



Glissements de terrain dans les Gorges de l'Arly

Etude des seuils statistiques de déclenchement / réactivation des mouvements gravitaires

M. Peruzzetto, A. Vallet, E. Equilbey



Introduction

Utilisation des seuils pluviométriques

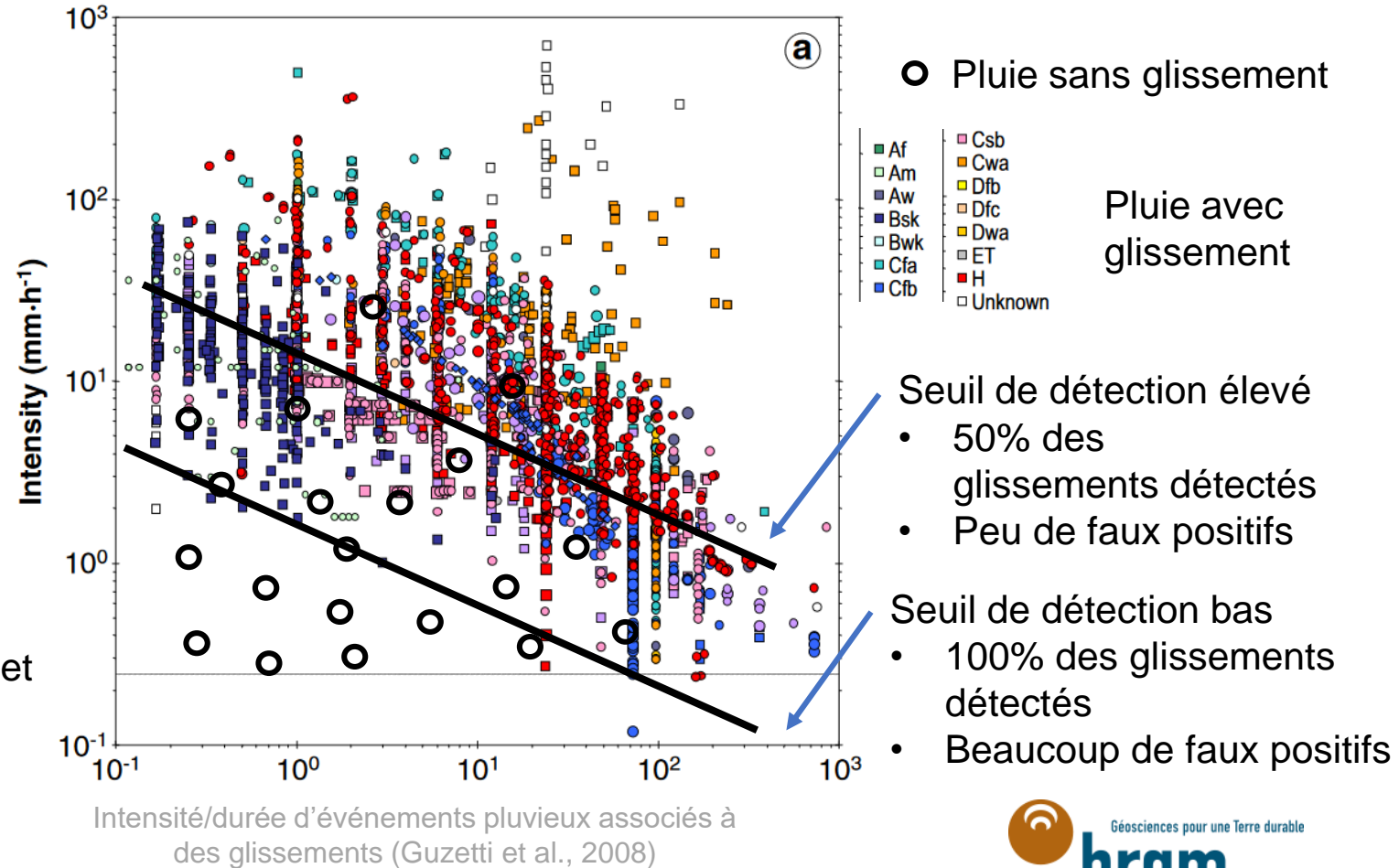
Prédire l'occurrence de mouvements gravitaires en fonction des prévisions météorologiques.

Critère sur des épisodes pluvieux.

- Caractérisation d'événement pluvieux (intensité/durée ou cumul/durée)
- Association des épisodes à l'occurrence d'événements
- Critère statistique de détection (détecter les glissements VS limiter le nombre de faux positifs)

Limites

- Spécifique à un site / un type de glissement
- Difficulté pour définir un événement pluvieux et établir la corrélation avec un glissement
- Pas de prise en compte de l'historique des précipitations



Introduction

Utilisation des seuils pluviométriques

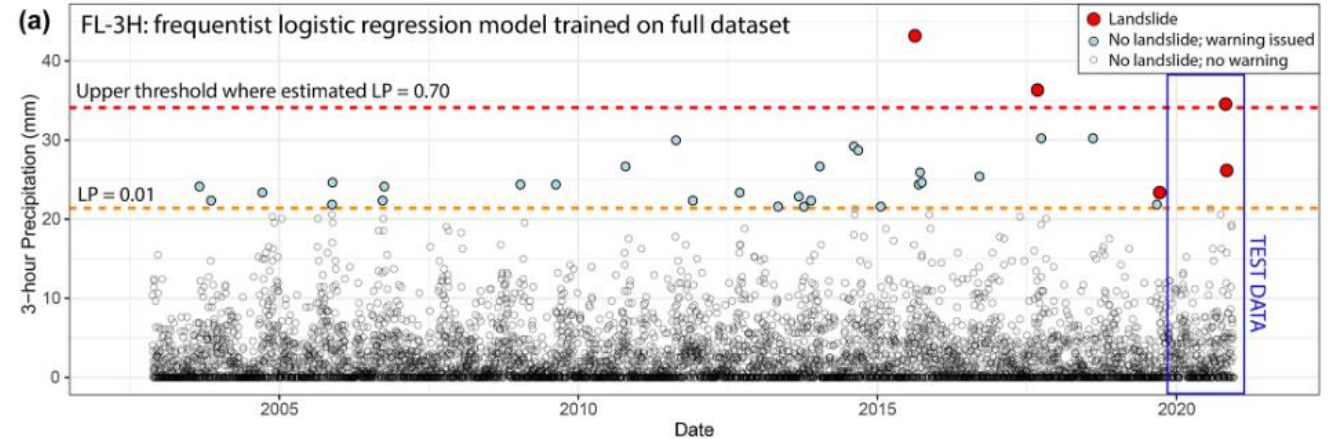
Prédire l'occurrence de mouvements gravitaires en fonction des prévisions météorologiques.

Critère sur des cumuls.

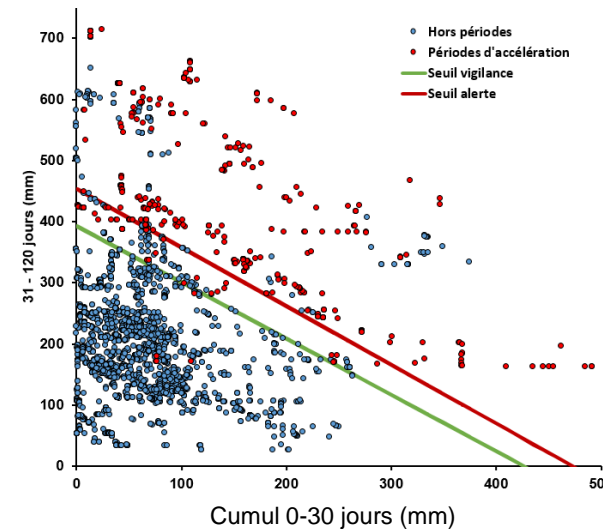
- Calcul de cumuls de pluies sur une fenêtre glissante, tous les jours
- Comparaison aux jours d'occurrence / d'activité des glissements
- Critère statistique de détection (détecter les glissements VS limiter le nombre de faux positifs)

Limites

- Prise en compte de dynamiques différentes (épisode court et intense VS épisode long) possible mais plus complexe



Cumuls pluviométriques sur 3 heures comme critère de seuil (Patton et al., 2023)



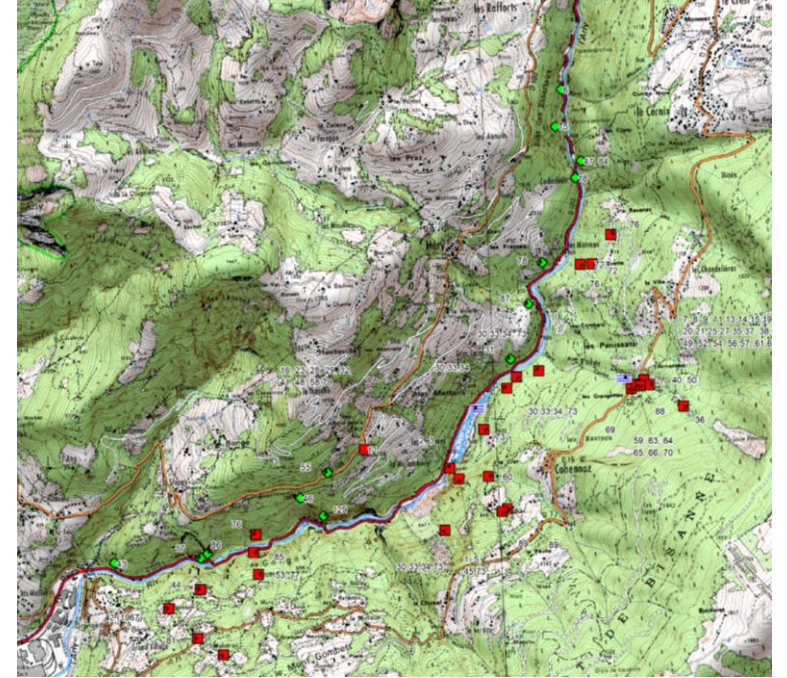
Critère combiné sur deux périodes de cumul (étude BRGM)

Application 1 : Gorges de l'Arly

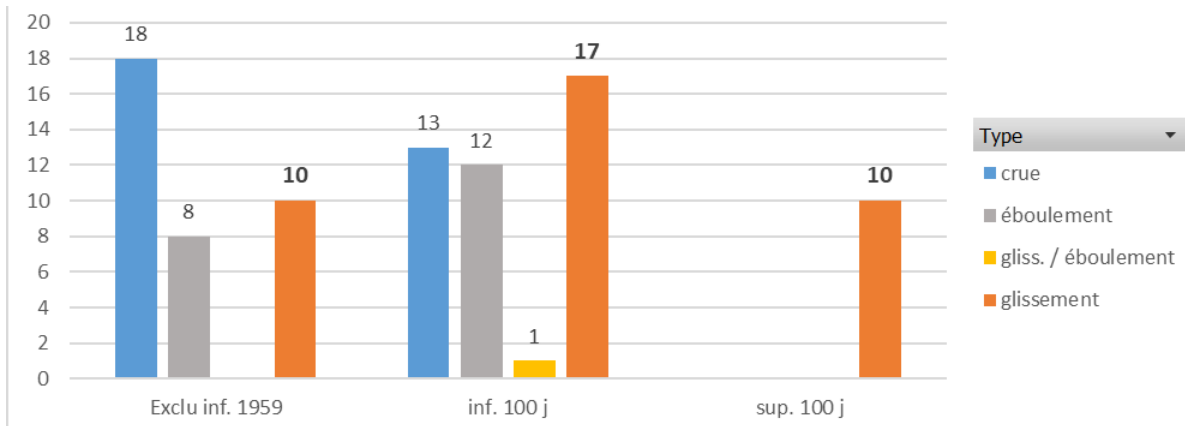
Données

Inventaire des glissements

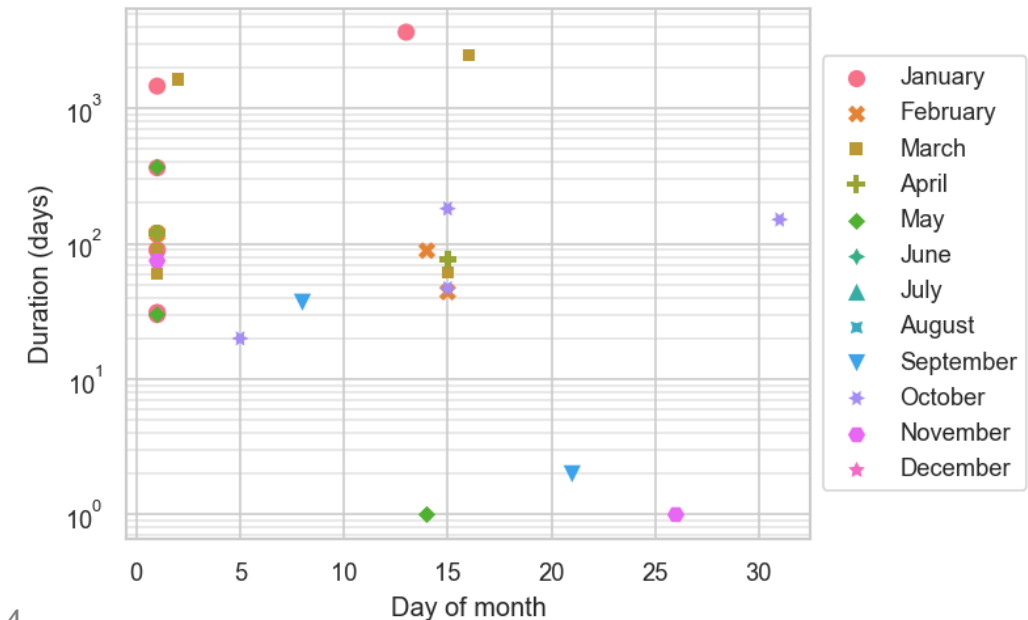
- 53 événements depuis 1959
- Recueil historique (BD MCT + ONF-RTM + archives + presse)
- Typologie variée et imprécise : crue + glissements + éboulements
- Datation et durée imprécise
- → Pas de distinction entre les types d'événements dans la suite



Localisation des événements



Nombre d'événement par type, date, et durée



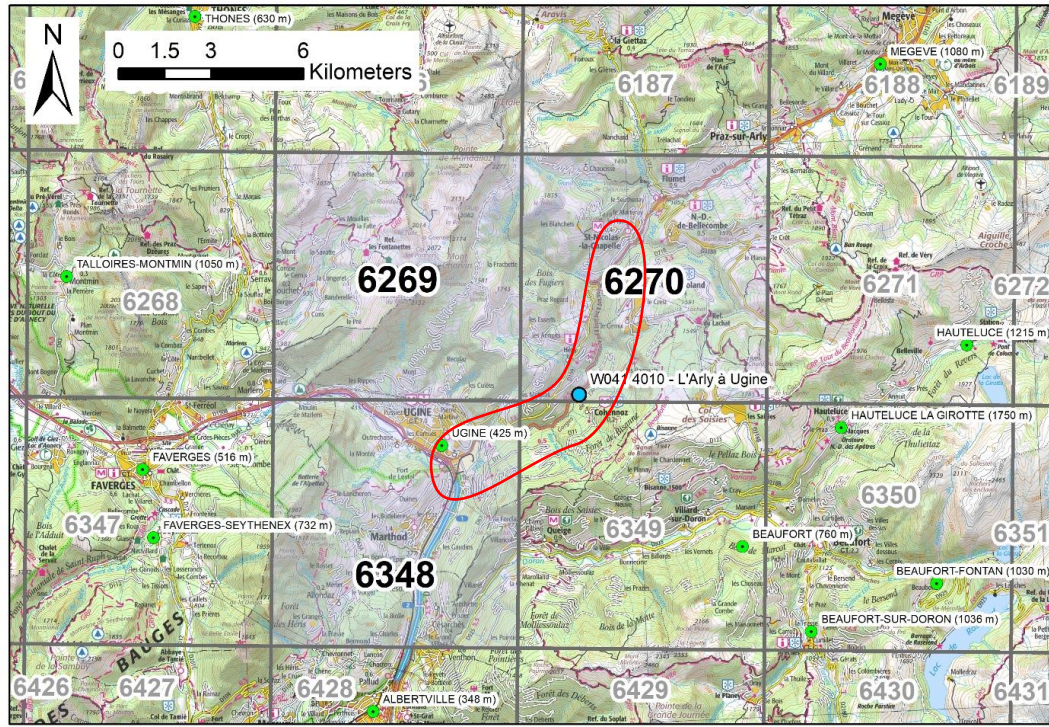
Durée des événements selon leur date de début

Application 1 : Gorges de l'Arly

Données

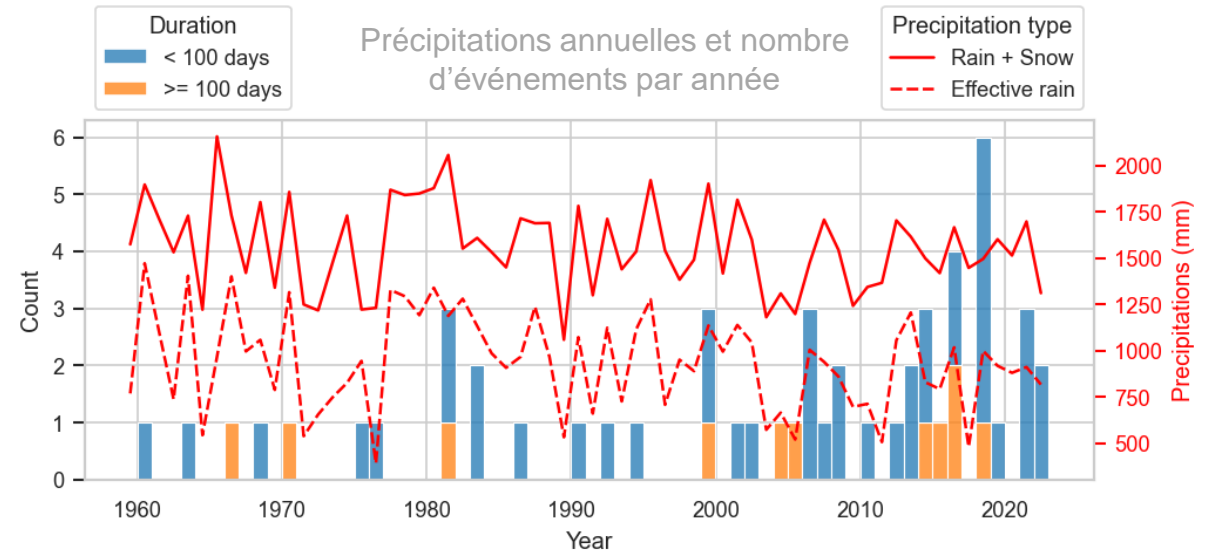
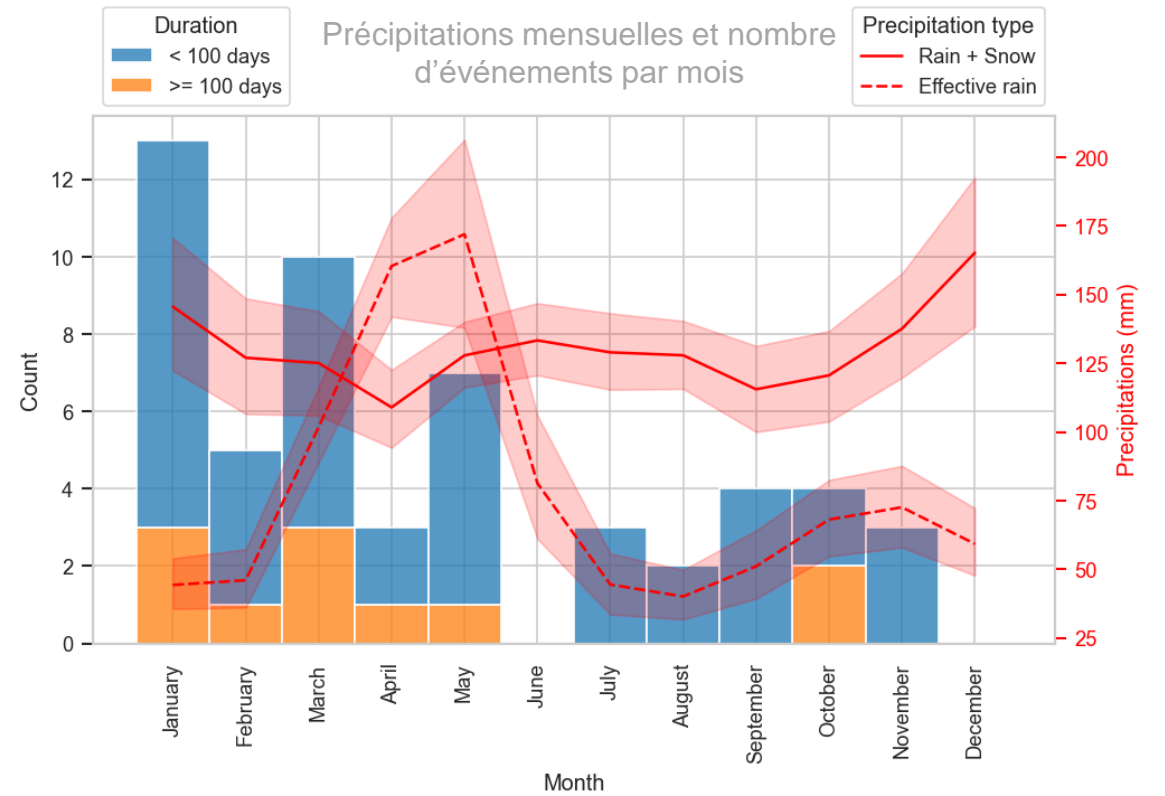
Données pluviométriques (depuis 1959)

- Données brutes (Pluie + neige)
 - Moyenne sur 3 mailles SAFRAN de Météo-France
- Précipitations efficaces
 - Pluie + fonte des neiges – évapotranspiration (modèle hydrologique GARDENIA calé sur débit Arly)



BRGM — SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL — WWW.BRGM.FR

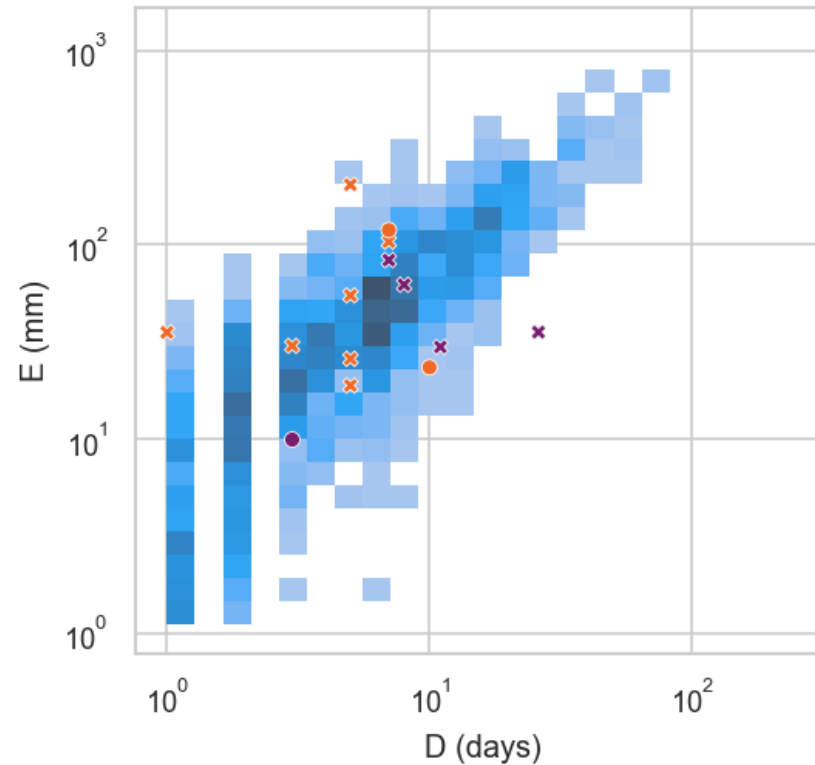
Mailles SAFRAN utilisées



Application 1 : Gorges de l'Arly

Comparaison pluviométrie / événements

- Comparaison inventaire avec durée / cumuls d'événements pluvieux avec l'outil CTRL-T (Melillo et al., 2018)
 - Pas de résultat concluant
- Tests sur les cumuls de pluie avec détermination des valeurs optimales de :
 - C : le nombre de jours utilisés pour calculer les cumuls
 - D : Le nombre de jours avant les glissements pendant laquelle une alerte devra être émise
 - Du seuil T sur le cumul
- Critère d'optimalité :
 - Maximiser le nombre de prédiction correctes
 - Minimiser le nombre de prédiction incorrectes



Exemple résultat CTRL-T

Pas de distinction entre événements pluvieux déclenchant / ne déclenchant pas des glissements

Histogrammes des événements pluvieux (durée/cumul) et événements associés à des glissements (points colorés)

Date (arbitraire)	01/05	02/05	03/05	04/05	05/05	06/05	07/05	08/05	09/05	10/05
Labels des observations	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Labels prédits (cumul sur C jours dépasse le seuil T)	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
Classification	FP	FN	TP	TP	TP	FN	TP	TN	TN	FP

TP : True Positive, TN : True Negative, FP : False Positive, FN : False Negative

Exemple théorique de labélisation des jours pour les observations et les prédictions

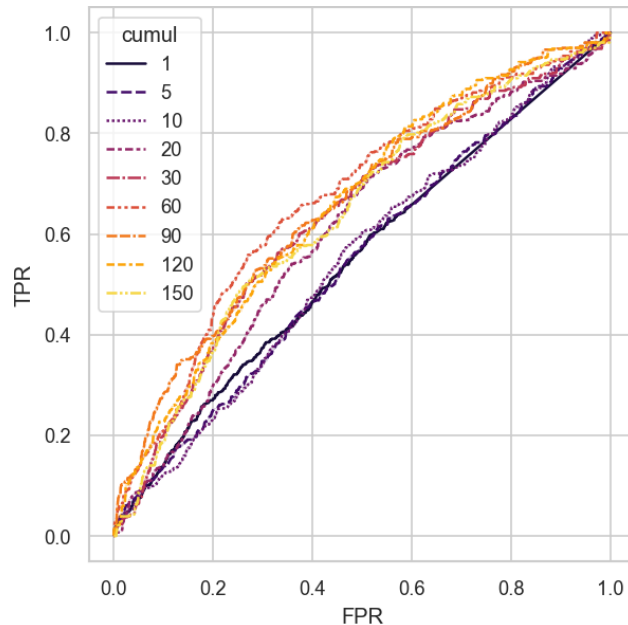
Détermination des périodes de cumul C / de détection D

- Utilisation de la courbe ROC
 - Pour une durée cumul C et une durée de détection D données, quantification de la qualité du test en fonction du seuil retenu
 - Un couple (C,D) optimal maximise l'air sous la courbe ROC AUC < 1
- Test systématique de tous les couples (C,D) pour déterminer le plus efficace

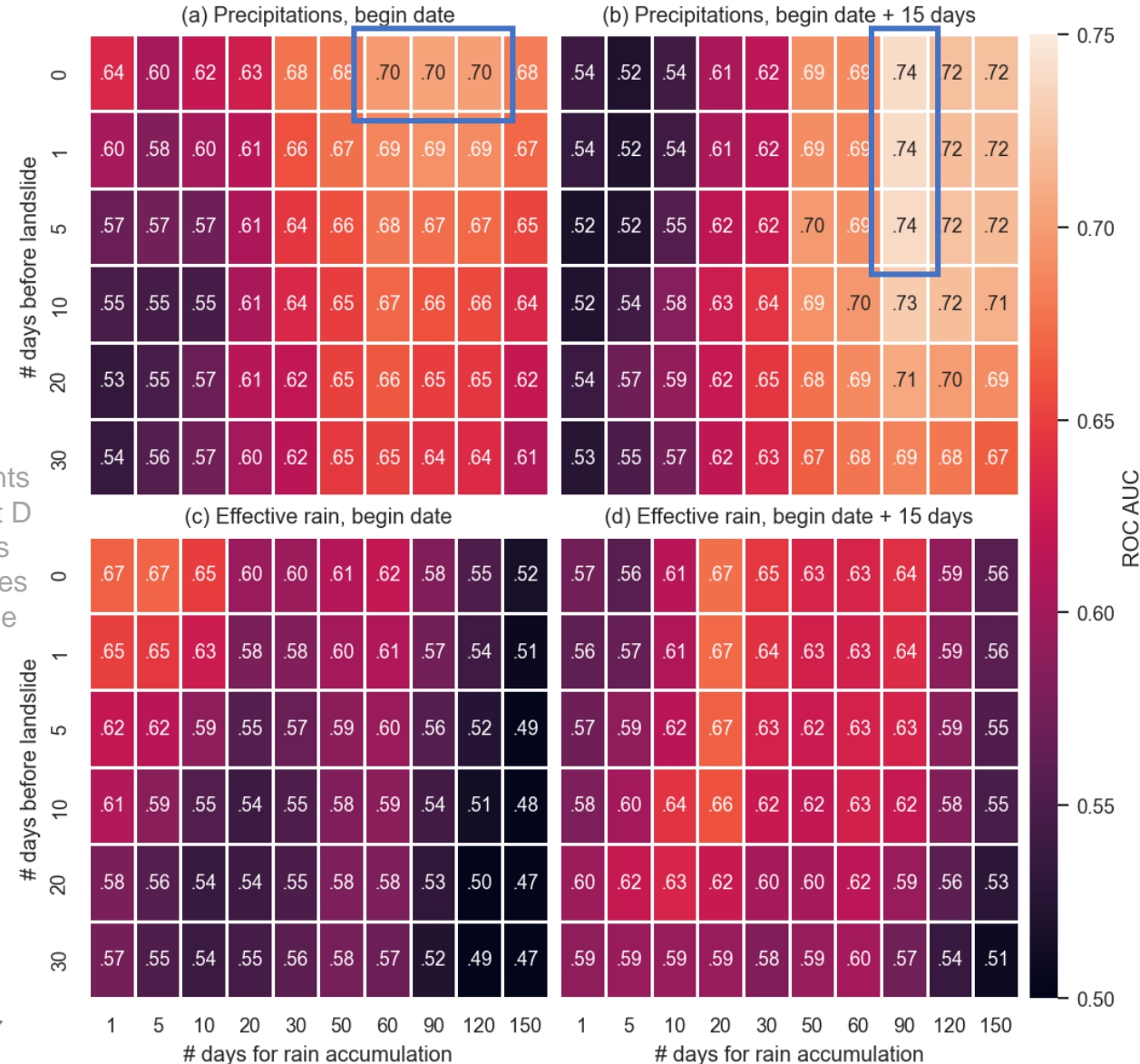
Exemple de courbes ROC pour différentes durées de cumul C, pour une durée de détection pré-événement de 10 jours

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$$



ROC AUC pour différents couples C (abscisse) et D (ordonnées), selon les données pluviométriques utilisées et les dates de début d'événement retenues



Détermination des seuils pluviométriques

5 jours avant le glissement ← → Jour du glissement

Pour un couple durée de cumul (90 jours) / durée pré-événement (5 jours)

Date (arbitraire)	01/05	02/05	03/05	04/05	05/05	06/05	07/05	08/05	09/05	10/05
Labels des observations	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Labels prédits (cumul sur C jours dépasse le seuil T)	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
Classification	FP	FN	TP	TP	TP	FN	TP	TN	TN	FP

• Définition d'un seuil de vigilance C1

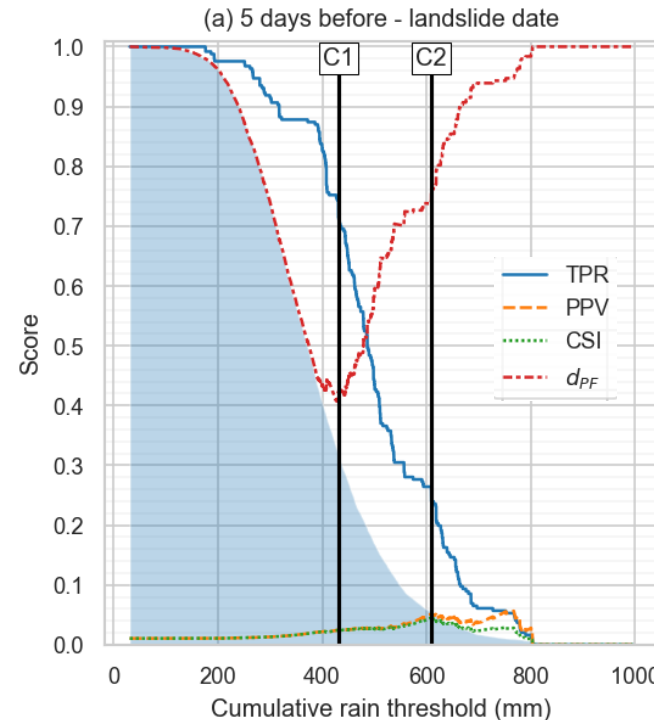
- Minimisation de $d_{PC} = \sqrt{FPR^2 + (1 - TPR)^2} > 0$
- → Minimisation du nombre de faux positifs (FP) et maximisation du nombre de vrais positifs (TP)

• Définition d'un seuil d'alerte C2

- Maximisation du $CSI = \frac{TP}{TP+FP+FN} < 1$
- → Minimisation du nombre de faux positifs (FP) et de faux négatifs (FN) et maximisation du nombre de vrais positifs (TP)

• Critère du CSI plus contraignant que le critère de d_{PC}

- **C1 < C2**



$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$ ← Proportion des observations qui sont détectées

$PPV = \frac{TP}{TP + FP}$ ← Proportion des détections qui correspondent à de vrais glissements

$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$

Application 1 : Gorges de l'Arly

Conclusion

Performances modestes mais résultats encourageants compte tenu de la fiabilité réduite des données

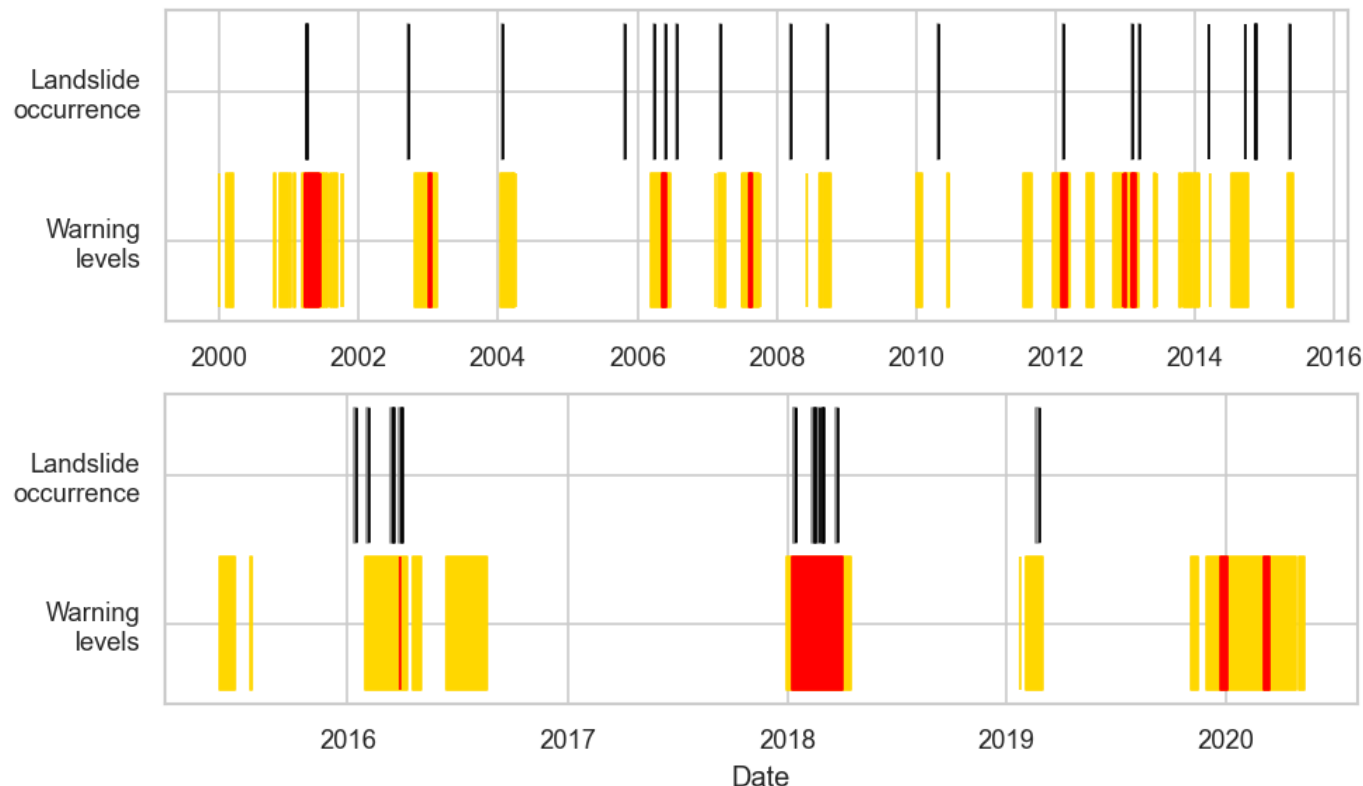
- **Inventaire imprécis**
 - Durée de cumul de 90 jours permet de détecter les clusters d'événements, mais ne correspond pas à un processus hydrogéologique
- **Perspectives**
 - Amélioration de la qualité de l'inventaire (historique + nouveau événements)



Application sur un site où les phases de glissements sont bien documentées

Chronogramme de déclenchement des alertes

Thresholds: 431 mm - 609 mm



Seuil	Valeur du seuil (mm)	% des jours de glissements détectés (TPR)	% de jours cumul > seuil correspondant à un glissement (PPV)	% jours cumulés > seuil
C1	431	74 %	2 %	32 %
C2	609	26 %	5 %	5 %

Application 2 : Glissement de Montgombert

Glissement de Montgombert : présentation

- **Activité**

- Actif depuis 2016
- Principales phases d'activités : 11/2016, 03-05/2017, 02/2018, 04/2018, 03/2020, 03/2021



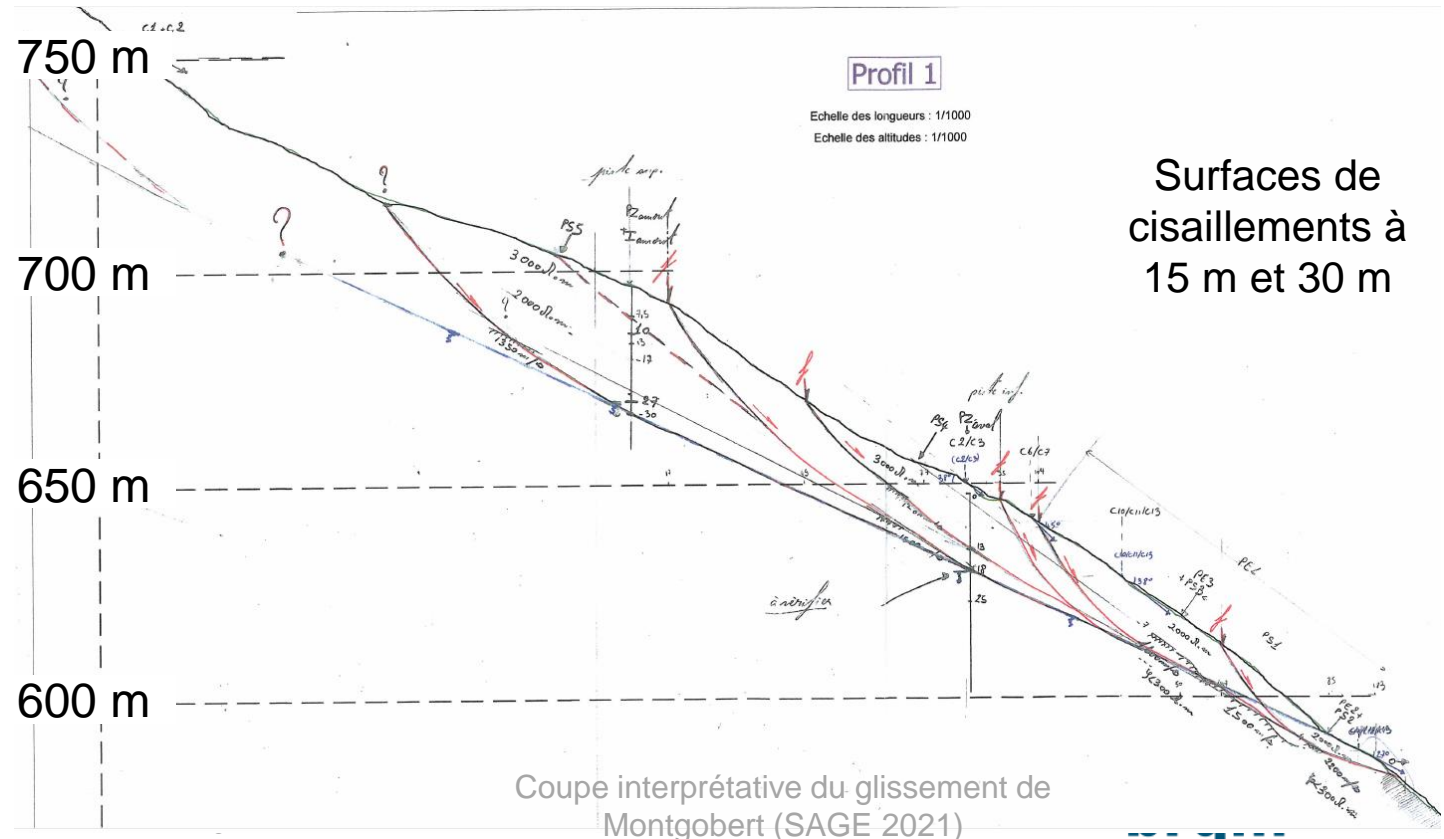
Novembre 2017



Janvier 2018

- **Instrumentation**

- Suivi tachéométrique automatisé (08/2016→03/2018, 07/2018→03/2020, 02/2021→09/2021)
- 2 inclinomètres (depuis 2016 et 2017 jusqu'à Mai 2021)
- Suivi photographique (05/2019 → 04/2020 ?)



Surfaces de cisaillements à 15 m et 30 m

Données pour la définition des seuils

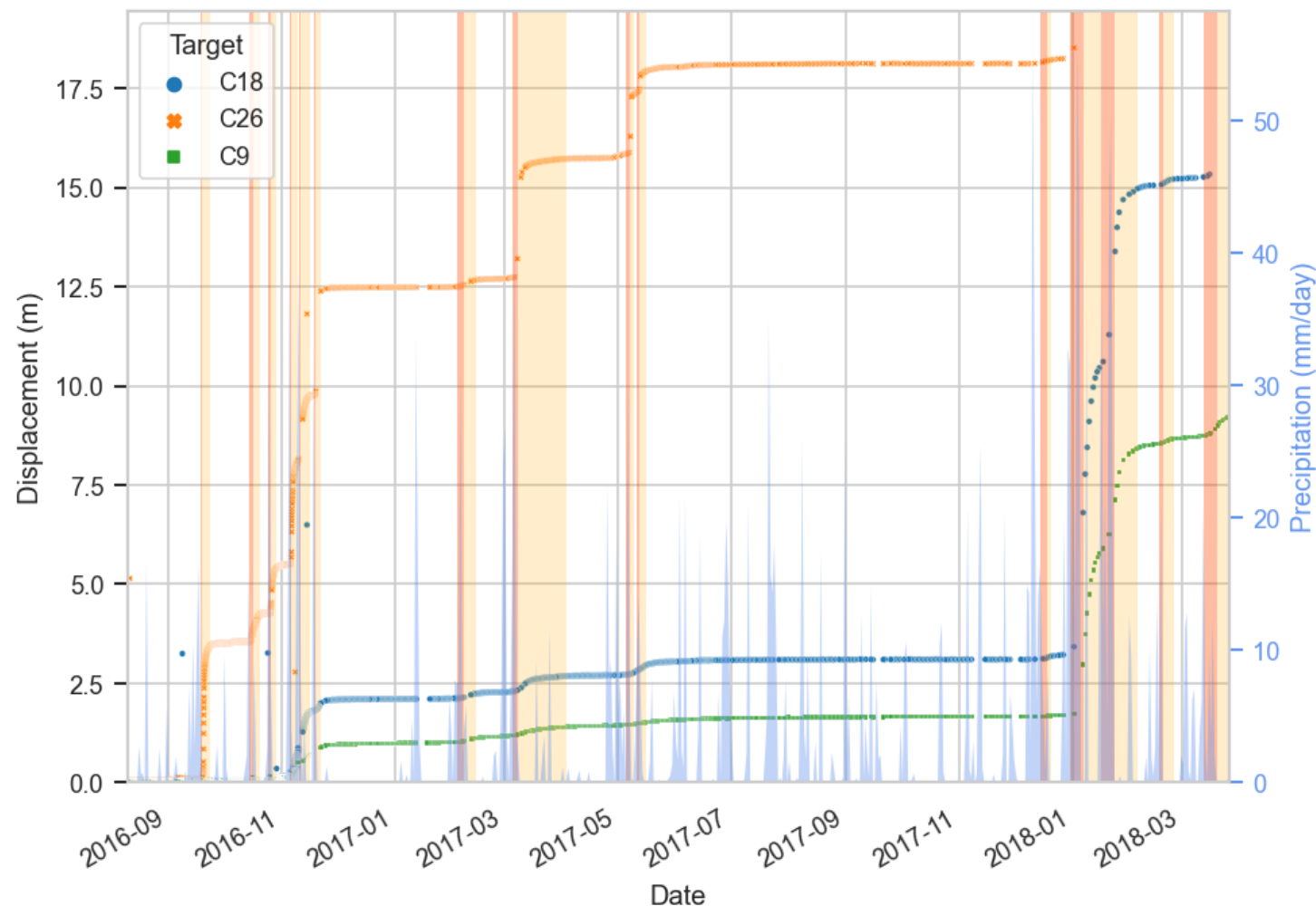
Périodes d'activité (orange et rouge) et d'accélération (rouge), avec les précipitations journalières

• Pluviométrie

- Moyenne des mailles SAFRAN 6348 et 6349 (pluie + neige)
- Test avec seulement la pluie, seulement la neige et les précipitations efficaces pour le bassin versant → pas d'amélioration
- Travail sur **cumuls** (analyse mois bonne avec durée/cumuls d'épisodes pluvieux)

• Activité du glissement

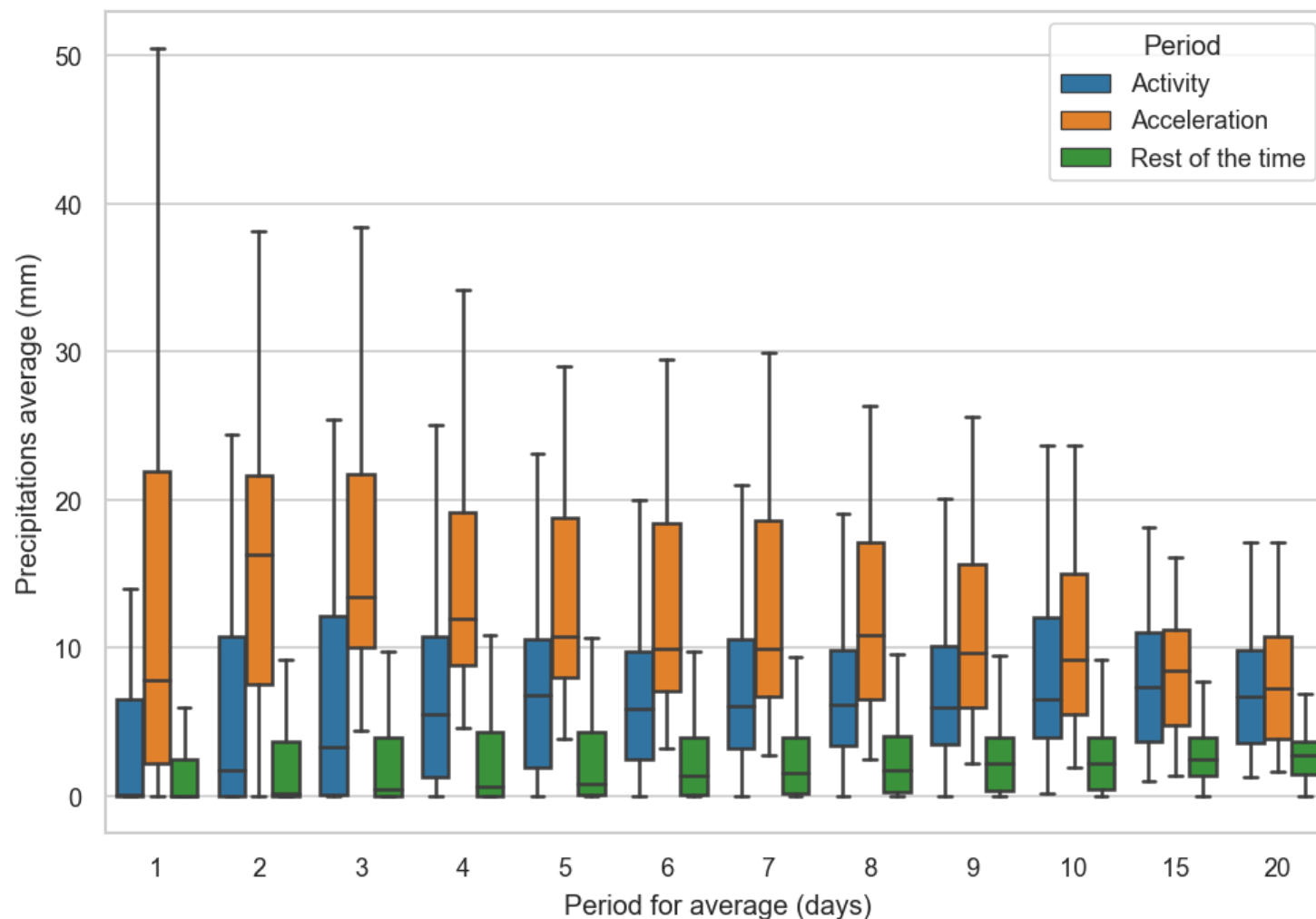
- Suivi **tachéométrique** automatisé
- Exploitation des cibles avec déplacements marqués
- Détermination manuelle de phases **d'accélération** et de phases **d'activité**
- **Détermination des seuils**
 - 09/2016 → 03/2018
- **Tests des seuils calculés**
 - 07/2018 → 03/2020
 - 02/2021 → 09/2021



Méthodologie

- **Jours à détecter**
 - Journées d'accélération + D jours avant le début de l'accélération
- **Calcul des seuils comme pour la seul à l'échelle régionale**
 - Détermination de la durée de cumuls / et de la durée pré-accélération donnant les meilleurs résultats
 - Pour ces durées, calcul de seuils d'alerte et de vigilance avec les critères du d_{PF} et du CSI .

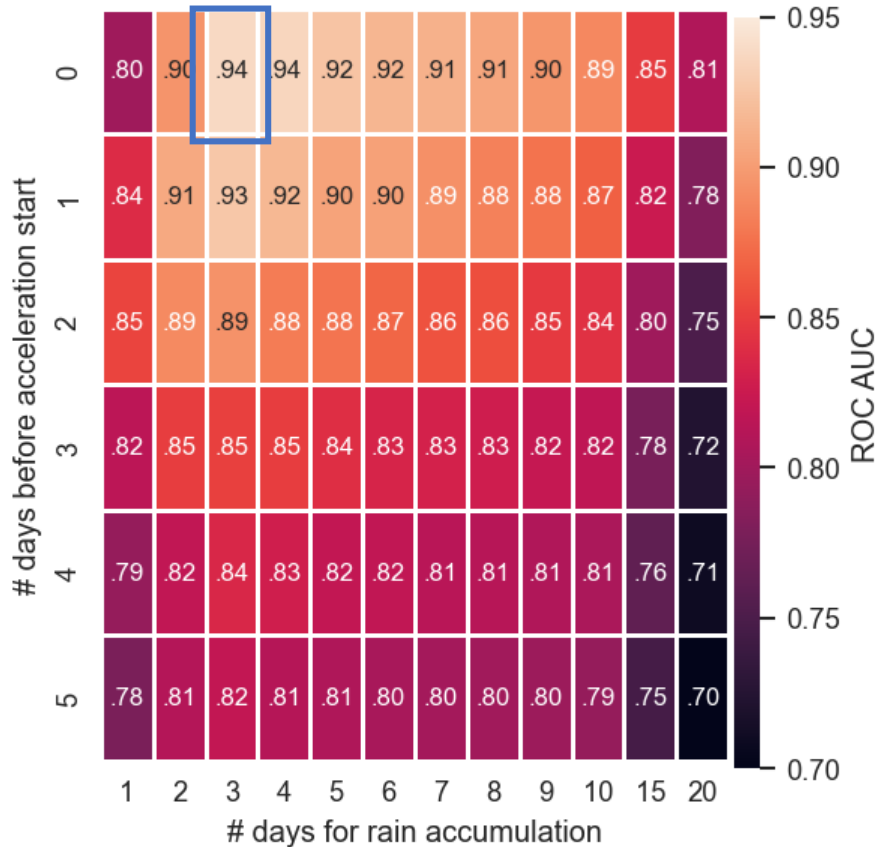
Comparaison des précipitations moyennées sur plusieurs périodes, pour les phases d'activité, d'accélération, et le reste du temps, de 09/2016 à 03/2018



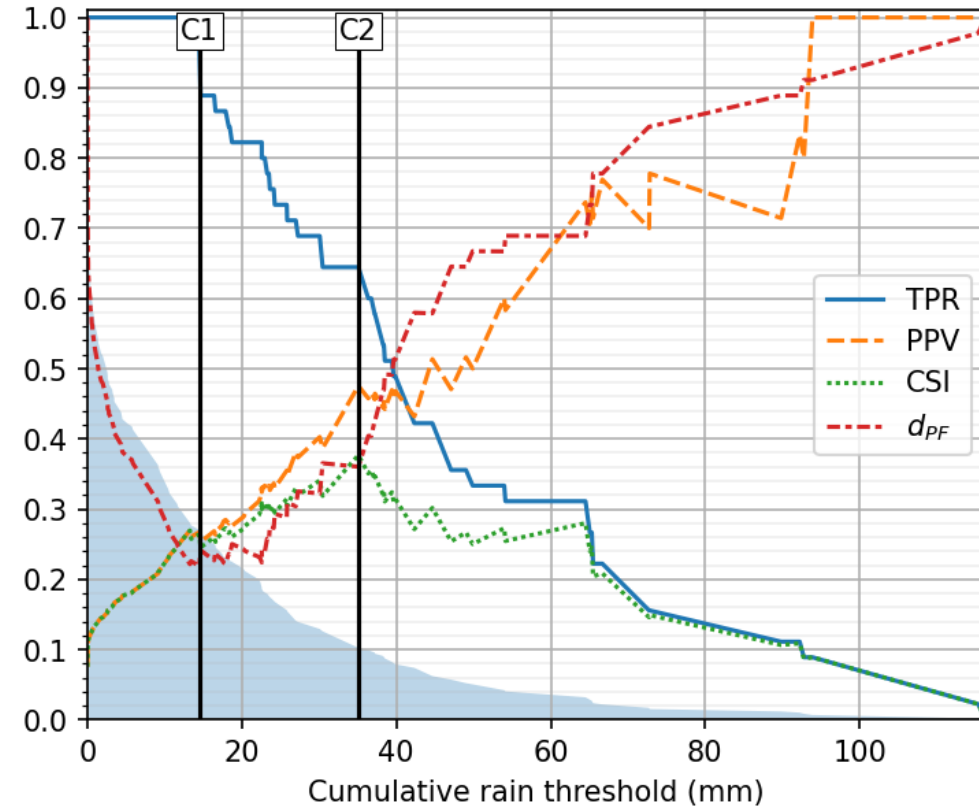
Application 2 : Glissement de Montgombert

Résultats : choix du seuil

ROC AUC pour différentes durées de cumul (abscisse) et durées pré-accélération (ordonnées)



Evolution de différents scores en fonction du seuil choisi sur des cumuls sur 3 jours, pour détecter les jours d'accélération

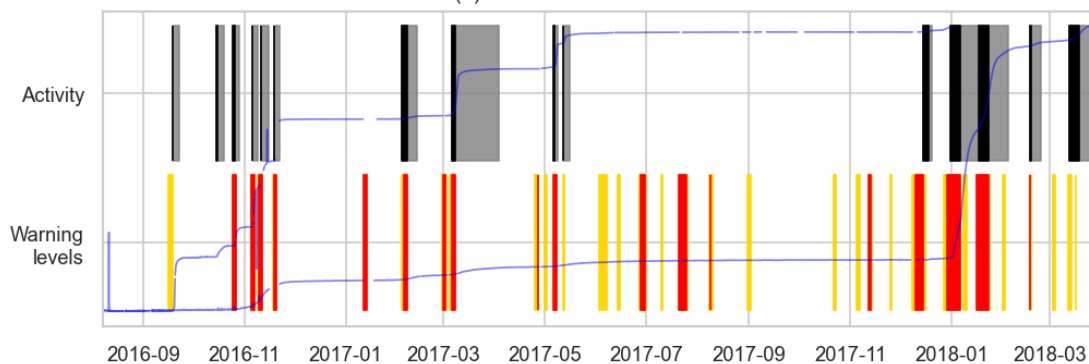


Seuil	% des jours d'accélération détectés (TPR)	% de jours cumul > seuil correspondant à une accélération (PPV)	% jours de dépassement du seuil	% premiers jours accélération détectés
14,5 mm (C1)	96 %	27 %	27 %	100 %
35,1 mm (C2)	64%	48 %	10 %	67 %

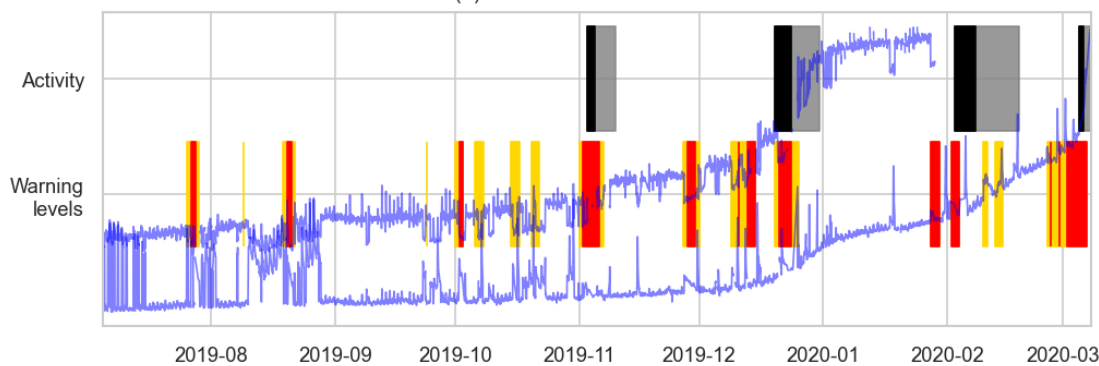
Application 2 : Glissement de Montgombert

Résultats : Validation sur les autres périodes

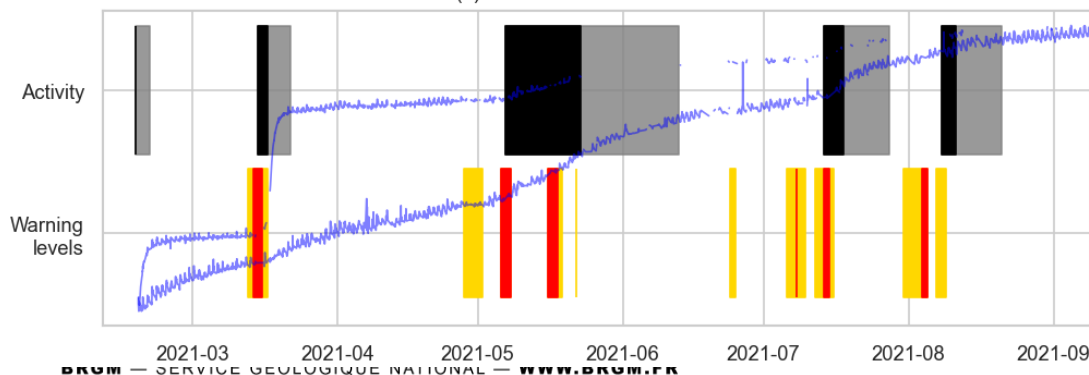
(a) 2016-08-08 to 2018-03-26



(b) 2019-07-05 to 2020-03-08



(c) 2021-02-10 to 2021-09-09



Chronogrammes de dépassement des seuils (jaune et rouge) et d'activité (gris et noir), avec les déplacements cumulés (bleu)

Scores des seuils d'activation selon les périodes

Période	Seuil	% des jours d'accélération détectés (TPR)	% de jours cumulés > seuil correspondant à une accélération (PPV)	% jours de dépassement du seuil	% premiers jours accélération détectés
08/08/2016	14,5 mm	96 %	27 %	27 %	100 %
-	(C1)				
26/03/2018 (Calage)	35,1 mm	64 %	48 %	10 %	67 %
-	(C2)				
05/07/2019	14,5 mm	81 %	13 %	39 %	100 %
-	(C1)				
08/03/2020 (Validation)	35,1 mm	69 %	30 %	15 %	75 %
-	(C2)				
10/02/2021	14,5 mm	70 %	31 %	32 %	80 %
-	(C1)				
09/09/2021 (Validation)	35,1 mm	30 %	60 %	7 %	60 %
-	(C2)				

Conclusion

- **Des résultats satisfaisants**

- Seuils déterminés pour le glissement du Montgombert plus significatifs que pour les Gorges de l'Arly
- E.g. 30 à 60% des alertes correspondent en effet à des phases d'accélération pour Montgombert, contre au mieux 9% pour les Gorges de l'Arly

- **Limites**

- Détection des mouvements de surface, mais pas nécessairement du mouvement global et plus lent du glissement;
- L'évolution du glissement change sa réponse hydro-mécanique aux précipitations → seuils pas forcément valables sur différentes périodes.

- **Perspectives**

- Acquisition de données pluviométriques plus précises spatialement (radar, pluviomètre);
- Analyse du lien entre l'intensité des phases d'accélération et les précipitations;
- Utilisation de méthodes statistiques plus poussées (seuils sur plusieurs périodes de cumuls, utilisation de machine-learning, ...). Des tests en ce sens ont été réalisés mais ne sont pas concluants.

Merci de votre attention.

Questions ?