

Systeme de vigilance des aléas gravitaires fondé sur l'intelligence artificielle

Héloïse CADET

h.cadet@sage-ingenierie.com

C2ROP2

13 mai 2025

Projet SIGALE 2021-2023
Système d'Information Géographique
des ALEas gravitaires



LE DÉPARTEMENT

*Maîtrise d'ouvrage,
financement*



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
direction
interdépartementale
des routes
Centre-Est

*Maîtrise d'ouvrage,
financement*



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

*AMI Résilience
Financement*



Systeme de vigilance pour les aléas gravitaires

Contexte et objectif

Glissement de terrain
Chute de bloc

2014 : Savoie – Eboulement de 4000 m³



Territoire



LE DÉPARTEMENT

Infrastructures
routières

Pour les gestionnaires:
anticipation & aide à la décision afin d'améliorer
la sécurité des enjeux:



- ✓ Evaluer les aléas
- ✓ Surveiller les enjeux via la vigilance journalière

✓ Anticiper les aléas et planifier les actions
préventives:

- ✓ Fermetures préventives
- ✓ Déviations
- ✓ Déploiements matériels et humains
- ✓ Cellules de crise



✓ Partager et pérenniser les connaissances
en ligne





Systeme de vigilance pour les aléas gravitaires

Structure du projet



Base de données d'apprentissage



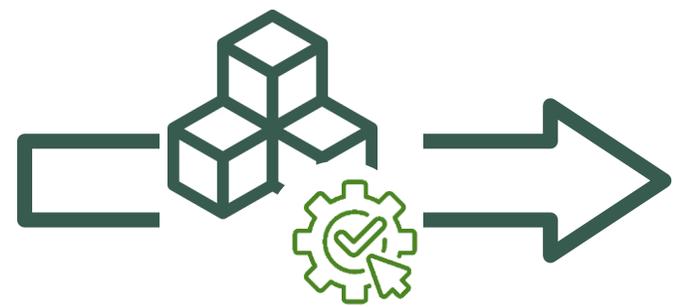
Apprentissage par intelligence artificielle



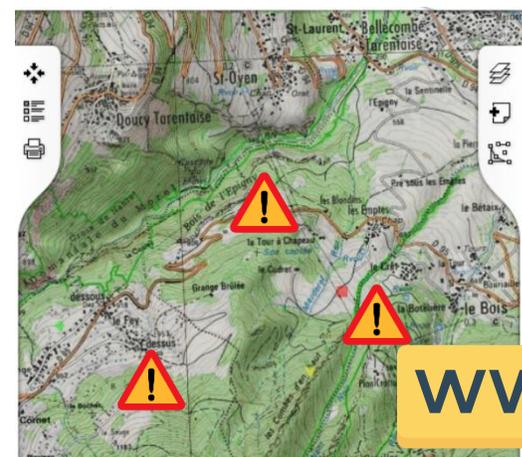
Modèle de vigilance



Nouvelles données



Application du modèle

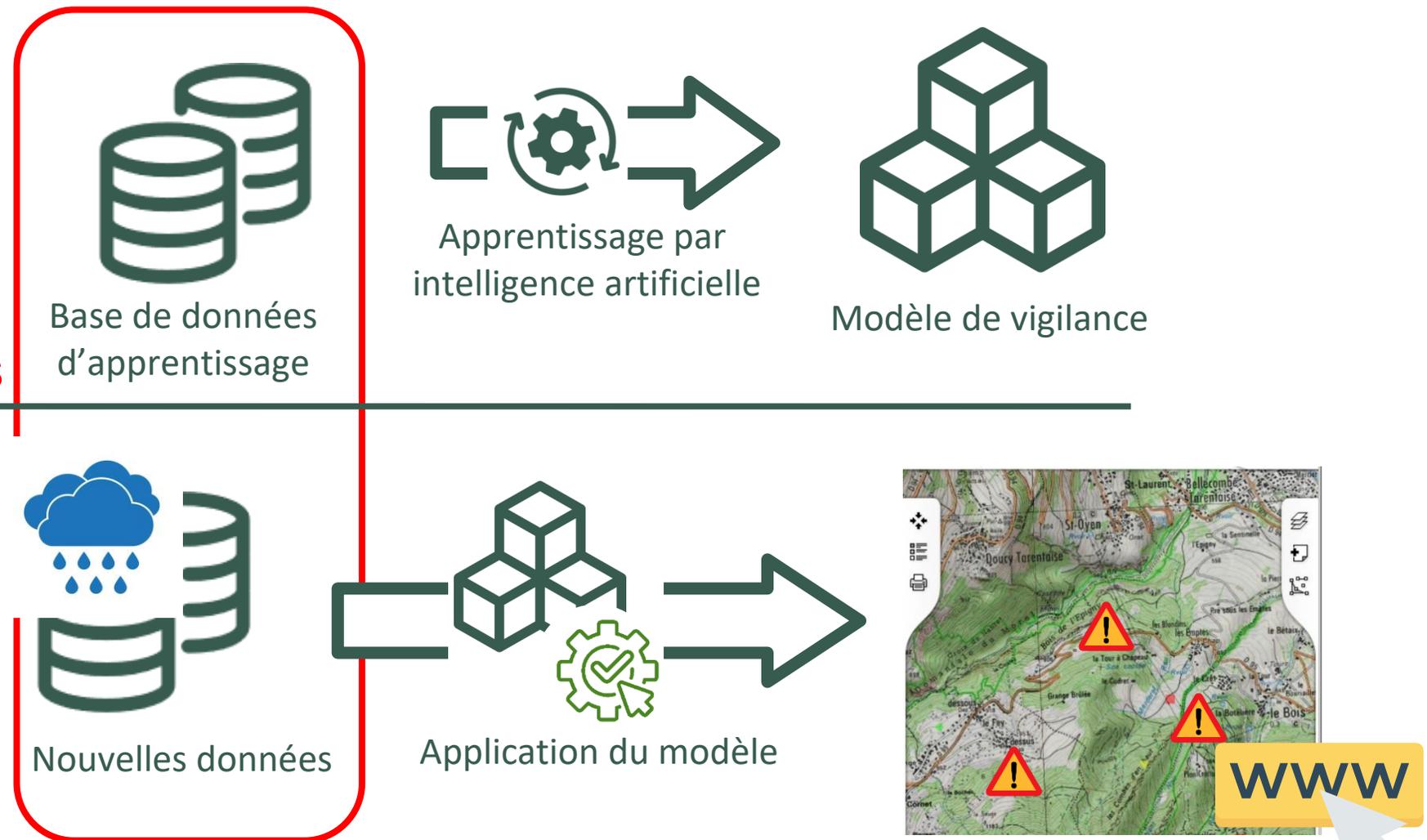




Systeme de vigilance pour les aleas gravitaires

Structure du projet

Les données
ESSENTIELLES
et
INDISPENSABLES
pour l'IA

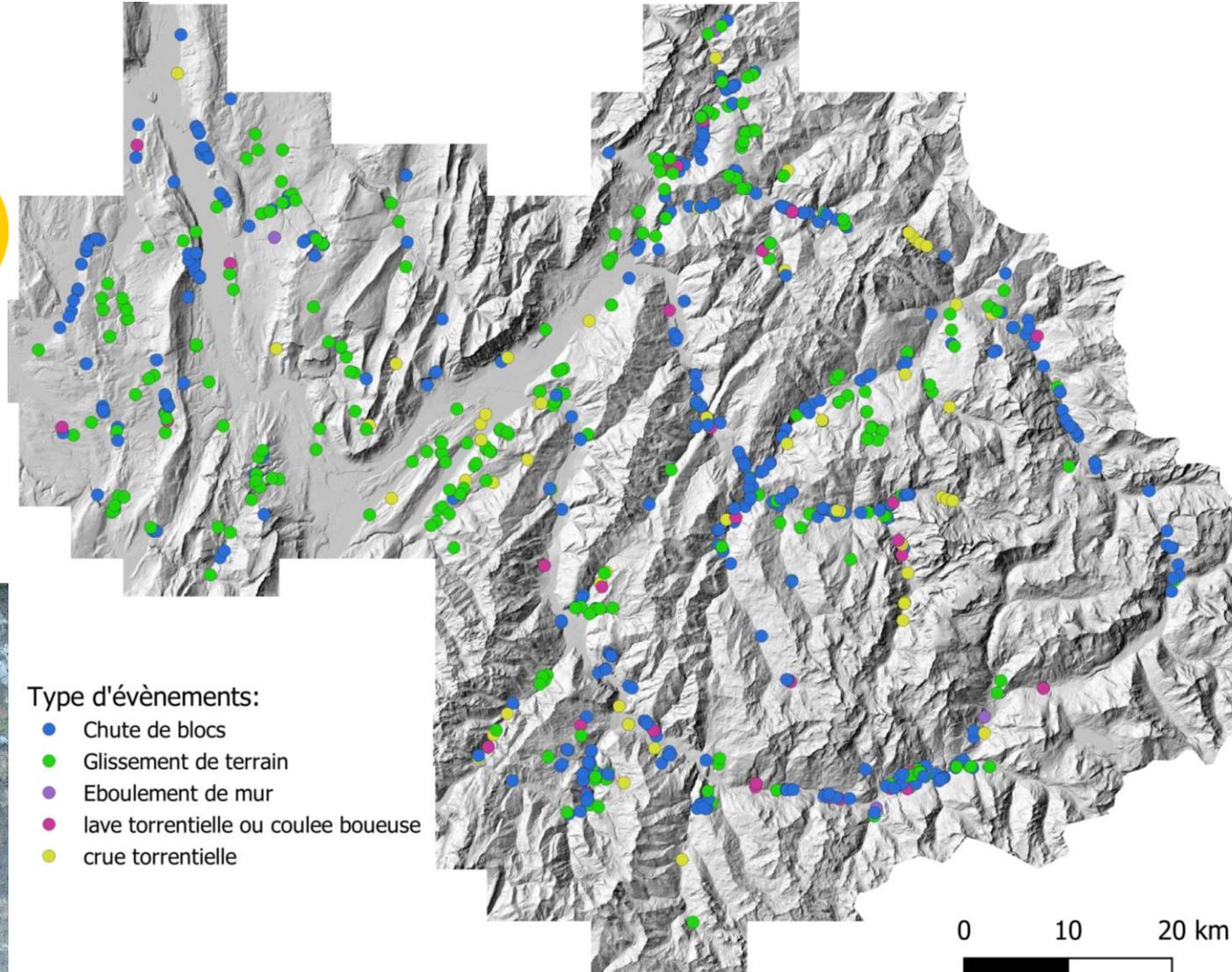


LES DONNÉES (1/2)

1451 événements gravitaires de
2008 à 2020



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



LES DONNÉES (2/2)

Spatiales

Géologies simplifiées
(source : BRGM)

Topographie (à 1 m et
produits dérivés)

Couverture des sols
(Corine Land Cover)



3 300 km
~37 000 points

Spatio-temporelles



Données historiques

- ✓ 1451 évènements
- ✓ Températures et lames d'eau de 2008 à 2020 (ANTILOPE)



Nouvelles données

- ✓ Prévisions météorologiques AROME

LES DONNÉES (2/2)

Spatiales

Géologies simplifiées
(source : BRGM)

Topographie (à 1 m et
produits dérivés)

Couverture des sols
(Corine Land Cover)



3 300 km
~37 000 points

37 000 pts * 365 jours * 13 ans
~ 175 M

Spatio-temporelles



Données historiques

- ✓ 1451 évènements
- ✓ Températures et lames d'eau de 2008 à 2020 (ANTILOPE)

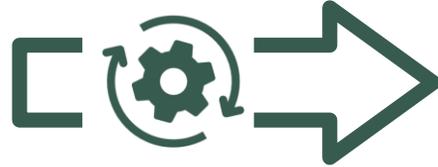


Nouvelles données

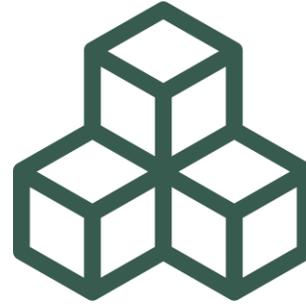
- ✓ Prévisions météorologiques AROME



Base de données d'apprentissage



Apprentissage par intelligence artificielle

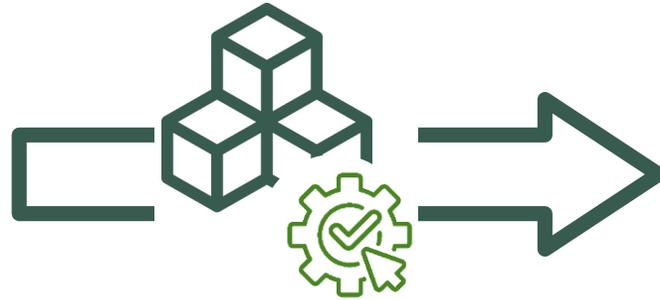


Modèle de vigilance

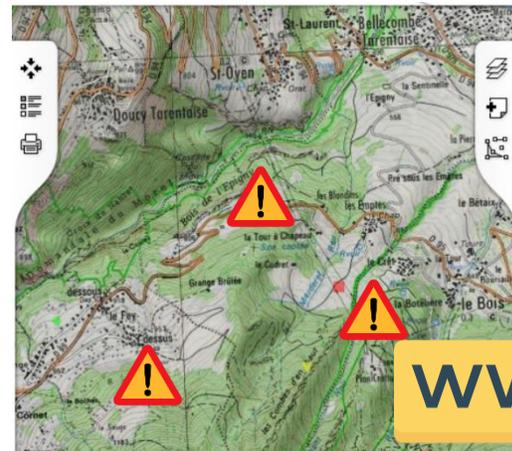
Les modèles



Nouvelles données



Application du modèle



LES MODÈLES (1/5)

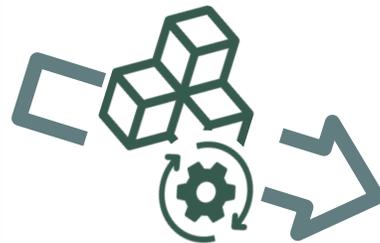
Principe général

- ✓ Pente + propagation
- ✓ pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal

Spatiales

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

Spatio-temporelles



Modèles statistiques



Modèles IA basés sur des
Random Tree Forest
Apprentissage sur données historiques

Spatial

Indice « terrain » de
susceptibilité à l'aléa

X

Prévision

Temporel

Degré de
vigilance
journalier
par zone



LES MODÈLES (2/5)

Susceptibilité aux aléas

Glissement de terrain:

LSI: Landslide Susceptibility Index

- ✓ Pente
- ✓ Géologie
- ✓ Couvert végétal

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

→ ~ 5 000 secteurs

Chute de bloc:

RSI: Rockfall Susceptibility Index

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

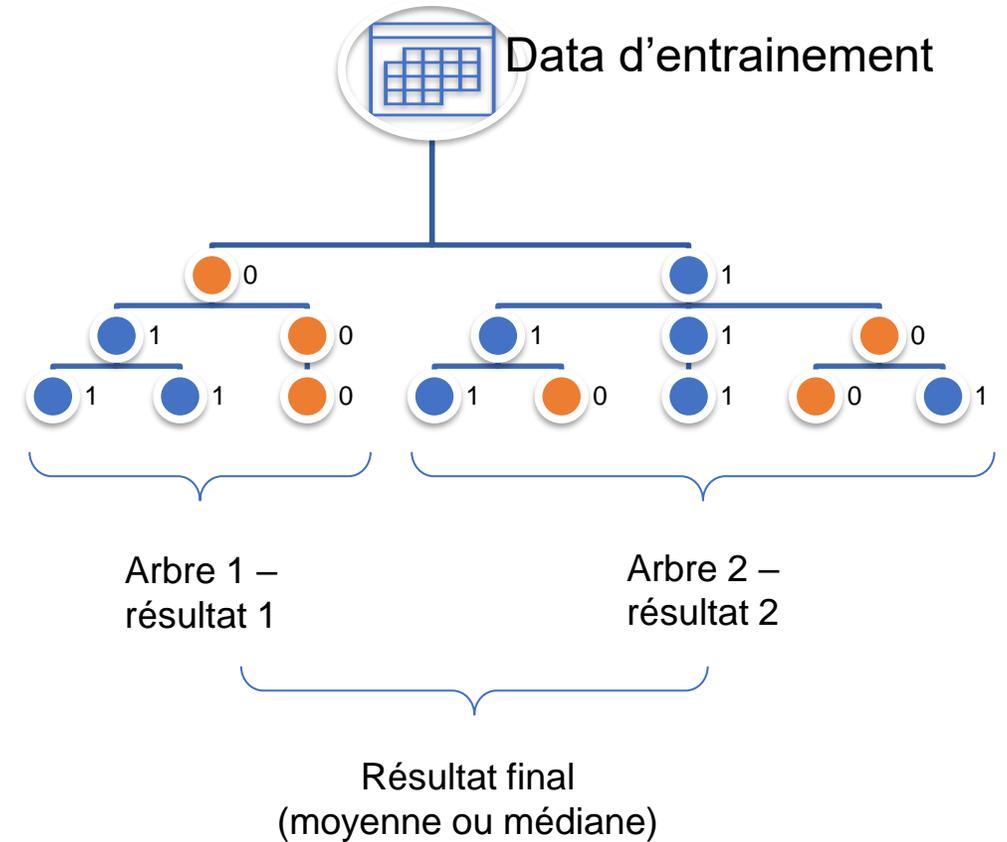
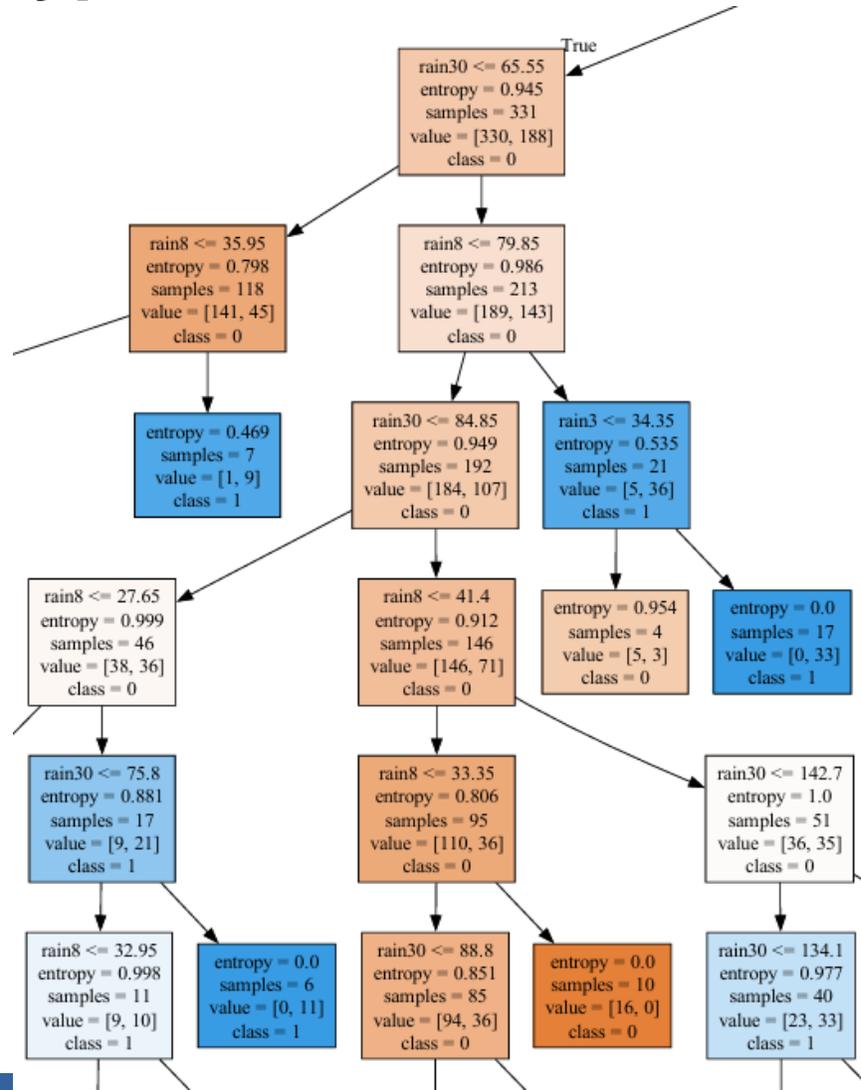
→ ~ 3 000 secteurs

Référence:

Cadet H., Rouquet D. et Lescurier A. (2022). Gravitational hazard (landslide and rockfall) susceptibility indexes for the Savoie Departement infrastructure ; Conférence: JAG-2022 ; DOI: 10.13140/RG.2.2.24454.45125

LES MODÈLES (3/5)

Modèles de prédiction IA : apprentissage automatique supervisé Type: Random tree forest



LES MODÈLES (4/5)

Principe d'évaluation des modèles

Basé sur

vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs, faux négatifs

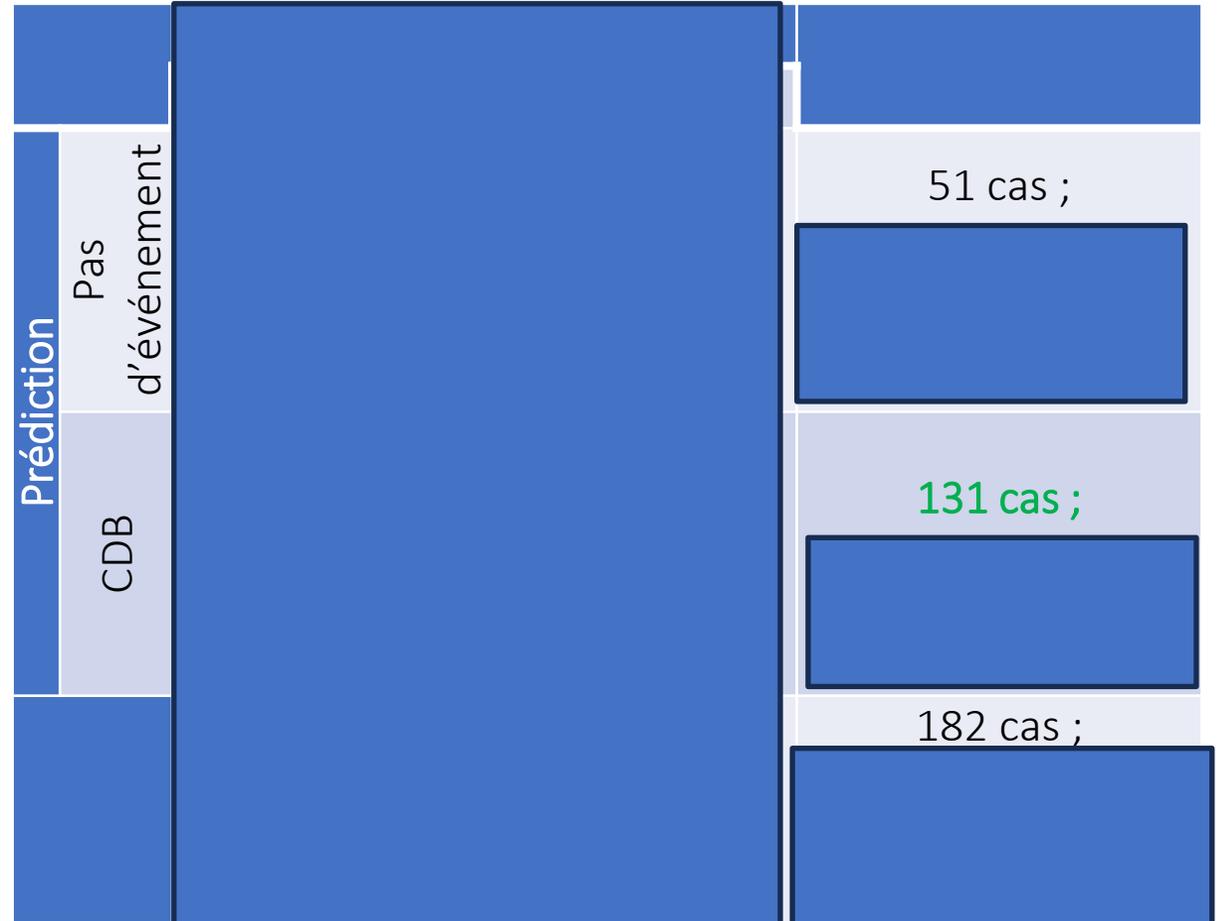
	Réal		
	Pas d'événement	CDB	
	91 cas	91 cas	182 cas ;

LES MODÈLES (4/5)

Principe d'évaluation des modèles

Basé sur

vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs, faux négatifs



LES MODÈLES (4/5)

Principe d'évaluation des modèles

Basé sur

vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs, faux négatifs

		Réal		
		Pas d'événement	CDB	
Prédiction	Pas d'événement	VN = 37	FN = 14	
	CDB	FP = 54	VP = 77	
		91 cas	91 cas	182 cas ;

LES MODÈLES (4/5)

Principe d'évaluation des modèles

Basé sur

vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs, faux négatifs

Métriques (mesures de performance),
exemple:

Rappel

=> tous les événements sont ils prévus?

Précision

=> fausse alerte?

ROC curve

		Réal		
		Pas d'événement	CDB	
Prédiction	Pas d'événement	VN = 37	FN = 14	51 cas ; valeur prédictive négative : $VN/(VN+FN) = 73\%$
	CDB	FP = 54	VP = 77	131 cas ; Précision : $VP/(VP+FP) = 59\%$
		91 cas Taux de faux positifs : $FP/(FP+VN) 59 \%$	91 cas Rappel : $VP/(VP+FN)$ 85 %	182 cas ; Exactitude : $(VP+VN)/\text{tous} = 63\%$

LES MODÈLES (4/5)

Principe d'évaluation des modèles

Basé sur

vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs, faux négatifs

Métriques (mesures de performance),
exemple:

Rappel

=> tous les événements sont ils prévus?

Précision

=> fausse alerte?

ROC curve

		Réal		
		Pas d'événement	CDB	
Prédiction	Pas d'événement	VN = 37	FN = 14	51 cas ; valeur prédictive négative : $VN/(VN+FN) = 73\%$
	CDB	FP = 54	VP = 77	131 cas ; Précision : $VP/(VP+FP) = 59\%$
		91 cas Taux de faux positifs : $FP/(FP+VN) = 59\%$	91 cas Rappel : $VP/(VP+FN) = 85\%$	182 cas ; Exactitude : $(VP+VN)/\text{tous} = 63\%$

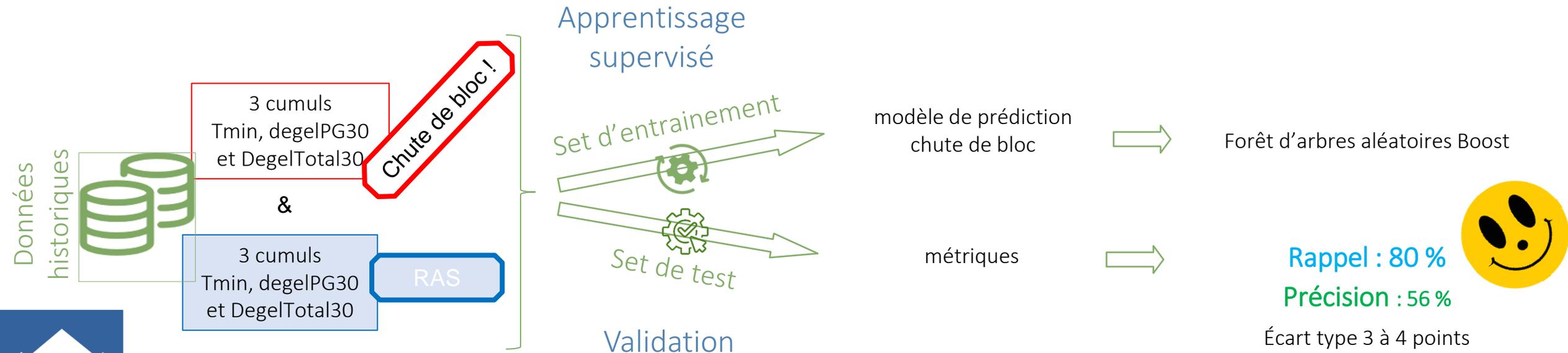
LES MODÈLES (5/5)

Modèle de prédiction IA chute de blocs

Sélection des paramètres d'entrée : analyse statistique et comparaison des métriques

- rain1
- rain20
- rain45
- Tmin
- degelPG30
- DegelTotal30

Elaboration des modèles IA chute de bloc



Référence:

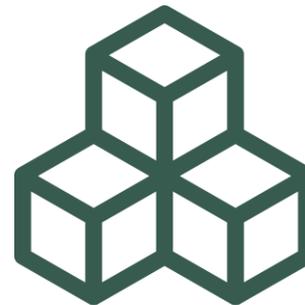
Cadet, H., Rouquet, D., and Lescurier, A.: Online geographical early warning system for gravitational hazard, ISL 2024.



Base de données d'apprentissage



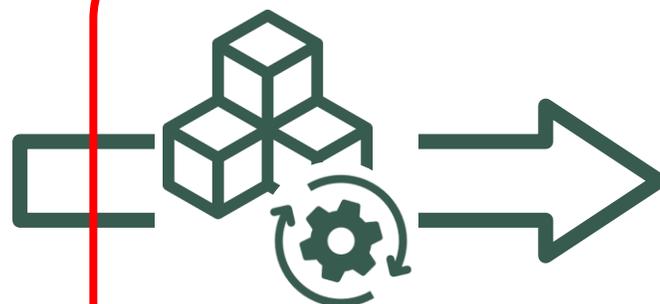
Apprentissage par intelligence artificielle



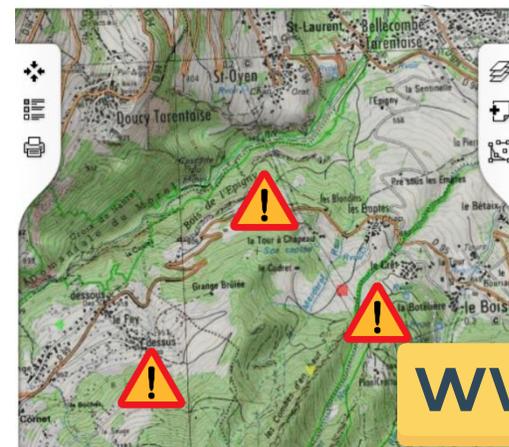
Modèle de vigilance



Nouvelles données



Application du modèle



Le web-service

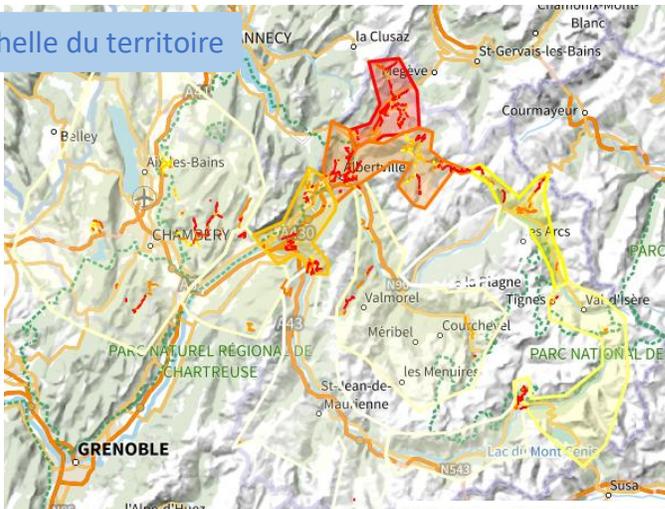
LE SERVICE-WEB

Un prototype avancé, outil d'aide à la décision

SPATIAL

TEMPOREL

échelle du territoire



Visualisation du niveau de vigilance = susceptibilité X prédiction

Moyenne de niveau de vigilance sur la période : 41

Période de surveillance

10/12/2023 → 23/12/2023

Niveau de vigilance globale par jour



échelle du secteur (ex: tronçon de route)



Glissements de terrain le 02/05/2015



Id : LL_B1, Coordonnées : 45.755, 6.467
Altitude : 513 m
Pente à 10 mètres : 22°

Caractéristiques de l'aléa et historique de la pluviométrie sur 45 jours



Cumul sur 3 jours : 153 mm
Cumul sur 8 jours : 202 mm
Cumul sur 30 jours : 245 mm

LE SERVICE-WEB REX



1 évènement $\sim 16\,500\text{ m}^3$.
alerte à 0.76 sur 2 jours => une seule fausse alerte sur un an

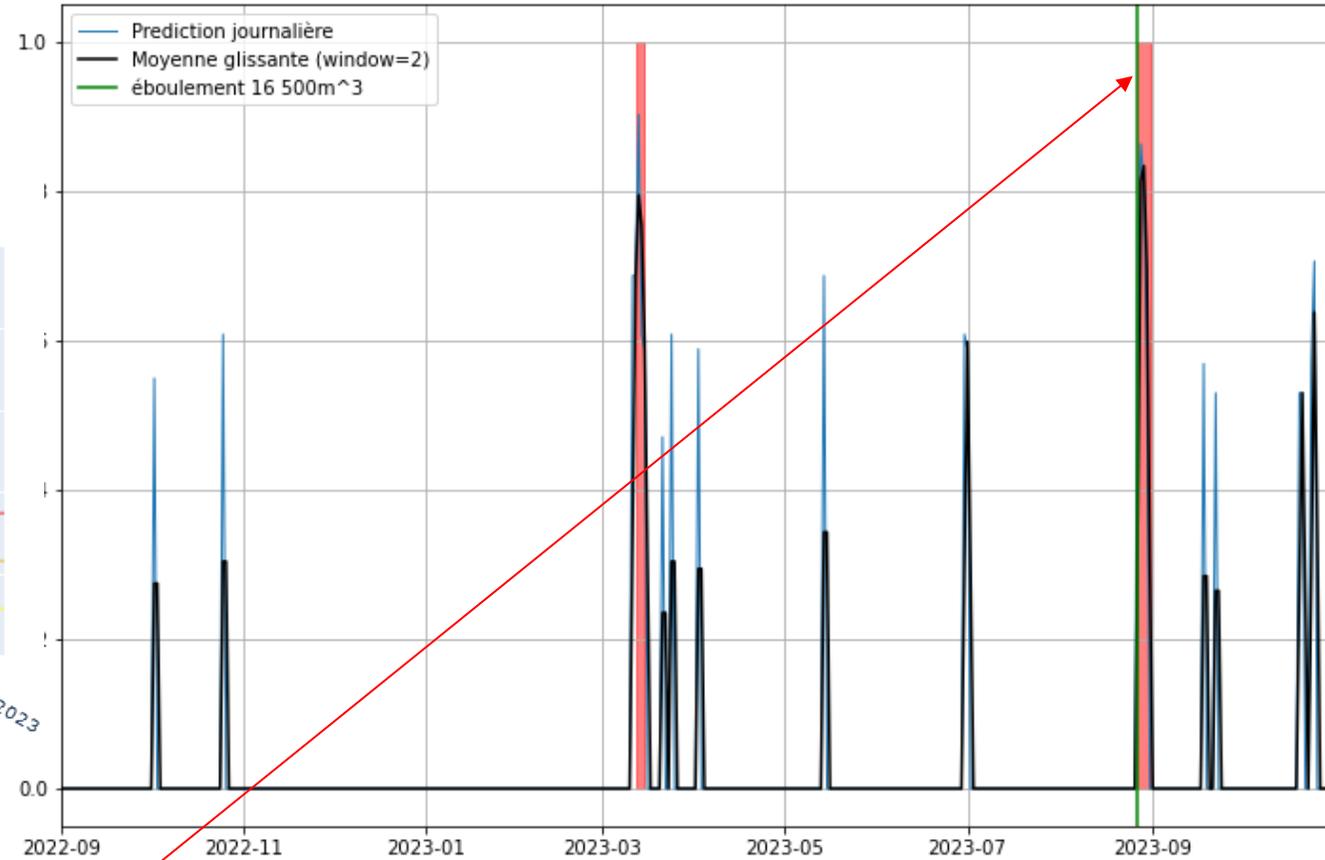
Exemple d'un retour d'expérience:

Niveau de vigilance globale par jour



Éboulement
d'ampleur

Résultat du modèle SIGALE glissement et alarme avec un seuil à 0.76 sur une durée de 2 jours





CONCLUSION & PERSPECTIVES

- ✓ 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

- ✓ Extension à d'autres territoires
- ✓ Mise à jour et automatisation des modèles (susceptibilité et IA) avec d'autres événements
- ✓ Développement des méthodologies d'évaluation des modèles IA (REX et système expert)
- ✓ Expertise des données météorologiques (prédiction à 4 jours)
- ✓ Evolution des fonctionnalités du prototype de service-web





CONCLUSION & PERSPECTIVES

- ✓ 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

- ✓ Extension à d'autres territoires
- ✓ Mise à jour et automatisation des modèles (susceptibilité et IA) avec d'autres événements
- ✓ Développement des méthodologies d'évaluation des modèles IA (REX et système expert)
- ✓ Expertise des données météorologiques (prédiction à 4 jours)
- ✓ Evolution des fonctionnalités du prototype de service-web

En cours





Des questions?

Systeme de vigilance des aléas gravitaires
fondé sur l'intelligence artificielle

Héloïse CADET
h.cadet@sage-ingenierie.com

