



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

PROJET MIROIR

Etude de seuils statistiques de précipitations déclenchant ou aggravant la stabilité des versants du val d'Arly (Projet MIROIR)



ASSOCIATION DÉVELOPPEMENT RECHERCHE GLISSEMENTS DE TERRAIN



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Parc
naturel
régional
du Queyras

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Micaschistes, Glissement de terrain, seuil d'activation, climat, Précipitations, Pluie Efficace, Evapotranspiration, Neige, Gorges de l'Arly, Ugine, Cohennoz, Savoie, Auvergne-Rhône-Alpes

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Peruzzetto M., Vallet A. et avec le concours d'Equilbey Edouard 2023. Étude de seuils statistiques de précipitations déclenchant ou aggravant la stabilité des versants du val d'Arly (Projet MIROIR). Rapport final V1. BRGM/RP-72995-FR, 51 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Dans le cadre du projet européen Feder-POIA et CIMA-MIROIR, il a été étudié les versants de vallée du Guil et de la vallée de l'Arly affectés par des mouvements gravitaires d'ampleurs variées (déformation de pentes, glissements profonds et chutes de blocs) et de dynamique très différentes (déplacements de quelques mm par an, à plusieurs dizaines de km/h) qui menacent les routes en fond de vallée.

Au sein de ce projet et du présent rapport, il a été recherché à caractériser la sensibilité aux événements climatiques des glissements de versant présents dans les Gorges de l'Arly (Savoie), ceci afin d'estimer ensuite à l'aide de scénarios GIEC de changements climatiques, une possible évolution à l'avenir de l'activité de ces mouvements de versant favorable ou défavorable (WorkPackage n°4 relatif aux simulation de scénarios de risques, avec prise en compte du dérèglement climatique).

Pour essayer de caractériser la sensibilité aux événements climatiques des glissements de versant, il a été tenté ici la méthode plus d'une fois éprouvée dans le passé avec un certain succès d'évaluation des seuils de pluviométrie à l'origine des déclenchements des mouvements de terrain (dit ici de manière abrégée et simplifiée par la suite, seuils hydroclimatiques).

Mais, si le nombre d'événements de mouvements de terrain inventoriés ici dans les Gorges de l'Arly est conséquent (largement plus de quelques dizaines), ils sont par contre en très grande majorité mal renseignés, tant en terme de dates d'activité qu'en connaissances techniques sur les déformations subies.

À une exception près, aucun site de glissement de terrain n'est suffisamment renseigné pour qu'une détermination individuelle de seuils hydroclimatiques soit possible. Et l'ensemble des glissements de versant seuls ne donnant pas de résultats satisfaisants de prime abord, il a été pris en compte également pour une première détermination de seuils les événements de chutes de blocs et de crues torrentielles déjà mieux datés, soit une recherche de seuil globalisé à l'ensemble des Gorges de l'Arly multi-sites et multi-aléa. Les meilleurs résultats obtenus sont pour un cumul de 90 jours de pluies, avec pour un premier seuil de vigilance de 431 mm (avec une prédiction efficace de 74 %) et pour le seuil d'alerte de 609 mm (mais avec une prédiction efficace réduite qu'à 26 %). Outre le manque de robustesse de ces seuils, les durées de dépassement de ces seuils respectivement 32 % de l'année pour le seuil de vigilance et 5 % du temps pour le seuil d'alerte exclut tout usage opérationnel de tel seuils.

Sur le seul site des Gorges de l'Arly où on dispose de données de chroniques de déformation, à savoir le glissement de Montgombert réactivé dès 2016 et toujours en activité résiduelle en 2020-2022 (acquisition en quasi-continu sur trois périodes consécutives entre 2016 et 2021), il a été fait une seconde recherche de seuils bien plus en phase avec la méthode utilisée au regard des données disponibles, prenant en compte non plus la date de déclenchement mais la date des phases d'accélération du glissement. Le calage des seuils s'est fait sur la première période de données en continu

de données en 2016-2018 (la plus active des trois) et pour un cumul de 3 jours de pluies, avec pour un premier seuil de vigilance de 14.5 mm (avec une prédiction efficace de 96 %) et pour le seuil d'alerte de 35 mm (mais avec une prédiction efficace de 64 %). Avec la dégradation du versant lors des 2 périodes, les seuils perdent ensuite en efficacité de prédiction (81% puis 71% pour le seuil de vigilance et 69 % puis même 30 % pour le seuil d'alerte). Mais si ces seuils s'avèrent bien plus fiables, là encore un usage opérationnel de ces seuils est difficilement envisageable, avec des dépassements du seuil de vigilance entre 27 % et 39 % du temps et de 7 à 15 % du temps pour les seuils d'alerte.

Pour privilégier une hiérarchisation des glissements de versant les plus sensibles, critiques dans la zone de Gorges de l'Arly (sur lesquels une attention accrue des acteurs locaux s'imposerait pour l'avenir), l'approche espérée de prise en compte du changement climatique trop aléatoire au regard des résultats obtenus avec ces seuils hydroclimatiques et autres sources d'incertitudes qui resteraient ensuite à gérer pour y parvenir, aboutit au final à une impasse devant la multiplication des verrous scientifiques. Au final, il a été préféré pour la suite du WP4 du projet MIROIR de recourir à une approche plus classique par modélisations de stabilité des versants (dans un premier volet à l'aide du logiciel Alice, puis avec un second volet ensuite de modélisation de propagation des masses glissées sous SHALTOP).

Le présent rapport propose aussi pour un usage éventuel ultérieur de la méthode des seuils hydroclimatiques et pour lever une partie des verrous toute une série de pratiques d'acquisitions nécessaires à renforcer pour aboutir à des résultats plus robustes et concluants.

Le présent document constitue un des livrables finaux du projet MIROIR.

Sommaire

1	Introduction	7
2	Seuils pluviométriques à l'échelle du bassin versant.....	11
2.1	Données événementiels et météorologiques.....	11
2.1.1	<i>Inventaire de glissements de terrain</i>	11
2.1.2	<i>Précipitations brutes</i>	17
2.1.3	<i>Précipitations efficaces</i>	17
2.2	Méthode.....	19
2.3	Seuils sur des événements pluvieux.....	19
2.4	Seuil sur les cumuls de précipitations.....	22
2.4.1	<i>Recherche du seuil le plus pertinent</i>	22
2.4.2	<i>Définition des seuils</i>	29
2.4.3	<i>Synthèse des résultats et perspectives</i>	32
3	Seuils pluviométriques à l'échelle locale.....	35
3.1	Données de déplacements et météorologiques.....	35
3.2	Seuils sur les cumuls de précipitation.....	39
3.3	Synthèse des résultats et perspectives	45
4	Conclusion	47
5	Bibliographie	49

Liste des figures

Figure 1 : 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).	9
Figure 2 : Profil topographique orthogonal à la vallée de l'Arly passant par le glissement de Cohennoz Montgombert en bleu (source Géoportail).	10
Figure 3 : Localisation des événements contemporains (> 1926) dans les Gorges de l'Arly et ses abords. Les numéros renvoient au tableau en figure 6.	12
Figure 4 : Base de données événementielle contemporaine : nombre d'évènements en fonction du type et de la durée.....	15
Figure 5 : Durée des glissements de terrain (ordonnée) en fonction du jour (abscisse) et du mois (symbole et couleur) de début répertorié.	15
Figure 6 : Nombre d'évènements répertoriés par mois (avec la date de début), en fonction de leur durée indiquée dans l'inventaire, et moyenne interannuelle des cumuls mensuels de précipitations entre 1959 et 2022 (courbe enveloppe avec les min et max).	16
Figure 7 : Nombre de glissements de terrains répertoriés par année (avec leur date de début), selon leur durée indiquée, et cumuls de précipitations.	17
Figure 8 : Résultats du code CTRL-T pour le catalogue complet des glissements.....	21
Figure 9 : Boîte à moustaches des précipitations moyennées (sur 1 à 150 jours), de 0 à 10 jours avant les glissements, et le reste du temps..	23

Figure 10 : Courbes ROC obtenues pour différentes durées de cumuls de précipitations (style et couleur des lignes).....	25
Figure 11 : ROC AUC obtenus pour l'ensemble des glissements répertoriés, en fonction de la durée des cumuls de précipitations (abscisse) et de la durée avant les glissements où les jours sont considérées comme des observations positives (ordonnée)..	27
Figure 12 : ROC AUC obtenus pour les glissements répertoriés d'une durée inférieure à 100 jours, en fonction de la durée des cumuls de précipitations (abscisse) et de la durée avant les glissements où les jours sont considérées comme des observations positives (ordonnée).....	28
Figure 13 : ROC AUC obtenus pour les glissements répertoriés d'une durée inférieures à 100 jours, en décalant leur date d'occurrence 15 jours après, et en utilisant les données de précipitations brutes.....	29
Figure 14 : Variations du TPR, PPV, CSI et dPF en fonction du seuil de cumul. Les seuils C1 et C2 correspondent respectivement au minimum de dPF et au maximum du CSI.....	31
Figure 15 : Simulation de déclenchement des seuils de vigilance (orange, cumul de 431 mm sur 90 jours) et d'alerte (rouge, cumul de 609 mm sur 90 jours) entre Janvier 2000 et Juin 2015....	32
Figure 16 : Simulation de déclenchement des seuils de vigilance (orange, cumul de 431 mm sur 90 jours) et d'alerte (rouge, cumul de 609 mm sur 90 jours) entre Juin 2015 et Juin 2020.....	32
Figure 17 : Nombre annuel de glissement de terrains répertoriés et nombre de jour par an de dépassement des seuils pluviométriques (431 mm et 609 mm) sur les cumuls de 90 jours.	34
Figure 18 : évolution du glissement de Montgombert entre novembre 2017 à gauche et janvier 2018 à droite (rapport SAGE RP7081c)	35
Figure 19 : évènement du 12 janvier 2018 vu depuis le fond de vallée de l'Arly à hauteur de la RD1212 coupée	36
Figure 20 : Coupe schématique de la zone de glissement (rapport SAGE RP7081c).....	36
Figure 21 : cibles du suivi tachéométrique entre 2016 et 2018 (rapport SAGE RP7081c).....	37
Figure 22 : Distance à la première position de 3 cibles topographiques sur le glissement de Montgombert, d'août 2016 à Avril 2018, avec les précipitations journalières.....	38
Figure 23 : Distance à la première position de 5 cibles topographiques sur le glissement de Montgombert, de Juillet 2019 à Août 2020	38
Figure 24 : Distance à la première position de 5 cibles topographiques sur le glissement de Montgombert, de Février 2021 à Novembre 2021.....	39
Figure 25 : Boîte à moustache des précipitations moyennées sur 1 à 20 jours pendant les périodes d'activité (bleu), les périodes d'accélération (orange) et le reste du temps (vert).....	40
Figure 26 : ROC AUC pour la détection des phases d'accélération du glissement de Montgombert entre août 2016 et mars 2018, en utilisant différentes durées de cumuls de précipitations..	41
Figure 27 : Variations du TPR, PPV, CSI et dPF en fonction du seuil sur le cumul de précipitations sur 3 jours.....	42
Figure 28 : Chronogramme des phases d'activité (en gris) et d'accélération (en noir) du glissement de Montgombert, pendant les trois périodes où des données de déplacement sont disponibles.	44

1 Introduction

Les versants de vallée du Guil et la vallée de l'Arly sont affectés par des mouvements gravitaires d'amplitudes variées (déformation de pentes, glissements profonds et chutes de blocs) et de dynamique très différentes (déplacements de quelques mm par an, à plusieurs dizaines de km/h) qui menacent les routes en fond de vallée. Ces phénomènes trouvent leur origine au début de l'Holocène, il y a 12 000 ans. À cette période, la fonte des glaciers dans les vallées a entraîné un rebond isostatique et une décompression latérale, qui ont eux-mêmes initié des grands mouvements de pentes gravitaires (DSGSD, Deep Seated Gravitational Slope Deformations). Le développement latéral et en profondeur de ces mouvements de pentes ont contribué au développement de glissements profonds en milieu de versant. Ces glissements sont actifs, avec des vitesses de quelques mm/an, et connaissent parfois des phases d'accélération. Ils sont associés à des glissements superficiels et des chutes de blocs notamment en bas de pente, par sapement de pied (incision du cours d'eau) et altération des matériaux schisteux. Si les crues soudaines de l'Arly favorisent la survenue et l'accélération de ces différents phénomènes par déstabilisation des berges, les différents mouvements gravitaires se produisent aussi dans des situations météorologiques moins extrêmes.

Ainsi, l'activité de chutes de blocs nécessite une attention soutenue au quotidien, notamment pour les gestionnaires de réseaux routiers départementaux. Des glissements de terrains profonds et superficiels se produisent aussi de manière +/- épisodique, et peuvent remobiliser des volumes significatifs de matériaux. C'est ce qui est effectivement arrivé dans les Gorges de l'Arly à partir de mai 2015 (plusieurs centaines de milliers de m³ partis à la rivière) et dans le Haut Guil au niveau du Pas de l'Ours à partir de 2014 et surtout en 2017-2018 (7 à 10 millions de m³ en tout). Ces zones sont très peu habitées, et malgré la menace sur la route en fond de vallée, les glissements n'ont jamais été significativement étudiés (hormis une surveillance instrumentale pour la gestion de crise). Dans le contexte actuel du changement climatique avec des épisodes pluvieux intenses plus réguliers, les glissements profonds pourraient être réactivés plus fréquemment et les glissements superficiels pourraient se produire en plus grand nombre. Les risques associés pour les infrastructures routières seraient alors plus importants, de même que pour les zones habitées à l'aval des vallées par charriage torrentiel des matériaux déposés en fond de vallée. Le projet européen MIROIR (2020-2023) a pour objectif d'améliorer l'état des connaissances de tels potentiels glissements de versant en masse pour permettre aux acteurs locaux (élus comme techniciens) de mieux s'y préparer et y faire face le jour échéant.

Dans le cadre de ce projet MIROIR, il est notamment prévu d'identifier et caractériser les différents compartiments de versant instable (WP3), puis d'aborder les perspectives d'évolution de ces masses instables à l'avenir, notamment dans un contexte de changement climatique (WP4). Apprécier la relative sensibilité des masses instables aux conditions climatiques via la caractérisation de seuils d'activation pluviométriques apparaît être une étape clé.

La détermination d'un seuil d'activation pluviométrique est une méthode introduite par (Caine, 1980), et elle est aujourd'hui largement utilisée pour estimer la quantité critique de précipitations pouvant entraîner une déstabilisation ou « phase d'accélération » d'un glissement de terrain (Aleotti, 2004; De Vita *et al.*, 1998; Frattini *et al.*, 2009; Guzzetti *et al.*, 2008; Segoni *et al.*, 2018; Terlien, 1998; Vallet *et al.*, 2016; Wieczorek *et al.*, 2000). Les seuils d'activation pluviométriques sont principalement utilisés pour les glissements de terrain peu profonds. Ils sont basés sur un indice combinant l'intensité ou le cumul et la durée des épisodes pluviométriques. La caractérisation d'un seuil d'activation météorologique ou pluviométrique consiste à définir la limite de séparation entre les conditions pluviométriques qui ont et qui n'ont pas déclenché la déstabilisation (phase d'accélération). La détermination d'un seuil d'activation pluviométrique

nécessite un historique d'évènements construit à partir de mesures d'accélération ou de signes morphologiques d'activité (ou les deux), pour lesquels les conditions pluviométriques sont connues ou ont été estimées. La fiabilité des seuils ainsi définis dépend donc directement de la quantité et de la qualité de cet historique. Ainsi un seuil d'activation pluviométrique permet, sur la base des prévisions météorologiques, de déterminer en avance si les conditions météorologiques sont favorables ou défavorables vis-à-vis des conditions de stabilité. C'est un outil qui peut être intégré dans un système de vigilance et ensuite d'alerte.

Les seuils de précipitations peuvent être définis soit par des approches empiriques (statistiques), soit par des approches déterministes (basées sur la physique), au niveau d'un bassin de risques homogène ou pour un versant instable spécifique. Les mouvements de terrain profonds (cas du Vescorn, Maurin et al., 2022)) impliquent généralement des relations hydromécaniques complexes entre les précipitations et la déformation. Pour ces glissements de terrain, les approches déterministes à seuil basées sur des modèles hydromécaniques sont difficiles à mettre en œuvre ou à calibrer en raison de la rareté ou de l'absence de paramètres hydrodynamiques et géotechniques, ainsi que de la forte hétérogénéité spatiale de ces paramètres. Ainsi, dans le cas d'un historique suffisant de données, la définition d'un seuil statistique local (propre à un glissement de terrain) est à privilégier car elle peut implicitement prendre en compte ces relations : elle ne nécessite pas d'avoir une connaissance *a priori* du comportement hydromécanique du glissement de terrain.

Les propriétés hydrauliques d'un hydrosystème peuvent moduler de manière significative la réponse aux sollicitations météorologiques (qualifiées par leur intensité et leur durée notamment). Par exemple, compte tenu du temps nécessaire à l'infiltration des eaux pluviales, la réponse hydrodynamique (état de saturation) d'un aquifère (et donc la réponse dynamique d'un glissement intersectant cet aquifère) dépend plus du cumul de précipitations sur une longue période (plusieurs jours/semaines ou même mois), que d'un seul événement pluvieux, même s'il est intense. (Martelloni *et al.*, 2012; Nafarzadegan *et al.*, 2013; Segoni *et al.*, 2018; Terlien, 1998; Vallet *et al.*, 2016; Van Asch *et al.*, 1999). Par conséquent, les données de pluviométrie cumulées sont appropriées pour les études de glissements de terrain profonds. La durée de la période de précipitations à investiguer dépend des conditions intrinsèques des glissements de terrain et est à évaluer au cas par cas.

Pour cette tâche du projet MIROIR, une approche statistique d'évaluation des seuils d'activation a été mise en œuvre en complément des approches à base physique réalisées lors de la phase d'identification et de caractérisation des masses instables dans les Gorges de l'Arly (WP3). Deux cas sont considérés :

- **Chapitre 2** : détermination d'un seuil de déclenchement à l'échelle d'un bassin de risques homogène correspondant aux Gorges de l'Arly (entre Ugine et Saint Nicolas-la-Chapelle, Figure 1), à partir d'une base de données d'événements de différents types (glissements profonds, superficiels, chutes de blocs). La qualité et l'exhaustivité de l'inventaire ne permet pas de déterminer un seuil spécifique à chaque type de mouvement de terrain ;
- **Chapitre 3** : détermination d'un seuil de déclenchement à l'échelle d'un versant instable spécifique : le glissement de Montgombert, qui est un glissement perché relativement superficiel (Figure 2).

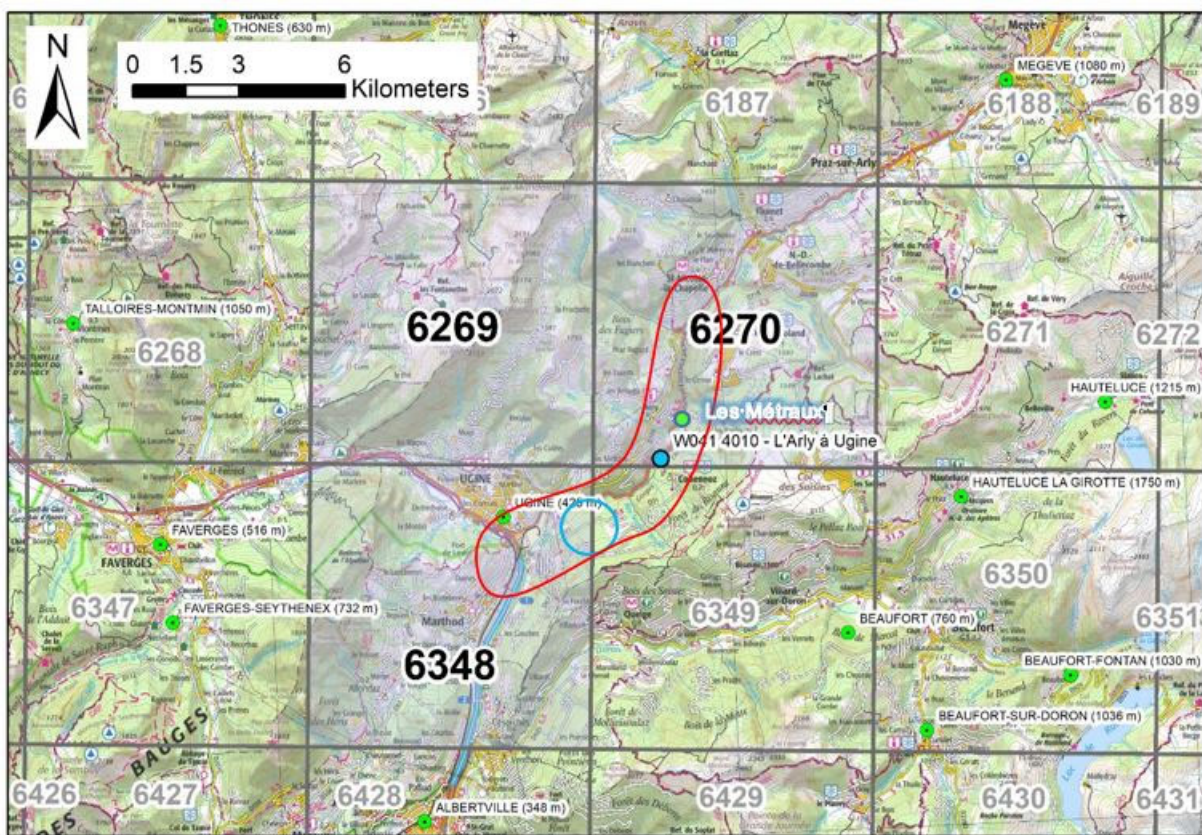


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude (Gorges du Val d'Arly en rouge et glissement du Montgombert en bleu) ainsi que des données météorologiques (mailles SAFRAN et stations météorologiques (points verts) et hydrométriques (point bleu)).

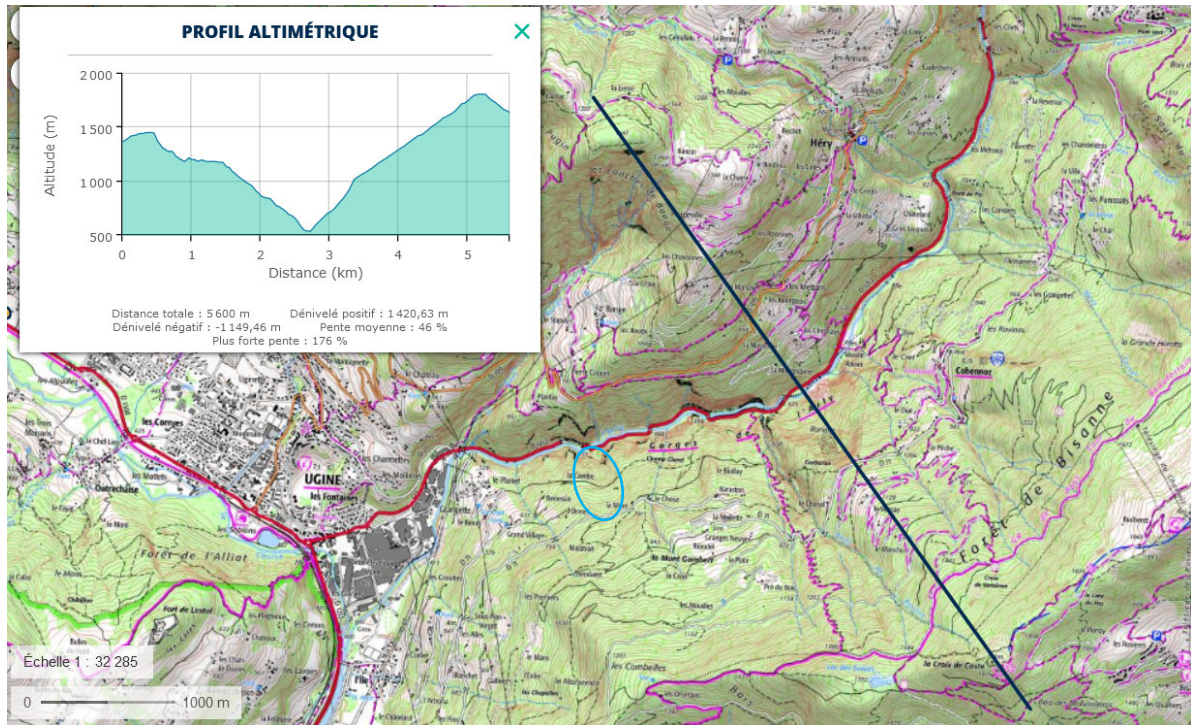


Figure 2 : Profil topographique orthogonal à la vallée de l'Arly passant par le glissement Montgombert en bleu (source Géoportail)

Dans chaque cas, par soucis d'exhaustivité compte tenu de la variabilité des phénomènes considérés, les seuils statistiques ont été évalués en utilisant d'une part le cumul/durée des épisodes pluvieux, et d'autre part les cumuls des précipitations sur des fenêtres de temps variables.

2 Seuils pluviométriques à l'échelle du bassin versant

2.1 DONNÉES ÉVÉNEMENTIELLES ET MÉTÉOROLOGIQUES

2.1.1 Inventaire de glissements de terrain

Un premier inventaire des mouvements de terrain contemporains a été réalisé grâce aux données collectées issues des bases de données de mouvements de terrain BD-MVT et du RTM, complétées par la monographie RTM de décembre 2014 sur le Nant Cortay (Roudnitska et al., 2014), des principaux événements rocheux affectant la RN212 entre 1976 et 2001, la consultation de la presse ancienne numérisée (<https://www.lectura.plus/>) et enfin d'articles de presse récents. Les mouvements de terrain les plus anciens datent de 1905.

Ce premier inventaire des événements survenus dans les Gorges de l'Arly a été complété en parallèle par une étude historique de collecte d'informations dans les archives historiques publiques (Acthys, 2021). Cette consultation des documents historiques a permis de recueillir en priorité et de manière exhaustive les glissements de terrain, mais aussi au passage les événements de chutes de blocs ainsi que les événements de crue torrentielle, pour un premier jeu de 85 événements entre 1721 et 1931. Ces données historiques concernent avant tout les crues et les éboulements et très marginalement les glissements de terrain (que 3 occurrences). C'est seulement après 1926 que les glissements de terrain commencent en nombre à représenter une part significative des événements signalés. La date fournie de début de l'événement est souvent imprécise (au mois, saison ou année près¹). Et la date de fin de l'événement est rarement connue et a été alors estimée².

En intégrant les événements déjà connus depuis 1905, c'est un inventaire au final de 171 mouvements de terrain et crues³, répartis sur trois périodes successives (Tableau 1 et Figure 3):

- 82 événements historiques antérieurs à 1926 ;
- 46 événements anciens compris entre 1926 antérieurs à 1956 ;
- et ensuite 53 événements plus récents (jusqu'à avril 2022).

Les données pluviométriques journalières récupérées n'étant disponibles en continu qu'à partir de 1959, seuls les événements postérieurs au 1^{er} Janvier 1959 sont conservés ensuite dans l'étude (Figure 3), soit 53 événements sur les 89 événements contemporains.

¹ Il s'agit de plus de la date lors du constat d'observation du désordre et pas forcément à la date de déclenchement.

² Pour les crues et chutes de blocs, la date de fin estimée est généralement celle du début sauf information fournie contraire. Pour les glissements de terrain, on a souvent une idée approchée de la période d'activité du glissement pour les plus actifs dans les documents fournis (arrondis au mois/saison :année/près) et pour les glissements ponctuels, la durée d'activité est par défaut arrondi à un mois minima si pas d'autres informations disponibles hors du signalement du déclenchement,

³ En général, les événements sont très mal décrits et pas tous clairement localisés : les informations techniques (profondeurs, étendues, glissement plan/ rotationnel....) sont la plupart du temps absentes. Il a été néanmoins possible d'évaluer systématiquement, mais de manière plus ou moins incertaine, le volume de l'événement (hors crue).

Étude de seuils statistiques de précipitations déclenchant ou aggravant la stabilité des versants du val d'Arly (Projet MIROIR)

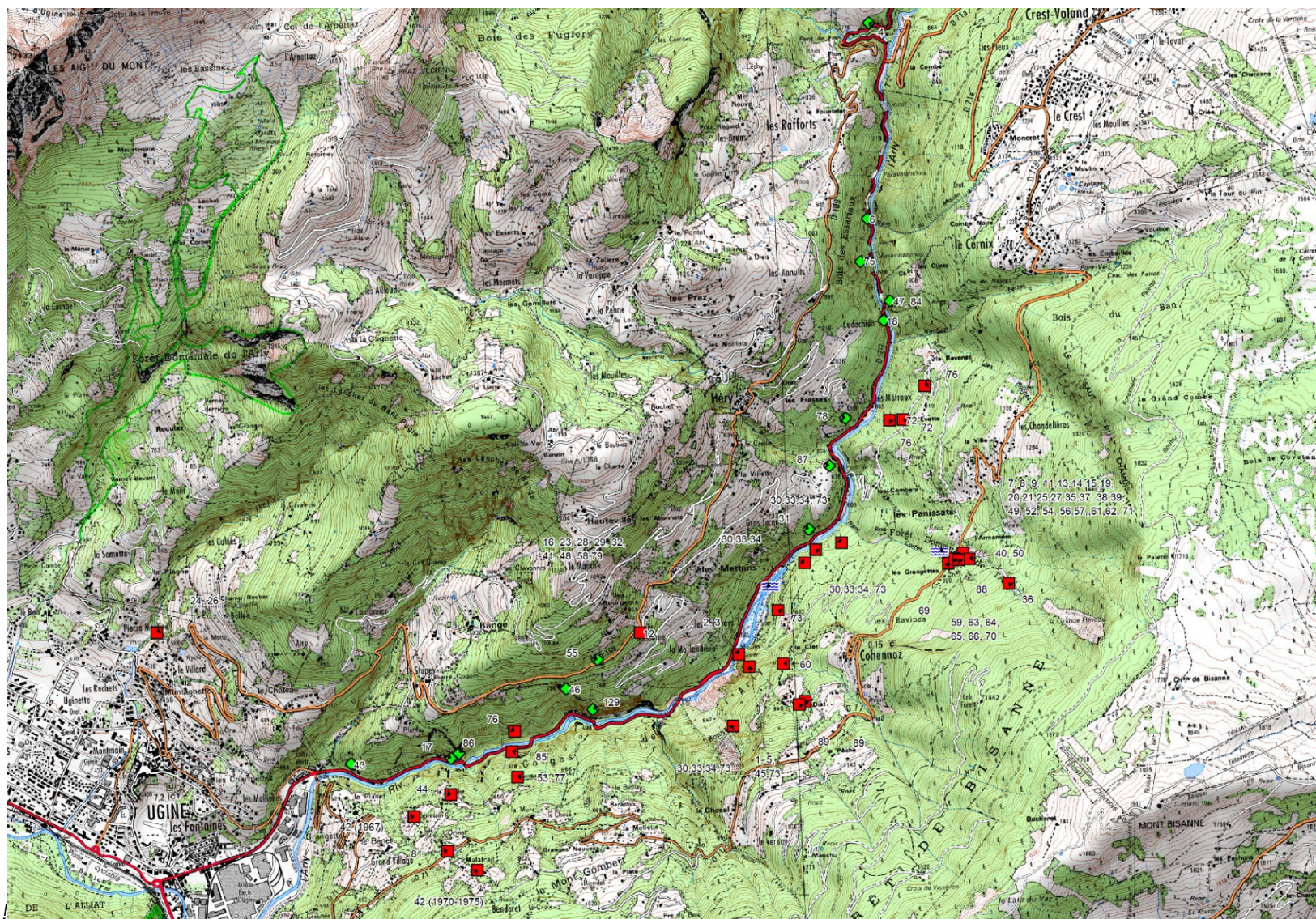


Figure 3 : Localisation des évènements contemporains (> 1926) dans les Gorges de l'Arly et ses abords. Les numéros renvoient au tableau en figure 6.

Tableau 1 : Synthèse de la base de données événementielle

Code	Type	Date début	Date fin	Durée	Information sur le lieu	Information sur l'intensité	Jour début	Mois début	Utilisation seuil
1	glissement	01/12/1930	01/09/1931	274	Extension est glissement Cohennoz	qq dizaines à centaine de milliers m3	1er jour du mois	12	Exclu inf. 1959
2	glissement	01/01/1926	?	0	Poussée sur les barrages de Moulin Ravier	juste en PI	1er jour du mois	1	Exclu inf. 1959
3	glissement	01/01/1927	?	0	Poussée sur les barrages de Moulin Ravier	juste en PI	1er jour du mois	1	Exclu inf. 1959
4	éboulement	01/01/1930	?	0	Eboulement Amont vers pont de flon	400 m3	1er jour du mois	1	Exclu inf. 1959
5	glissement	15/12/1930	31/05/1933	898	Extension glissement Cohennoz coté MR	2 cours d'eaux déviés	15ème jour du mois	12	Exclu inf. 1959
6	éboulement	08/03/1931	09/03/1931	1	Eboulements amont Cliets	150 m3 environ	Autre	3	Exclu inf. 1959
7	crue	22/06/1932	29/06/1932	7	crues du Nant Cortay	mais aussi le 29 juin	Autre	6	Exclu inf. 1959
8	crue	02/07/1932	?	0	crues du Nant Cortay	0	Autre	7	Exclu inf. 1959
9	crue	03/08/1934	08/08/1934	5	crues du Nant Cortay	mais aussi le 08 aout	Autre	8	Exclu inf. 1959
10	éboulement	28/02/1935	?	0	Eboulement Gorges de l'Arly	250 m3	Autre	2	Exclu inf. 1959
11	crue	03/06/1935	31/10/1935	150	crues du Nant Cortay	juin, aout, septembre, octobre	Autre	6	Exclu inf. 1959
12	glissement	31/12/1935	07/01/1936	7	glissement coulées RD109 aval Hery	0	Autre	12	Exclu inf. 1959
13	crue	26/05/1937	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	5	Exclu inf. 1959
14	crue	10/06/1938	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
15	crue	10/06/1938	?	0	crue Nant Cortay	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
16	crue	06/07/1938	?	0	crue sur l'Arly	barrage Arly détruit	Autre	7	Exclu inf. 1959
17	éboulement	20/01/1939	?	0	Eboulement Combe Noire	0	Autre	1	Exclu inf. 1959
18	éboulement	22/01/1939	?	0	éboulement amont Moulin Ravier	150 m3	Autre	1	Exclu inf. 1959
19	crue	09/06/1939	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
20	crue	30/06/1939	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
21	crue	16/07/1939	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	7	Exclu inf. 1959
22	éboulement	06/09/1940	?	0	Eboulement au Moulin Ravier	0	Autre	9	Exclu inf. 1959
23	crue	15/09/1940	?	0	crue Arly	0	15ème jour du mois	9	Exclu inf. 1959
24	glissement	13/06/1941	?	0	glissement Nant des Bauges à Ugine	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
25	crue	25/06/1941	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
26	éboulement	08/08/1941	?	0	Eboulement (Nant des Bauges ??) + apports MR	150 m3 et +	Autre	8	Exclu inf. 1959
27	crue	12/06/1942	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	6	Exclu inf. 1959
28	crue	07/11/1944	?	0	crue Arly	0	Autre	11	Exclu inf. 1959
29	crue	07/12/1944	?	0	crue Arly	0	Autre	12	Exclu inf. 1959
30	glissement	01/01/1946	?	0	Activités des versants (glissement de Moulin Ravier)	pont détruit lors d'une crue	1er jour du mois	1	Exclu inf. 1959
31	éboulement	01/04/1948	?	0	Eboulement au Moulin Ravier	5000 à 9000 m3	1er jour du mois	4	Exclu inf. 1959
32	crue	11/11/1949	?	0	crue Arly	0	Autre	11	Exclu inf. 1959
33	glissement	05/09/1950	15/09/1950	10	Activités des versants (glissement de Moulin Ravier)	fin des prises d'eau des Usines	Autre	9	Exclu inf. 1959
34	glissement	01/02/1954	31/12/1959	2159	glissement de Moulin Ravier actif (flanc amont)	RN202 encore coupée en 1959 !!	1er jour du mois	2	Exclu inf. 1959
35	crue	26/05/1955	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	5	Exclu inf. 1959
36	glissement	01/01/1956	16/07/1956	197	Erosion en amont du Nant Cortay	Erosion de berge	1er jour du mois	1	Exclu inf. 1959
37	crue	14/08/1959	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	8	inf. 100 j
38	glissement	01/11/1960	15/01/1961	75	glissement au Nant Cortay	(anthropique a priori)	1er jour du mois	11	inf. 100 j
39	crue	26/07/1963	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	7	inf. 100 j
40	glissement	01/03/1966	01/07/1966	122	glissement au Nant Cortay	0	1er jour du mois	3	sup. 100 j
41	crue	21/09/1968	23/09/1968	2	crue Arly	entre vincenale et centenale	Autre	9	inf. 100 j
42	glissement	01/01/1970	01/01/1974	1461	glissement Malatrait Benessin	0	1er jour du mois	1	sup. 100 j
43	éboulement	23/05/1976	?	0	Eboulement dans les gorges	que BDMVT....	Autre	5	inf. 100 j
44	glissement	01/04/1981	30/07/1981	120	glissement aval Benessin	0	1er jour du mois	4	sup. 100 j
45	glissement	05/10/1981	25/10/1981	20	Réactivation glissement berge Panissats	0	Autre	10	inf. 100 j
46	éboulement	30/11/1981	?	0	Eboulement fonds des Gorges Ugine	100 m3	Autre	11	inf. 100 j
47	éboulement	09/01/1983	?	0	Eboulement en amont des Cliets	200 m3	Autre	1	inf. 100 j
48	crue	26/11/1983	27/11/1983	1	crue Arly	0	Autre	11	inf. 100 j
49	crue	23/05/1986	?	0	Forte crue du Nant Cortay	0	Autre	5	inf. 100 j
50	glissement	14/02/1990	14/05/1990	89	glissement au Nant Cortay	0	Autre	2	inf. 100 j
51	glissement	15/10/1992	01/12/1992	47	glissement au Nant Cortay	0	15ème jour du mois	10	inf. 100 j
52	crue	01/05/1994	31/05/1994	30	forte crue de mai 1994 du Nant Cortay	0	1er jour du mois	5	inf. 100 j
53	glissement	01/01/1999	31/12/1999	364	glissement au Montgombert	0	1er jour du mois	1	sup. 100 j
54	glissement	14/05/1999	15/05/1999	1	Forte crue du Nant Cortay	0	Autre	5	inf. 100 j
55	éboulement	26/05/1999	?	0	Amont RD	0	Autre	5	inf. 100 j
56	crue	21/03/2001	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	3	inf. 100 j
57	crue	07/09/2002	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	9	inf. 100 j
58	crue	13/01/2004	14/01/2004	2	crue Arly	5000 m3	Autre	1	inf. 100 j
59	glissement	15/10/2005	15/04/2006	182	glissement au Nant Cortay	0	15ème jour du mois	10	sup. 100 j
60	glissement	15/03/2006	15/05/2006	61	glissement du chemin Diat	0	15ème jour du mois	3	inf. 100 j
61	crue	16/05/2006	?	0	crue du Nant Cortay	6000-8000 m3	Autre	5	inf. 100 j
62	crue	14/07/2006	?	0	crue du Nant Cortay	0	Autre	7	inf. 100 j
63	glissement	01/03/2007	01/06/2007	92	glissement au Nant Cortay	0	1er jour du mois	3	inf. 100 j
64	glissement	01/03/2008	30/04/2008	60	glissement au Nant Cortay	0	1er jour du mois	3	inf. 100 j
65	glissement	08/09/2008	15/10/2008	37	glissement aval RD au Nant Cortay	0	Autre	9	inf. 100 j
66	glissement	15/04/2010	01/07/2010	77	glissement au Nant Cortay (talus amont RD)	0	15ème jour du mois	4	inf. 100 j
67	éboulement	27/01/2012	?	0	Chute de bloc avec 4 x4 détruit	+/- 1m3	Autre	1	inf. 100 j
68	éboulement	23/01/2013	?	0	Eboulement aux Cliets	10 000 m3	Autre	1	inf. 100 j
69	glissement	01/03/2013	15/05/2013	75	glissement au Nant Cortay	0	1er jour du mois	3	inf. 100 j
70	glissement	01/03/2014	15/05/2014	75	glissement au Nant Cortay	0	1er jour du mois	3	inf. 100 j
71	crue	08/09/2014	?	0	crue du Nant Cortay	6000-8000 m3	Autre	9	inf. 100 j
72	glissement	31/10/2014	31/03/2015	151	Metraux glissement printemps 2015	le plus amont de 2016 (+/- 6000 m3)	Autre	10	sup. 100 j
73	glissement	01/05/2015	03/05/2016	368	crue exceptionnelle Arly et glissements (gliss. / coulée)	> 300 000 m3	1er jour du mois	5	sup. 100 j
74	glissement	01/01/2016	31/01/2016	30	Erosion du pied du glissement (Panissats)	0	1er jour du mois	1	inf. 100 j
75	éboulement	22/01/2016	?	0	Gorges de l'Arly (amont)	0	Autre	1	inf. 100 j
76	glissement	02/03/2016	01/09/2020	1644	Métraux	diz milliers à qq diz milliers m3	Autre	3	sup. 100 j
77	glissement	16/03/2016	31/12/2022	2481	Montgombert	0	Autre	3	sup. 100 j
78	éboulement	01/01/2018	01/02/2018	31	Gorges de l'Arly	0	1er jour du mois	1	inf. 100 j
79	crue	01/01/2018	01/02/2018	31	crue Arly	0	1er jour du mois	1	inf. 100 j
80	éboulement	09/02/2018	?	0	Gorges de l'Arly	0	Autre	2	inf. 100 j
81	glissement	15/02/2018	31/03/2018	44	Montgombert Coulée sur la RD1212 (glissement / coulée)	qq 100 m3	15ème jour du mois	2	inf. 100 j
82	éboulement	12/03/2018	?	0	Gorges de l'Arly	qq dizaines à centaine m3	Autre	3	inf. 100 j
83	glissement	01/02/2018	31/05/2018	119	Amont Métraux	qq centaines voire mille m3 ??	1er jour du mois	2	sup. 100 j
84	éboulement	09/02/2019	?	0	Eboulement aux Cliets	5000-8000 m3	Autre	2	inf. 100 j
85	glissement	01/04/2021	?	0	Combe Noire face à glissement Montgombert	qq dizaines à centaine m3	1er jour du mois	4	inf. 100 j
86	gliss. / éboulement	08/07/2021	?	0	débouché amont casquette aval Combe Noire	30 m3	Autre	7	inf. 100 j
87	éboulement	04/08/2021	?	0	100-300 m aval des Métraux	4 à 5 m3	Autre	8	inf. 100 j
88	glissement	01/01/2022	01/04/2022	90	Nant Cortay talus amont RD71	0	1er jour du mois	1	inf. 100 j
89	glissement	01/01/2022	01/04/2022	90	Diat	0	1er jour du mois	1	inf. 100 j

Parmi ces 53 événements :

- 43 (81%) ont une durée renseignée inférieure à 100 jours, et donc 10 (19 %) ont une durée supérieure à 100 jours (Figure 4);
- 19 (35%) ont une date de début correspondant au 1^{er} jour du mois, et 5 (9%) au 15^{ème} jour du mois (Figure 5);
- 13 (24%) ont une date de début en Janvier, et 28 (52%) entre Janvier et Mars (Figure 6).
- 20 (22.5 %) sont des éboulements, 37 (42 %) sont des glissements/coulées, 31 (37 %) sont des crues et enfin 1 (1 %) événement est mixte type glissement / éboulement (Figure 4).

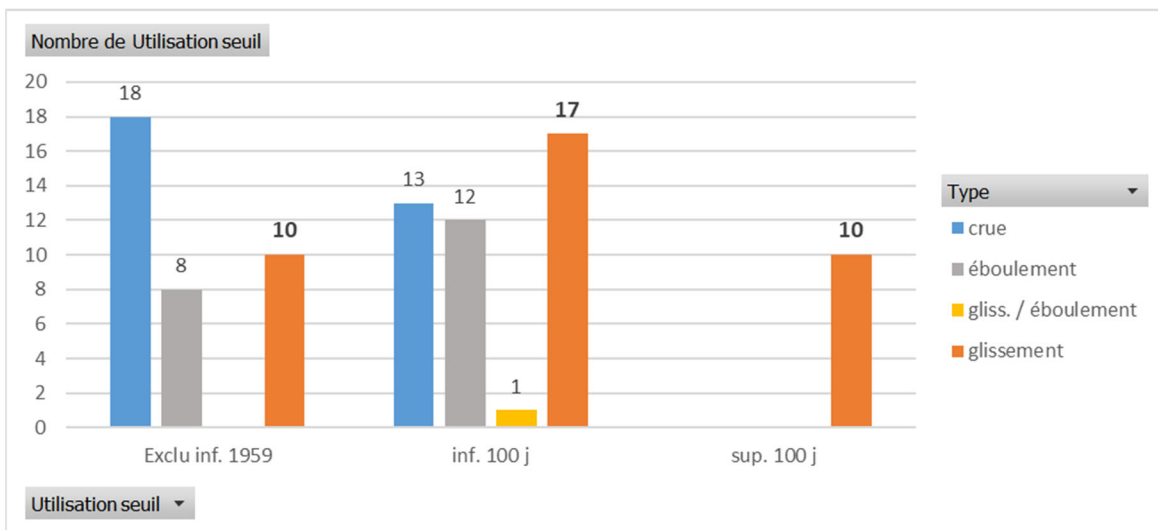


Figure 4 : Base de données événementielle contemporaine : nombre d'événements en fonction du type et de la durée

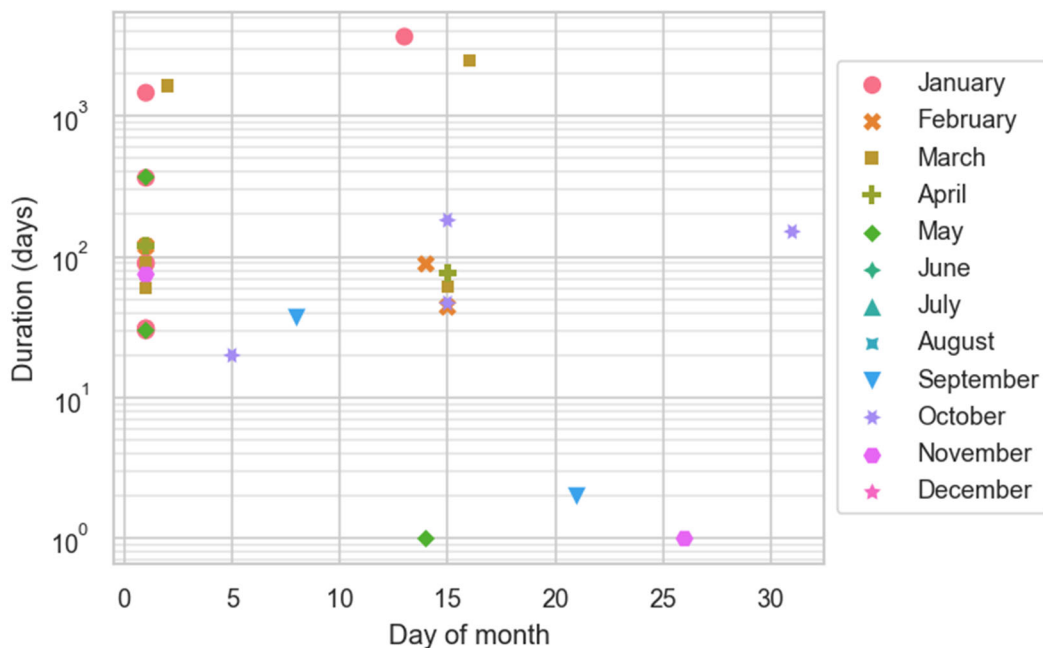


Figure 5 : Durée des glissements de terrain (ordonnée) en fonction du jour (abscisse) et du mois (symbole et couleur) de début répertorié.

L'inventaire des mouvements de terrain dans le Val d'Arly présente cependant les limites suivantes :

- **Biais historique** (Figure 7): davantage d'événements sont répertoriés après les années 2000 avec des descriptions plus complètes (amélioration du recensement et de la bancarisation) ;
- **Imprécision sur la date** (Figure 5):
 - De nombreux évènements sont signalés avec des dates de démarrage au 1^{er} ou au 15^{ème} jour du mois : cette information correspond à des évènements s'étant produits dans la quinzaine de jours suivant ;
 - Les durées d'activité sont évaluées sur des durées souvent importantes mais surtout incertaines. Cette incertitude est corrélée à une incertitude sur la date de début : 9 des 10 évènements avec une durée supérieure à 100 jours ont une date de début au 1^{er} ou au 15 du mois.
- **Diversité des mouvements de terrain recensés** : la typologie (glissement / crue / éboulement) et l'intensité des évènements sont renseignées avec une précision différente selon les cas).

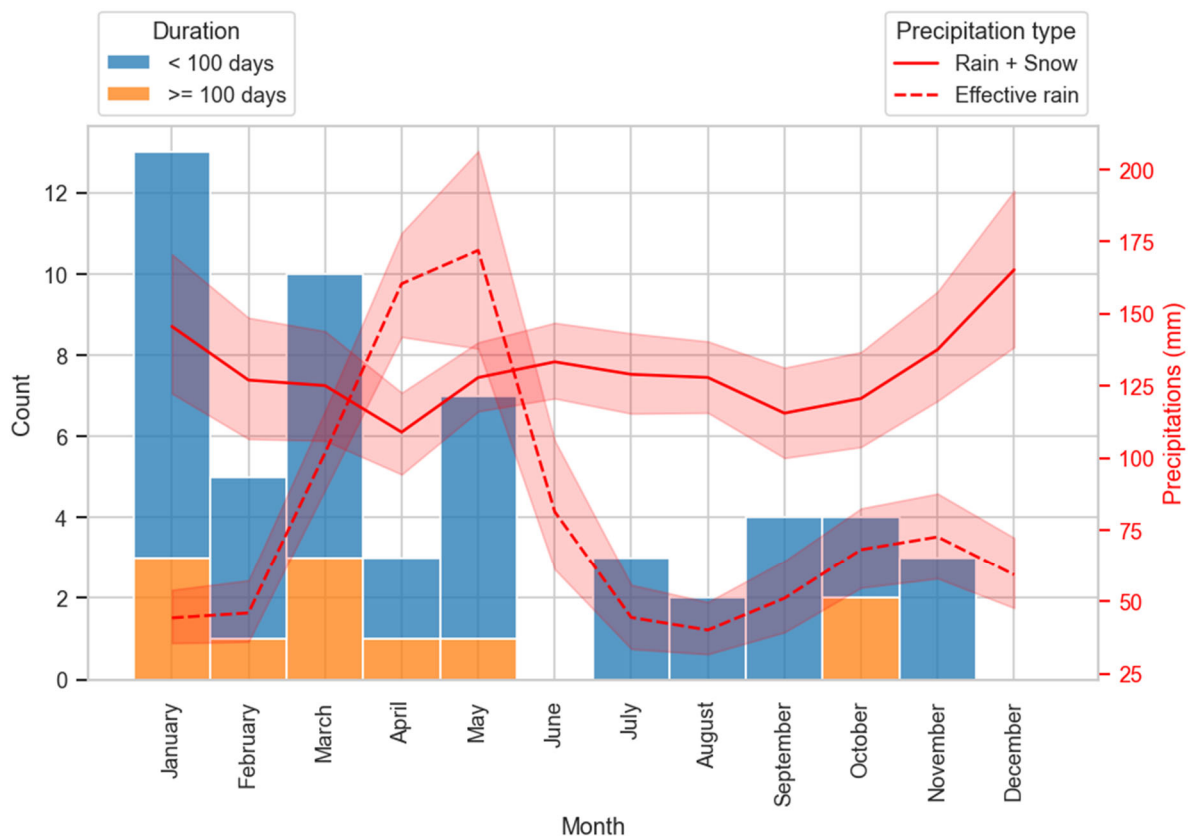


Figure 6 : Nombre d'évènements répertoriés par mois (avec la date de début), en fonction de leur durée indiquée dans l'inventaire, et moyenne interannuelle des cumuls mensuels de précipitations entre 1959 et 2022 (courbe enveloppe avec les min et max).

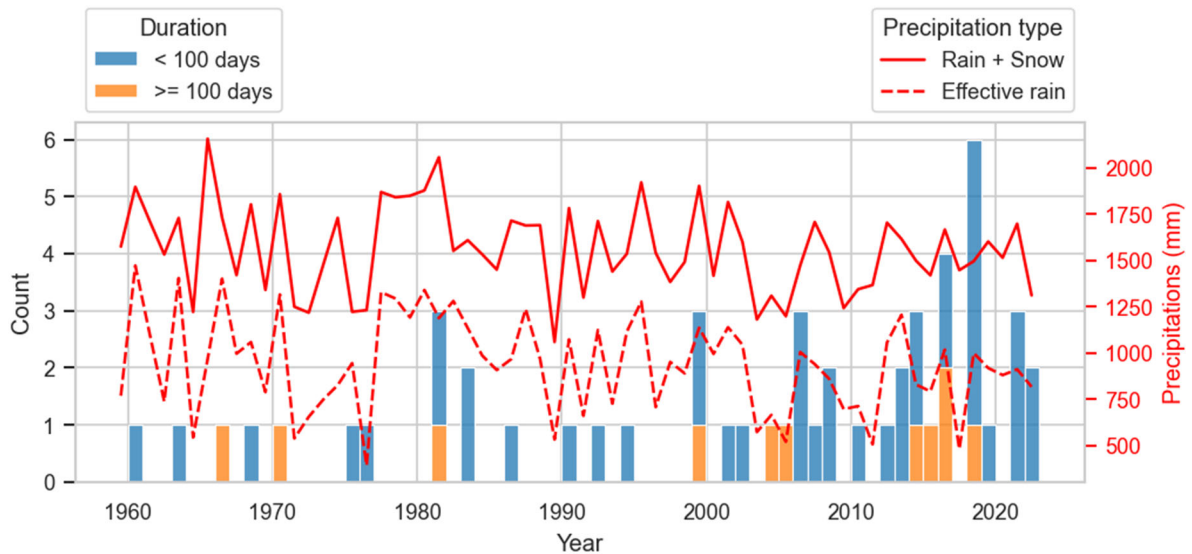


Figure 7 : Nombre de glissements de terrains répertoriés par année (avec leur date de début), selon leur durée indiquée, et cumuls de précipitations.

2.1.2 Précipitations brutes

La moyenne journalière des données de précipitations SAFRAN de Météo-France des mailles 6348, 6269 et 6270 (mailles de 8 km de côté) sur la période de 1959 à 2022 a été utilisée comme donnée d'entrée pour cette étude (Figure 1). Les données de précipitations brutes montrent une intensité plus forte sur les mois hivernaux (novembre à janvier) alors que sur le reste de l'année les cumuls mensuels ne varient pas significativement (Figure 6). Aucune tendance significative sur les cumuls annuels ne peut être identifiée entre 1959 et 2022 (Figure 7). Les mailles à l'ouest de la vallée de l'Arly ont été privilégiées. La maille 6349 bien que couvrant des glissements de terrain du Val d'Arly a été exclue car majoritairement centrée sur la vallée du Doron et non celle de l'Arly.

2.1.3 Précipitations efficaces

Les données de précipitations efficaces ont été estimées sur la base du modèle hydrogéologique GARDÉNIA. GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées (<https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>). Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs. Les paramètres du modèle ont été calés à l'aide des données journalières de débit de la station hydrométriques de l'Arly à Ugine (W04104010 - <https://hydro.eaufrance.fr/sitehydro/W0414010/fiche> - Figure 1). Les précipitations efficaces estimées dans cette étude intègrent une simulation du stockage ou de la fonte du manteau neigeux qui est un processus déterminant en zone de montagne. En plus des précipitations, les données de température et d'évapotranspiration SAFRAN des mailles 6348, 6269 et 6270 (mailles de 8 km de côté) de 1959 à 2022 ont été utilisées comme données d'entrée du modèle GARDÉNIA.

Le calage du modèle Gardénia sur les débits mesurés dans l'Arly a conduit à la pondération suivante pour les chroniques SAFRAN: $0.11 \cdot 6348 + 0.16 \cdot 6269 + 0.73 \cdot 6270$. Le modèle le plus simple a été utilisé (un réservoir) et la superficie du bassin versant a été estimée par modélisation (paramètre de calage).

Les précipitations efficaces montrent une répartition saisonnière très différente de celles des précipitations brutes (Figure 6) :

- un pic entre avril/mai correspondant à la fonte du manteau neigeux ;
- un creux en juillet/août provoqué par les fortes intensités d'évapotranspiration liées aux chaleurs estivales et à la croissance de la végétation.

Les données de précipitations et l'évaluation des précipitations efficaces utilisées dans cette étude présentent de fortes incertitudes de représentativité :

- **Disparité spatiale:** les données SAFRAN sont des données globalisées à l'échelle d'une maille qui ne sont pas systématiquement représentatives des épisodes pluvieux locaux notamment au niveau des glissements de terrain. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas d'une vallée encaissée comme l'Arly où les variations spatiales peuvent être très significatives. ;
- **Simulation du stockage et de la fonte du manteau neigeux:** la vallée de l'Arly présente de fortes variations d'altitude (500 à 1800 m environ - Figure 2) impliquant une temporalité différente du stockage et de la fonte du manteau neigeux. Cependant l'estimation a été globalisée pour l'ensemble des 3 mailles SAFRAN et présente ainsi de fortes incertitudes d'un point de vue local ;
- **Estimation des précipitations efficaces :** le modèle utilisé dans cette étude est globalisé avec une calibration à une station hydrométrique sur l'Arly, ne reflétant pas les processus hydrogéologiques locaux et spécifiques des glissements de terrain de la vallée.

L'utilisation des données SAFRAN plutôt que des chroniques de précipitations mesurées a été contrainte :

- par l'absence de stations météorologiques locales anciennes ;
- la nécessité d'avoir des chroniques qui remontent le plus loin possible dans le passé pour valoriser les données événementielles de l'inventaire mouvement de terrain.

2.2 MÉTHODE

Plusieurs méthodes ont été testées pour analyser la corrélation entre les précipitations et l'occurrence de glissements de terrain à l'échelle du bassin versant de l'Arly. Les dates des glissements ont été comparées :

- **Section 2.3** : à des événements pluvieux définis par une durée et un cumul de précipitations, grâce à l'outil CTRL-T (Barthelemy, 2021; Melillo *et al.*, 2018) ;
- **Section 2.4** : à des cumuls pluviométriques sur des périodes précédant un événement glissement de terrain (de 1 à une centaine de jours).

Dans chaque cas, deux types de chroniques pluviométriques sont considérées :

- les chroniques de précipitations brutes (pluie et neige) – parfois simplement nommées « précipitations » dans le reste du rapport;
- les chroniques reconstruites de précipitations efficaces.

Compte tenu de l'incertitude sur le catalogue des glissements de terrain et en particulier de l'incertitude sur la typologie, des tests sont réalisés avec l'ensemble des événements du catalogue. En particulier, les événements de crue sont conservés : ce ne sont pas des mouvements gravitaires, mais les crues sont souvent associées à des déstabilisations le long des berges, ou à des déstabilisations plus haut sur les versants qui n'ont pas été identifiées (les impacts directs de la crue éclipsent les autres événements dans les journaux locaux)⁴. Une distinction est néanmoins faite entre les événements dont la durée renseignée est supérieure ou inférieure à 100 jours. Les dates utilisées sont soit celles du catalogue, soit celles du catalogue décalées 15 jours plus tard (considérant qu'une date renseignée pour le premier jour du mois indique parfois que le glissement a eu lieu dans la première quinzaine du mois).

Huit tests sont donc réalisés à chaque fois, en combinant :

- les deux types de chroniques de précipitations (précipitations brutes issues des données SAFRAN ou précipitations efficaces) ;
- les deux types de catalogues (complets ou restreints en enlevant les événements de durée supérieure à 100 jours) ;
- les deux types de dates (celles du catalogue ou décalées de 15 jours).

2.3 SEUILS SUR DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX

La première méthode utilisée pour tenter d'identifier des seuils pluviométriques de déclenchement se base sur des événements pluvieux, définis par une durée et un cumul de précipitations. Cette analyse est réalisée avec l'outil CTRL-T, développé par Melillo *et al.* (2018), et testée au BRGM dans le cadre d'un stage de Master (Barthelemy, 2021).

L'outil CTRL-T opère en trois étapes :

1. Définition des événements pluvieux à partir des chroniques de précipitations.
2. Identification des événements pluvieux associés à des glissements de terrain : pour chaque glissement, quand c'est possible, plusieurs événements pluvieux possiblement

⁴ La méthodologie présentée plus bas a été testée en enlevant du catalogue les événements de crue, sans que cela ne change significativement les résultats sur les seuils retenus.

associés au glissement sont identifiés (MRC, Multiple Rainfall Conditions). Parmi ces événements pluvieux, un par glissement est retenu comme l'événement le plus probablement associé au glissement (MPRC, Most Probable Rainfall Conditions).

3. Détermination de seuils pluviométriques de déclenchement à partir des MPRC.

L'étude réalisée par Barthelemy (2021) avec CTRL-T se concentrait sur des glissements dans les Alpes, avec des données de précipitations de type SAFRAN, comme dans ce travail. Les mêmes paramètres ont donc été retenus pour la présente étude. Ces paramètres incluent par exemple :

- durées minimales pour séparer des événements de précipitations en été et en hiver ;
- durée minimale d'un événement ;
- cumuls minimaux pour considérer qu'un événement pluvieux ait pu déclencher un glissement.

Plus de détails sur la méthode sont donnés dans (Barthelemy, 2021) et (Melillo *et al.*, 2018). Les résultats des deux premières étapes (définition des événements pluvieux et détection des événements associés à des glissements) sont donnés en Figure 8.

L'outil CTRL-T parvient à faire un lien entre des événements pluvieux et des glissement dans, au mieux, 11 cas sur 59 (points violets dans la Figure 8d). Ce nombre est toutefois trop faible pour réussir à définir un seuil statistiquement robuste. Par ailleurs, l'analyse visuelle des résultats ne semble pas indiquer une différence de répartition significative entre les événements pluvieux associés à des glissements (points violets et oranges), et l'ensemble des événements pluvieux (histogramme avec l'échelle de bleus). En d'autre terme, l'analyse n'est pas discriminante et aucun seuil significatif et pertinent ne peut être établi pour distinguer les conditions pluviométriques déclenchant des instabilités de celles n'ayant aucun impact.

Ces résultats pourraient théoriquement être améliorés en choisissant plus finement les paramètres de l'outil CTRL-T. Toutefois, compte tenu du nombre réduit de glissements et de la faible précision sur leur date d'occurrence, l'amélioration significative des résultats est incertaine voire peu probable.

L'utilisation de cumuls pluviométriques sur des périodes continues de plusieurs dizaines de jours semble plus appropriée, car les variations temporelles sont ainsi lissées. Cela réduit les possibilités d'avoir un seuil d'alerte contraint temporellement (i.e. le délai entre le déclenchement de l'alerte et l'occurrence d'un glissement peut être de l'ordre de plusieurs jours/semaines), mais facilite l'exploitation d'un inventaire de glissements dont les dates sont peu précises. Cette démarche est décrite dans la section suivante.

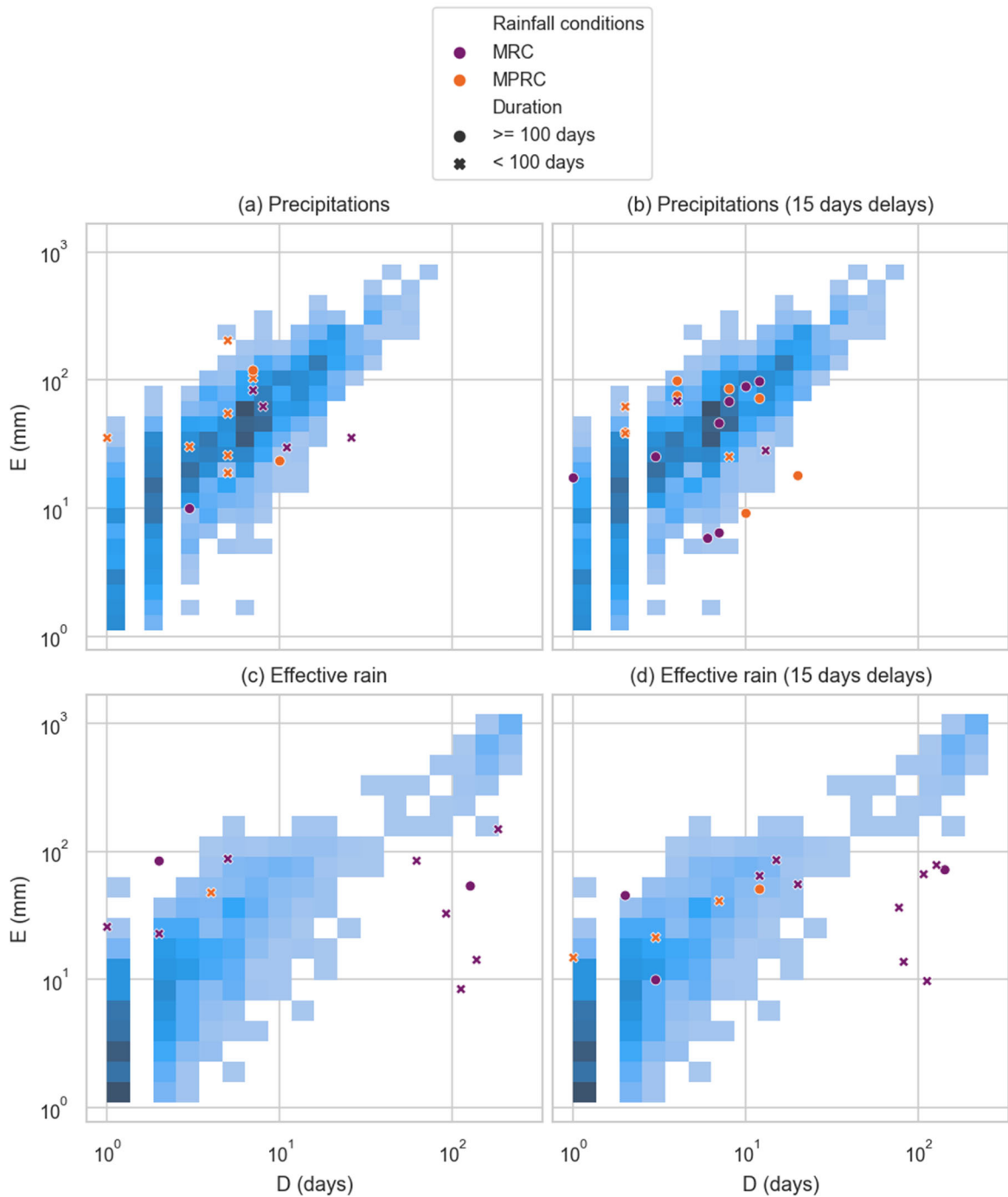


Figure 8 : Résultats du code CTRL-T pour le catalogue complet des glissements. L'échelle de couleur bleue donne l'histogramme 2D des épisodes pluvieux identifiés entre Janvier 1959 et Décembre 2022 par l'outil CTRL-T (durée en abscisse, cumul en ordonnée). Les points et croix sont les épisodes pluvieux associés à des glissements de terrain par le code CTRL-T. Violets : épisodes pluvieux les plus probables (MPRC, Most Probable Rainfall Conditions). Orange : autres épisodes pluvieux possiblement associés à ces glissements (MRC, Multiple Rainfall Conditions). Le figuré correspond à la durée renseignée par le catalogue (rond > 100 jours et croix < 100 jours). Les données pluviométriques sont les données SAFRAN (a et b), ou celle des précipitations efficaces à partir des mailles SAFRAN (b et c). Les dates utilisées pour les glissements sont soit celles de l'inventaire (a et c), soit celles de l'inventaire décalées 15 jours plus tard (b et d).

2.4 SEUIL SUR LES CUMULS DE PRÉCIPITATIONS

2.4.1 Recherche du seuil le plus pertinent

L'analyse du lien entre cumul pluviométrique et occurrence de glissements de terrain est faite en faisant varier deux paramètres :

- La durée C (pour période de **Cumul**) en jours sur laquelle les cumuls sont calculés. Dans cette étude, des durées de 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120 et 150 jours ont été considérées ;
- La durée D (pour période de **Décalage**) en jours avant la date du glissement pendant laquelle une alerte pourra être émise. Cette durée correspond à la période de transfert (hydrogéologique) potentiel entre l'occurrence d'un événement pluvieux, et l'augmentation de la pression de pore dans les matériaux menant à l'initiation ou à l'accélération du glissement. Dans cette étude, des durées de 1, 5, 10, 20, 30, 60 et 90 jours ont été testées.

Avant de proposer des seuils d'alerte sur les cumuls pluviométriques, il convient de déterminer la combinaison (C, D) qui permet le mieux de détecter les conditions pluviométriques déclenchant des glissements. Cela peut déjà être fait graphiquement en comparant les distributions des cumuls pluviométriques pendant les D jours avant les glissements répertoriés, aux cumuls pluviométriques le reste du temps. Un exemple de résultat est donné Figure 9 avec des boîtes à moustaches. Dans le cas où l'ensemble des glissements sont considérés avec les dates du catalogue, il apparaît ainsi graphiquement que les cumuls sur 30, 60 et 90 jours (et dans une moindre mesure sur 120 et 150 jours) des données des précipitations brutes sont globalement plus importants dans les 10 jours précédant les glissements, que le reste du temps (Figure 11a). La différence est moins marquée pour les précipitations efficaces (Figure 11b).

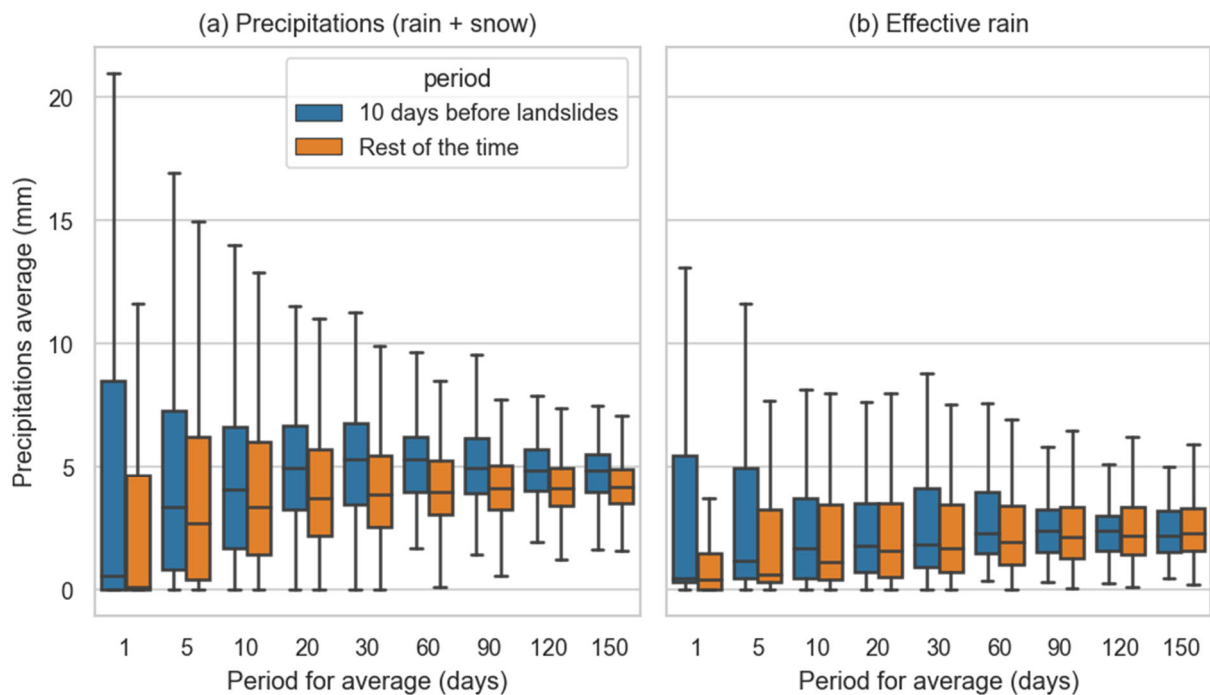


Figure 9 : Boîte à moustaches des précipitations moyennées (sur 1 à 150 jours), de 0 et 10 jours avant les glissements, et le reste du temps. L'ensemble des glissements est considéré, avec les dates d'occurrence de l'inventaire. Les précipitations sont celles des données SAFRAN (a) ou les précipitations efficaces recalculées (b).

Afin d'objectiver la combinaison des durées C et D permettant d'obtenir les seuils les plus pertinents, les courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) sont utilisées. Elles permettent de quantifier les performances d'un classificateur.

Pour chaque combinaison (C, D), et pour un seuil de cumul testé, chaque jour de la période d'étude (janvier 1959 à décembre 2022) est d'abord labellisé de manière prédictive :

- Positif si le cumul est supérieur au seuil;
- Négatif si le cumul est inférieur au seuil.

Ces labels prédits sont ensuite comparés aux labels observés qui sont :

- Positifs si le jour est compris entre la date du glissement, et D jours avant ;
- Négatifs sinon.

Les labels prédits sont catégorisés selon leur correspondance aux labels observés suivant le Tableau 2. Un exemple est donné dans le Tableau 3.

Tableau 2 : Classification des prédictions d'un modèle selon les observations

	Positif prédit	Négatif prédit	
Positif observé	TP (True Positive)	FN (False Negative)	TP + FN = P (Nbre positifs observés)
Négatif observé	FP (False Positive)	TN (True Negative)	FP + FN = N (Nbre négatifs observés)
	TP + FP = NPP (Nombre positifs prédits)	FN + TN = NPN (Nombre négatifs prédits)	NPP + NPN = P + N

Tableau 3 : Exemple théorique de labellisation des jours pour les observations et les prédictions, en considérant une période pré-glissement de 5 jours (gris clair). Le jour du glissement théorique est indiqué par la case grise foncée.

Date (arbitraire)	01/05	02/05	03/05	04/05	05/05	06/05	07/05	08/05	09/05	10/05
Label des observations	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Label prédits	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
Classification	FP	FN	TP	TP	TP	FN	TP	TN	TN	FP

Plusieurs scores sont ensuite calculés :

- $TPR = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP+FN}$ (True Positive rate) : proportion des positifs observés qui sont correctement labellisés.
- $TNR = \frac{TN}{N} = \frac{TN}{FP+TN}$ (True Negative Rate) : proportion des négatifs observés qui sont correctement labellisés.
- $FPR = \frac{FP}{N} = \frac{FP}{FP+TN}$ (False Positive Rate) : Proportion des négatifs observés qui sont incorrectement labellisés en positifs.
- $PPV = \frac{TP}{NPP} = \frac{TP}{TP+FP}$ (Positive Predictive Value) : Proportion des positifs prédits qui sont des vrais positifs
- $NPV = \frac{TN}{NPN} = \frac{TN}{TN+FN}$ (Negative Predictive value) : Proportion des négatifs prédits qui sont des vrais négatifs.

Dans le cas d'un modèle parfait, $TPR=TNR=PPV=NPV=1$ et $FPR=0$.

La qualité d'un test (en l'occurrence, détecter les jours de 0 à D jours avant les glissements de terrain) peut être évaluée en analysant l'évolution de ces différents scores en fonction du seuil choisi. C'est le principe de la courbe ROC, où le TPR est tracé en fonction du FPR, leurs variations correspondant à des variations de seuil. Pour un test extrêmement permissif où le seuil est 0, tous les jours sont labellisés positifs : tous les positifs observés sont prédits ($TPR=1$), mais tous les jours sans glissements sont aussi catégorisés positifs ($FPR=1$). A l'inverse, avec un seuil très élevé il n'y a aucun faux positif ($FPR=0$), mais aucun positif observé n'est prédit ($TPR=0$). La courbe ROC varie donc entre les points (0, 0) et (1, 1).

Un bon modèle maximise le TPR et minimise le FPR, la courbe ROC se rapproche donc des deux segments [(0, 0) ; (0, 1)] et [(0, 1) ; (1, 1)]. A l'inverse, un modèle aléatoire obtiendra une proportion similaire de vrais positifs parmi les positifs observés, et de faux positifs parmi les

négatifs observés : $FPR=TPR$. La courbe ROC d'un modèle aléatoire est alors une droite reliant les points (0, 0) et (1, 1).

Un exemple de courbe ROC est donné Figure 10, pour les données de précipitations brutes et les dates des glissements de l'inventaire, et en considérant une durée D de 10 jours. Dans ces conditions, l'analyse graphique montre que la courbe ROC obtenue pour des cumuls sur 60 jours est celle qui est la plus haute. Pour le quantifier, un indicateur courant est l'aire sous la courbe ROC (ROC AUC = ROC Area Under Curve) qui varie entre 0.5 (pour un classificateur aléatoire) et 1 (pour un classificateur parfait).

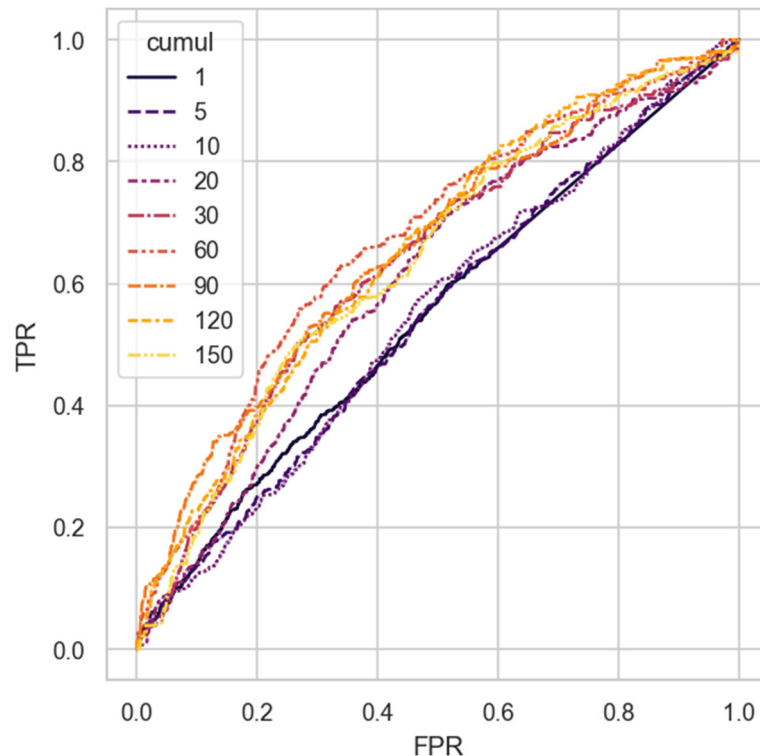


Figure 10 : Courbes ROC obtenues pour différentes durées de cumuls de précipitations (style et couleur des lignes), où les positifs observés sont les jours entre 0 et 10 jours avant la date des glissements (données de précipitations brutes, jours des glissements donnés par l'inventaire).

Les valeurs du ROC AUC pour différentes combinaisons de périodes C et D sont données :

- en Figure 11 en considérant l'ensemble des glissements ;
- en Figure 12 en considérant seulement les glissements dont la durée renseignée est inférieure à 100 jours.

Chaque sous-figure donne les résultats pour les données de précipitations brutes ou de précipitations efficaces, et avec les dates originales de glissements ou décalées 15 jours plus tard.

Dans tous les cas, le ROC AUC ne dépasse pas 0.75, ce qui est relativement faible. Par exemple, Corsini et Mulas (2017) considèrent des valeurs entre 0.7 et 0.8 comme acceptables, mais arrivent à obtenir des valeurs supérieures à 0.9.

Dans cette étude, les meilleurs résultats sont obtenus avec les données de précipitations brutes en décalant les dates glissements de terrain de 15 jours par rapport à la date renseignée dans le catalogue (Comparer Figure 11a et Figure 11b, et Figure 12a et Figure 12b): cela s'explique sans doute par le fait que les dates indiquées sont souvent celles du début des premières et deuxième quinzaines des mois, pour signifier que les glissements se sont produits lors de ces quinzaines. **Les meilleures valeurs de ROC AUC sont obtenues pour des cumuls calculés sur 90 jours, et en considérant des périodes avant les glissements de 0 à 5 jours.**

L'utilisation des précipitations efficaces au lieu des données de précipitations brutes n'améliore pas les résultats. Avec les précipitations efficaces, décaler la date des glissements de 15 jours permet une meilleure corrélation (comparer par exemple la Figure 11c à la Figure 11d), et les meilleurs résultats sont obtenus pour des cumuls sur 20 jours, en considérant un période de 0 à 5 jours avant la date des glissements (ROC AUC entre 0.66 et 0.67).

Ces résultats peuvent paraître surprenants, dans la mesure où la plupart des glissements sont catalogués entre janvier et mars, alors que le pic de précipitations efficaces se produit à la fonte des neiges, entre Avril et Mai (Figure 6). Plusieurs explications non exclusives peuvent être avancées:

- Un mauvais référencement temporel de l'inventaire des glissements de terrain en début d'année (renseigné en début d'année faute d'information plus précise sur l'occurrence temporelle) ;
- Une estimation des précipitations efficaces non représentative (influence significative de la vallée encaissée de l'Arly sur la météorologie locale) ;
- Des glissements de terrain peu profonds plus sensibles aux phénomènes d'eaux superficiels que des eaux souterraines (peu de modulation de la mise en saturation par des processus hydrogéologiques).

En éliminant les glissements dont la durée indiquée est supérieure à 100 jours, les valeurs de ROC AUC sont très légèrement augmentées de 0.01 à 0.02, mais les valeurs les plus importantes sont obtenues pour les mêmes couples de périodes C et D.

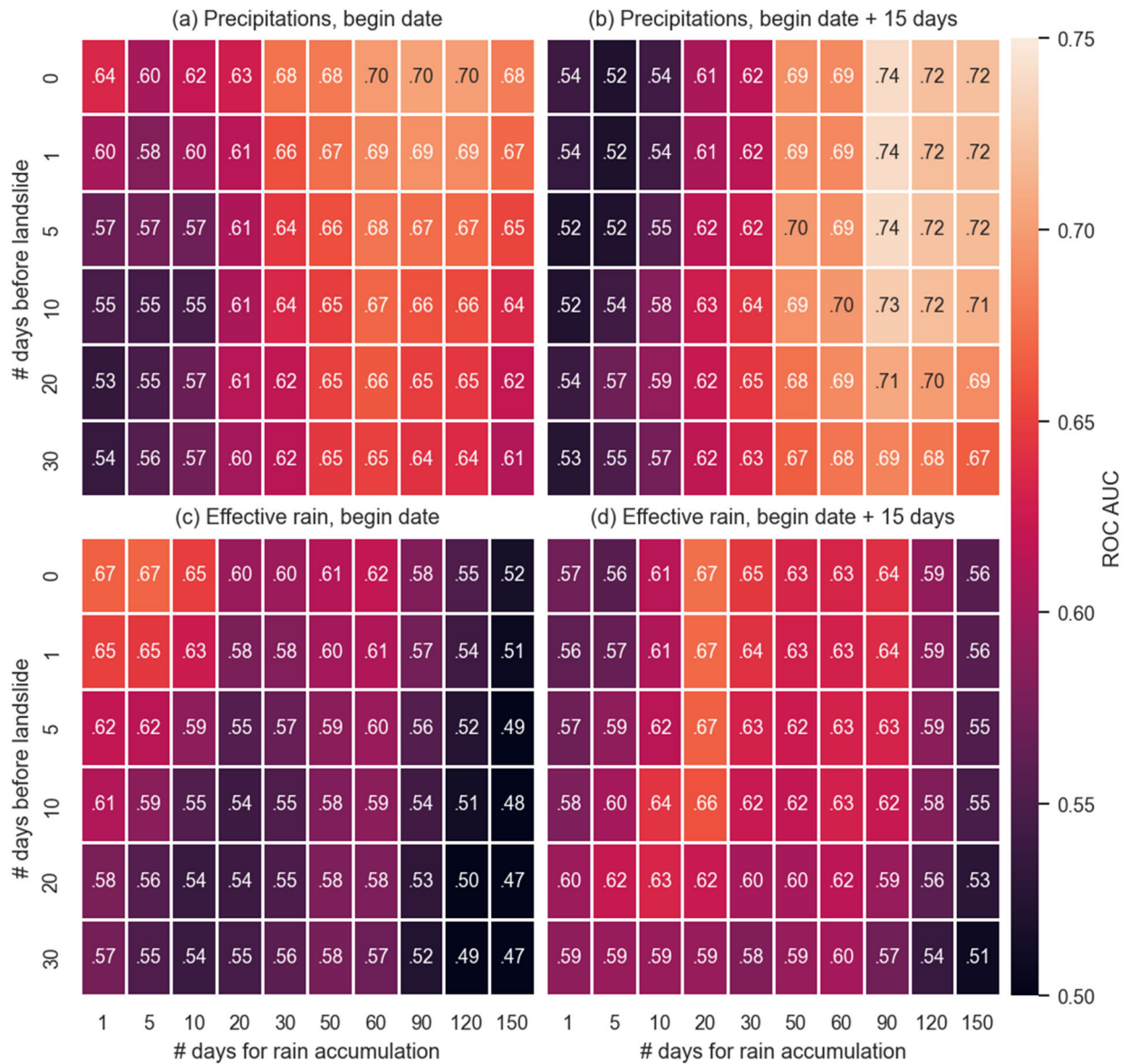


Figure 11 : ROC AUC obtenus pour l'ensemble des glissements répertoriés, en fonction de la durée des cumuls de précipitations (abscisse) et de la durée avant les glissements où les jours sont considérées comme des observations positives (ordonnée). SAFRAN (a, b) correspond aux données de précipitations brutes et effective rainfall aux données de précipitations efficaces (c, d). Les dates des glissements sont celles de l'inventaire (a, c) ou celles de l'inventaires décalées 15 jours après (b, d).

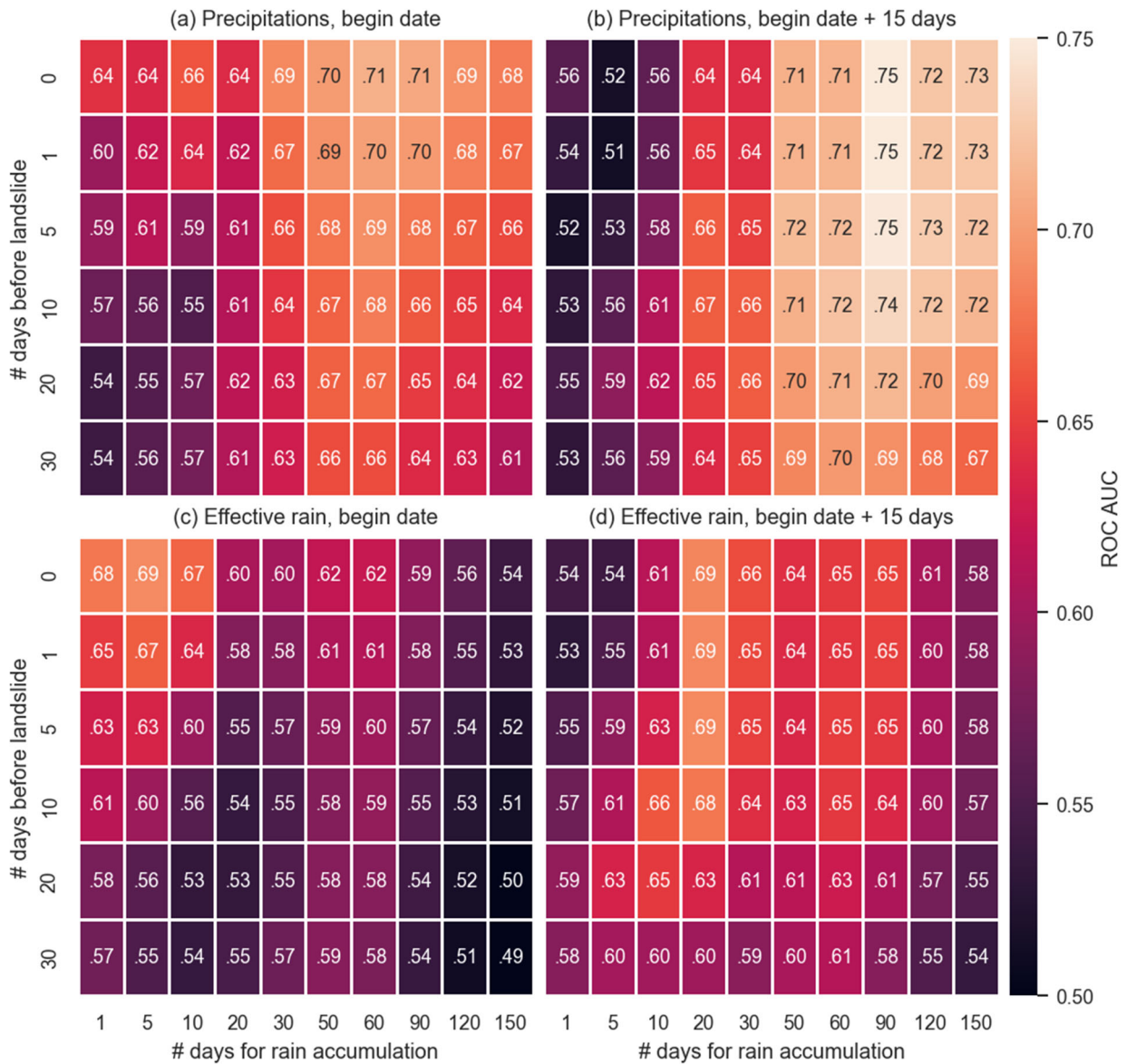


Figure 12 : ROC AUC obtenus pour les glissements répertoriés d'une durée inférieure à 100 jours, en fonction de la durée des cumuls de précipitations (abscisse) et de la durée avant les glissements où les jours sont considérés comme des observations positives (ordonnée). SAFRAN (a, b) correspond aux données de précipitations brutes et effective rainfall aux données de précipitations efficaces (c, d). Les dates des glissements sont celles de l'inventaire (a, c) ou celles de l'inventaires décalées 15 jours après (b, d).

Considérant les valeurs relativement faibles obtenues pour le ROC AUC, une nouvelle approche a priori moins contraignante a été testée. Au lieu de considérer comme observations positives seulement les jours avant les dates des glissements de terrain, les jours qui suivent peuvent aussi être labélisés comme observations positives. Cela traduit le fait que les précipitations ont un rôle déclencheur, mais aussi une influence sur la dynamique du glissement une fois qu'il est initié (maintien d'une période d'activité).

Cette nouvelle approche a été testée uniquement :

- pour les glissements répertoriés d'une durée inférieure à 100 jours ;
- en décalant leur date d'occurrence 15 jours après ;

- en utilisant les données de précipitations brutes.

Les ROC AUC obtenues avec ce principe, sont données en Figure 13. Des durées de 0, 1 et 5 jours avant les événements sont testées, correspondant aux durées ayant donné précédemment les meilleurs résultats. Des durées post-événements de 0 à 45 jours⁵ sont également testées. Ces différentes configurations ne permettent cependant pas d'améliorer le ROC AUC, qui est au maximum de 0,75 toujours pour une durée de cumul de 90 jours, et pour une durée post-événement de 0 à 10 jours.

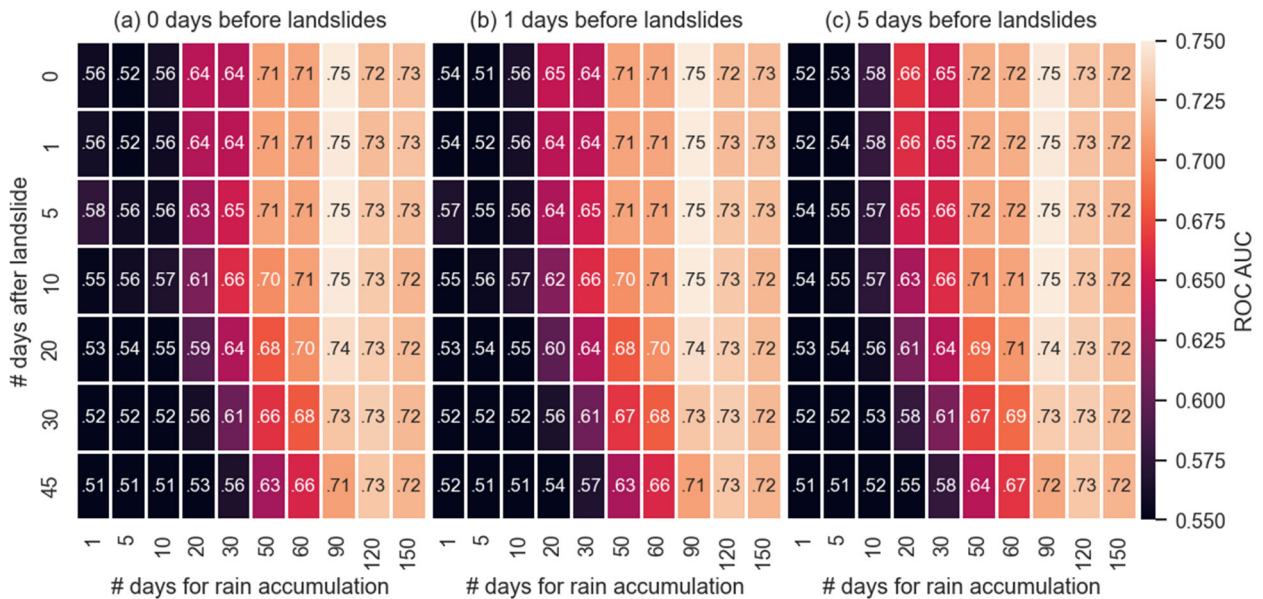


Figure 13 : ROC AUC obtenus pour les glissements répertoriés d'une durée inférieure à 100 jours, en décalant leur date d'occurrence 15 jours après, et en utilisant les données de précipitations brutes. La durée du cumul de précipitations est donnée en abscisse, et la durée après la date des glissements pendant laquelle les observations sont labellisées positives est donnée en ordonnée. La durée avant le glissement pendant laquelle les observations sont labellisées positive est 1 jour (a), 5 jours (b) ou 10 jours (c).

2.4.2 Définition des seuils

Compte tenu des résultats précédents, la période de cumuls retenue dans la suite est de 90 jours sur les données de précipitations brutes. Pour définir les seuils et tester leur efficacité, seuls les glissements dont la durée répertoriée est inférieure à 100 jours sont utilisés, et les dates des glissements retenues sont celles de l'inventaire décalées 15 jours plus tard. La période labellisée positive dans les observations sera soit de 0 à 5 jours avant les glissements, soit de 5 jours avant à 5 jours après les glissements.

D'après les travaux de Corsini et Mulas (2017), et Postance et al. (2018), deux seuils peuvent être définis :

- Le seuil C_1 est celui qui permet, dans la courbe ROC, de se rapprocher au maximum d'un classificateur parfait donné par TPR=1 (100% des événements observés sont prédits) et

⁵ Valeurs calées de manière réursive.

FPR=0 (il n'y a aucun faux positif). Le seuil C_1 correspond donc au point de la courbe ROC qui minimise la distance au point (0,1), donnée par $d_{PC} = \sqrt{FPR^2 + (1 - TPR)^2}$

- Le seuil C_2 qui maximise le CSI (Critical Success Index) défini par $CSI = \frac{TP}{TP+FP+FN}$ et qui varie entre 0 (aucun vrai positif) et 1 (aucun faux positif et aucun faux négatif).

En pratique, maximiser le CSI est plus contraignant que minimiser d_{PC} . En effet, dans les deux cas l'optimisation nécessite de maximiser le nombre de vrais positifs et de minimiser le nombre de faux positifs, mais la maximisation du CSI nécessite aussi de réduire le nombre de faux négatifs. Ainsi, $C_1 < C_2$. **C_1 peut donc être vu comme un seuil de vigilance, et C_2 comme un seuil d'alerte.**

Les seuils obtenus pour les deux cas (période labellisée positive dans les observations de 0 à 5 jours avant les glissements, ou de 5 jours avant à 5 jours après les glissements), avec les scores correspondants, sont donnés Figure 14 et Tableau 4. Le premier seuil C_1 correspond à un cumul pluviométrique sur 90 jours de 431 mm. Il est dépassé environ 30% des jours de l'année, et permet de retrouver entre 70% et 74% des jours associés à des glissements de terrain (selon les périodes avant et après glissement retenues). Ses performances sont donc assez faibles : l'ensemble des jours de glissement n'est pas identifié, alors qu'il est activé relativement régulièrement. La précision est également assez faible : un jour labellisé positif ne correspond à un jour effectivement associé à un glissement de terrain que dans 2% à 4% des cas (i.e., les vrais positifs ne représentent que 2% à 4% des positifs prédits).

Cette précision peut être améliorée avec le seuil C_2 qui est plus restrictif (cumul de 609 mm sur 90 jours), mais elle reste faible, de 5% à 9%. Le seuil C_2 n'est dépassé que dans 5% des cas, et permet de récupérer environ 25% des jours positifs observés.

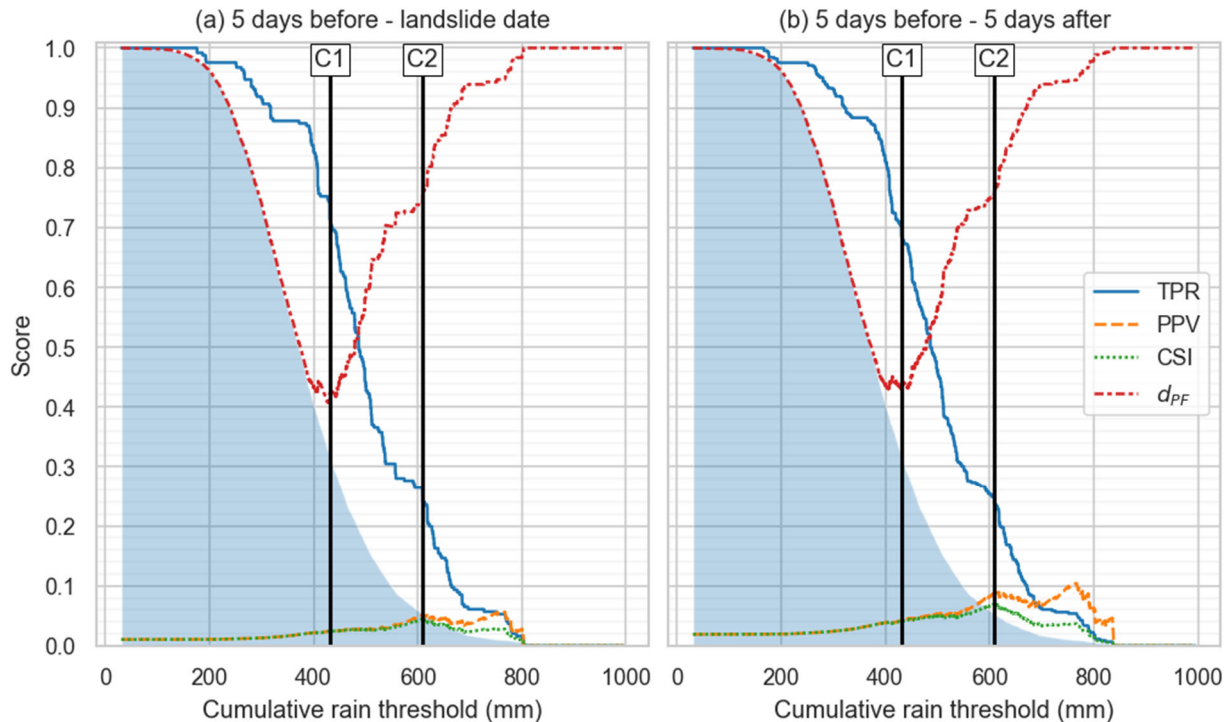


Figure 14 : Variations du TPR, PPV, CSI et d_{PF} en fonction du seuil de cumul. Les seuils C1 et C2 correspondent respectivement au minimum de d_{PF} et au maximum du CSI. La zone bleutée est la distribution cumulée des cumuls sur 90 jours des précipitations brutes. Seuls les glissements dont la durée répertoriée est inférieure à 100 jours sont utilisés, et les dates des glissements retenues sont celles de l'inventaire décalées 15 jours plus tard. La période labellisée positive dans les observations sera soit de 0 à 5 jours avant les glissements (a), soit de 5 jours avant à 5 jours après les glissements (b).

Tableau 4 : Seuils pluviométriques sur des cumuls de 90 jours pour deux cas tests, et valeurs des scores associés.

Période retenue	Seuil	Valeur du seuil (mm)	TPR	PPV	% jours de dépassement du seuil
De 0 à 5 jours avant les glissements	C1 (vigilance)	431	0.74	0.02	32 %
	C2 (alerte)	609	0.26	0.05	5 %
De 5 jours avant à 5 jours après les glissements	C1 (vigilance)	431	0.70	0.04	32%
	C2 (alerte)	609	0.25	0.09	5%

En l'état, les seuils obtenus semblent difficilement utilisables d'un point de vue opérationnel. En particulier, leur précision (probabilité qu'un jour labellisé positif corresponde en effet à un glissement de terrain) est trop faible (inférieure à 9%) pour définir un seuil d'alerte opérationnel. Les seuils de vigilance obtenus, bien que trop permissifs (déclenchés 1 jour sur 3), permettent néanmoins de récupérer entre 70% à 74% des jours associés à des glissements de terrain.

Un exemple de chronogramme de déclenchement des seuils est donné en Figure 15 entre Janvier 2000 et Juin 2015, et Figure 16 entre Juin 2015 et Juin 2020. Douze des 18 événements survenus entre 2000 et 2015 sont détectés par les seuils. Entre 2015 et 2020, seul un glissement n'est pas identifié début 2016. En revanche, les clusters d'événements survenus dans les premiers mois de 2016 et 2018 sont bien identifiés.

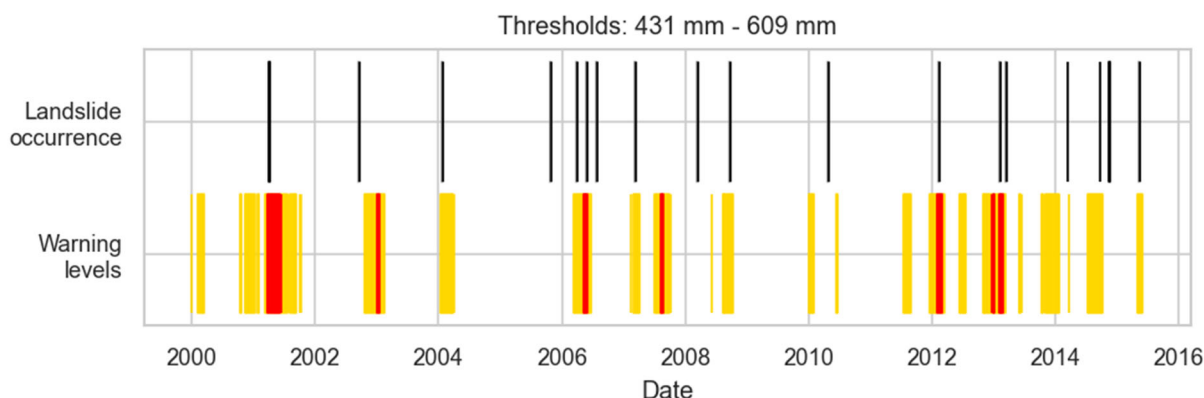


Figure 15 : Simulation de déclenchement des seuils de vigilance (orange, cumul de 431 mm sur 90 jours) et d'alerte (rouge, cumul de 609 mm sur 90 jours) entre Janvier 2000 et Juin 2015. Les dates d'occurrence des glissements (décalées 15 jours après par rapport aux dates de l'inventaire) sont indiquées par les barres noirs sur la première ligne

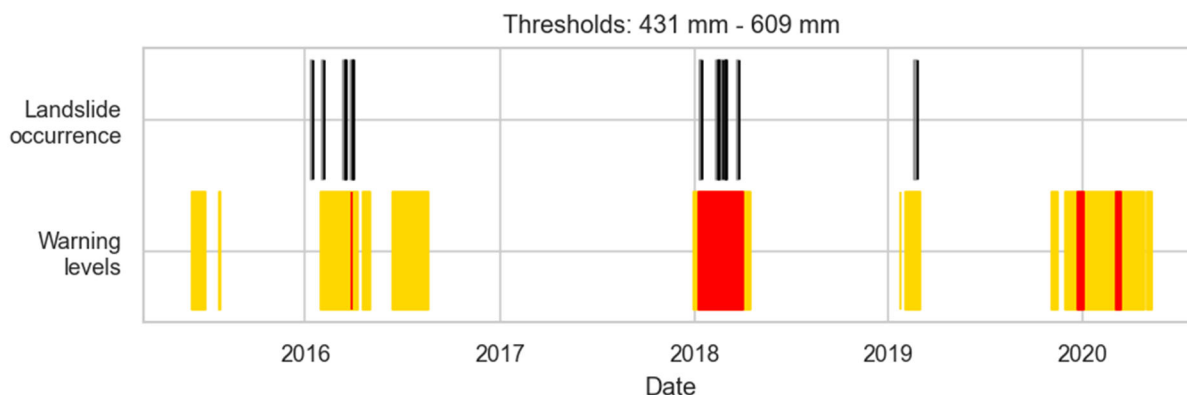


Figure 16 : Simulation de déclenchement des seuils de vigilance (orange, cumul de 431 mm sur 90 jours) et d'alerte (rouge, cumul de 609 mm sur 90 jours) entre Juin 2015 et Juin 2020. Les zones grisées correspondent à une période de 5 jours avant la date d'occurrence des glissements.

2.4.3 Synthèse des résultats et perspectives

Les performances des seuils obtenus bien que relativement modestes d'un point de vue opérationnel sont intéressantes et encourageantes compte-tenu de la fiabilité réduite des données d'entrée.

En effet, les performances obtenues peuvent être principalement imputées à la faible qualité et quantité des données disponibles (voir section 2.1 - limites de la base de données événementielles et des données météorologiques utilisées). La période de 90 jours retenue

comme pertinente dans cette étude est par exemple immanquablement liée à l'imprécision des données d'entrée (les cumuls sur des fenêtres glissantes lissent les variations journalières / hebdomadaires et ainsi les imprécisions de localisation temporelle des évènements). Par conséquent, le cumul de 90 jours est plus lié au processus d'optimisation du nombre de détections de glissements de terrain qu'à un processus physique hydromécanique (comme le temps de transfert entre l'occurrence de précipitations et le déclenchement d'un glissement de terrain).

Dans une moindre mesure, les performances obtenues peuvent être également associées à la méthodologie suivie dans cette étude. Par exemple, dans le cas où les jours labélisés comme observations positives sont ceux entre 0 et 5 jours avant les glissements, un classificateur parfait devra retrouver l'ensemble de ces jours. En pratique, il peut être acceptable que seulement une partie de ces jours soit identifiée, puisqu'ils correspondent à un seul glissement de terrain. Les choix méthodologiques réalisés sont cependant eux même directement conditionnés par la quantité et la qualité des données d'entrée (par exemple dans cette étude, en raison du faible nombre d'évènements le jeu de données d'entrée n'a pas été séparé en données de calibration et de validation pour évaluer le caractère prédictif des seuils sur de nouvelles données ou évaluer la variabilité temporelle des seuils retenus en fonction des périodes étudiées).

Les résultats obtenus montrent cependant que les précipitations ont un rôle déclencheur majeur dans l'instabilité des versants de la vallée de l'Arly et que l'investigation de la relation précipitation-déstabilisation est pertinente pour mieux anticiper le déclenchement des glissements de terrain dans ce secteur. Le cumul sur 90 jours permet ainsi de mieux détecter les glissements survenus par clusters temporels comme lors des premiers mois de 2016 et de 2018 (Figure 16).

La détermination d'un seuil pourrait être affinée au niveau de la précision temporelle (i.e. avoir des périodes de dépassement des seuils plus faibles, en utilisant des cumuls sur des durées plus faibles), en consolidant l'inventaire existant:

- Soit en explorant de nouvelles archives pour construire un inventaire plus exhaustif et avec des dates plus précises (mais ce deuxième aspect est sans doute très compliqué à améliorer pour des glissements anciens). Les périodes de dépassements des seuils définis, pour lesquelles peu ou pas de glissements de terrains ont été répertoriés, pourraient être inspectées en priorité (par exemple de 1995 à 1998, voir Figure 17).
- Soit en le complétant avec des événements récents ou à venir mieux documentés.

Une autre approche consiste à travailler sur des seuils pluviométriques non plus à l'échelle du bassin versant, mais à l'échelle de sites précis, où un ou plusieurs glissements sont instrumentés. Il est alors possible de définir précisément les dates d'activité et d'accélération des glissements. C'est l'objet de la section suivante, qui prend comme exemple le glissement de Montgombert localisé dans la vallée de l'Arly.

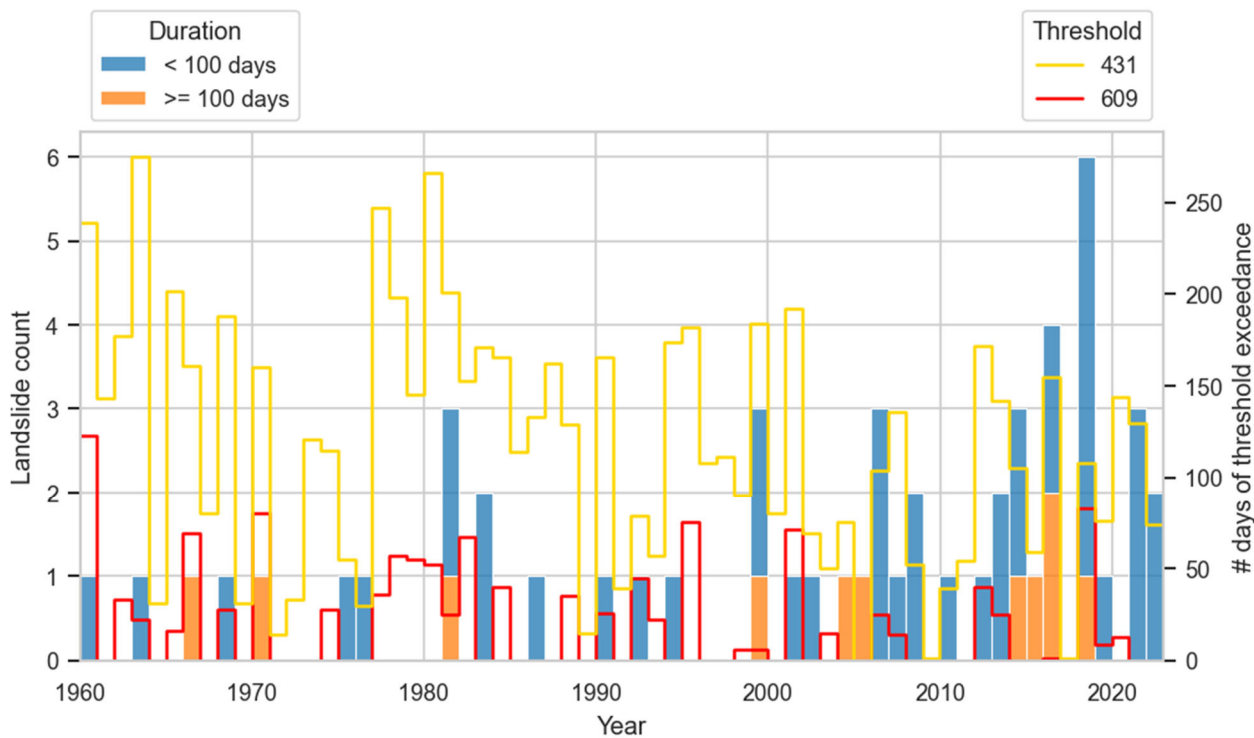


Figure 17 : Nombre annuel de glissement de terrains répertoriés et nombre de jour par an de dépassement des seuils pluviométriques (431 mm et 609 mm) sur les cumuls de 90 jours.

3 Seuils pluviométriques à l'échelle locale

3.1 DONNÉES DE DÉPLACEMENTS ET MÉTÉOROLOGIQUES

Le glissement récent (qui s'est activé en 2016) dit de Montgombert se situe sur la rive gauche de l'Arly, au-dessus de la RD1212, sur le versant Nord du Mont Gombert. Le glissement, dont la partie supérieure se situe à une centaine de mètres au-dessus de la route, est actif depuis le printemps 2016 (mais en ralentissements de plus en plus prononcés après les années 2016 à 2018) : la route était alors régulièrement affectée par des chutes de blocs et des coulées de matériaux (Figure 20 et figure 21), puis cette activité a fortement diminué jusqu'à ce jour, même si le glissement présente encore une activité résiduelle (Cf rapport SAGE RP7081-f, 2022). Plusieurs surfaces de rupture ont été repérées, notamment autour de 14 m de profondeur et pour la plus profonde à 30 m de profondeur (Figure 22).



Figure 18 : évolution du glissement de Montgombert entre novembre 2017 à gauche et janvier 2018 à droite (rapport SAGE RP7081c)



Figure 19 : évènement du 12 janvier 2018 vu depuis le fond de vallée de l'Arly à hauteur de la RD1212 coupée

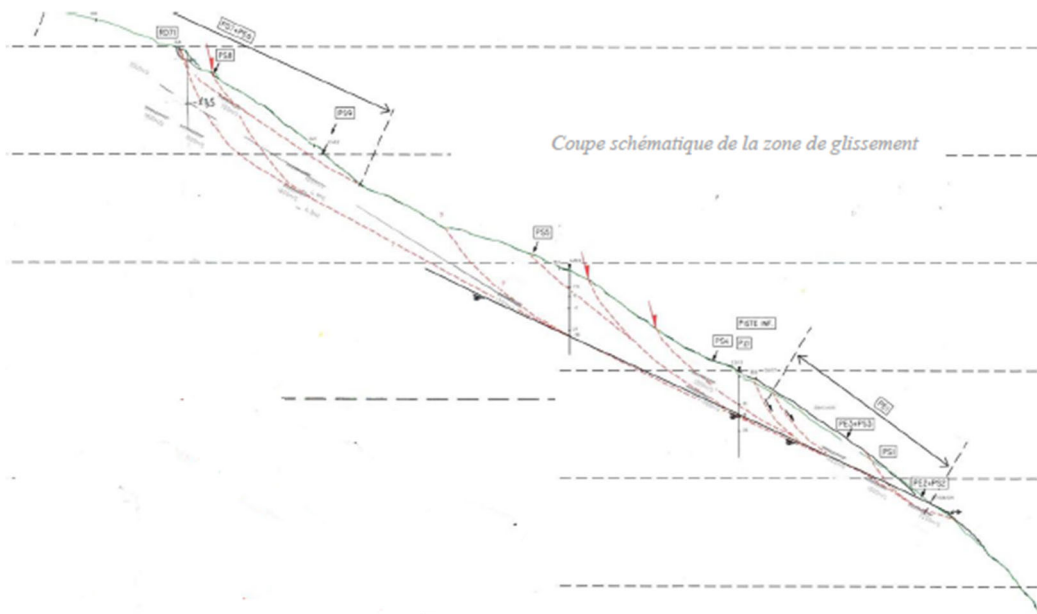


Figure 20 : Coupe schématique de la zone de glissement (rapport SAGE RP7081c)

Un suivi tachéométrique automatisé a été mis en place à partir d'août 2016, avec une vingtaine de cibles (Figure 23). Trois périodes de mesures sont disponibles, interrompues chaque fois par la perte des cibles après des mouvements importants du glissement :

- D'août 2016 à Mars 2018 (Figure 22) ;
- De Juillet 2018 à Mars 2020 (Figure 23) ;
- De Février 2021 à Septembre 2021 (Figure 24).

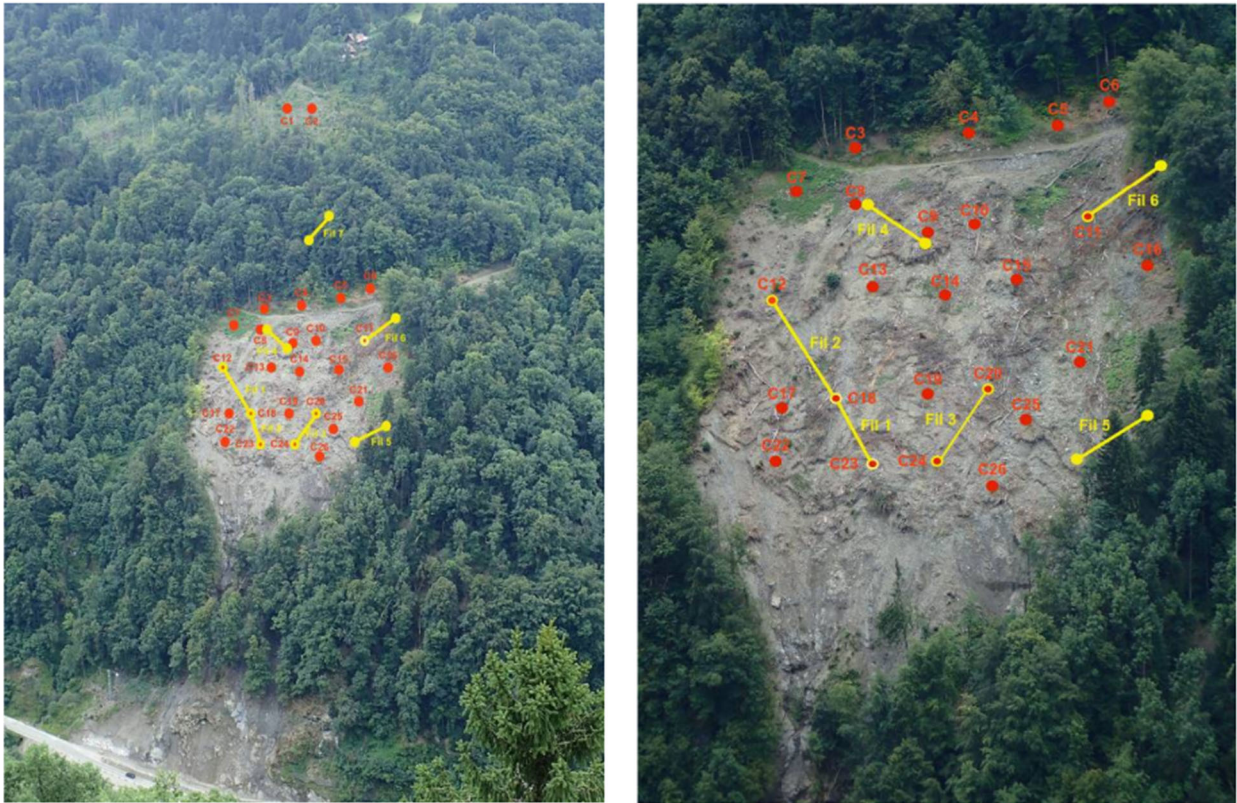


Figure 21 : cibles du suivi tachéométrique entre 2016 et 2018 (rapport SAGE RP7081c)

L'analyse des séries temporelles de déplacement permet d'identifier à dire d'expert : des phases d'activité (plages colorées dans les Figure 22, Figure 23 et Figure 24), pendant lesquelles les vitesses de déplacement journalières sont supérieures aux vitesses de déplacements calculées sur plusieurs mois. Ces phases d'activité débutent par une phase d'accélération où les vitesses de déplacement augmentent significativement (plages rouges dans les Figure 22, Figure 23 et Figure 24) La détermination de ces phases a été faite graphiquement, à partir de chroniques de déplacements, et lorsque les données de déplacement n'étaient pas trop bruitées, avec les chroniques de vitesses calculées à partir des chroniques de déplacement.

Pour tenter d'identifier des seuils pluviométriques d'activation du glissement de Montgombert, les données de précipitations brutes sont utilisées. Les précipitations journalières des mailles SAFRAN 6348 et 6349 ont été moyennées (le glissement étant à la limite des deux mailles), et l'analyse a été faite en combinant la pluie et la neige⁶.

⁶ La même analyse a également été réalisée en prenant seulement la pluie, seulement la neige, ou les précipitations efficaces estimées pour le bassin versant. Mais ces approches n'ont pas permis d'améliorer les résultats par rapport à ce qui est présenté dans ce rapport. L'outil Ctrl-T a également été testé, mais il n'a pas donné de résultats satisfaisants.

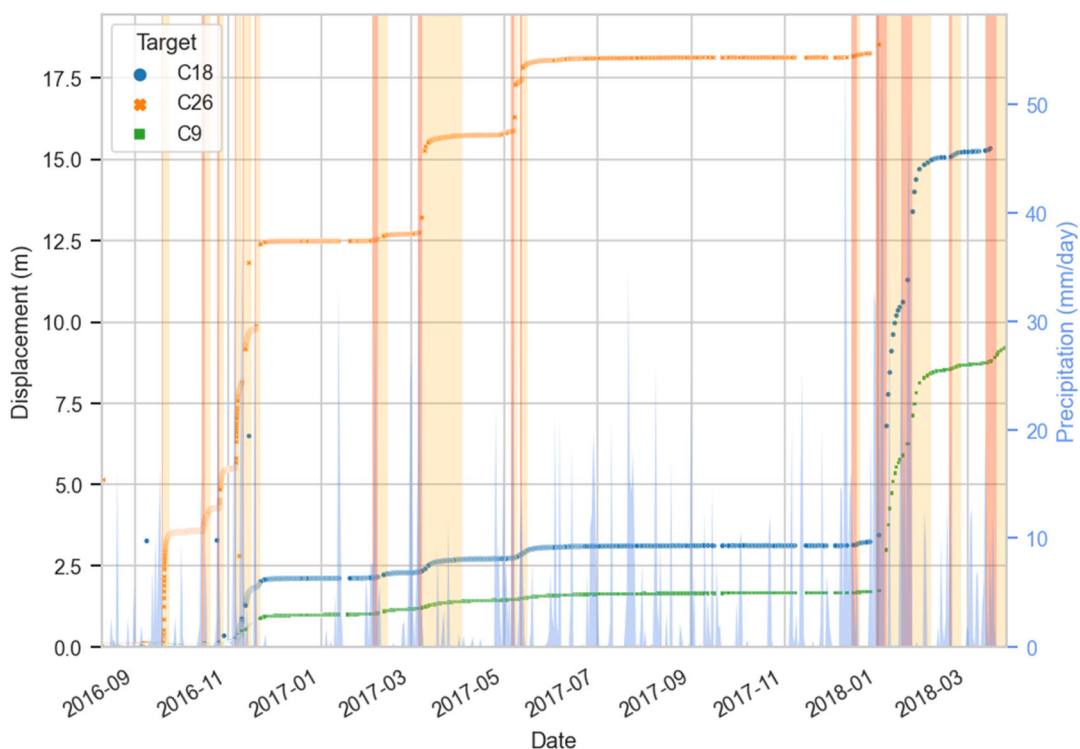


Figure 22 : Distance à la première position de 3 cibles topographiques sur le glissement de Montgombert, d’Août 2016 à Avril 2018, avec les précipitations journalières. Les périodes d’activité sont colorées en orange et rouge, le rouge correspondant aux périodes d’accélération.

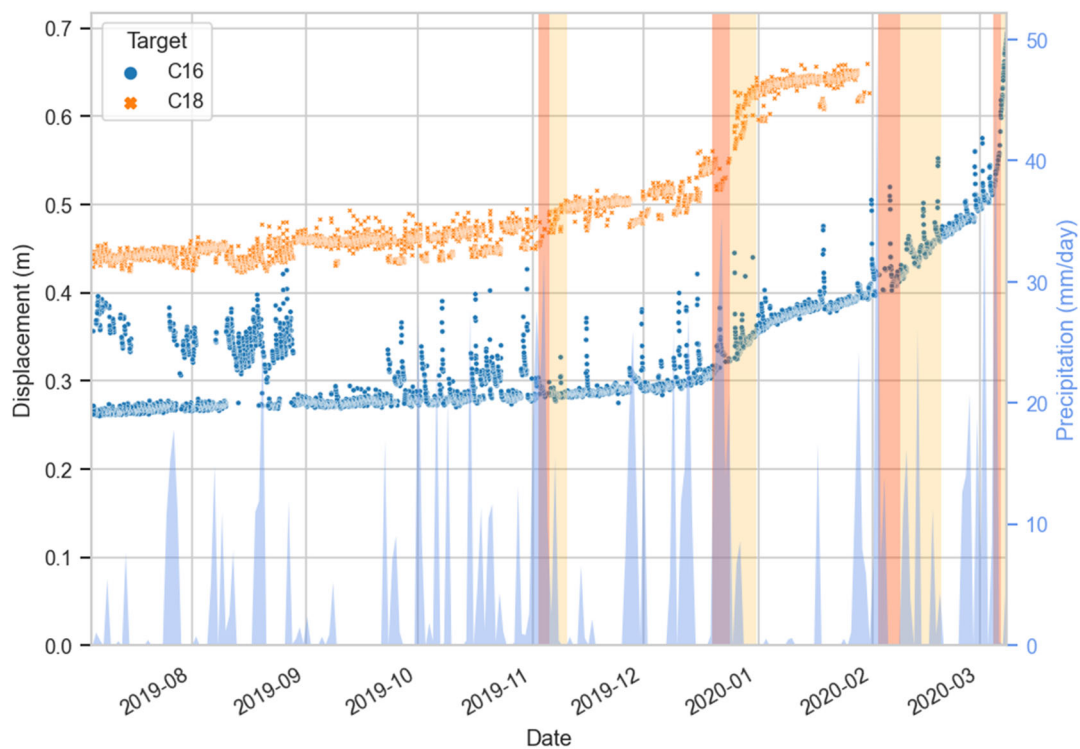


Figure 23 : Distance à la première position de 5 cibles topographiques sur le glissement de Montgombert, de Juillet 2019 à Août 2020, avec les précipitations journalières. Les périodes d’activité sont colorées en orange et rouge, le rouge correspondant aux périodes d’accélération.

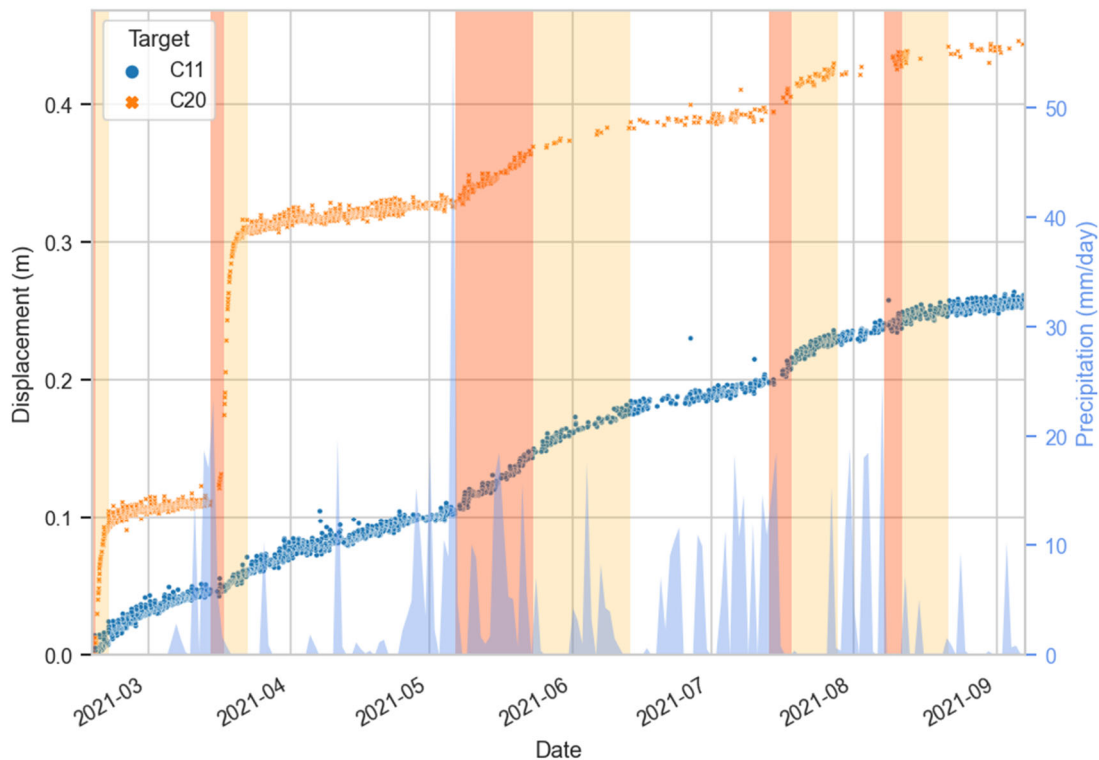


Figure 24 : Distance à la première position de 5 cibles topographiques sur le glissement de Montgombert, de Février 2021 à Novembre 2021, avec les précipitations journalières. Les périodes d'activité sont colorées en orange et rouge, le rouge correspondant aux périodes d'accélération.

3.2 SEUILS SUR LES CUMULS DE PRÉCIPITATION

La même méthode que celle décrite au paragraphe 2.4 a été utilisée pour déterminer des seuils sur les cumuls de précipitations. Ces seuils sont déterminés pour la période d'août 2016 à mars 2018, qui dispose de données de déplacement les plus précises, et pendant laquelle les mouvements les plus importants ont été détectés (plus de 17,5 m de déplacement sur l'ensemble de la période). Cette période constitue la période de calage du seuil. Les données des deux autres périodes n'ont pas été utilisées pour déterminer le seuil mais pour valider ses performances sur des données indépendantes.

Une première analyse graphique montre que sur la période d'août 2016 à mars 2018 (Figure 22) les cumuls de précipitations sont globalement plus importants pendant les périodes d'accélération que pendant les périodes d'activité, ainsi que pendant le reste du temps (Figure 25). La période d'accélération est donc plus discriminante vis-à-vis du cumul des précipitations et a par conséquent été sélectionnée pour poursuivre la détermination d'un seuil d'activation pluviométrique.

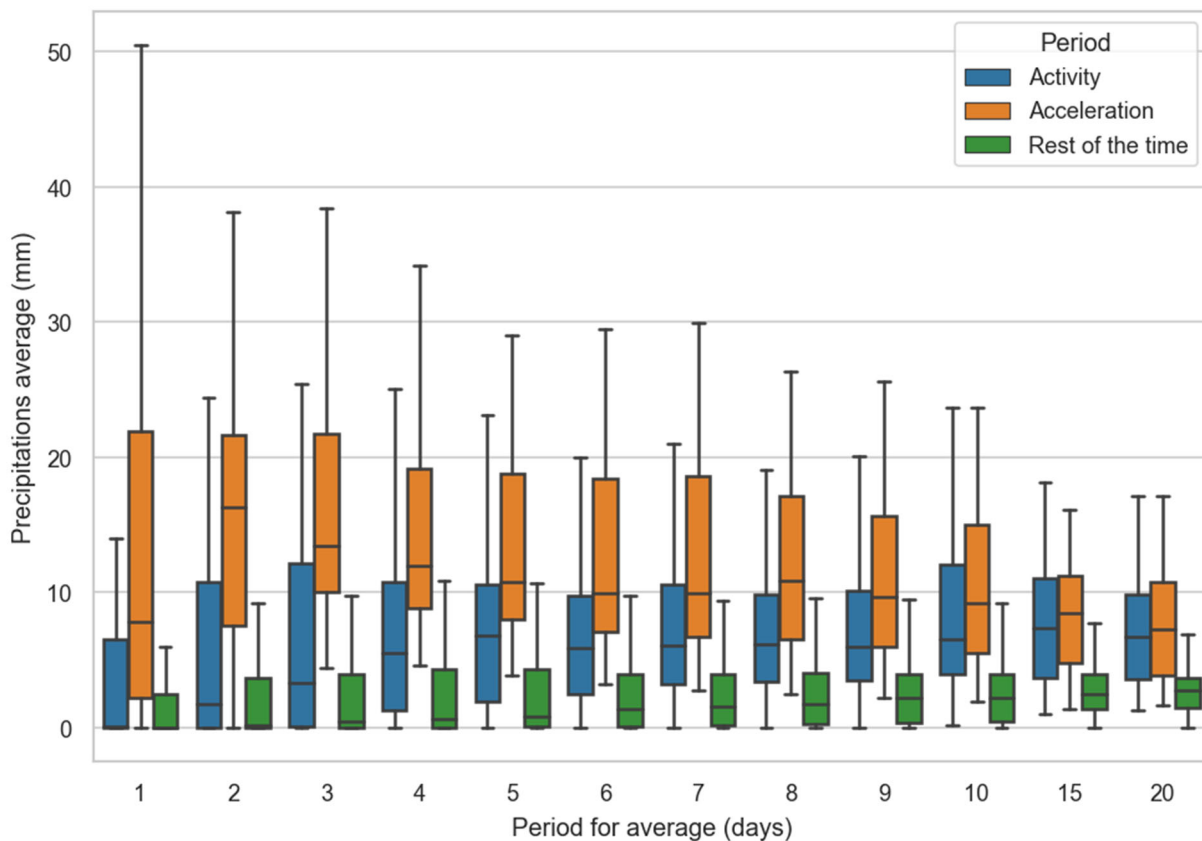


Figure 25 : Boîte à moustache des précipitations moyennées sur 1 à 20 jours pendant les périodes d'activité (bleu), les périodes d'accélération (orange) et le reste du temps (vert). La période analysée s'étale d'août 2016 à mars 2018.

La Figure 26 donne les valeurs de ROC AUC en fonction des durées de cumul et des périodes où les jours sont labellisés comme observations positives :

- Soit de D jours avant le début de la période d'accélération jusqu'à la fin de la période d'accélération ;
- Soit de D jours avant le début de la période d'accélération jusqu'au premier jour de la période d'accélération.

Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant des cumuls de précipitations sur 3 jours, et en ne considérant comme observations positives que les jours des phases d'accélération sans décalage (ROC AUC de 0,94). Les seuils de vigilance et d'alerte sont déterminés comme précédemment : le seuil de vigilance minimise d_{PF} , et le seuil d'alerte maximise le CSI . Les deux seuils calculés sont 15 mm et 35 mm (Figure 27). Les scores associés pour la période de calage (août 2016 à mars 2018) et pour les deux autres périodes (juillet 2018 à mars 2020, et février 2021 à septembre 2021) sont donnés Tableau 5. Les périodes d'activation pour ces trois périodes sont données en Figure 28.

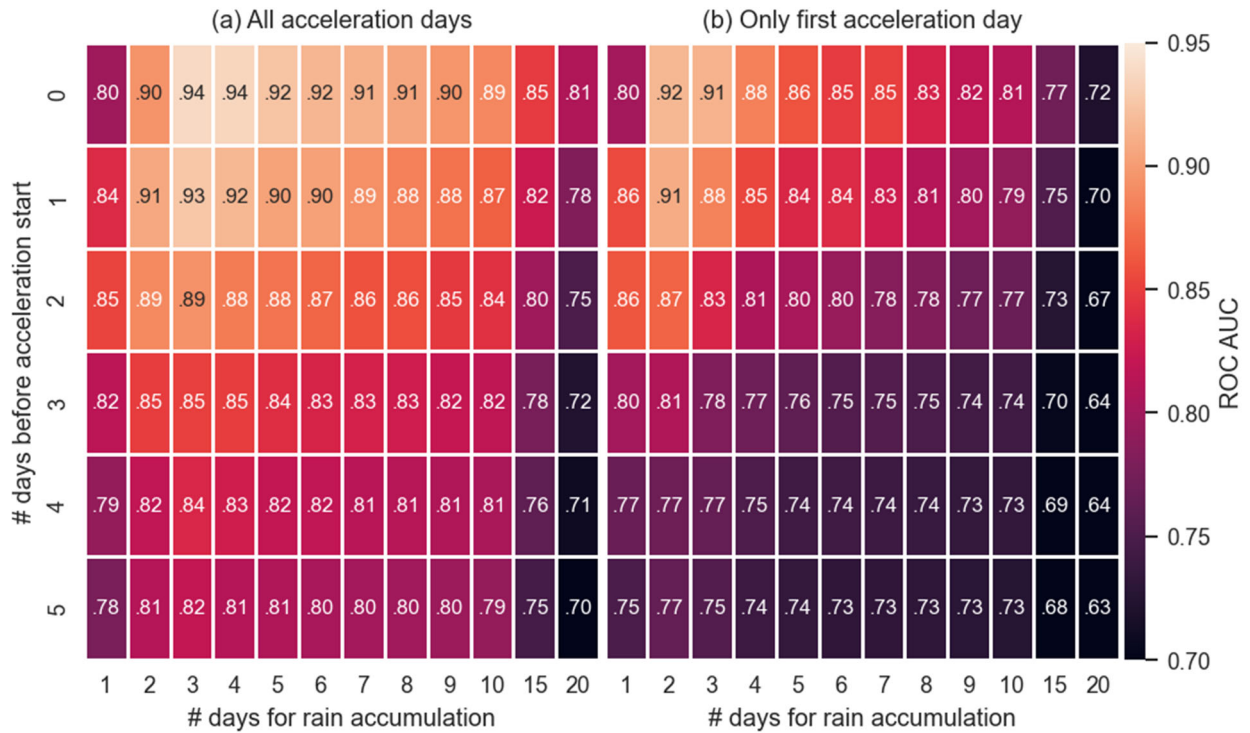


Figure 26 : ROC AUC pour la détection des phases d'accélération du glissement de Montgombert entre août 2016 et mars 2018, en utilisant différentes durées de cumuls de précipitations. Les jours labellisés comme observations positives commencent de 0 à 5 jours avant la date du début de l'accélération (ordonnée) et s'arrêtent à la fin des périodes d'accélération (a), ou à leur premier jour (b).

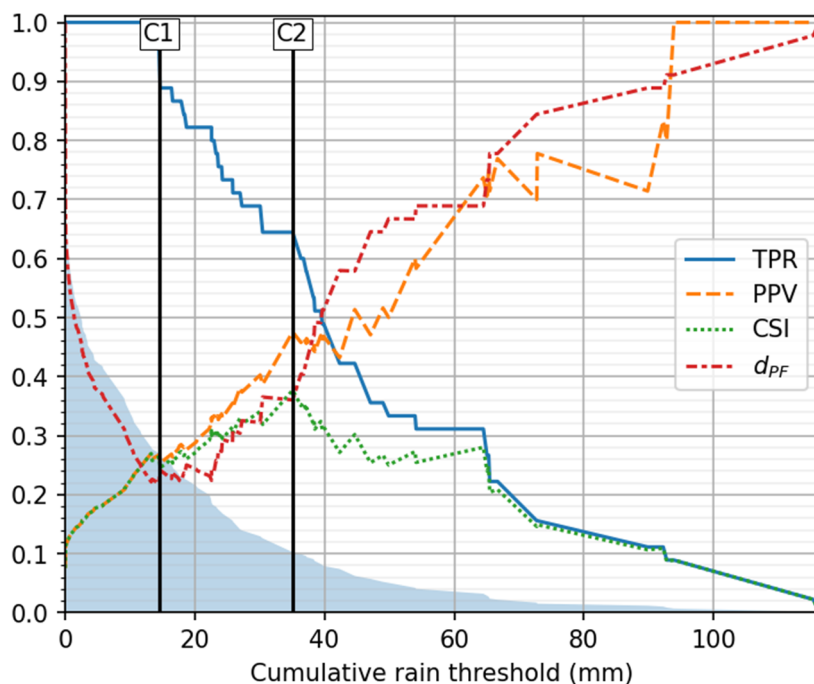


Figure 27 : Variations du TPR, PPV, CSI et d_{PF} en fonction du seuil sur le cumul de précipitations sur 3 jours. Les jours labellisés comme observations positives sont les jours d'accélération. Les seuils C1 et C2 correspondent respectivement au minimum de d_{PF} et au maximum du CSI.

Tableau 5 : Seuils pluviométriques retenus pour des cumuls sur 3 jours, et valeurs des scores associés sur plusieurs périodes. Les seuils retenus sont ceux calibrés sur la période du 08/08/2016 au 26/03/2018.

Période	Valeur du seuil	TPR	PPV	d_{PF}	CSI	% jours de dépassement du seuil	Proportion premiers jours accélération détectés
08/08/2016 - 26/03/2018 (Calage)	14,5 mm (C1, vigilance)	0.96	0.27	0.22	0.26	27 %	1
	35,1 mm (C2, alerte)	0.64	0.48	0.36	0.38	10 %	0.67
05/07/2019 - 08/03/2020 (Validation)	14,5 mm (C1, vigilance)	0.81	0.13	0.41	0.13	39 %	1
	35,1 mm (C2, alerte)	0.69	0.30	0.33	0.26	15 %	0.75
10/02/2021 - 09/09/2021 (Validation)	14,5 mm (C1, vigilance)	0.7	0.31	0.39	0.28	32 %	0.8
	35,1 mm (C2, alerte)	0.3	0.60	0.70	0.25	7 %	0.6

Les performances des seuils de détection sont supérieures dans le cas de la première période (2016-2018), par rapport aux deux autres. Pour la première période, la valeur du d_{PF} pour le seuil de vigilance C1 est 0.22, alors qu'elle est supérieure à 0.39 sur les deux autres périodes. Il en va de même pour le CSI du seuil d'alerte C2 (0.38 pour la première période, inférieure à 0.26 pour les deux suivantes). Cette différence de performance s'explique principalement car la première période correspond à la période de calage où des performances plus importantes sont attendues (définition du seuil réalisée sur cette période).

Les différences de performance entre les périodes peuvent être également être expliquées par :

- Le suivi discontinu des déplacements avec des cibles différentes d'une période à l'autre (cible pas forcément représentative du même compartiment du glissement de terrain) ;
- L'évolution au cours du temps de la relation précipitations-déplacements du glissement du Montgombert.

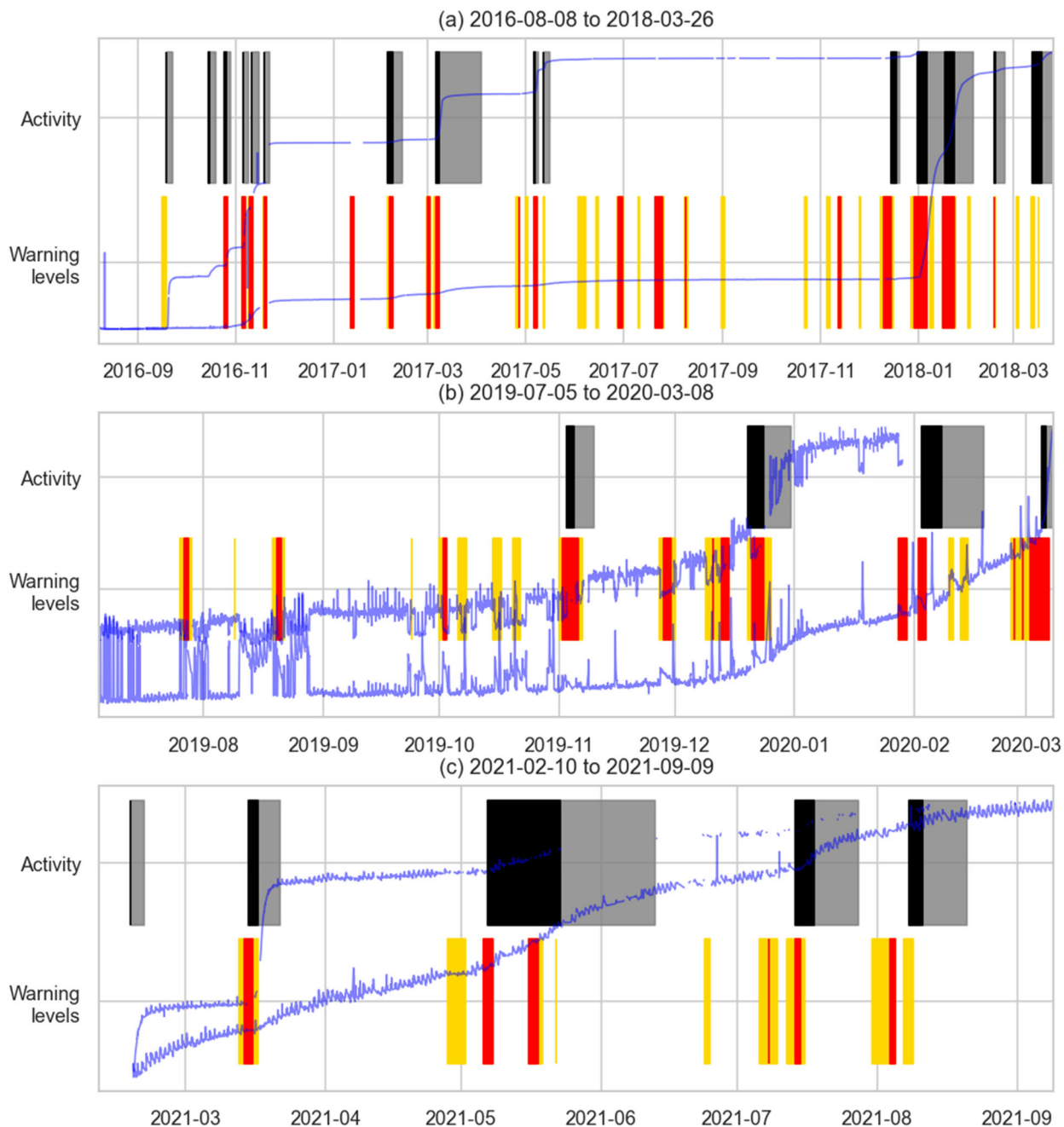


Figure 28 : Chronogramme des phases d'activité (en gris) et d'accélération (en noir) du glissement de Montgombert, pendant les trois périodes où des données de déplacement sont disponibles. Le dépassement du seuil pluviométrique de vigilance (22,6 mm sur trois jours) est indiqué en orange, et le dépassement du seuil pluviométrique d'alerte (35,1 mm sur trois jours) est indiqué en rouge. Les courbes bleues sont les courbes de déplacement normalisés par cible, pour deux cibles par période (C9 et C26 en a, C16 et C18 en b, C11 et C20 en c).

3.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Les seuils définis donnent des résultats acceptables, et significativement supérieurs aux résultats obtenus à l'échelle du bassin de risque de la vallée de l'Arly. Ainsi, entre 2019 et 2021, le pourcentage de jours où le seuil d'alerte est dépassé, et correspondant en effet à des périodes d'accélération, se situe entre 30 et 60 % (pour mémoire il est au mieux à 9% pour l'étude à l'échelle du bassin versant). De même, tous les premiers jours des phases d'accélération sont détectés par le seuil de vigilance entre mai 2019 et mars 2020.

Une limite de l'approche adoptée dans cette étude est la définition de seuils sur la base (1) de mesure de déplacement de surface et ce (2) sur les cibles topographiques les plus mobiles (3 cibles pour la période de calibration et 2 cibles pour la période de validation, sur une quinzaine de cibles installées chaque fois). Ces mouvements sont donc représentatifs des mouvements superficiels du glissement, dans les zones ponctuelles les plus actives et réactives. Mais le déplacement d'ensemble du glissement, caractérisé par une dynamique et une réactivité plus lente, n'est pas caractérisé.

Une autre limite de la définition de seuils pluviométriques pour l'étude de sites ponctuels concerne l'évolution des couplages hydro-mécaniques du versant au cours du temps et des déstabilisations successives (évolution de la géométrie, changement des chemins d'écoulement, altération des matériaux...). Dans une perspective opérationnelle, après une période de calage des seuils de déclenchement, il serait nécessaire de réévaluer le seuil lorsque le contexte hydromécanique évolue. Pour ce faire, il est important de disposer de données de déplacement précises, ce qui peut être en pratique compliqué notamment en cas de perte des cibles topographiques (cas du Montgombert).

Par conséquent, les performances des seuils établis ont très probablement été impactées :

- **par le suivi discontinu des déplacements avec des cibles différentes d'une période à l'autre ne suivant pas strictement les mêmes compartiments du glissement de terrain ;**
- **par l'évolution de la dynamique du glissement de terrain au cours du temps.**

Les résultats sont néanmoins très satisfaisants à l'échelle du site du Montgombert mais les travaux sont encore trop préliminaires pour que le seuil défini soit intégré dans un système d'alerte. Des pistes de développements pour une analyse plus poussée du lien entre précipitations et accélération d'un glissement de terrain actif devraient inclure :

- L'acquisition des données pluviométriques plus précises, en particulier avec l'installation de pluviomètres pour des études à l'échelle de sites précis.
- L'utilisation de méthodes de *machine learning* pour travailler directement sur les précipitations journalières des jours antécédents, au lieu de définir simplement un seuil sur un cumul. Des tests en ce sens ont été réalisés avec plusieurs types de méthodes de machine learning (random forest, SVM, réseaux de neurones), mais les résultats préliminaires obtenus ne sont pour l'instant pas concluants (ROC AUC inférieur à 0.76). Des analyses plus poussées sont donc nécessaires.
- L'analyse du lien entre l'intensité des précipitations, et l'intensité de la phase d'accélération. Dans cette étude, seul l'occurrence des phases d'accélération a été prise en compte.

4 Conclusion

Dans ce travail deux types de seuils pluviométriques pour le déclenchement de glissements de terrain ont été étudiés :

- Des seuils à l'échelle de l'ensemble du bassin versant de l'Arly pour le déclenchement et/ou la réactivation de glissement de types différents. Les meilleurs résultats ont été obtenus en travaillant sur des cumuls de précipitations sur 90 jours : ces cumuls permettent de détecter les événements pluvieux majeurs, avec des dépassements de seuils sur plusieurs semaines qui permettent de détecter correctement les clusters temporels de glissements. Compte tenu de la variabilité phénoménologique des glissements considérés et de l'incertitude sur leurs dates d'occurrence, le déclenchement d'alerte basé sur ces cumuls génère beaucoup de faux positifs ;
- Des seuils à l'échelle d'un glissement identifié et instrumenté (glissement de Montgombert), pour prévoir les accélérations superficielles. Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant des cumuls de 3 jours, indiquant la forte réactivité des parties superficielles du glissement.

Les résultats obtenus confirment que les précipitations ont bien un rôle déclencheur majeur dans l'instabilité des versants de la vallée de l'Arly et que l'investigation de la relation précipitation-déstabilisation est pertinente pour mieux anticiper le déclenchement des glissements de terrain dans ce secteur. Compte tenu de l'incertitude sur l'inventaire des événements sur le secteur, les seuils calculés pour l'ensemble de la vallée ne sont toutefois pas utilisables tels quels pour un système opérationnel.

Les pistes de développement pour de futurs travaux concernent ainsi en particulier la consolidation de l'inventaire des glissements dans le bassin de risque des Gorges de l'Arly (avec des glissements anciens ou à venir), pour préciser la typologie des événements et leur dates d'occurrence. Pour affiner la quantification du lien entre déclenchement et précipitations, des données pluviométriques plus précises pourront aussi être exploitées (données radar de meilleure résolution spatiale, et/ou pluviomètres pour des analyses à l'échelle de site). Enfin, des méthodes statistiques plus poussées (e.g. machine learning) pourront aussi être testées.

5 Bibliographie

- Aleotti, P.**, 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology, Rainfall-triggered landslides and debris flows* 73, 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- Barthelemy, S.**, 2021. Analyse statistique des précipitations dans le déclenchement de glissements de terrain. (Rapport de stage de 3ème année). ENSG, BRGM, Orléans, France.
- Caine, N.**, 1980. The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 62, 23–27. <https://doi.org/10.2307/520449>
- Coeur D.**, 2022, Projet Miroir Etude historique des instabilités de versant dans les Gorges de l'Arly sur les communes d'Ugine et de Cohennoz (Savoie). Rapport d'Acthys-Diffusion du 25/03/2022, 56 p. 21 fig., 3 tab.
- Corsini, A., Mulas, M.**, 2017. Use of ROC curves for early warning of landslide displacement rates in response to precipitation (Piagneto landslide, Northern Apennines, Italy). *Landslides* 14, 1241–1252. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0781-8>
- De Vita, P., Reichenbach, P., Bathurst, J.C., Borga, M., Crosta, G., Crozier, M., Glade, T., Guzzetti, F., Hansen, A., Wasowski, J.**, 1998. Rainfall-triggered landslides: a reference list. *Environmental Geology* 35, 219–233. <https://doi.org/10.1007/s002540050308>
- Desvarreux P., Lorier L., Palin P.**, 2002, Traitement d'un itinéraire routier par rapport au chutes de blocs et éboulements : exemple des gorges de l'Arly. *Géochronique* n°132, pp 35-38
- Frattini, P., Crosta, G., Sosio, R.**, 2009. Approaches for defining thresholds and return periods for rainfall-triggered shallow landslides. *Hydrol. Process.* 23, 1444–1460. <https://doi.org/10.1002/hyp.7269>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P.**, 2008. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5, 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Maurin P., Azemard P., Colas B., Guitet C., Levy C., Martin R., Martins C., Vallet A. et le concours d'Andreis N., Demirdjian J.-L., Malascrabes M.**, 2022, Versant du Vescorn. Analyse des mouvements de terrain. Rapport du comité technique. Phase 2 : Scénarios de rupture, de propagation et d'obstruction du Var. Octobre 2022. Rapport BRGM-CEREMA-RTM référencé 20-ME-0303 (CEREMA) et RP-71984-FR (BRGM), 129 p., 96 fig., 2 ann.
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., Catani, F.**, 2012. Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides* 9, 485–495. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0308-2>
- Melillo, M., Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Gariano, S.L., Roccati, A., Guzzetti, F.**, 2018. A tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence. *Environmental Modelling & Software* 105, 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024>
- Nafarzadegan, A.R., Talebi, A., Malekinezhad, H., Emami, N.**, 2013. Antecedent Rainfall Thresholds for the Triggering of Deep-Seated Landslides (Case study: Chaharmahal & Bakhtiari Province, Iran). *ECOPERSIA* 1, 23–39.

- Postance, B., Hillier, J., Dijkstra, T., Dixon, N.**, 2018. Comparing threshold definition techniques for rainfall-induced landslides: A national assessment using radar rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms* 43, 553–560. <https://doi.org/10.1002/esp.4202>
- Roudnitska S, avec l'appui d'Etcheverry D. et Waszak D.**, 2014, Torrent du Nant Cortay, Etude de bassin versant de décembre 2014. rapport RTM Savoie. 122 p.
- Segoni, S., Piciullo, L., Gariano, S.L.**, 2018. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides* 15, 1483–1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Terlien, M.T.J.**, 1998. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology* 35, 124–130. <https://doi.org/10.1007/s002540050299>
- Vallet, A., Varron, D., Bertrand, C., Fabbri, O., Mudry, J.**, 2016. A multi-dimensional statistical rainfall threshold for deep landslides based on groundwater recharge and support vector machines. *Nat Hazards* 84, 821–849. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2453-3>
- Van Asch, Th.W.J., Buma, J., Van Beek, L.P.H.**, 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology* 30, 25–32. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00042-2)
- Wieczorek, G.F., Guzzetti, F.**, 2000. A review of rainfall thresholds for triggering landslides, in: *Proceedings of the EGS Plinius Conference*. Editoriale Bios, Maratea, Italy.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Auvergne Rhône Alpes

Campus LyonTech -la Doua
58 boulevard Niels Bohr Bat E14 –CS 52132
69603 Villeurbanne Cedex -France
Tél. : 04.72.82.11.50

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm