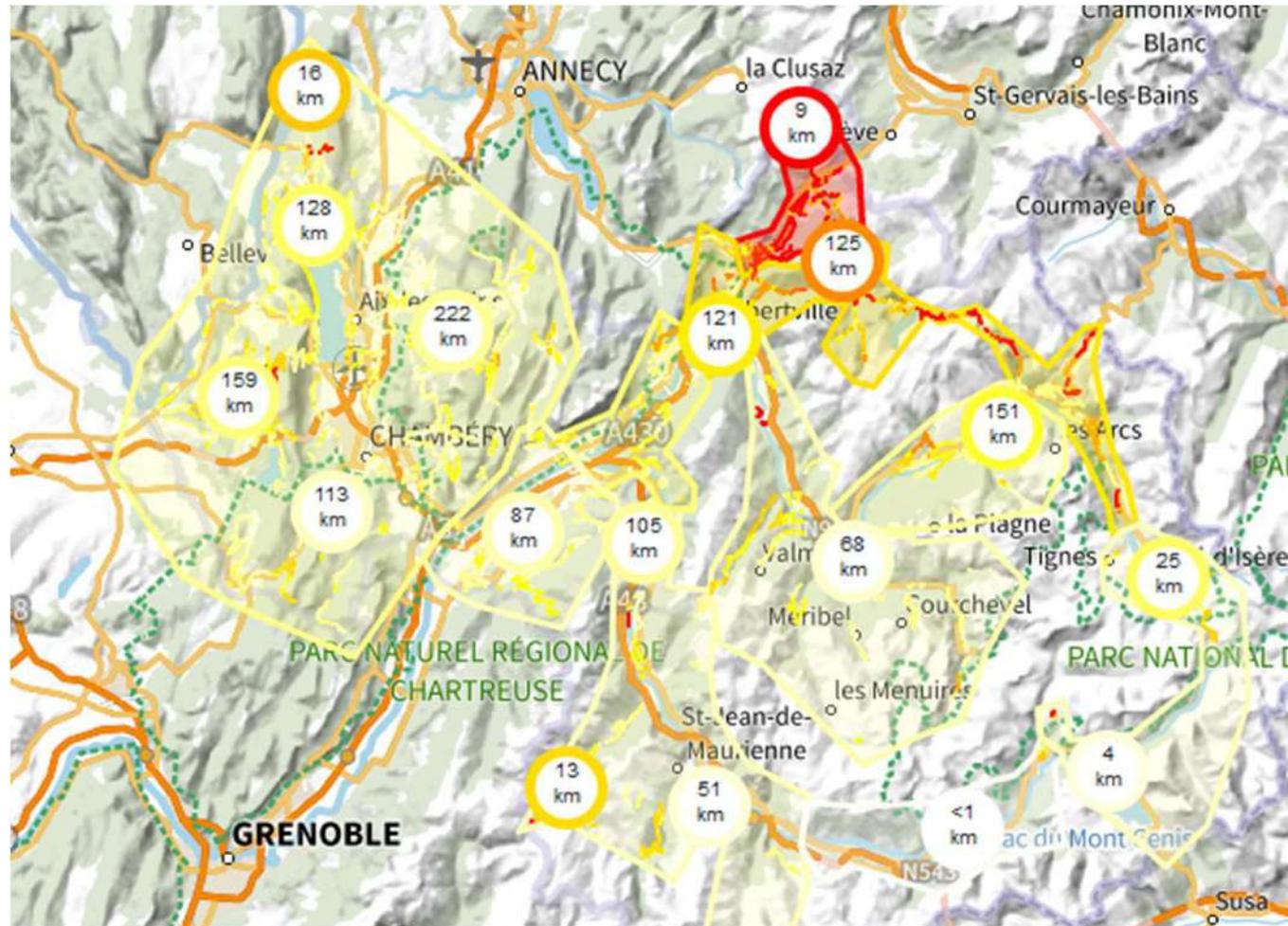


**Héloïse Cadet**

[h.cadet@sage-ingenierie.com](mailto:h.cadet@sage-ingenierie.com)



# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département



# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département

## Contexte

### La problématique des aléas gravitaires

- Glissements de terrain
- Chutes de blocs
- Laves torrentielles
- Coulée de boue

2014 : Savoie

Eboulement de 4000 m<sup>3</sup>



2023 : Savoie– La Praz

# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département

## Enjeux

### Anticipation & aide à la décision

- Fermetures préventives
- Déviations
- Déploiements matériels et humains
- Cellules de crise
- Rationaliser les fonds d'urgence
- Partager les connaissances





Vendredi 29 septembre - 9h-17h – MACI  
Université Grenoble Alpes

# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département

## Le projet SIGALE

Système d'Information Géographique des ALEas gravitaires  
2021-2022





# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département

## Le projet SIGALE

Systeme d'Information Géographique des ALEAs gravitaires  
2021-2022

Glissement de terrain et chute de bloc





# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département

## Le projet SIGALE

Systeme d'Information Géographique des ALEAs gravitaires  
2021-2022

Glissement de terrain et chute de bloc  
Infrastructures de la Savoie





# Service-web de vigilance des mouvements de terrain à l'échelle d'un département

## Le projet SIGALE

Systeme d'Information Géographique des ALEas gravitaires  
2021-2022

Glissement de terrain et chute de bloc

Infrastructures de la Savoie

Outil d'anticipation & aide à la décision, basé sur données traitées par IA,

=> niveau de vigilance



AMI  
Résilience

# Structure du projet SIGALE



Données historiques



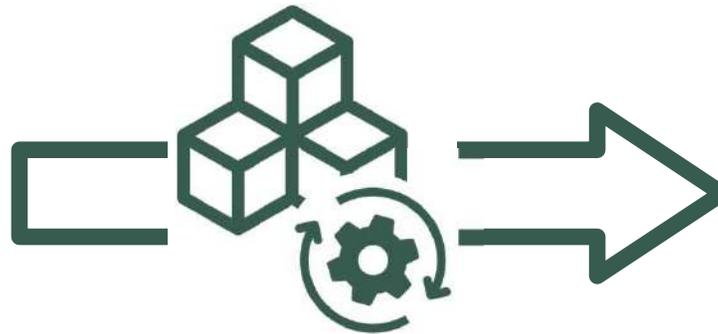
Apprentissage par  
intelligence artificielle



Modèle



Nouvelles données



Application du modèle



# Structure du projet SIGALE



Données historiques

Les données



Apprentissage par  
intelligence artificielle



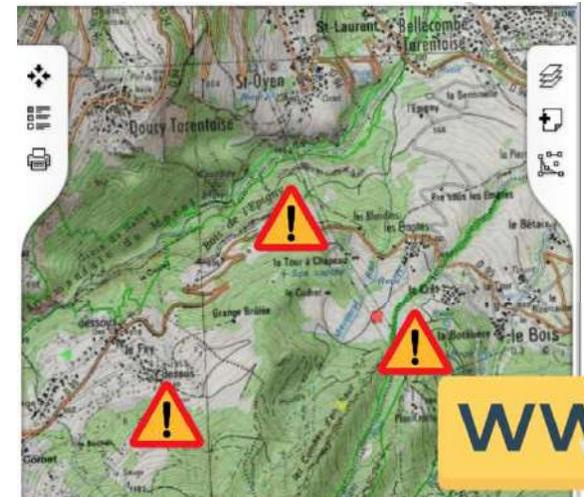
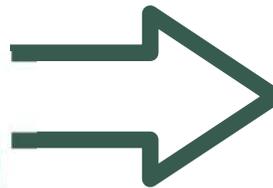
Modèle



Nouvelles données



Application du modèle



WWW

# Structure du projet SIGALE



Données historiques



Apprentissage par  
intelligence artificielle

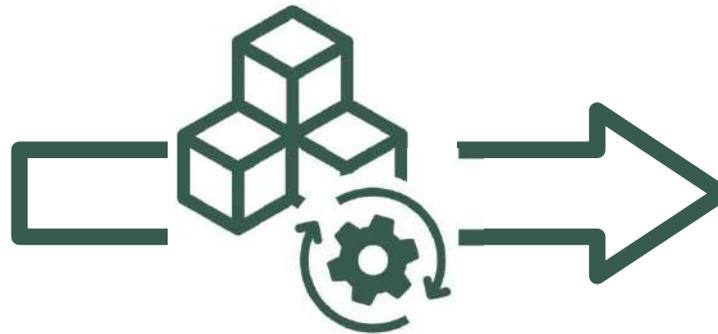


Modèle

Les modèles  
niveau de  
vigilance



Nouvelles données



Application du modèle



# Structure du projet SIGALE



Données historiques



Apprentissage par  
intelligence artificielle

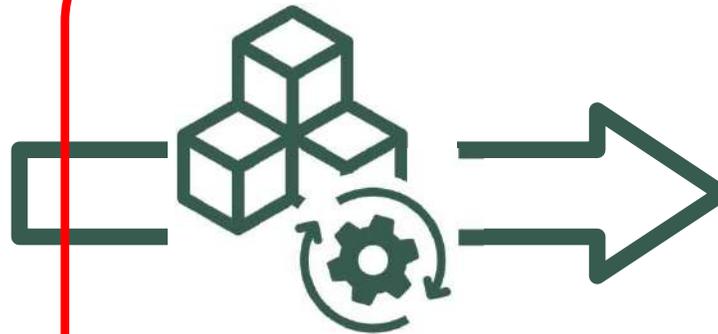


Modèle

Niveau de vigilance  
via web-service



Nouvelles données



Application du modèle



WWW

# Les données

## Spatiales

3 300 km  
~37 000 points



Géologies simplifiées (source : BRGM)  
Topographie (à 1 m et produits dérivés)  
Couverture des sols (Corine Land Cover)

## Spatio-temporelles

### Données historiques



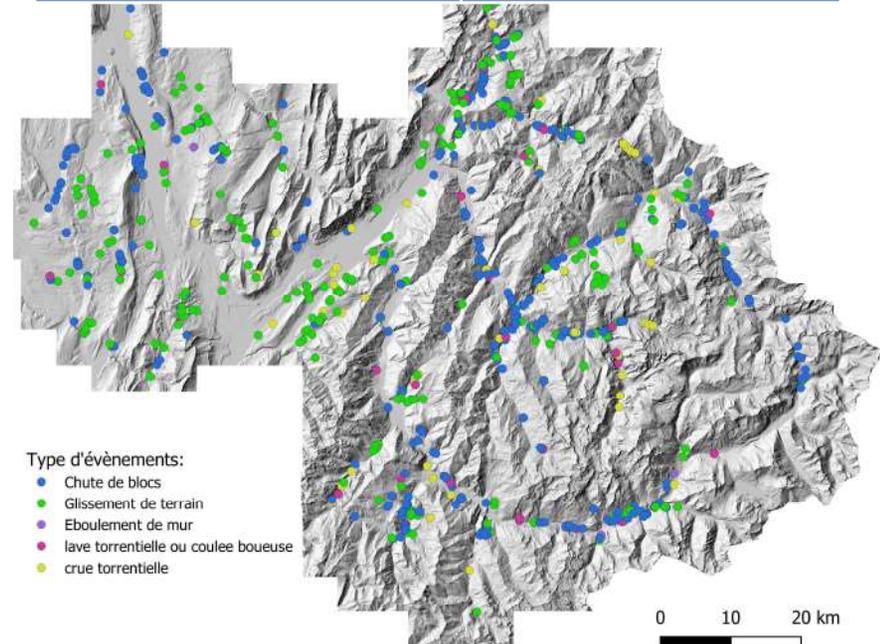
1451 événements datés  
Températures et précipitations  
2008 à 2020 (ANTILOPE)

### Nouvelles données



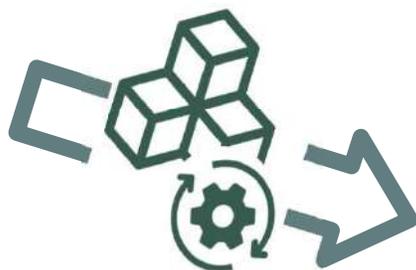
Prévisions météorologiques  
**AROME**

Type d'aléa	nb d'aléa par type
Chute de blocs	863
Glissement de terrain	481
lave torrentielle	107



# Les modèles

- ✓ Pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal



**Modèles statistiques**

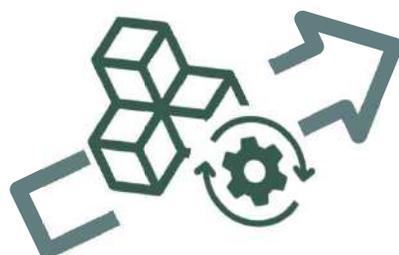
**Spatial**

Indice « terrain » de susceptibilité à l'aléa



**Niveau de vigilance journalier par zone**

- ✓ Cumuls de précipitations de 2 à 45 jours
- ✓ Proxies de température



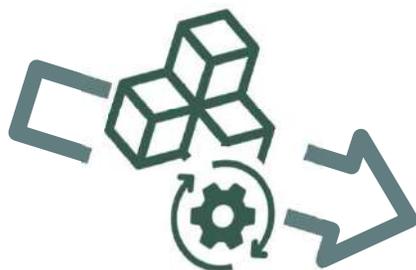
**Modèles IA**  
 Random Tree Forest  
 XGboost

**Prévision**

**Temporel**

# Les modèles

- ✓ Pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal



Modèles statistiques

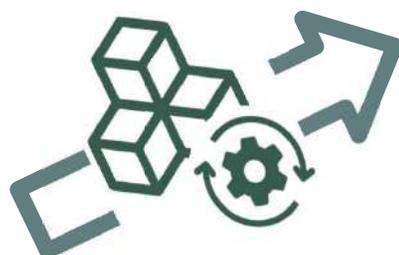
## Spatial

Indice « terrain »  
de susceptibilité  
à l'aléa



Niveau de  
vigilance  
journalier  
par zone

- ✓ Cumuls de précipitations de 2 à 45 jours
- ✓ Proxies de température



Modèles IA  
Random Tree Forest  
XGboost

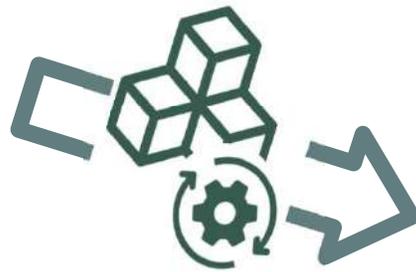
Prévision

## Temporel

# Les modèles

Cadet H., Rouquet D. et Lescurier A. (2022)
   
 Gravitational hazard (landslide and rockfall) susceptibility indexes for the Savoie Department infrastructure; JAG-2022

- ✓ Pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal



**Modèles « statistiques »**

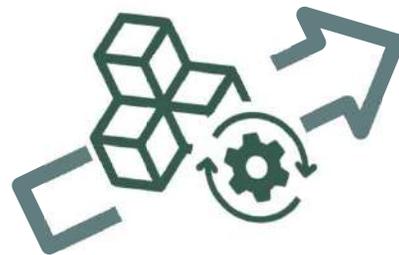
**Spatial**

Indice « terrain » de susceptibilité à l'aléa



**Niveau de vigilance journalier par zone**

- ✓ Cumuls de précipitations de 2 à 45 jours
- ✓ Proxies de température



**Modèles IA**  
 Random Tree Forest  
 XGboost

Prévision

Temporel

# Les modèles

## Spatial

## Indice « terrain » de susceptibilité à l'aléa

### Glissement de terrain:

#### LSI

#### Landslide Susceptibility Index

$$LSI(i) = \sum_{j=1}^3 \omega_j x_{ij}$$

- ✓ Pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal

→ ~ 6 000 secteurs

### Chute de bloc:

#### RSI

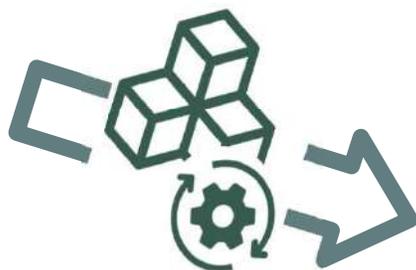
#### Rockfall Susceptibility Index

- ✓ Zone de départ
- ✓ Propagation avec flow-R

→ ~ 3 000 secteurs

# Les modèles

- ✓ Pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal



**Modèles statistiques**

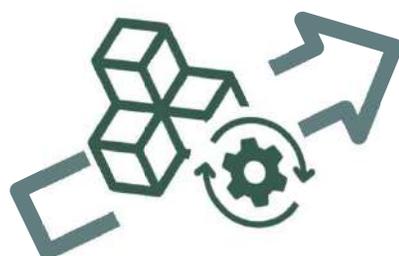
**Spatial**

Indice « terrain » de susceptibilité à l'aléa



**Niveau de vigilance journalier par zone**

- ✓ Cumuls de précipitations de 2 à 45 jours
- ✓ Proxies de température



**Modèles IA**  
**Random Tree Forest**  
**XGboost**

Prévision

**Temporel**

# Les modèles

## Temporel Évaluation des modèles de prévision Glissement de terrain

**Test-set (sous-échantillonnage)**  
**Forêt d'arbres aléatoires**  
**4 paramètres d'entrée :**  
**rain3, rain8, rain30**

		Réal		Prévision
		Pas d'événement	Glissement	
prévisions	Pas d'événement			104
	Glissement			81
réel		82	103	185

# Les modèles

## Temporel Évaluation des modèles de prévision Glissement de terrain

**Test-set (sous-échantillonnage)**  
**Forêt d'arbres aléatoires**  
**4 paramètres d'entrée :**  
**rain3, rain8, rain20 et rain45**

**Les métriques:**

### Rappel

**=> tous les évènements sont-ils prévus?**

		Réal		Prévision
		Pas d'événement	Glissement	
prévisions	Pas d'événement	[Large empty cell]		104
	Glissement			16 9%
réel		[Large empty cell]		103 63%

# Les modèles

## Temporel

## Évaluation des modèles de prévision

## Glissement de terrain

Test-set (sous-échantillonnage)

Forêt d'arbres aléatoires

4 paramètres d'entrée :

rain3, rain8, rain20 et rain45

Les métriques:

### Rappel

=> tous les évènements sont-ils prévus?

### Précision

=> fausse alerte?

		Réal		Prévision
		Pas d'événement	Glissement	
prévisions	Pas d'événement	104		104
	Glissement			16 9%
réel		103		63%

# Les modèles

## Temporel

## Évaluation des modèles de prévision

## Glissement de terrain

Test-set (sous-échantillonnage)

Forêt d'arbres aléatoires

4 paramètres d'entrée :

rain3, rain8, rain20 et rain45

Les métriques:

### Rappel

=> tous les évènements sont-ils prévus?

### Précision

=> fausse alerte?

		Réal		Prévision
		Pas d'événement	Glissement	
prévisions	Pas d'événement	66 36%	38 20%	104 63%
	Glissement	16 9%	65 35%	<b>81</b> <b>80%</b>
réel		82 80%	<b>103</b> <b>63%</b>	185 71%

# Les modèles

## Temporel Évaluation des modèles de prévision Glissement de terrain

Test-set (sous-échantillonnage)  
XGboost

3 paramètres d'entrée :  
rain2, rain12 et rain45

Les métriques:

### Rappel

=> tous les évènements sont-ils prévus?

### Précision

=> fausse alerte?

		Réal		Prévision
		Pas d'événement	Glissement	
prévisions	Pas d'événement	51 28%	12 7%	63 81%
	Glissement	40 22%	79 43%	119 66%
réel		91 56%	91 87%	182 71%

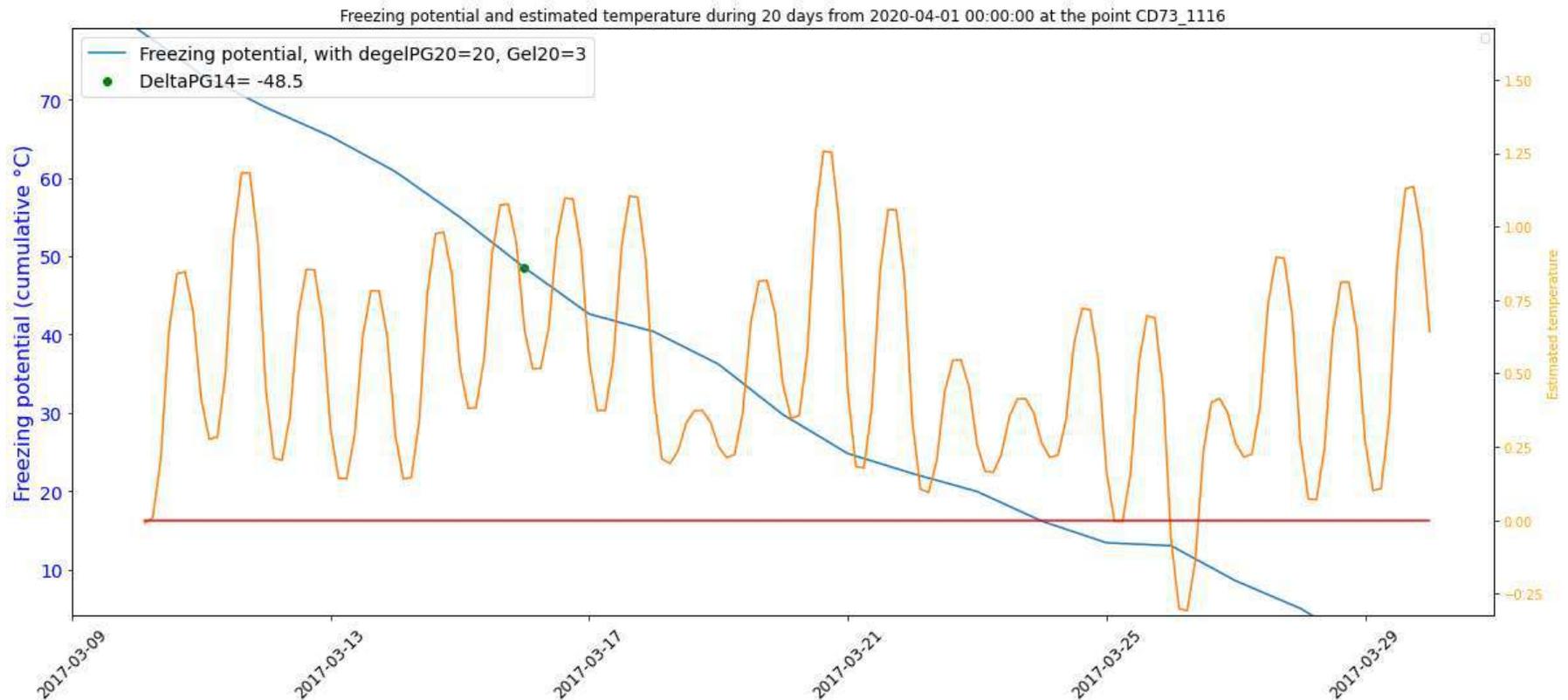
# Les modèles

## Temporel Évaluation des modèles de prévision Chute de bloc

6 paramètres d'entrée sélectionnés:  
 rain2, rain8, rain20, deltaPG14, degelPG20 et G20

$$FP = \sum -T$$

avec  $0 \leq FP \leq 1000$



# Les modèles

## Temporel

## Évaluation des modèles de prévision

## Chute de bloc

Test-set (sous-échantillonnage)

Forêt d'arbres aléatoires

6 paramètres

d'entrée sélectionnés:

rain2, rain8, rain20,  
 deltaPG14, degelPG20 et G20

### Rappel

=> tous les évènements sont-ils prévus?

### Précision

=> fausse alerte?

		Réal		prévision
		Pas d'événement	cdb	
prévisions	Pas d'événement	115 33%	57 16%	172 67%
	cdb	65 19%	113 32%	178 63%
réel		180 64%	170 67%	350 65%

# Prototype de service web

The screenshot displays a web dashboard with a blue header and three main content areas. The header contains a search icon, the title 'Tableaux de bord', and navigation icons. The three widgets are:

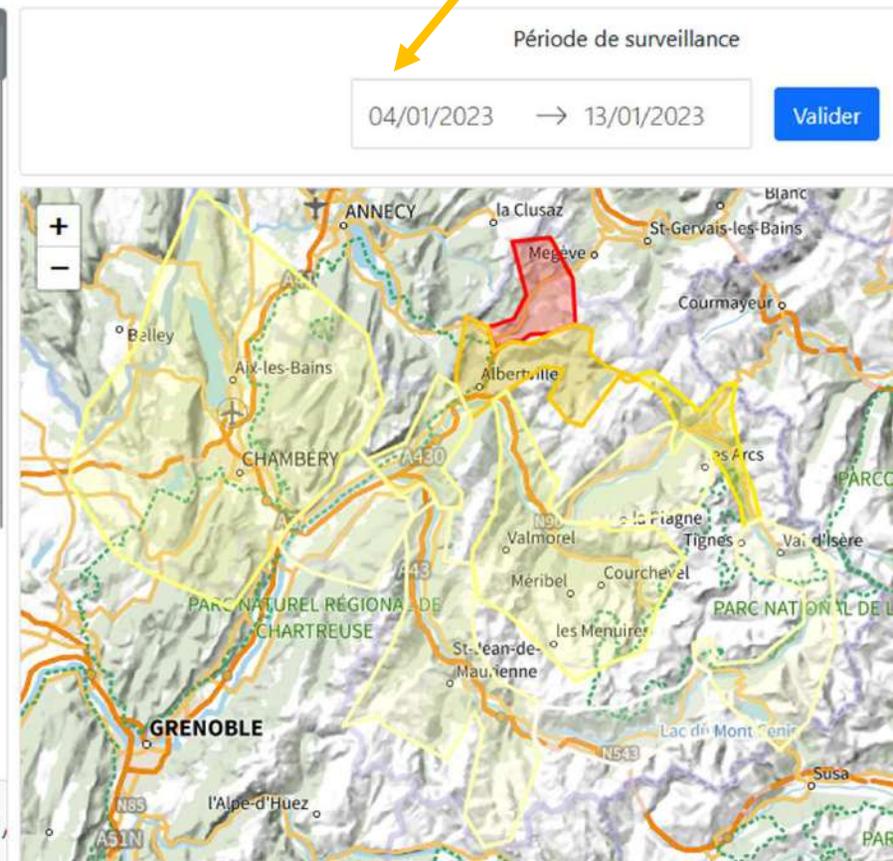
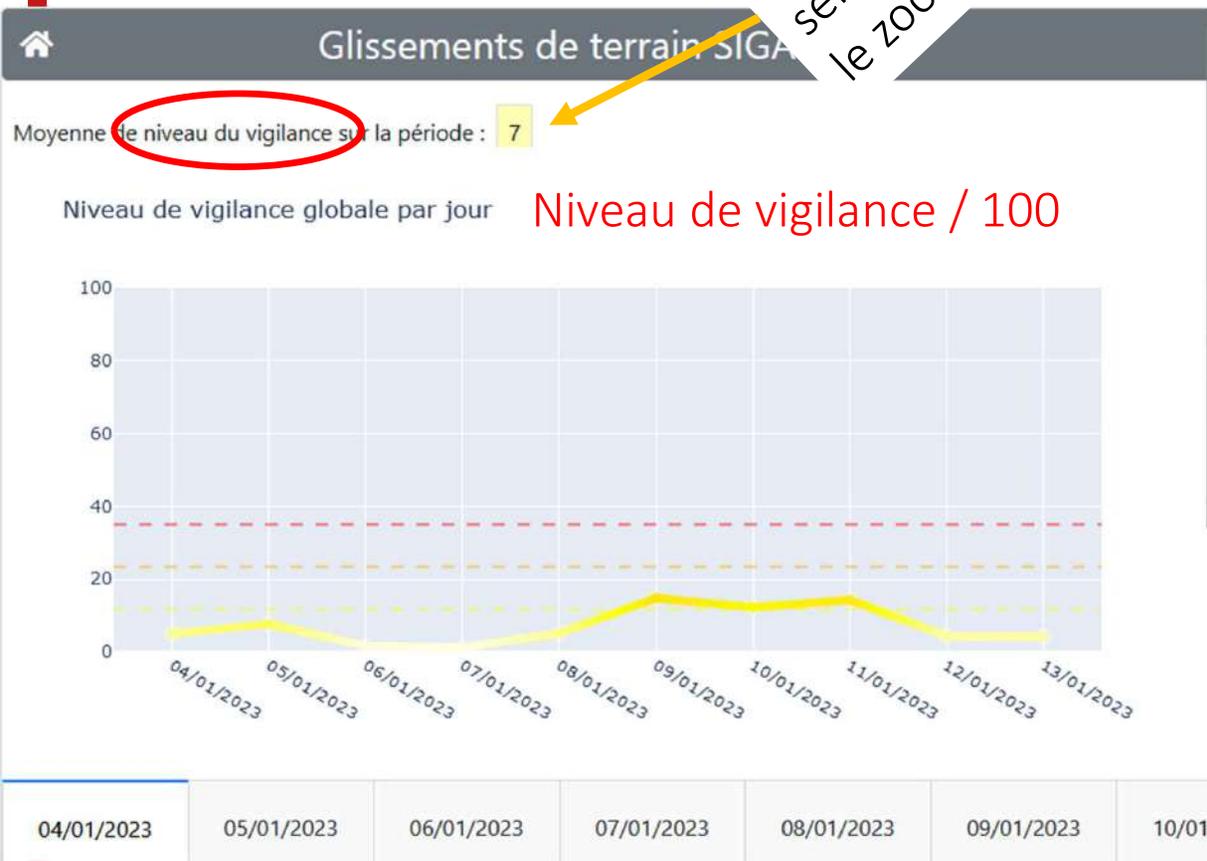
- 1 - Vigilance glissements SIGALE**: Features a map of a mountain slope with a white path and a warning triangle icon. Below the map is a red 'PROTOTYPE' watermark and buttons for 'Lien public' and 'Modifier'.
- 2 - Vigilance chutes de blocs SIGALE**: Features a map of a mountain peak with falling rock icons and a warning triangle icon. Below the map is a red 'PROTOTYPE' watermark and buttons for 'Lien public' and 'Modifier'.
- 3 - Historique d'événements SIGALE**: Features a map of a mountain peak with a calendar icon and a warning triangle icon. Below the map is a red 'PROTOTYPE' watermark and buttons for 'Créer un lien public' and 'Modifier'.

# Prototype de service web

ZOOM 0: La Savoie

moyenne sur la période sélectionnée et le zoom choisi

Sélectionner une période



ATTENTION: Échéance de prévision à 1 jour

# Prototype de service web

## ZOOM 1: zone prioritaire

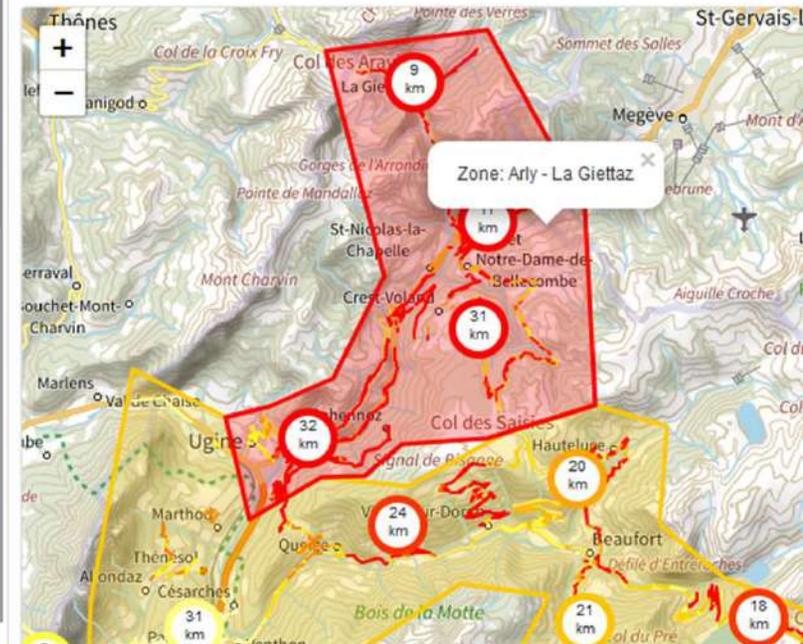
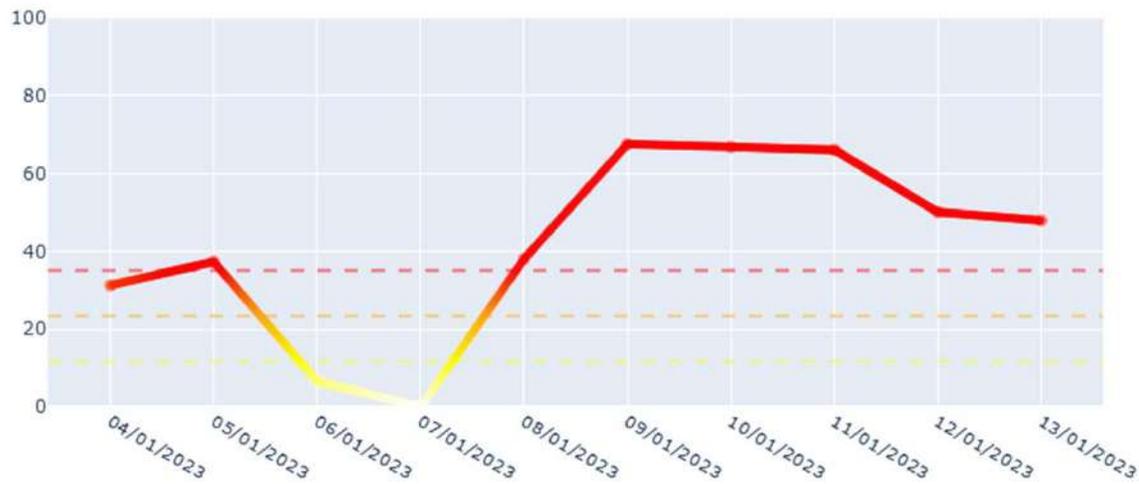
Zone Arly - La Giettaz entre le 04/01/2023 et le 13/01/2023

Période de surveillance

04/01/2023 → 13/01/2023

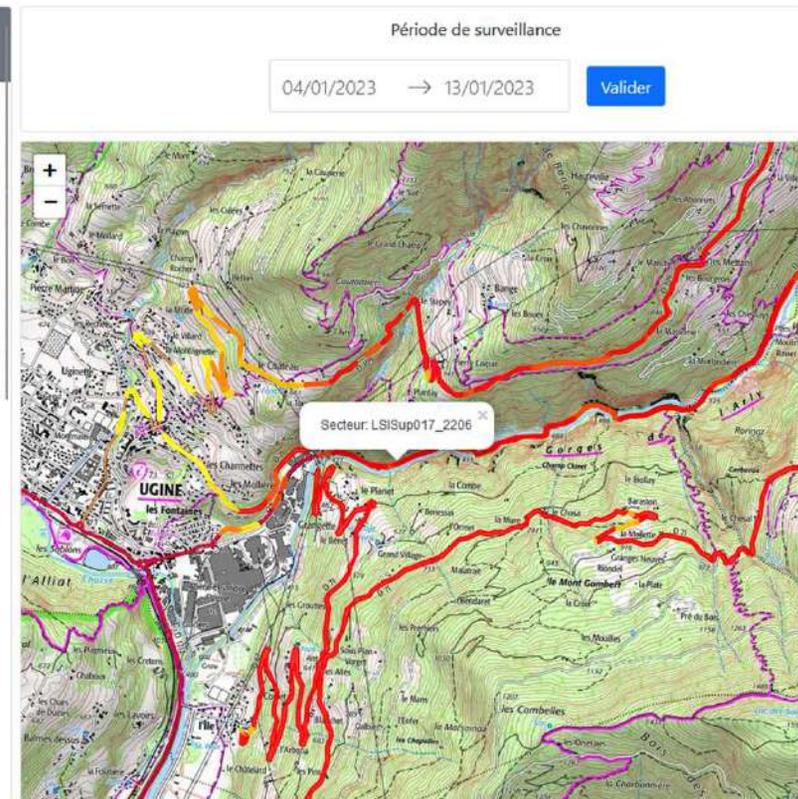
Moyenne de niveau du vigilance sur la période : **41**

Niveau de vigilance globale par jour



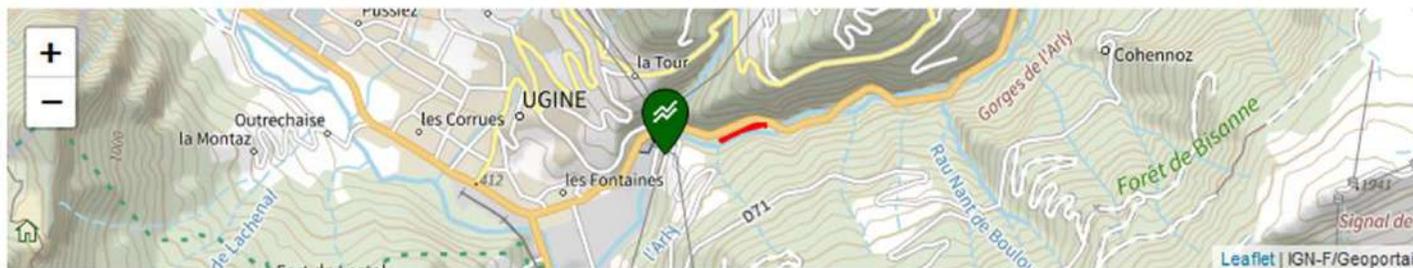
# Prototype de service web

## ZOOM 2: Un secteur



# Prototype de service web

ZOOM 2 bis: Comparaison avec l'historique



Secteur LSISup017\_2206 entre le 04/01/2023 et le 13/01/2023



Id : LSISup017_2206, Coordonnées : 45.752, 6.443
Altitude : 441 m, longueur du secteur: 0.4 km
Pente à 10 mètres : 14°
Géologie : ALLUVIONS et SABLES
Couverture du sol : Forêts de feuillus
LSI : 0.23

Précipitations 45 jours avant le 13/01/2023

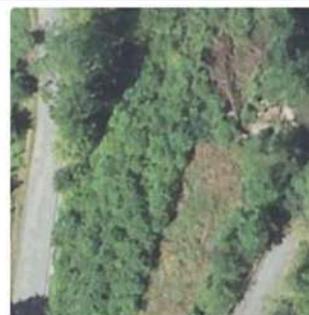


Cumul sur 3 jours  
15 mm

Cumul sur 8 jours  
49 mm

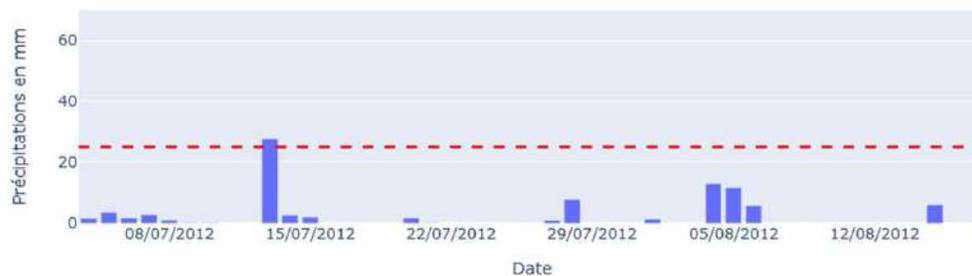
Cumul sur 30 jours  
210 mm

Glissements de terrain le 17/08/2012



Id : CD73269, Coordonnées : 45.75, 6.435
Altitude : 467 m
Pente à 10 mètres : 38°
Géologie : GRES et CONGLOMERATS
Couverture du sol : Systèmes culturaux et parcellaires complexes
LSI : 0.072

Précipitations 45 jours avant le 17/08/2012



Cumul sur 3 jours  
6 mm

Cumul sur 8 jours  
6 mm

Cumul sur 30 jours  
48 mm

# Conclusion

## Résultats

- ✓ Un territoire test
- ✓ Des modèles spatiaux de susceptibilité aux aléas
- ✓ Des modèles de prévision basés sur l'IA
- ✓ Un prototype en ligne d'aide à la décision

## Perspectives

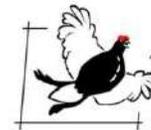
- ✓ Extension à d'autres territoires: base de données !
- ✓ Mise à jour et automatisation des modèles (susceptibilité et IA) avec d'autres événements
- ✓ Développement des méthodologies d'évaluation des modèles IA (métriques)
- ✓ Expertise des données météorologiques (prédiction à 4 jours)
- ✓ Evolution du prototype de service-web vers l'opérationnel

Projet : **VigiMouv**

Partenaires:



TETRAS  
LIBRE



INRAE



Déposé: France 2030 Projets collaboratifs I-DEMO régionalisé

Contact: [h.cadet@sage-ingenierie.com](mailto:h.cadet@sage-ingenierie.com)