

Évaluation de l'impact du changement climatique sur les aléas glissement de terrain et chutes de blocs : une évaluation quantitative basée sur une analyse bayésienne des événements historiques (Région PACA)

Assessing the impact of climate change on landslide and rockfall hazards: a quantitative assessment based on Bayesian analysis of historical events (PACA region)

Dominique BATISTA^{1*}, Pierre AZEMARD², Thibault LANDEL¹

1 Cerema Méditerranée DIM, Aix en Provence, France

2 Cerema GéoCod, Aix en Provence, France

**dominique.batista@cerema.fr*

RESUME : Dans le cadre d'un cofinancement État-Région, le Cerema développe une approche originale permettant une quantification de l'impact du changement climatique sur les aléas « glissements de terrain » et « chutes de blocs » sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Ces travaux ont été initiés en 2009 dans le cadre du projet RHyTMME (Risque Hydrométéorologique en Territoire de Montagnes et Méditerranéens), développé en partenariat avec Météo-France et INRAE. Notre approche repose sur une analyse des événements historiques extraits de la BDRTM (alimentée par les services de Restauration des Terrains de Montagne) ainsi que de la BDMvT, alimentée par le BRGM et le Cerema.

Notre analyse a nécessité la construction préalable de groupes géotechniques homogènes regroupant plus de 1000 lithologies issues de la base de données CHARM50®. Ces regroupements établis à dire d'expert et affinés statistiquement, permettent d'étudier des populations d'événements dans des contextes géotechniques homogènes. L'analyse de la localisation des événements historiques pour chacun de ces groupes s'est soldée en 2015 par la production de cartes quantifiant la répartition spatiale des aléas historiques « glissements de terrain » et « chutes de blocs » sur la région.

Depuis, le Cerema a poursuivi ces travaux basés sur une analyse bayésienne des conditions de déclenchement des aléas afin d'évaluer l'évolution temporelle de ces aléas gravitaires avec les précipitations. Nous avons pour cela constitué une base de données événements/météorologie pour chaque groupe géotechnique en utilisant les données de la base SAFRAN de Météo-France, pour chaque événement postérieur à 1958. Cette approche a permis d'étudier les conditions de déclenchement des événements et d'évaluer l'aléa instantané en tout point de la région en fonction de l'aléa historique local et des précipitations enregistrées localement.

L'intégration temporelle de ces aléas instantanés permettent alors de fournir une première quantification de l'impact du changement climatique sur les aléas gravitaires considérés.

ABSTRACT:

As part of a joint State-Region funding initiative, Cerema is developing an original approach to quantify the impact of climate change on landslides and rockfalls in the Provence-Alpes-Côte d'Azur region.

This work was initiated in 2009 as part of the RHyTMME (Hydrometeorological Risk in Mountainous and Mediterranean Territories) project, developed in partnership with Météo-France and INRAE. Our approach is based on an analysis of historical events extracted from the BDRTM (supplied by the Mountain Land Restoration Services) and the BDMvT database, supplied by BRGM and Cerema.

Our analysis required the prior construction of homogeneous geotechnical groups comprising more than 1,000 lithologies from the CHARM50® database. These groupings, established by experts and statistically refined, enable the study of populations of events in homogeneous geotechnical contexts. The analysis of the location of historical events for each of these groups resulted in 2015 in the production of maps quantifying the spatial distribution of historical "landslides" and "rockfalls" hazards in the region.

Since then, Cerema has continued this work based on a Bayesian analysis of the conditions that trigger hazards in order to assess the temporal evolution of these gravitational hazards with precipitation. To this end, we have compiled an events/meteorology database for each geotechnical group using data from Météo-France's SAFRAN database for each event

since 1958. This approach enabled us to study the conditions triggering events and assess the instantaneous hazard at any point in the region based on the local historical hazard and locally recorded precipitation. The temporal integration of these instantaneous hazards then provides an initial quantification of the impact of climate change on the gravitational hazards under consideration.

Mots-clés: Quantification des effets du changement climatique ; Chute de bloc ; Glissement de terrain ; Impact sur les infrastructures

1 INTRODUCTION

Face à la multiplication d'évènements majeurs perturbant à la fois le fonctionnement des infrastructures de transport et les moyens financiers alloués à leur gestion, la DREAL et la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur ont initié une étude sur la résilience des infrastructures régionales dans un contexte de changement climatique.

De nombreuses études ont montré le lien entre le déclenchement des glissements de terrain ou des chutes de blocs, et les conditions météorologiques (Abraham et al., 2021; Batista et al., 2015, 2005; D'Amato et al., 2016; Delonca et al., 2014; Mateos et al., 2012; Melillo et al., 2020; Nissen et al., 2022). Les variations attendues des conditions météorologiques du fait du changement climatique vont induire une modification de l'exposition des infrastructures à ces phénomènes. Ces variations principalement de pluviométrie (cumuls, répartition temporelle et intensité) et températures (notamment gel-dégel pour les chutes de blocs) ont des effets potentiellement antagonistes (Blanc et al., 2025b, 2025a; Jacquemart et al., 2024).

Notre travail poursuit les développements de (Batista et al., 2021) en les généralisant pour l'ensemble de la région.

2 RÉSULTATS ANTÉRIEURS

La susceptibilité spatiale au glissement de terrain et aux chutes de blocs est un résultat du projet Risque Hydrométéorologique en Territoire de Montagnes Méditerranéens (RHyTMMé) réalisé entre 2009 et 2017 (Batista et al., 2015, 2017). L'inventaire utilisé est une agrégation des bases de données mouvement de terrain opérées par l'ONF-RTM (Bisquert et al., 2025) en zone de montagne et par le BRGM sur le reste du territoire (Mirgon et Herniot, 2012), contenant des mouvements de 1900 à 2013. Cette base contient 1712 glissements de terrains et 1567 chutes de blocs qui font l'objet d'un traitement séparé.

Les facteurs de prédisposition pris en compte ont été choisis pour leur influence réputée au premier ordre mais aussi en fonction de leur disponibilité sur

l'ensemble de la période de recensement, ce qui a exclu l'occupation du sol. Le Tableau 1 détaille les facteurs pris en compte et la source de données utilisées.

Tableau 1 : Facteurs de prédisposition pris en compte

Facteur	Source de données
Lithologie	Regroupements à partir de CHARM50® (BRGM)
Distance au failles	CHARM50® (BRGM)
Pente	MNT IGN 25 m
Exposition	MNT IGN 25 m
Distance aux rivières	BD CARTHAGE (IGN)

Un travail approfondi de classification des faciès géologiques (basé sur CHARM50®) permet de définir des « groupes géotechniques homogènes » regroupant les lithologies présentant des descriptions comparables et se comportant de façon similaire d'après notre expérience du terrain. Douze groupes ont été identifiés pour les chutes de blocs et treize pour les glissements de terrain (Figure 1). La densité d'évènements par km² caractérise la susceptibilité de chaque groupement au phénomène considéré, qu'il s'agisse de chutes de blocs ou de glissements.

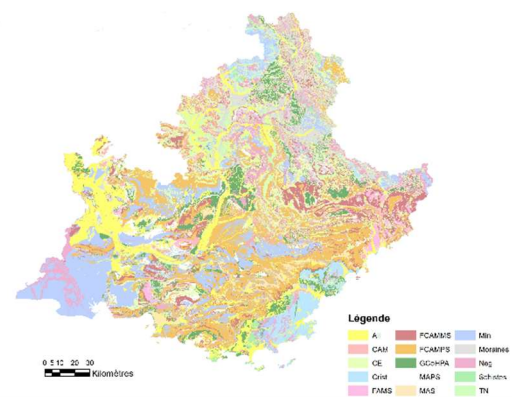


Figure 1 : Carte des groupes géotechniques glissement de terrain

Pour chaque groupe géotechnique et chaque facteur de prédisposition, on détermine la densité d'évènements recensés par km² pour une même classe de valeur du facteur de prédisposition. Ces classes sont choisies de façon à conserver un effectif représentatif

pour l'ensemble des groupes. La fonction d'influence d'un facteur de prédisposition pour un groupe géotechnique est définie comme le ratio de cette densité à la densité moyenne obtenue pour l'ensemble du groupe, toutes conditions confondues. Elle traduit la modulation de la susceptibilité en fonction de la classe (Figure 2). Un calcul de corrélation a permis de s'assurer que les divers facteurs de prédisposition sont peu corrélés entre eux, permettant de supposer leur indépendance.

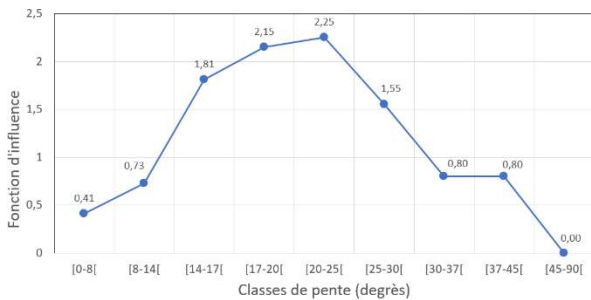


Figure 2: Glissements de terrain, fonction d'influence de la pente pour le groupe « marnes et argiles sensibles »

La susceptibilité est alors définie par (Figure 3) :

$$S(px) = D_g \times F_{\text{faille-g}}(\text{dist faille}) \times F_{\text{hydro-g}}(\text{dist hydro}) \times F_{\text{pente-g}}(\text{pente}) \times F_{\text{expo-g}}(\text{exposition}) \quad (1)$$

Où $S(px)$ est la susceptibilité au droit du pixel « px »
 D_g est la densité d'évènement au km^2 du groupe géotechnique « g »
 $F_{\text{faille-g}}$ est la fonction d'influence de la distance aux failles pour le groupe « g »
 $F_{\text{hydro-g}}$ est la fonction d'influence de la distance aux réseau hydrographique pour le groupe « g »
 $F_{\text{pente-g}}$ est la fonction d'influence de la pente pour le groupe « g »
 $F_{\text{expo-g}}$ est la fonction d'influence de l'exposition pour le groupe « g »

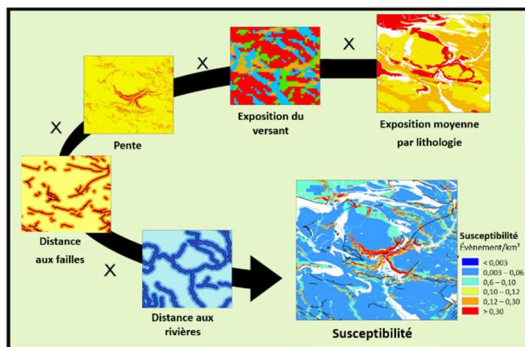


Figure 3 : Modulation de la susceptibilité en fonction de la distribution locale des facteurs de prédisposition

Du fait d'un inventaire régional non exhaustif, les valeurs, exprimées en nombre d'évènement par km^2 , ne sont pas des valeurs absolues. Par contre leur variabilité spatiale est restituée de façon quantitative, permettant de localiser les zones les plus soumises aux aléas (Figure 4).

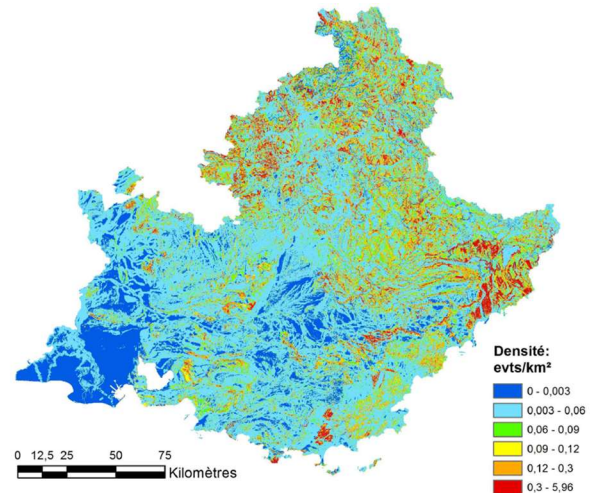


Figure 4 : Carte de susceptibilité aux glissements de terrain de la région PACA

3 MÉTHODES

Les études reliant les conditions météorologiques et les mouvements de terrain portent généralement sur la recherche de seuils météorologiques de déclenchement des mouvements (Abraham et al., 2021; Barthélemy et al., 2025; Krautblatter and Moser, 2009; Melillo et al., 2020) ; souvent dans l'objectif d'un système d'alerte. Ces relations sont généralement exprimées comme des lois puissance reliant un cumul minimal en fonction de la durée de l'épisode générateur. Elles sont très largement dépendantes des sites où elles ont été établies. L'évaluation des relations entre les conditions météorologiques et les évènements gravitaires doit donc être basée sur des études sur un espace limité et avec une précision spatiale et temporelle permettant d'identifier correctement ces liens. Dans notre approche l'influence des cumuls pluviométriques est évaluée de façon continue et s'affranchit de la notion de seuil de déclenchement jugée trop restrictive.

3.1 Influence du cumul pluviométrique

Afin d'évaluer l'évolution de l'aléa glissement de terrain et chute de blocs avec la pluviométrie, nous avons constitué une base de données évènements/pluviométrie pour chaque groupe géotechnique (regroupant typiquement près de 50 000

à 90 000 jours). Nous nous sommes ici limités aux évènements localisés précisément dans l'espace et dans le temps afin de construire une base de données fiable. Pour chaque évènement postérieur à 1958, nous extrayons dans la base SAFRAN de Météo-France, la pluviométrie journalière sur une période de 3 ans avant chaque évènement. La durée de 3 ans est choisie pour tenir compte de l'affaiblissement mécanique dans le temps des sites d'instabilité. Les séries chronologiques concaténées ainsi obtenues pour chaque groupe géotechnique en prenant le soin de bien intégrer les dates de glissements de terrain ou de chutes de blocs observés.

Un code FORTRAN permet de modéliser l'application d'une règle de gestion de l'aléa sur chaque population géotechnique (regroupant les séries événements / pluviométrie pour un groupe géotechnique donné) et d'évaluer l'efficacité de chaque règle de gestion :

Le programme :

- calcule pour chaque journée « j » un cumul pluviométrique « amorti » (Abraham et al., 2021) sur un nombre de jours NCT (correspondant à la durée de cumul fourni au Tableau 2) défini en amortissant les précipitations les plus anciennes à l'aide d'un coefficient d'atténuation Katten (fourni dans le Tableau 2) :

$$cumul_{pluie}(j) = \sum_{i=1}^{NCT} (P(j-i+1) * Katten^i) \quad (2)$$

Où P(i) est la pluie du jour i en mm

Katten est le coefficient d'atténuation

NCT est le nombre de jours de cumul

Cumul_{pluie}(j) est la pluie cumulée et atténuée sur NCT jours

- simule pour chaque population géotechnique (regroupant les séries événements/pluviométrie pour un groupe géotechnique donné), l'application d'une règle d'alerte définie par l'application d'une durée d'alerte d'un jour dès que le cumul pluviométrique dépasse un seuil « court terme » dénommé « SCT » ;
- puis le programme calcule pour chaque règle d'alerte considérée le nombre de jours d'alertes ainsi que le nombre d'évènements historiques correctement détectés (ayant lieu pendant les alertes) ;
- évalue l'efficacité de chaque règle d'alerte par le pourcentage d'évènements détectés et le pourcentage de jours d'alerte associés, reportés sur un graphe appelé « graphique efficacité ».

A titre d'exemple, nous donnons ci-après (Figure 5) le graphe d'efficacité pour le groupe géotechnique « FAMS » (Formations à Alternances Marneuses Sensibles) :

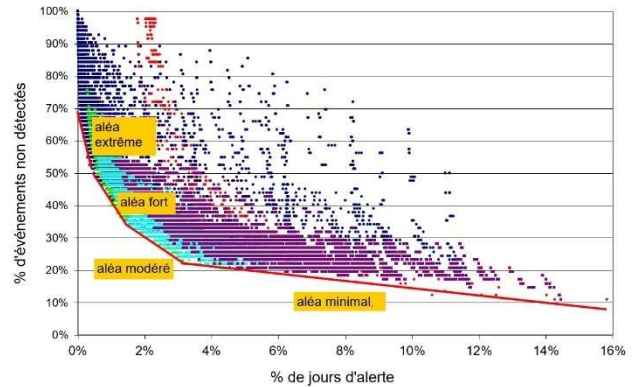


Figure 5: Graphique d'efficacité du groupe « Formations à alternances marneuses sensibles », glissements de terrain

Chaque point du graphe représente le résultat obtenu en termes de pourcentage de jours d'alerte et de pourcentage d'évènements détectés pour une règle d'alerte donnée. Sa position dans le graphique traduit l'efficacité de la règle d'alerte, puisqu'une règle d'alerte est d'autant plus efficace qu'elle minimise à la fois le pourcentage de jours d'alerte et le pourcentage d'évènements non détectés. Pour chaque groupe géotechnique, les performances d'une grande variété de règles d'alerte ont ainsi été calculées (Batista et al., 2005) et ont permis de construire des graphiques d'efficacité spécifiques à chaque groupe géotechnique. Les différents paramètres définissant les règles d'alerte considérées sont listés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Plage de valeurs pour les chutes de blocs (Bloc) et les glissements (Gliss)

Paramètre	Valeur basse	Valeur haute	Nb valeurs
Durée de cumul (j) Bloc :	1	4	4
Durée de cumul (j) Gliss	1	5	5
Coefficient d'atténuation Bloc (%)	85	100	2
Coefficient d'atténuation Gliss (%)	85	85	1
Seuil du cumul (mm) Bloc	1	360	27
Seuil du cumul (mm) Gliss	5	400	27

Les graphiques d'efficacité permettent de représenter les résultats de chaque règle de gestion de l'aléa dans un graphe, équivalent à une courbe ROC mais plus directement exploitable par un gestionnaire : pourcentage d'évènement non détectés en fonction du pourcentage de jours d'alerte. Nous constatons que le nuage de points ainsi obtenu en Figure 5 est limité en partie inférieure par une « courbe enveloppe » que nous appellerons « courbe de gestion optimale de l'aléa ». Il convient de noter que cette courbe a précédemment été utilisée pour définir et optimiser les

règles de gestion de l'aléa chute de bloc sur la route du littoral à la Réunion (Batista et al., 2005). Nous constatons en Figure 5 que la pente de cette courbe est faible pour des pourcentages de jours d'alerte élevés et est à contrario forte pour des pourcentages de jours d'alerte faible. En remarquant que cette pente est proportionnelle à un nombre d'évènement par unité de temps, on met en évidence que cette « courbe enveloppe de gestion optimale de l'aléa » traduit une augmentation sensible de l'aléa lorsque les durées d'alerte sont réduites. Ainsi cette courbe enveloppe permet traduit l'augmentation de l'aléa lorsque le cumul pluviométrique critique déclenchant l'alerte augmente, c'est-à-dire lorsque l'intensité pluviométrique augmente. L'évaluation des fonctions d'influence pluviométrique est donc basée sur l'inversion de cette courbe enveloppe de gestion optimale de l'aléa ». traduisant de manière implicite l'évolution de l'aléa en fonction de la pluviométrie. Cette courbe enveloppe, est ensuite approchée à l'aide de différentes familles de règles d'alerte considérant une durée de cumul pluviométrique et un coefficient d'atténuation fixées et faisant varier le seuil critique de cumul pluviométrique « SCT » déclenchant l'alerte. La famille de règles d'alerte produisant dans le graphique d'efficacité la courbe la plus proche de la « courbe de gestion optimale de l'aléa » est alors utilisée pour évaluer l'évolution de l'aléa en fonction de la pluviométrie (Figure 6).

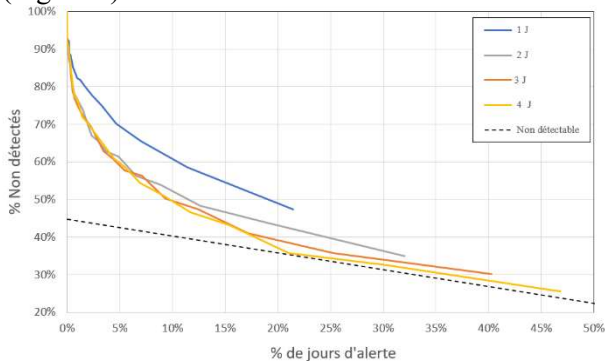


Figure 6 : Groupe Calcaires sensibles, chutes de blocs, Courbe d'efficacité pour 1 à 4 j de cumul, atténuation 0,85

Pendant une période durant laquelle le cumul pluviométrique est compris entre x et y mm on définit la probabilité d'un évènement par :

$$P(x \text{ à } y \text{ mm}) = \frac{N \cdot [(1 - N_{dt}(x)) - (1 - N_{dt}(y))]}{J_t \cdot [J_a(x) - J_a(y)]} \quad (3)$$

Où N est le nombre total d'évènement de la série ;

J_t est la durée totale de la série (jours) ;

$N_{dt}(i)$ est le % non détecté pour le cumul i mm (%) ;

$J_a(i)$ est le % de jour d'alerte pour un cumul de i mm (%).

Que l'on peut écrire :

$$\left(\frac{P(x \text{ à } y \text{ mm})}{N/J_t} \right) = \frac{N_{dt}(y) - N_{dt}(x)}{J_a(x) - J_a(y)} \quad (4)$$

Cette équation (4) exprime le rapport de la probabilité d'évènement, pour un cumul de pluie entre x et y mm, à la probabilité moyenne toutes conditions météorologiques confondues (qui est la fonction d'influence du cumul de pluie pour le groupe géotechnique considéré), comme égale à la pente de la courbe d'efficacité. Cette fonction peut être approximée par une ou deux fonctions continues de type loi exponentielle ou loi puissance (Erreur ! Source du renvoi introuvable. et Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

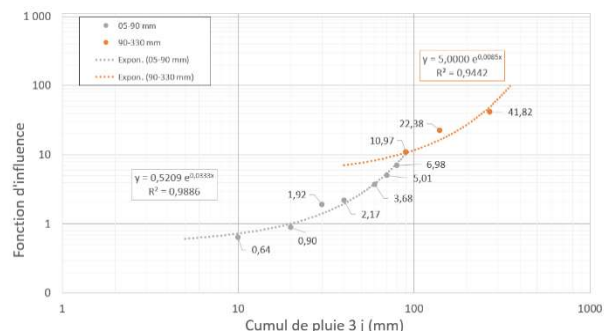


Figure 7 : Groupe Calcaires sensibles, chutes de blocs, courbe de fonction d'influence avec ajustement exponentiel sur 2 plages

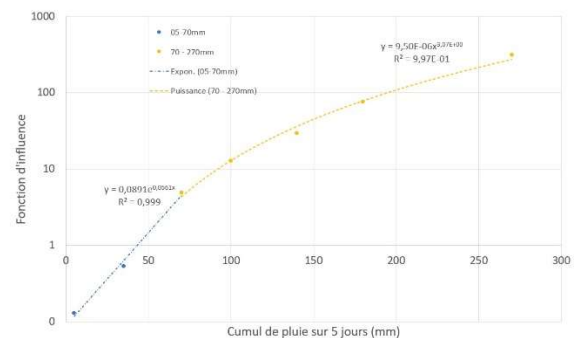


Figure 8 : Groupe « Formations à alternances marnieuses sensibles », glissements de terrain, courbe de fonction d'influence avec ajustement exponentiel sur la plage 0-70 mm et ajustement loi puissance sur la plage 70-270 mm

3.2 Gel dégel pour les chutes de blocs

Il ne s'agit pas ici de prendre en compte les effets sur le permafrost, qui sont très important mais limités à la haute montagne. Compte tenu de la cible de l'étude, enjeux routiers et ferroviaires, on se limite aux effets, plus superficiels, correspondant à la zone sans permafrost. L'incidence du facteur gel-dégel sur les chutes de blocs est nettement moins bien caractérisée que celle de la pluviométrie (D'Amato et al., 2016;

Delonca et al., 2014; Mateos et al., 2012; Nissen et al., 2022), même si ce phénomène représente localement plus de 50% des cas de déclenchement. Il n'a pas été possible de définir une influence différenciée selon les groupes géotechniques selon la même méthodologie que pour les pluies. La modélisation utilise le potentiel de gel (équation 5) pour définir les épisodes de gel-dégel.

$$PG(j) = \text{Min}[(PG(j-1) - T_j); 0] \quad (5)$$

Où PG(j) est le potentiel de gel du jour j (°C*j)

T_j est la température du jour j (°C)

Le Tableau 3 ci-dessous indique les différentes périodes qui composent chaque cycle de gel-dégel.

Tableau 3 : Définition des périodes de gel, redoux et dégel

Période	Température	Évolution des Température
Gel	< 0°C	Décroissante
Redoux	< 0°C	Croissante
Dégel	> 0°C	Indifférent
Avec PG > 0		

La prise en compte de la période et de la valeur de potentiel de gel s'appuie principalement sur (D'Amato et al., 2016; Delonca et al., 2014). Cela conduit aux facteurs d'influence indiqués au Tableau 4, valeurs entachées d'une incertitude significative.

Tableau 4: Facteur d'influence du gel retenus

Potentiel de Gel	Gel	Redoux	Dégel°
0 à 4 °J	1,6	1,6	1,6
4 à 17 °J	1,3	1,8	2,4
> 17 °J	2,1	2,9	4,5
Absence de gel	0,93	0,93	0,93

La première ligne correspond à des périodes de températures négatives courtes et peu intenses pour lesquelles la distinction des périodes n'est pas pertinente (gel nocturne par ex); la dernière à des périodes sans gel (PG=0).

3.3 Application aux séries climatiques

Les modèles de changement climatiques utilisés sont les mêmes que ceux utilisés dans le cadre de la TRACC et disponibles sur le portail DRIAS. Suite à une correction de biais réalisée par notre partenaire Hydroclimat, des séries journalières de variables météorologiques sont obtenues pour des durées de 20 ans. Pour chaque pixel de la région, on connaît le groupe géotechnique auquel il appartient, sa susceptibilité spatiale (d'après Rhytmme) et, chaque

jour de la série climatique, le facteur d'influence du cumul atténué de pluviométrie. Le produit de la susceptibilité spatiale par la somme des facteurs d'influence de ce pixel sur la période modélisée est un indicateur quantifié de la probabilité d'apparition d'un évènement sur ce pixel pour la période modélisée dans la TRACC (20 ans). Pour les chutes de blocs, on combine le facteur pluviométrique et le facteur gel-dégel selon l'équation 6 :

$$I(m, px) = S_{px} * \sum_{j=1}^n [Fi_G(P_j) * Fi(PG_j)] \quad (6)$$

Où I(m,px) est l'indicateur de probabilité d'évènement au pixel « px » et pour le modèle climatique « m » (évènements par km²) ;

S_{px} est la susceptibilité au mouvement de terrain du pixel « px » (évènements par km²) ;

j est le jour de la série climatique modélisée ;

n est le nombre de jour de la série climatique ;

Fi_G(P_j) est la fonction d'influence du groupe géotechnique « G » pour la pluie cumulée atténuée du jour « j » ;

Fi(PG_j) est la fonction d'influence pour le potentiel de gel du jour « j » (non pris en compte pour les glissements).

On dispose ainsi d'une évaluation finement spatialisée d'un indicateur de probabilité d'évènement associé à un modèle climatique. On compare ensuite les résultats de chaque modèle climatique par rapport à un état de référence, c'est-à-dire la période 1976-2005, conformément à la TRACC.

4 RÉSULTATS

Seuls sont présentés ici les résultats préliminaires obtenus (Batista et al., 2021) pour les glissements de terrain sur le territoire des vallées impactés par la tempête Alex (Tinée, Vésubie, Roya). Sur cette zone la méthodologie décrite au §3.3 est appliquée sur les données RCP 8.5 de 2066-2100 d'un unique pixel pluviométrique de référence (n° 5124) et comparée aux données de référence 1976-2005. On notera que la donnée pluviométrique de la tempête Alex à ce point, valeur interpolée sur la carte de cumul Météo France, est inférieur aux projections RCP 8.5 fin du siècle.

L'application de l'équation (6) permet de calculer pour chaque pixel des trois vallées l'indicateur de probabilité de glissement pour les deux scenarii considérés. La (Figure 9) présente la cartographie de la différence entre le calcul RCP8.5 et le calcul pour la période de référence (ce qui correspond à un suraléa).

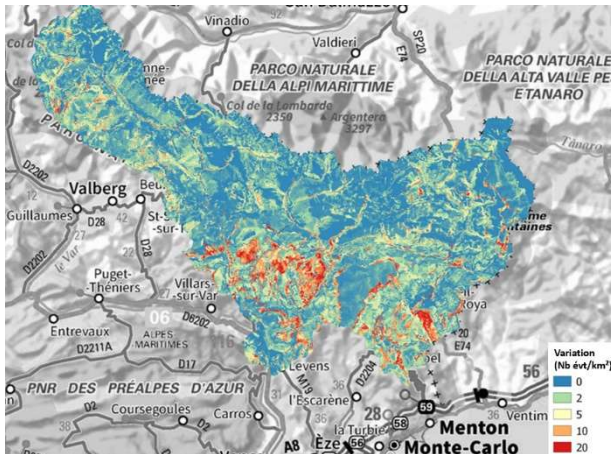


Figure 9 : Répartition spatiale de l'augmentation de l'indicateur de probabilité de glissement projeté, selon RCP 8.5 au point de ref 5127 (en nb de glissements/km²)

La Figure 10 représente la variation relative de l'aléa par rapport à l'état de référence. On note une large dominante de la classe 21-35% et une large zone de forte variation relative (>47%) mais qui correspond à une zone de faible indicateur de probabilité en valeur absolue (classe 0-2 sur la Figure 9). Cette zone en rouge traduit la plus grande sensibilité au changement climatique de ce groupe géotechnique.

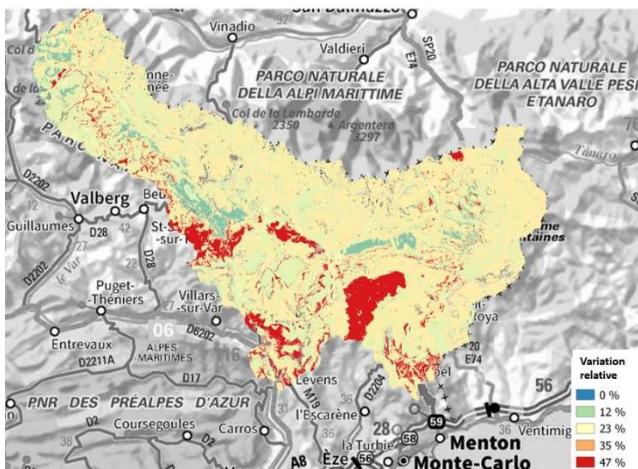


Figure 10 : Répartition spatiale de la variation relative de l'indicateur de probabilité de glissement par rapport à l'actuel

Ces résultats constituent un démonstrateur de la méthode de calcul de l'impact du changement climatique sur les aléas gravitaires considérés.

5 CONCLUSION

La méthodologie développée est originale sur deux aspects. D'une part elle est finement spatialisée grâce à l'exploitation de la susceptibilité aux mouvements de terrain du modèle RHyTMMe (Batista et al., 2017) ;

d'autre part elle a établi un modèle continu de l'influence de la pluviométrie sur les glissements de terrain et les chutes de blocs. La combinaison des deux permet d'évaluer en chaque point du territoire un indicateur de probabilité de mouvement de terrain associé à un modèle climatique et de le comparer à l'état actuel. Le croisement de cet indicateur et des enjeux d'infrastructure donne au gestionnaire une vision quantifiée et détaillée de l'influence du changement climatique sur les aléas gravitaires.

Un travail sur la caractérisation des incertitudes liées aux projections climatiques pourra alors être effectué en comparant les 17 modèles climatiques de la TRACC entre eux.

Pour les chutes de blocs, la prise en compte du gel dégel est entachée d'une grande incertitude. Les études en cours (projet ANR C2RIA en particulier) devraient mieux contraindre l'évaluation pour des altitudes moyennes (hors pergélisol). Par ailleurs une procédure d'évaluation sommaire de la propagation jusqu'au enjeux est en développement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région et la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur pour leur financement ainsi que la Région Réunion pour laquelle les premiers développements relatifs à l'influence de la pluviométrie sur le déclenchement des événements ont été produits.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham, M.T., Satyam, N., Rosi, A., Pradhan, B., Segoni, S., 2021. Usage of antecedent soil moisture for improving the performance of rainfall thresholds for landslide early warning. *CATENA* 200, 105147. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105147>
- Barthélemy, S., Bernardie, S., Grandjean, G., 2025. Assessing rainfall threshold for shallow landslides triggering: a case study in the Alpes Maritimes region, France. *Nat Hazards* 121, 4023–4049. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06941-2>
- Batista, D., Azemard, P., Renel, F., Haulbert, T., 2015. Prévion de l'aléa « instantané » glissement de terrain et chute de blocs en région PACA, retours d'expériences. Presented at the Journées Aléa Gravitaires, Caen. https://jag2015.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/03fpmxjag15_batista.pdf
- Batista, D., Binet, C., Rat, M., 2005. Etude statistique de l'aléa chute de pierres sur la RN1 à La Réunion,

- in: Géologie et ouvrages linéaires. Presented at the GEOLINE, BRGM éditions, Lyon, p. 298.
- Batista, D., Genois, J.L., Azemard, P., Haulbart, T., Rougé, A.-C., Renel, F., Rault, C., 2017. Évaluation des aléas historiques glissements de terrain et chutes de blocs sur la région PACA (étude No. JLG/I17-035). Cerema Med.
- Batista, D., Genois, J.L., Giroux, H., 2021. Evaluation de l'impact du changement climatique sur les aléas gravitaires : prévisions basées sur une analyse probabiliste des événements historiques. Champs sur marnes. <https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/journee-20211209/00%20JST%20geotech%20env%20prog%20211116v8.pdf>
- Bisquert, A., Mainieri, R., Carlados, S., Robert, Y., Giacona, F., Verry, P., Eckert, N., 2025. La base de données événementielles RTM pour la connaissance des risques naturels en montagne : L'exemple du département de l'Isère (France). rga 113–4. <https://doi.org/10.4000/137kf>
- Blanc, A., Manieri, R., Eckert, N., Martin, R., 2025a. Changement climatique et phénomènes rocheux : Note de synthèse sur l'état des connaissances. ONF-RTM.
- Blanc, A., Martin, R., Manieri, R., Eckert, N., 2025b. Changement climatique et glissements de terrain : Note de synthèse sur l'état des connaissances. ONF-RTM.
- D'Amato, J., Hantz, D., Guerin, A., Jaboyedoff, M., Baillet, L., Mariscal, A., 2016. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16, 719–735. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-719-2016>
- Delonca, A., Gunzburger, Y., Verdel, T., 2014. Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 14, 1953–1964. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1953-2014>
- Jacquemart, M., Weber, S., Chiarle, M., Chmiel, M., Cicoira, A., Corona, C., Eckert, N., Gaume, J., Giacona, F., Hirschberg, J., Kaitna, R., Magnin, F., Mayer, S., Moos, C., Van Herwijnen, A., Stoffel, M., 2024. Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps. Earth-Science Reviews 258, 104886. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104886>
- Krautblatter, M., Moser, M., 2009. nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps). NHESS 9, 1425–1432. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1425-2009>
- Mateos, R.M., García-Moreno, I., Azañón, J.M., 2012. Freeze–thaw cycles and rainfall as triggering factors of mass movements in a warm Mediterranean region: the case of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). Landslides 9, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0290-8>
- Melillo, M., Gariano, S.L., Peruccacci, S., Sarro, R., Mateos, R.M., Brunetti, M.T., 2020. Rainfall and rockfalls in the Canary Islands: assessing a seasonal link. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 20, 2307–2317. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2307-2020>
- Mirgon, C., Herniot, P., 2012. Outil de saisie web (BDMVT) Développement (No. BRGM / RP-62093-FR). BRGM.
- Nissen, K.M., Rupp, S., Kreuzer, T.M., Guse, B., Damm, B., Ulbrich, U., 2022. Quantification of meteorological conditions for rockfall triggers in Germany. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 22, 2117–2130. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2117-2022>