomènes rocheux, avalanches). **Une note générale présente le contexte dans lequel s'inscrit cette action ainsi que la méthodologie utilisée.**

2. Vue d'ensemble

L'impact du changement climatique sur les glissements de terrain est abordé dans de nombreuses études. Néanmoins, **le terme « landslide » - utilisé principalement dans les articles de revue, dont le GIEC - réfère bien souvent à une diversité de mouvements en masse** (glissement de terrain, lave torrentielle, chute de blocs, éboulements, et même avalanche de glace). Il convient donc de restreindre la revue aux éléments concernant particulièrement ce que nous considérons comme relevant du glissement de terrain, ce qui ramène à une littérature plus réduite mais qui reste néanmoins substantielle par rapport à d'autres phénomènes comme les chutes de blocs.

3. Les glissements de terrain

Les glissements de terrain sont **des mouvements du sol** qui surviennent sur une pente selon **une surface de rupture** (évènement « brusque » et localisé) ou selon **un mécanisme de déformation** – fluage avec phases d'activation/accélération et de décélération/dormance. Un glissement de terrain peut donc être caractérisé par l'apparition de la rupture et les premiers mouvements, mais aussi par une phase de réactivation ou d'accélération d'un glissement existant (souvent mise en évidence par des dommages). Une fois le mouvement initié, le déplacement de la masse mobilisée peut être continu ou discontinu, rapide ou lent, et peut évoluer en coulées boueuses (transition vers une phase plus liquide). On distingue **les glissements superficiels** (quelques mètres de profondeur maximum) **des glissements profonds** pouvant affecter de grandes surfaces d'un versant (d'une dizaine à plusieurs centaines de mètres de profondeur, pouvant mobiliser plusieurs millions de mètres cubes).

L'occurrence de glissement de terrain - soit la rupture suivie du mouvement, soit la réactivation ou l'accélération de glissement - est en premier lieu liée **à la géologie, l'hydrogéologie et à la géomorphologie d'un versant**. Ces facteurs déterminent la résistance mécanique du sol à la gravité et ses propriétés hydrauliques (taux d'infiltration, conductivité, taille des pores), c'est-à-dire la susceptibilité des terrains aux glissements. Elle est donc liée au premier ordre **au contexte local.** Lorsque les prédispositions sont réunies, **l'accumulation d'eau dans le sol peut jouer un rôle de précurseur** à un glissement de terrain ou à la réactivation d'un glissement existant, du fait notamment de la modification de la cohésion des matériaux et/ou de l'augmentation des pressions interstitielles. L'accumulation d'eau dans le sol dépend des **apports** - principalement les précipitations et la fonte nivale – **et des pertes** par le drainage de la pente et par évapotranspiration.

Par ailleurs, l'activité humaine a toujours joué – et continue de jouer – un rôle significatif dans le déclenchement ou la réactivation des glissements de terrain. Les interventions anthropiques modifient à la fois les prédispositions des terrains aux glissements - usage des sols, travaux de terrassements, création de pentes raides ou remblais artificiels - et les apports/contenus en eau du sol : drainage agricole, perturbation ou suppression du drainage, concentration et renvois des eaux depuis les zones imperméabilisées. Le délai entre l'action humaine et l'occurrence, la réactivation ou l'accélération du glissement peut parfois être long.

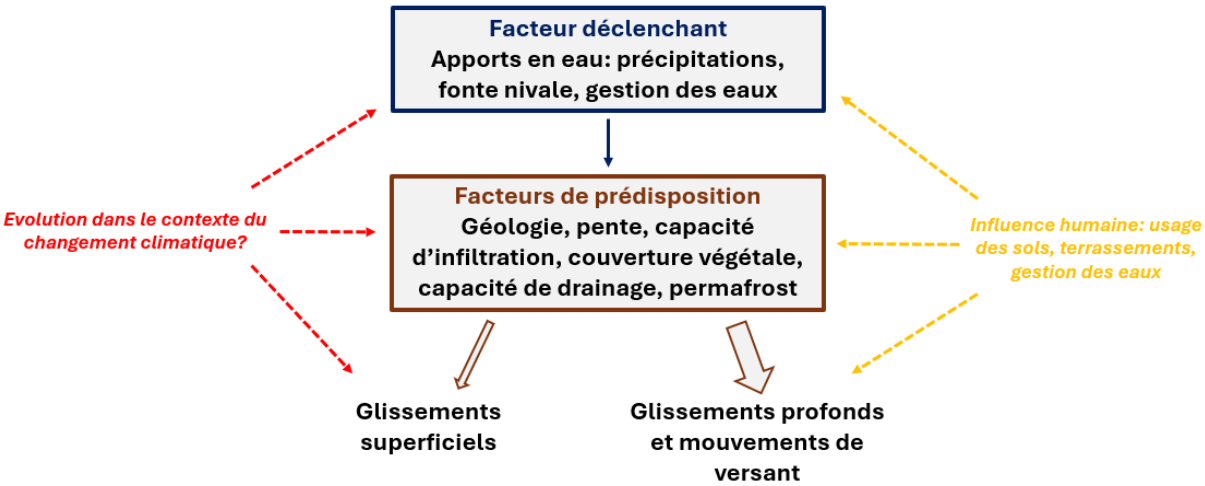

Figure 1: Schéma conceptuel des glissements de terrain mettant en évidence les prédispositions d'un terrain au glissement et les précurseurs. L'influence humaine est directe via l'usage des sols, les terrassements et la gestion des eaux, mais aussi indirecte via le réchauffement climatique d'origine anthropique.

L'atteinte d'un seuil critique de contenu en eau permettant l'initiation ou la réactivation d'un glissement de terrain dépend généralement **d'une période antécédente** plus ou moins longue (plusieurs semaines à plusieurs mois) et **d'un évènement déclencheur** (plusieurs heures à plusieurs jours, Figure 2). Les glissements superficiels ont plutôt tendance à répondre à des pics d'intensité de précipitations sur un temps court (part évènementielle importante) tandis que les glissements profonds répondent à des cumuls de précipitations pouvant s'étaler sur plusieurs semaines à plusieurs mois.

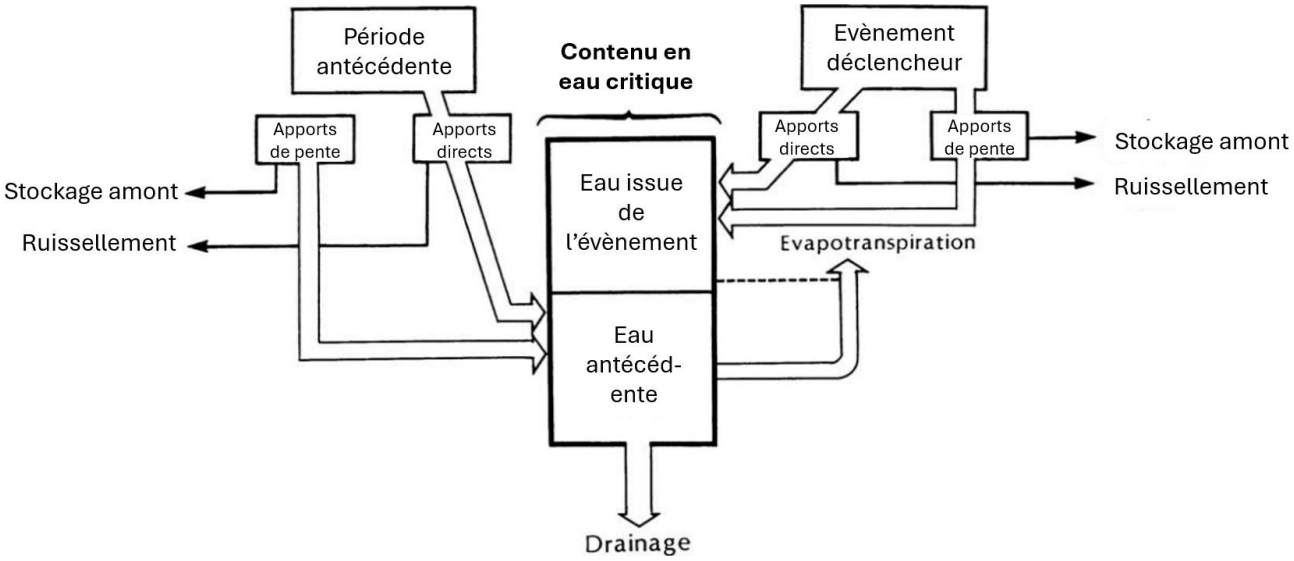

Figure 2: Schéma conceptuel des précurseurs hydro-climatiques des glissements de terrain (traduit de la Figure 1 de Crozier, 2010). Les apports en eau au sol sont liés aux précipitations qui s'infiltrent et aux apports depuis les pentes amont. Les pertes sont liées au drainage et à l'évapotranspiration. Deux phases sont distinguées pour atteindre le contenu en eau critique qui favorise l'occurrence de glissement : la période antécédente (plusieurs semaines ou mois) et l'échelle de l'évènement déclencheur (plusieurs heures ou jours).

Nous présentons ci-dessous l'état des connaissances sur l'évolution des glissements de terrain dans le contexte du changement climatique, d'un point de vue de la connaissance des processus/précurseurs, et d'un point de vue des séries d'observation du phénomène.

4. Evolution au regard des processus/précurseurs

Comme abordé précédemment, **le contenu en eau du sol** constitue le principal précurseur d'un glissement de terrain, mais il joue également un rôle dans la propagation potentielle (vitesse, évolution d'une phase solide à liquide). Comme évoqué ci-dessus de manière conceptuelle, ce contenu en eau peut être décomposé en une quantité d'eau antécédente et une quantité d'eau issue d'un évènement météorologique. Nous abordons ci-dessous les processus en jeu à ces deux pas de temps, ainsi que les études faisant le lien entre l'évolution attendue des précurseurs et l'activité de glissement de terrain, principalement en termes d'occurrence et/ou de phases d'activation. Le contrôle climatique des champs de vitesses et de la taille des glissements est bien moins documenté.

4.1. Contenu en eau antécédent

Cette notion de contenu en eau du sol avant un évènement déclencheur est le résultat du bilan hydrique qui intègre les apports et pertes en eau sur une longue période (plusieurs semaines à plusieurs mois, voire années). Les composantes météorologiques du bilan hydrique sont les précipitations liquides, l'évapotranspiration, et la fonte nivale. Nous abordons ci-dessous les évolutions observées/attendues de ces trois composantes et les implications potentielles pour les glissements de terrain.

4.1.1. Les précipitations

Sur la période 1950-2020, **l'évolution du cumul annuel de précipitation est faible sur la France** métropolitaine, bien qu'une légère diminution soit observée dans la moitié sud. Au pas de temps saisonnier, les cumuls hivernaux et estivaux sont en diminution dans la moitié sud de la France, et les cumuls automnaux sont en augmentation dans le sud-est et le nord-est. Les évolutions observées des forts cumuls aux échelles de temps intermédiaires (entre la saison et la journée) sont moins bien documentées et les incertitudes sur l'évolution des blocages des systèmes dépressionnaires – apportant des précipitations répétées sur plusieurs semaines – sont fortes.

Les projections climatiques pour la France suggèrent peu d'évolution des cumuls annuels dans la moitié nord, et une légère diminution dans la moitié sud (trajectoire TRACC, +4°C en France). **Les incertitudes sur le signe de la tendance sont fortes** puisque la France se situe à la croisée des influences Atlantiques et de l'influence Méditerranéenne. L'évolution simulée des circulations atmosphériques par les différents modèles sur cette région a donc un impact fort sur les tendances des cumuls de précipitations. En été, une diminution de l'ordre de 20 à 30% des cumuls est projetée par rapport à la période 1976-2005 sur la moitié sud de la France. En hiver, une augmentation de l'ordre de 20 à 30% des cumuls est projetée sur un large quart nord-est du pays (Figure 3).

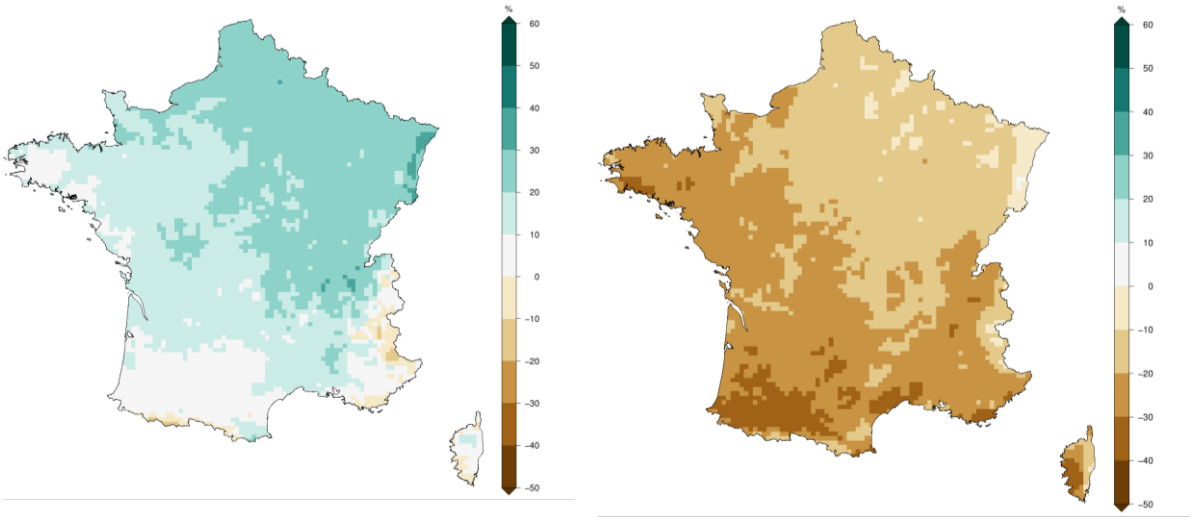

Figure 3: Ecart relatif des précipitations hivernales (gauche) et estivales (droite) en fin de siècle selon la TRACC (+4°C en France, médiane de l'ensemble). Source : DRIAS Climat. https://www.drias-climat.fr/

D'un point de vue des cumuls annuels de précipitations, les tendances sont donc peu marquées et associées à de fortes incertitudes dans les projections. Nous retenons néanmoins des tendances contrastées spatialement : augmentation des cumuls dans la moitié nord en hiver, et une diminution des cumuls dans la moitié sud en été.

En zone de montagne, le réchauffement se traduit par une élévation de la limite pluie-neige et ainsi un changement de la phase des précipitations. A cumul saisonnier équivalent, les précipitations liquides sont donc plus importantes en hiver ce qui pourrait se traduire par une augmentation de l'humidité des sols à cette saison. Cette évolution pourrait ainsi modifier **la fréquence et la saisonnalité** des glissements de terrain en montagne. Elle pourrait également favoriser l'occurrence de glissement superficiel prenant la forme de coulée « complexe » mélangeant neige, sol, et/ou eau liquide dont le comportement s'apparente à celui des **slushs** (Figure 4).

Figure 4: Plusieurs coulées de slush au lieu-dit « les Contamines » à Lanslebourg le 8 janvier 2018 suite à de fortes pluies sur de la neige fraiche. Les « slushs » sont des coulées de terre/boue emportant la neige présente en surface (départ au niveau du sol qui emporte la neige, et non pas avalanche emportant du sol).

4.1.2. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est **une composante très importante du bilan hydrique**, puisque cette dernière peut permettre le retour de plus de 50% des précipitations vers l'atmosphère (pourcentage moins élevé en zones de montagne). L'évapotranspiration potentielle est dépendante de la température de l'air, et définit la quantité d'évaporation qui pourrait se produire si la quantité d'eau disponible est suffisante. **La demande évaporative de l'atmosphère augmente dans un air plus chaud (facteur asséchant des sols).** Une étude s'appuyant sur des projections multi-modèles en Europe suggère une augmentation de l'ordre de 75 à 125 mm par an de l'évapotranspiration potentielle à l'horizon 2050, pour un scénario de réchauffement intermédiaire (RCP4.5).

Les projections proposées sur le portail DRIAS Eau suggèrent des augmentations de l'évapotranspiration réelle de l'ordre de 10 à 15% sur les reliefs en fin de siècle selon le scénario intermédiaire RCP4.5 (Figure 5).

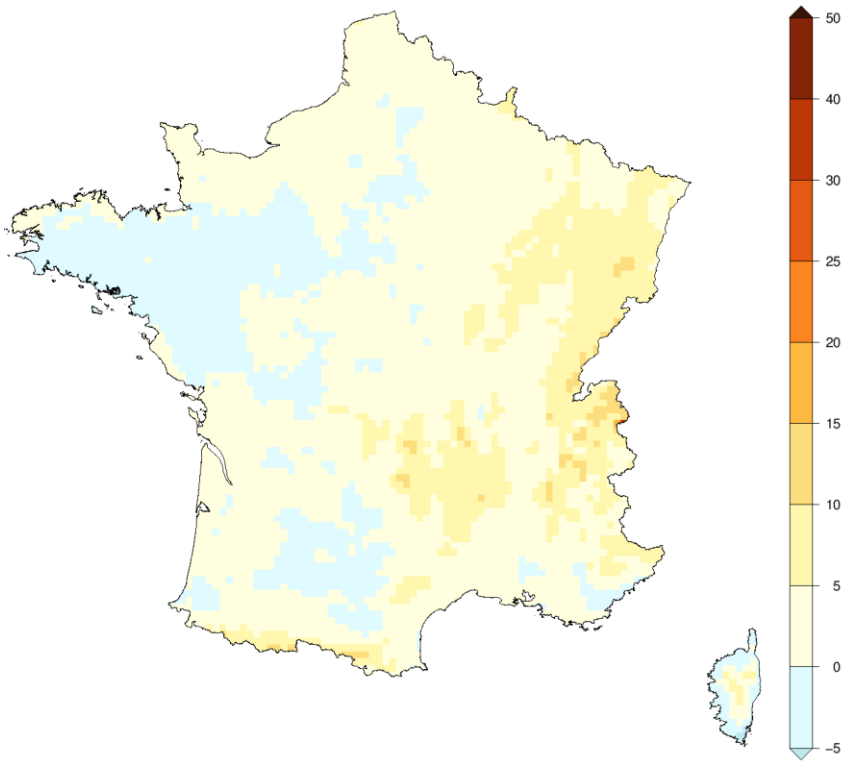

Figure 5: Ecart relatif de l'évapotranspiration réelle cumulée en fin de siècle selon le scénario intermédiaire RCP4.5 (médiane de l'ensemble). Source : DRIAS Eau. https://drias-eau.fr/

Une étude de deux glissements de terrain en Ubaye suggère que l'augmentation attendue de l'évapotranspiration dans les faces sud diminuerait drastiquement l'humidité des sols et ainsi l'instabilité des terrains pour les glissements superficiels. Une étude basée sur des projections climatiques sur le sud-est de l'Angleterre suggère que l'augmentation des cumuls annuels de précipitations serait compensée par l'augmentation de l'évapotranspiration, se traduisant par aucune évolution projetée de l'occurrence des grands glissements de terrain.

4.1.3. La fonte nivale

La fonte nivale joue aussi un rôle dans le bilan hydrique à un instant donné. Cette dernière est plus précoce et plus rapide dans le contexte du réchauffement en cours. Plusieurs études analysent le lien entre les glissements de terrain et la fonte nivale dans le contexte du changement climatique.

Une étude menée sur un bassin versant de l'Ubaye suggère que l'occurrence de glissements

au cours du XXe siècle est grandement liée à la quantité de neige (cumul de précipitations hivernales) et la vitesse de la fonte (températures printanières). Depuis les années 1990, c'est **l'augmentation des températures printanières** qui semble expliquer l'augmentation de la fréquence des glissements, en augmentant la vitesse de la fonte quel que soit le cumul hivernal.

Une étude menée dans le Piémont italien suggère une évolution de la saisonnalité des glissements superficiels, avec **une contribution plus importante du printemps.** Ces grands épisodes de glissement ayant lieu au printemps ne sont pas nécessairement liés à des précipitations aussi abondantes que pour les glissements d'automne, mais ils sont couplés à une fonte nivale non négligeable. La fonte nivale plus rapide semble donc **affecter la fréquence et la saisonnalité des glissements de terrain.**

Par ailleurs, le manteau neigeux constitue une surcharge des terrains en plus de contribuer à leur alimentation en eau via la fonte, il favorise alors les glissements superficiels et une évolution vers des coulées complexes de boue, neige, eau liquide de type slush.

4.2. L'évènement déclencheur

A l'échelle de l'évènement déclencheur, les précipitations jouent au premier ordre. La fonte nivale joue généralement un rôle au second ordre, tandis que l'évapotranspiration est généralement négligeable puisque l'air est saturé en humidité.

D'un point de vue théorique, l'augmentation attendue de l'intensité des précipitations dans un climat plus chaud, en lien avec une plus grande capacité de l'atmosphère à contenir de l'humidité, pourrait favoriser l'occurrence de glissements de terrain, notamment les glissements de terrain superficiels. En pratique, l'évolution des intensités de précipitations dépend aussi des évolutions de circulations atmosphériques, de la disponibilité en humidité, de la physique des nuages, et les évolutions sont différentes selon les pas de temps considérés.

Au pas de temps journalier, des observations indiquent depuis les années 80 (1) une augmentation des précipitations extrêmes automnales (Alpes du sud, Cévennes et vallée du Rhône), (2) une diminution en hiver dans les Alpes du Nord, et (3) une élévation de la limite pluie-neige favorisant les pluies sur neige au cœur de l'hiver. Ces tendances observées peuvent être amenés à faire évoluer la fréquence et la saisonnalité des glissements.

Dans les Alpes européennes, certaines études suggèrent une **augmentation de l'activité convective** en été, c'est-à-dire des pluies d'orages. Sur ces précipitations courtes, l'accroissement de l'humidité dans un air plus chaud semble jouer un rôle au premier ordre, et le réchauffement apporte **une plus grande quantité d'énergie pour la convection**. Une augmentation des précipitations convectives entrainerait une augmentation du ruissellement. Une augmentation de la fréquence des glissements superficiels et des réactivations de glissements pourrait aussi être observée, mais ces impacts sont plus incertains (lien moins direct, dépendance à la capacité d'infiltration des sols et donc au contexte local).

4.3. Projections climatiques

Des études relativement nombreuses utilisent les projections climatiques pour estimer l'évolution future de l'activité des glissements de terrain dans différentes régions du monde. Des modèles globaux sont utilisés, et une descente d'échelle est mise en place pour obtenir des données d'entrée adaptées aux modèles de stabilité du sol qui tiennent compte des différentes variables évoquées ci-dessus. Néanmoins, nous notons que les variables considérées comme précurseurs sont systématiquement les précipitations, parfois couplées à

l'évapotranspiration mais très rarement à la fonte nivale. **Les projections obtenues sur l'activité des glissements sont ainsi très dépendantes du modèle de stabilité du sol retenu.** L'utilisation des précipitations seules dans la plupart des études pourrait s'expliquer par le fait qu'elles représentent une variable de premier ordre pour les glissements, et qu'elle est une sortie directe des modèles de climat (contrairement à l'évapotranspiration ou la fonte).

Par ailleurs, **les précipitations convectives** – qui peuvent avoir un impact sur les glissements superficiels et qui seraient amenées à augmenter de manière plus importante que les précipitations stratiformes – ne sont pas simulées de manière réaliste dans les projections multi-modèles actuellement disponibles étant donné leurs résolutions spatiales trop larges (c'est d'autant plus le cas en zone de montagne où les processus convectifs sont influencés par les reliefs). Néanmoins, cette thématique est au cœur des recherches actuelles et des résultats sont à attendre prochainement.

De manière générale, plusieurs projections mettent en avant une réduction de la fréquence des glissements de terrain et/ou de la vitesse des glissements actifs **là où les modèles de climat projettent une diminution des cumuls annuels ou saisonniers de précipitations**. C'est le cas pour une étude s'intéressant au bassin versant de Barcelonnette, en Ubaye.

A l'inverse, plusieurs études mettent en avant une augmentation de la fréquence des glissements. Une étude sur le bassin versant de Cauterets (Pyrénées) met en avant une augmentation future des zones favorables aux glissements de terrain, avec une réponse plus marquée pour les glissements superficiels que pour les glissements profonds. Cette augmentation est principalement due à une augmentation des cumuls et intensités des précipitations simulées - évolution néanmoins basée sur un seul modèle de climat. Une étude à proximité dans le Val d'Aran suggère en revanche que **l'évolution de la couverture des sols**, avec la remontée en altitude de la forêt, pourrait compenser l'augmentation des précipitations et ainsi tendre vers une meilleure stabilité des sols.

En dehors de la France, une étude s'intéressant à l'évolution future des glissements superficiels en Italie centrale met en avant une augmentation de plus de 40% de l'occurrence des glissements superficiels en fin de siècle selon un scénario pessimiste de réchauffement (RCP8.5), **principalement en hiver, en lien avec une augmentation des cumuls de pluie.** En été, l'intensification des précipitations est couplée à une diminution de l'humidité du sol, ce qui n'entraine pas de changement significatif de l'occurrence des glissements. Une augmentation de la fréquence et de **la taille** des glissements superficiels (il s'agit de l'un des rares résultats à ce sujet) est aussi simulée au centre de la Norvège en réponse à une augmentation des cumuls de précipitations à différents pas de temps (6h, 12h, 24h) selon le RCP8.5. En Slovénie, une augmentation des surfaces sujettes aux glissements superficiels est simulée en réponse à une augmentation **des cumuls de précipitations hivernaux.**

Dans les hautes montagnes d'Asie, une étude suggère que l'activité de glissements de terrain seraient accrue, principalement en haute montagne, en lien avec l'augmentation des précipitations projetée par les modèles de climat **en altitude**. Le lien avec l'augmentation du risque de scénarios en cascade est évoqué (glissement dans lacs glaciaires engendrant une débâcle par exemple).

4.4. Les spécificités de la haute montagne

La haute-montagne se caractérise sous nos latitudes par la présence de glaciers et de permafrost. Il est avéré que le retrait glaciaire et la dégradation du permafrost favorise une augmentation de la fréquence des chutes de blocs/éboulements et augmente la disponibilité

sédimentaire. Ces deux dynamiques sont abordées dans les notes relatives aux phénomènes rocheux et aux crues torrentielles.

Le dégel du permafrost réduit la cohésion des terrains et les rendent plus perméables. Les phénomènes qui se rapprochent le plus des glissements de terrain évoqués dans cette note sont la déstabilisation des terrains jusqu'alors gelés en permanence (par exemple les moraines ou marges proglaciaires), l'accélération des glaciers rocheux, mais aussi l'affaissement des sols qui peut impacter les infrastructures de haute montagne.

5. Evolution observée du phénomène

Les nombreuses études proposant des projections futures de l'activité des glissements de terrain se basent sur des bases de données de glissements observés/reconstitués pour établir un lien avec les précurseurs (bien souvent les précipitations). Cependant, ces bases de données ne possèdent pas nécessairement une profondeur temporelle suffisante pour établir des tendances passées robustes. Ainsi, les études analysant les tendances observées des glissements de terrain **sont moins nombreuses celles proposant des projections futures.**

Sur le temps long, des reconstructions de chroniques de glissements de terrain au cours de l'holocène dans les Alpes Suisses montrent plutôt que les périodes d'activité plus soutenue sont associés à **des périodes froides et humides.**

En France, **la base de données RTM** constitue une donnée riche pour l'analyse des glissements dans les Alpes françaises et des Pyrénées. Les extractions récentes tendent à montrer une augmentation de la fréquence des glissements depuis une dizaine d'années. Cependant, des traitements statistiques spécifiques sont nécessaires pour s'affranchir des biais liés au recensement des données et à des facteurs non climatiques.

Dans les Alpes, une étude menée au centre de la Suisse met en avant une augmentation de la fréquence des glissements depuis 1960, et le lien est fait **avec l'augmentation des intensités de précipitations depuis les années 1960**. Une seconde étude à l'échelle du pays entier ne conclut pas à une évolution significative de l'occurrence des glissements. En Italie, l'exploitation d'une base de données de glissements superficiels dans le nord-ouest du pays de 1960 à 2019 met en évidence une légère augmentation de l'occurrence des glissements dans les Alpes mais une diminution marquée dans le Piémont, en lien avec une diminution marquée du nombre de jours pluvieux.

En contexte de permafrost, une étude sur le plateau tibétain, couvrant la période 2009 et 2018 met en avant une augmentation de la fréquence des glissements et des glissements de plus en plus hauts en altitude (évolution d'environ 130 mètres par décennie), en lien avec la remontée en altitude de la limite basse du permafrost (présence de véritable sol en contexte de permafrost sous ces latitudes).

6. Synthèse

Les glissements de terrain sont en premier lieu dépendants **de la géologie, de la géomorphologie, et de la topographie. Les activités anthropiques** peuvent jouer un rôle important dans l'occurrence de certains glissements.

L'atteinte **d'un seuil critique de contenu en eau du sol joue un rôle de précurseur, et c'est principalement en ce sens que l'évolution du climat peut être amenée à modifier l'activité des glissements.** L'atteinte de ce niveau critique est le résultat des apports et pertes en eau sur une période antécédente et lors d'un évènement déclencheur, dépendant des précipitations sur différents pas de temps (caractérisées sur 6h, 12h, 24h, une saison, une année dans la bibliographie), de la fonte du manteau neigeux, et de l'évapotranspiration.

D'un point de vue de l'évolution des glissements de terrain **au regard des processus/précurseurs, nous retenons :**

1) Une réponse potentiellement différente au changement climatique **des glissements profonds** – qui répondent sur le temps long – **et des glissements superficiels** qui réagissent sur des pas de temps plus courts ;

2) Une évolution pour le moment **peu marquée des cumuls annuels de précipitations en France.** Les tendances saisonnières observées et modélisées suggèrent une humidification de la moitié nord en hiver et un assèchement de la moitié sud en été ;

3) **Une augmentation des intensités de précipitation** (encore difficilement observée sur des pas de temps courts en montagne), qui pourrait augmenter la fréquence des glissements superficiels. Le lien n'est cependant pas direct car le contenu en eau antécédent et la capacité d'infiltration du sol entrent en compte ;

4) Une diminution du contenu en eau du sol dans un climat plus chaud en lien avec **l'augmentation de l'évapotranspiration** (effet asséchant). Cela pourrait avoir un effet sur les glissements profonds mais aussi sur les glissements superficiels (l'atteinte d'un contenu critique nécessite un apport plus important à l'échelle d'un épisode météorologique) ;

5) Une élévation de la limite pluie neige, une réduction de la couverture neigeuse, et une modification de la vitesse et de la saisonnalité de la fonte nivale pouvant modifier la fréquence et **la saisonnalité des glissements de terrain, et conduire à des occurrences de mouvements de masses complexes de type « slush » à des saisons et/ou lieux surprenants.**

6) Des déstabilisations favorisées par **le retrait glaciaire et le dégel du permafrost** en haute montagne.

7) Un manque de connaissance concernant l'impact des évolutions climatiques sur **la taille des glissements** et sur **les modulations de la vitesse** des grands glissements.

D'un point de vue **des observations des glissements de terrain,** nous retenons :

1) Des évolutions d'occurrence des glissements **différentes** selon les régions et les saisons ;

2) Dans les Alpes, les tendances mises en avant **sont positives (augmentation de la fréquence) ou nulles.** Les bases de données exploitées sont néanmoins régionales et non exhaustives rendant les résultats disponibles peu robustes et difficilement généralisables.

Conclusion :

En synthèse, bien que les tendances sur l'activité de glissement de terrain soient contrastées et que notre compréhension globale reste largement lacunaire du fait de la complexité des phénomènes, il semble que la réponse des glissements profonds pourrait être bien différente de celle des glissements superficiels, notamment en lien avec l'augmentation de l'évapotranspiration d'un côté et l'augmentation de l'intensité des précipitations de l'autre. Il semble aussi que les modifications liées à l'enneigement pourraient favoriser plus de glissements en hiver (pluie à la place de la neige) et au printemps (fonte rapide), de même que l'occurrence d'écoulements complexes de type slush. Les éléments formulés dans le présent paragraphe **doivent toutefois être considérés davantage comme une synthèse à dire d'expert** basée sur les métiers/expériences des rédacteurs et la bibliographie, plutôt que sur une réelle analyse quantitative.

Le changement climatique a dans le présent, et aura dans le futur, des effets non négligeables sur les glissements de terrain. Ces effets sont délicats à prédire de manière quantitative et sont aujourd'hui peu/pas intégrés à la prévention des risques pour les territoires de montagne en France. Ils auront très certainement **un impact fort sur les territoires de montagne.** Dans ce contexte, **il semble important d'améliorer les connaissances et les méthodes sur la caractérisation des glissements dans l'ensemble de leur dimension (occurrence, activation/accélération, taille/volume) et sur leur évolution à venir avec le changement climatique.**

Bien que la présente note se soit concentrée sur l'impact du changement climatique sur les glissements, des études suggèrent que l'impact des activités humaines sur les glissements de terrain pourrait constituer un signal **aussi important** – voir plus important - que l'impact du changement climatique futur sur les glissements de terrain. Autrement dit, les actions visant à réduire **l'impact connu** des activités anthropiques sur les glissements pourraient être plus bénéfiques que des actions d'adaptation aux effets du changement climatique, **par ailleurs plus incertains.** Plusieurs études modélisant l'évolution future des glissements se basent d'ailleurs sur différents scénarios **d'usage des sols**.

7. Références mobilisées pour la rédaction de cette note

Auflič et al. (2023). **Climate change increases the number of landslides at the juncture of the Alpine, Pannonian and Mediterranean regions.** Sci Rep 13, 23085. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50314-x

Buma J. and Dehn M. (2000). **Impact of climate change on a landslide in South East France, simulated using different GCM scenarios and downscaling methods for local precipitation.** Clim Res 15:69-81 https://doi.org/10.3354/cr015069

Bernardie et al. (2021). Modelling landslide hazards under global changes : the case of a Pyrenean valley. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 147–169. https://doi.org/10.5194/nhess-21-147-2021

Blanchet et al. (2021). **Explaining recent trends in extreme precipitation in the Southwestern Alps by changes in atmospheric influences.** Weather and Climate Extremes, https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100356

Chen et al. (2024). **Elevation-dependent shift of landslide activity in mountain permafrost regions of the Qilian Mountains.** Advances in Climate Change Research 15, 1067-1077. https://doi.org/10.1016/j.accre.2024.11.003

Ciabatta et al. (2016). **Assessing the impact of climate-change scenarios on landslide occurrence in Umbria Region, Italy.** Journal of Hydrology, Volume 541, Part A. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.007

Collison et al. (2000). **Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England.** Engineering Geology 55, 205–218. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00121-0

Crozier (2010). **Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review.** Geomorphology 124 (2010) 260–267. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009

Dapples et al. (2003). **New records of Holocene landslide activity in the Western and Eastern Swiss Alps: Implication of climate and vegetation changes.** Eclogae Geologicae Helvetiae, 96(1), 1-10.

Dezsi et al. (2018). **High-resolution projections of evapotranspiration and water availability for Europe under climate change.** International Journal of Climatology, 38 :3832–3841. https://doi.org/10.1002/joc.5537

Giorgi et al. (2016). **Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming.** Nature Geoscience, https://www.nature.com/articles/ngeo2761

Hock et al. (2019). **High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. P□rtner et al.].** Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 131-202. https://doi.org/10.1017/9781009157964.004

Hurlimann Ziegler et al. (2021). **Effect of land cover and climate changes on rainfall-induced landslides: regional-scale modelling in the Val d'Aran (Pyrenees, Spain).** In International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Online Library: 13th International Symposium on Landslides (XIII ISL) (pp. 1-8). http://hdl.handle.net/2117/341154

Lopez et al. (2013). **Climate change increases frequency of shallow spring landslides in the French Alps.** Geology, 41 (5): 619–622. https://doi.org/10.1130/G34098.1

Malet et al. (2007**). Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley.** In Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change–Challenges and Solutions, pp. 195-205. https://doi.org/10.1201/NOE0415443180.ch24

Météo France, CNRM, IPSL, CERFACS (2020). **DRIAS Climat.** https://www.drias-climat.fr/

Météo France, CNRM, IPSL, CERFACS (2024). **DRIAS les futurs de l'eau.** Projet Explore 2. https://drias-eau.fr/

Meusburger, K., & Alewell, C. (2008). **Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland).** Natural Hazards and Earth System Sciences, 8(3), 509-520. https://doi.org/10.5194/nhess-8-509-2008

Kirschbaum et al. (2020). **Changes in extreme precipitation and landslides over High Mountain Asia.** Geophysical research letters, 47(4), e2019GL085347. https://doi.org/10.1029/2019GL085347

Oguz et al. (2023). **Quantification of climate change impact on rainfall-induced shallow landslide susceptibility: a case study in central Norway.** Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 18:2, 467-490. https://doi.org/10.1080/17499518.2023.2283848

Paquet (2024). **A detailed stationarity analysis and trend modelling of French daily precipitations.** IMSC 2024, Toulouse

Patton et al. (2019). **Landslide response to climate change in permafrost regions.** Geomorphology 340, 116–128. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.029

Ribes et al. (2019). **Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean.** Climate Dynamics, https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2

Tiranti, D., & Ronchi, C. (2023). **Climate change impacts on shallow landslide events and on the performance of the regional shallow landslide early warning system of piemonte (Northwestern Italy).** GeoHazards, 4, 475–496. https://doi.org/10.3390/geohazards4040027