



# VIGIlance MONTagne – Service de prévision de risque glissement de terrain et laves torrentielles en territoire de montagne

Séverine Bernardie, Andrea Giacobbe, Yannick Thiery, Nathalie Marcot, Louis Ferradou, Lucie Armand  
Frédéric Liébault, Théo Welfringer, Dominique Laigle, Guillaume Chambon  
Aurélie Arnaud, Audrey Borelly, Anahi Leguizamon  
Sylvain Chave, Zoe Candaux



de durable

# Contexte

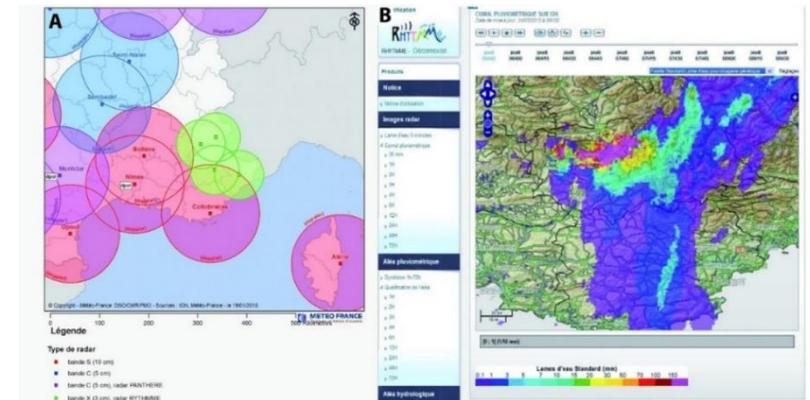
Les espaces montagneux soumis à une grande variété d'aléas naturels

- Induits par forçage hydrométéorologique
- Augmentation du nombre d'événements dans le contexte du changement climatique
- Glissements de terrain et laves torrentielles

-> Nécessité de mettre en place des mesures de prévention, et de gestion du risque

Progrès récents en matière d'acquisition de données météorologiques (observation, traitement, analyse et interprétation des données)

-> les systèmes d'alerte territoriaux (échelle régionale) constituent un outil majeur

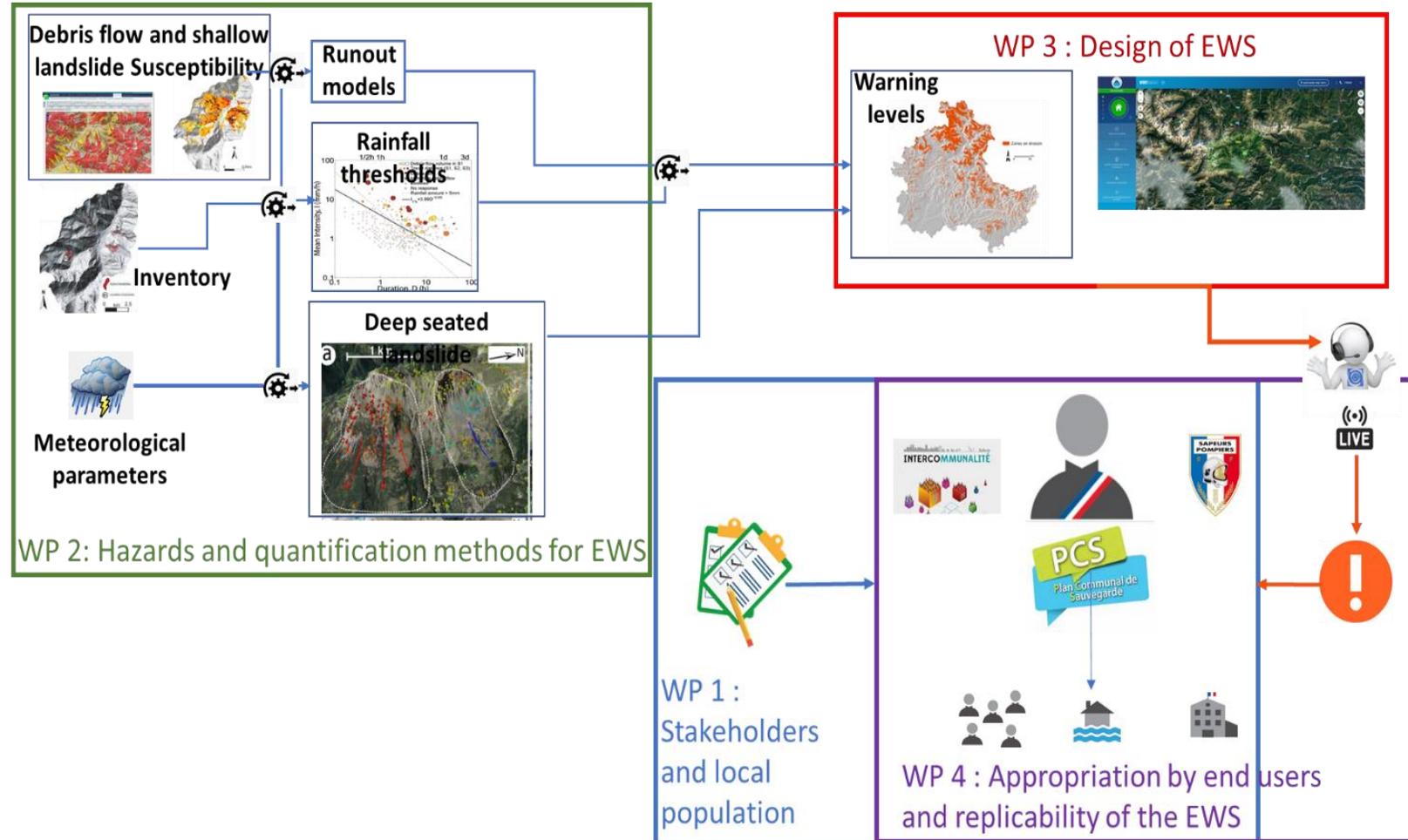


# Objectifs scientifiques et techniques

Développer un nouveau service d'alerte (SA) en temps réel concernant les phénomènes de laves torrentielles (LT) et de glissements de terrain (GT)

-> à destination des autorités de sécurité (SDIS/ CODIS, Préfecture, Municipalités...)

-> Une approche multi-échelles emboîtées : échelle régionale et locale (municipalité), avec le développement de services pour les utilisateurs finaux intervenant à ces deux échelles



# Objectifs scientifiques et techniques

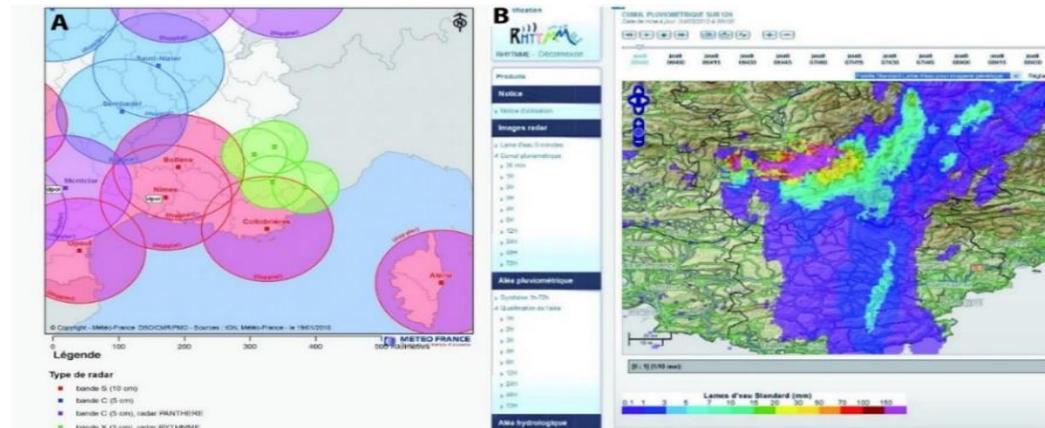
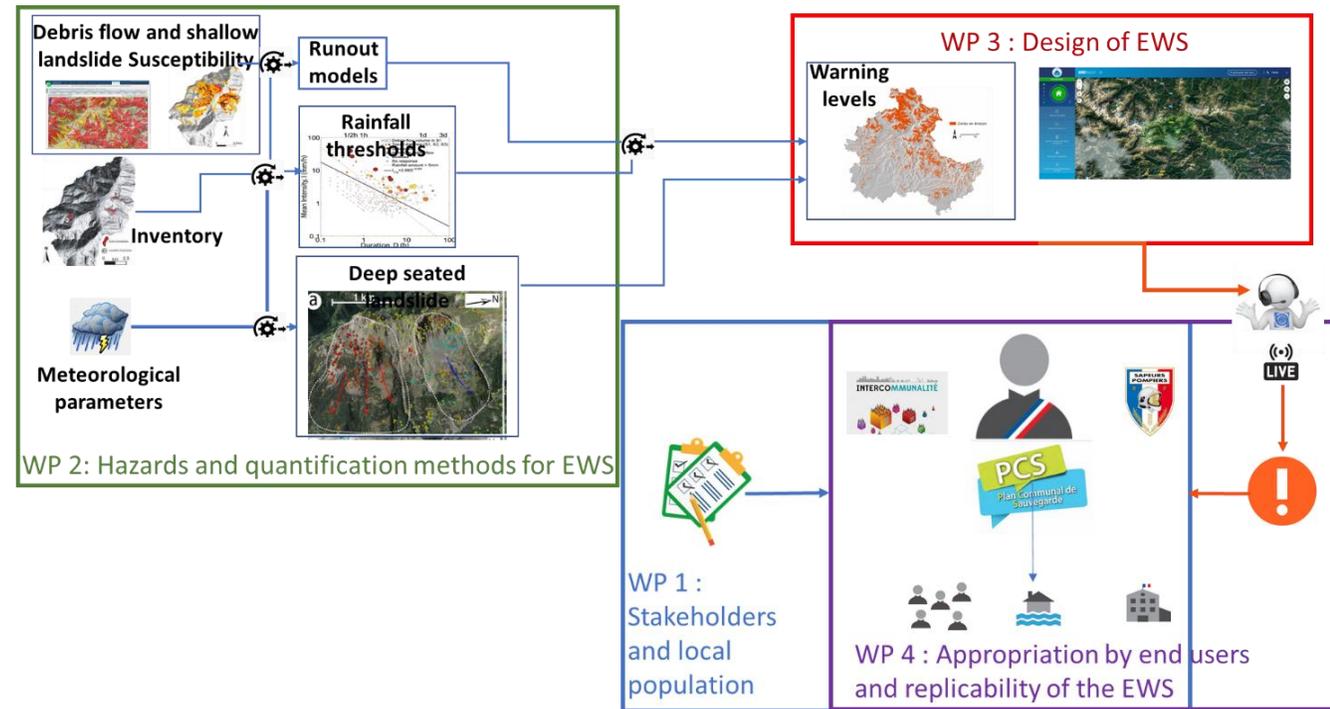
## 1) Analyse du risque

- > analyser la perception des risques, des SA, et la gestion actuelle de la prévention des risques et de la crise
- > **identification des besoins des acteurs de la sécurité civile et l'acceptabilité sociale des SA**

Enquêtes menées auprès des **acteurs locaux de la sécurité, et de la population locale**

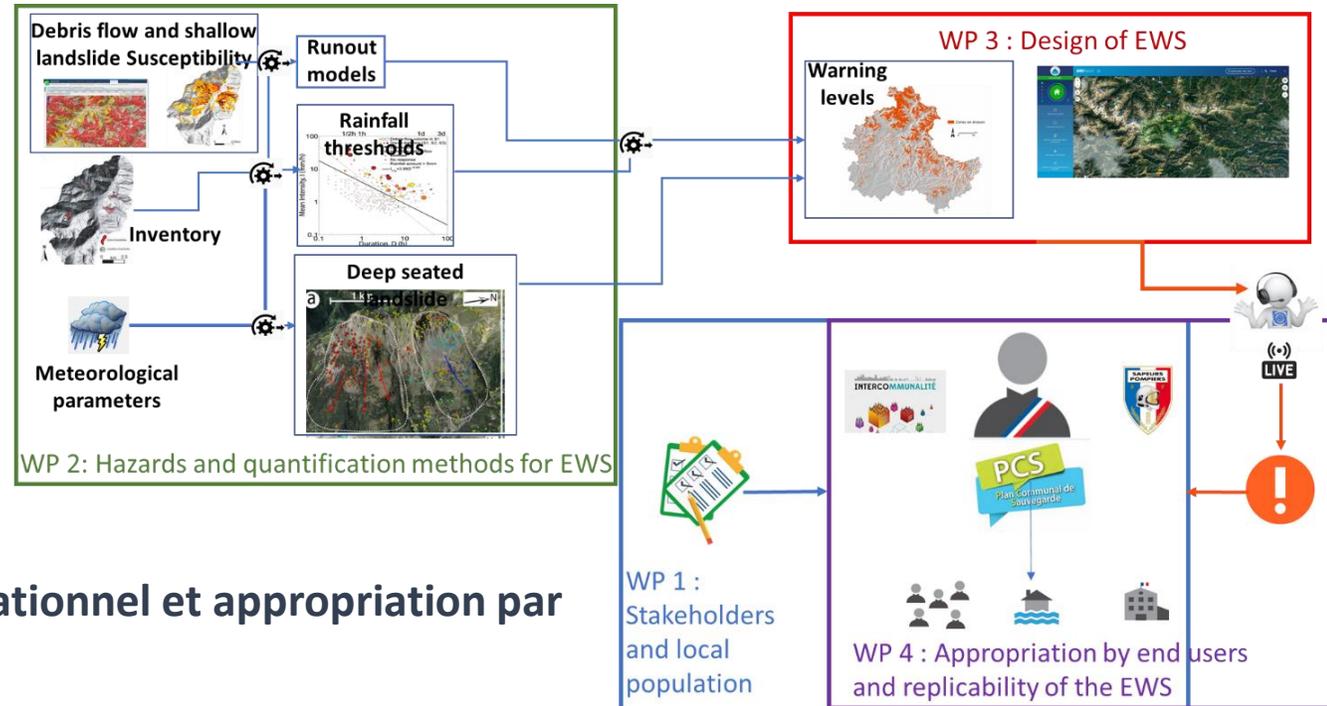
## 2) Analyse des processus physiques

- Exploitation de radars météorologiques et données complémentaires pour analyser l'occurrence des LT et GT superficiels
- > **définition de seuils critiques de précipitations qui déclenchent les événements**



# Objectifs scientifiques et techniques

- Améliorer la caractérisation de la **variabilité spatiale** des conditions de déclenchement des LT et GT superficiels
- Produire des scénarios d'aléas en couplant les cartes de susceptibilité avec des **modèles de propagation** à base physique
- GT actifs et profonds: production automatique de séries temporelles de mouvements du sol en utilisant des **données INSAR** (fréquence mensuelle)

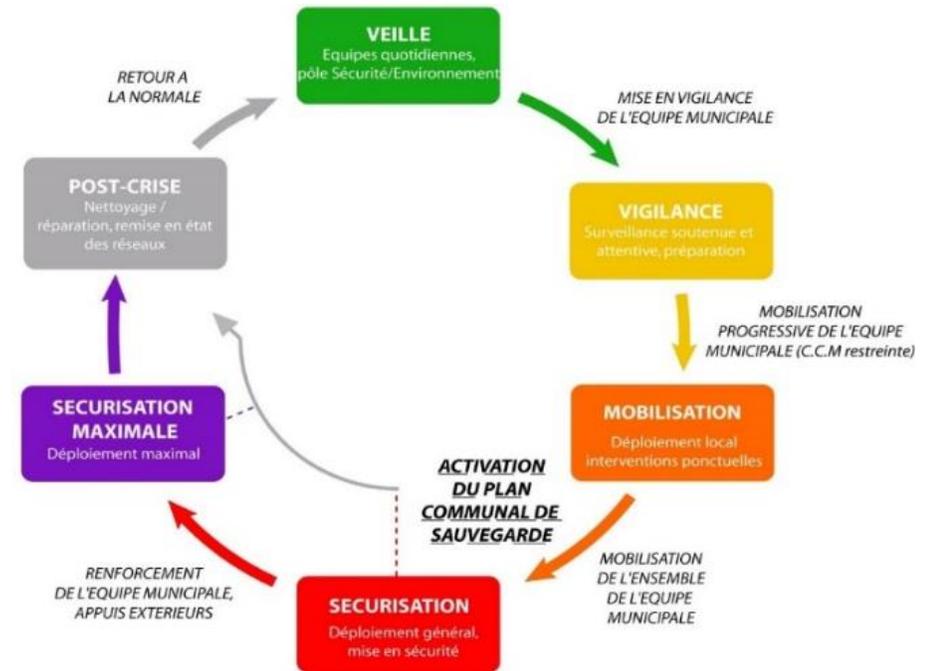


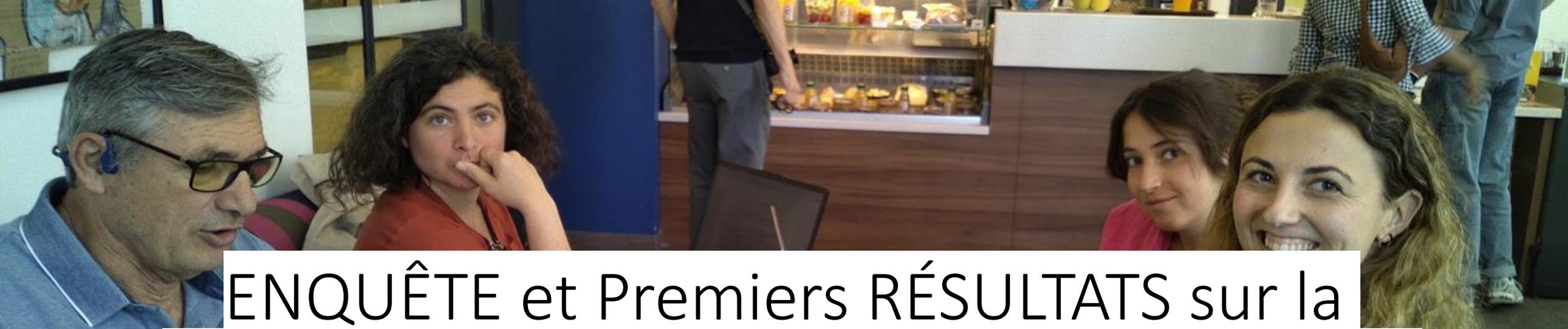
## 3 ) Développer un système de prévision et d’alerte opérationnel et appropriation par les utilisateurs

- Coupler les prévisions de précipitations avec : i) les seuils de déclenchement ; ii) cartes de susceptibilité iii) propagation des phénomènes
- Intégrer des cartes de vigilance de GT et de LT en temps réel dans les SA disponibles avec la définition de niveaux de vigilance, de messages et d’actions associées et l'analyse des incertitudes associées

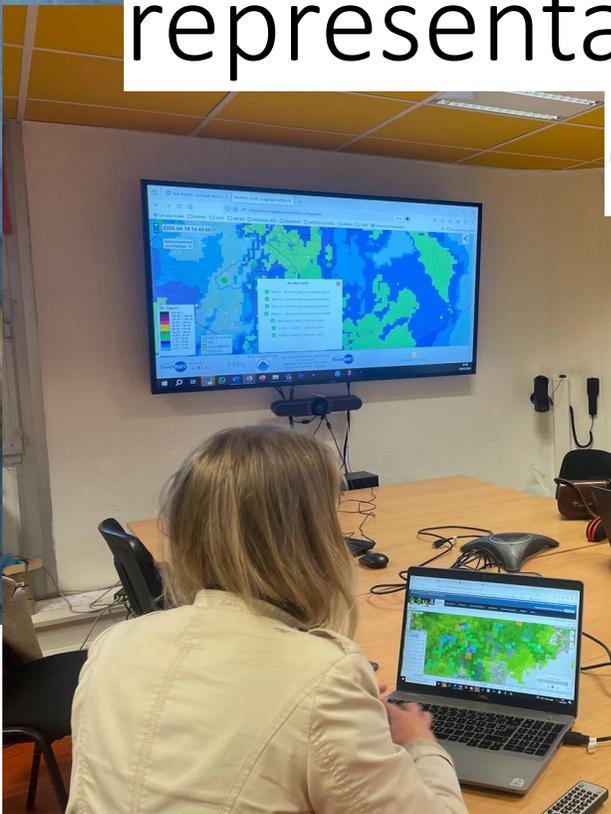
# Retombées attendues

- **L'amélioration des SA pour les GT et LT est un gain pour tous les acteurs de la gestion de crise**
- Développer un nouveau service au sein de la plateforme existante Wikipredict
- Nouveau service pour les GT et LT ; utilisateurs de Predict (plus de 1000 communes de montagne) de ces territoires bénéficieront ainsi directement des apports du projet VIGIMONT
- Bénéfices opérationnels : une diffusion précoce des informations d'aide à la décision -> activation plus rapide du PCS et une sécurisation rapide des enjeux
- Mis en œuvre sur les sites d'études: départements 06, 05, et les communes suivantes sont ciblées : Crots, Saint-Martin-Vésubie, Menton



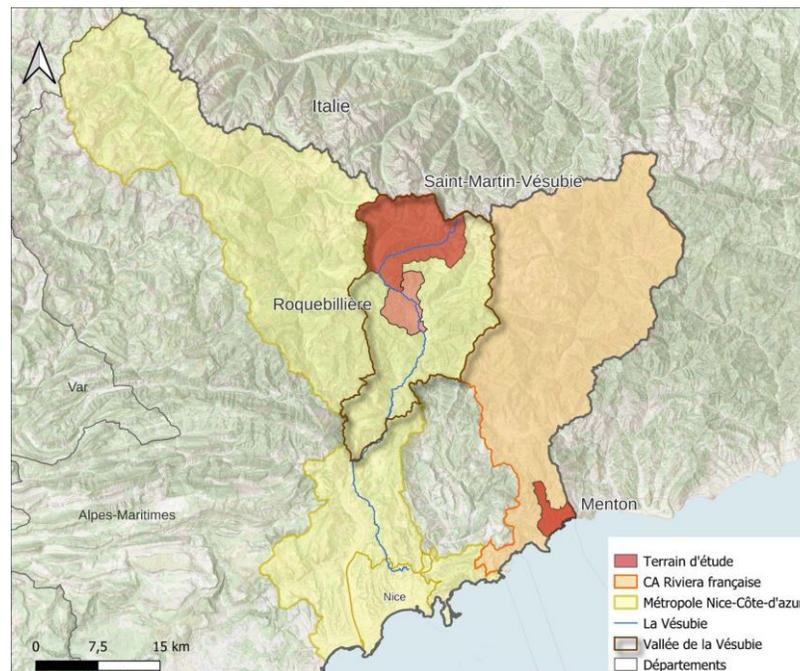
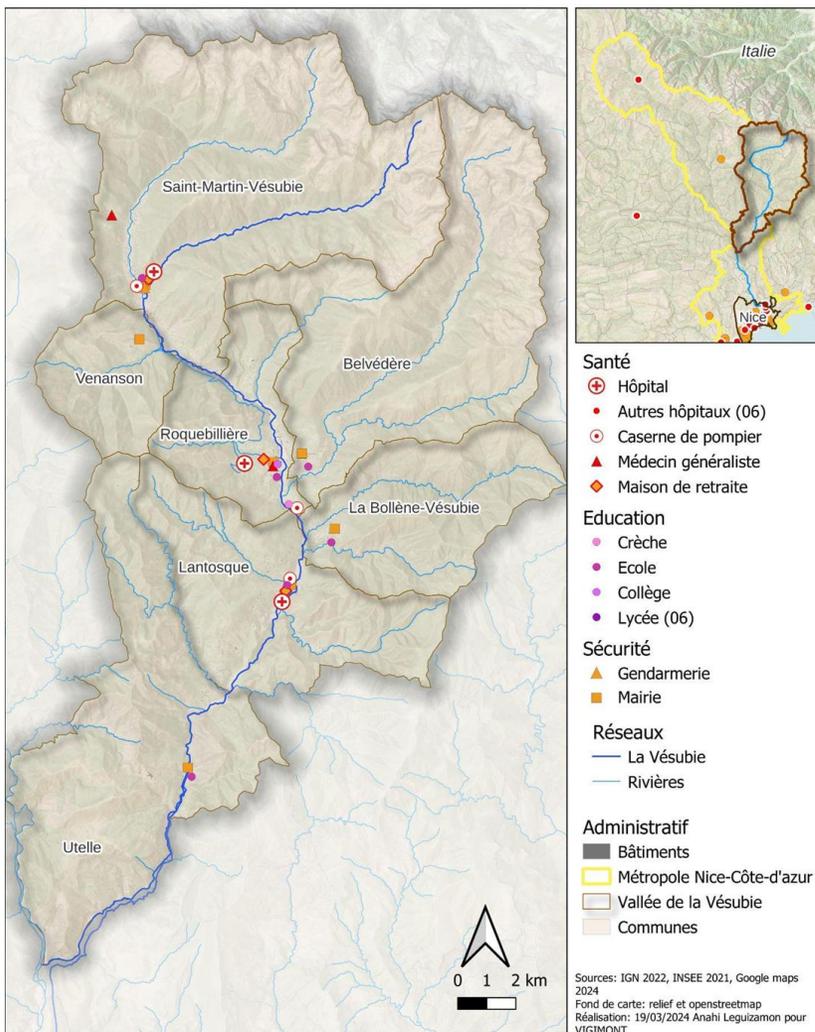


# ENQUÊTE et Premiers RÉSULTATS sur la représentation de la vigilance et de l'alerte, et utilisation des outils

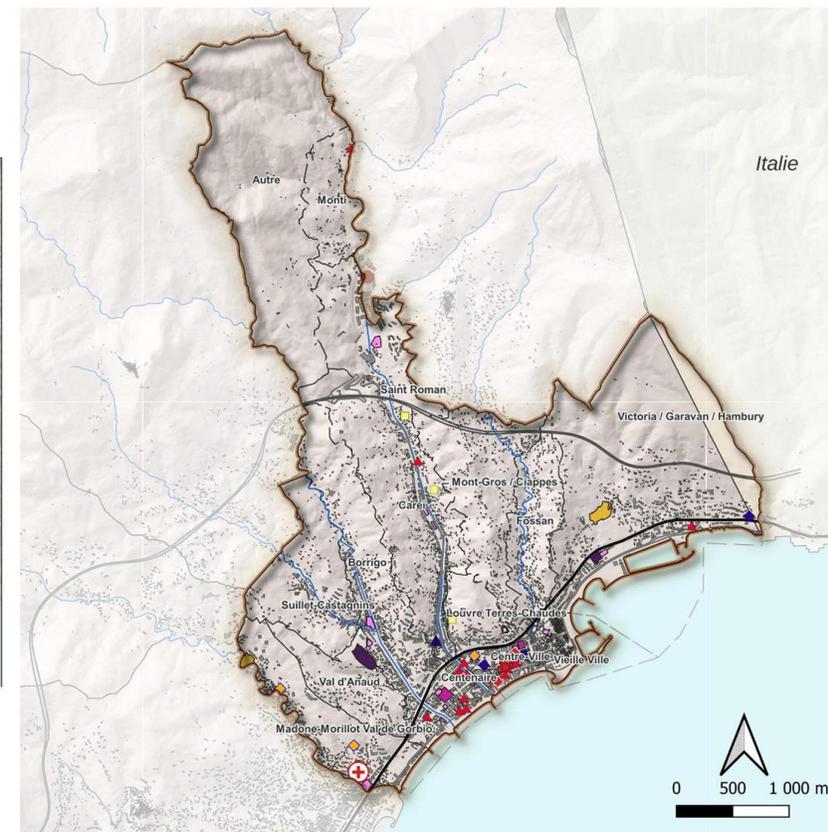


# SITES ÉTUDIÉS - enquête

## Enjeux dans la vallée de la Vésubie en 2024



## Enjeux à Menton en 2024



# ACTEURS INTERVIEWÉS

<i>Echelle départementale</i>		
<b>Cécile Guitet</b> <i>ex-chef de service de la RTM 06 et actuellement directrice de l'agence RTM Alpes du Sud ainsi que cheffe du service RTM des Alpes-de-Haute-Provence</i>	RTM 06	1h 47 min 20 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Frédéric Castagnola</b> <i>Lieutenant-Colonel de Sapeurs-Pompiers (retraité)</i>	SDIS 06	2h 01 min 16 sec
<b>Caroline DEBUISSY</b> <i>Capitaine et chef du groupement fonctionnel Citoyenneté</i>	SDIS 06	2h 10 min 10 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Adrien Dubois</b> <i>Officier de sapeurs-pompiers</i>	SDIS 06	48 min et 26 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Matthias Paluszkiewicz</b> <i>Chef du pôle risques naturels et technologiques</i>	Direction départementale des territoires et de la mer (DDTM) 06 – pôle risques	1h 45 min 46 sec
<b>Sophie Casals</b> <i>Journaliste</i>	Nice-matin	1h 09 min 06  sec <a href="#">en zoom</a>

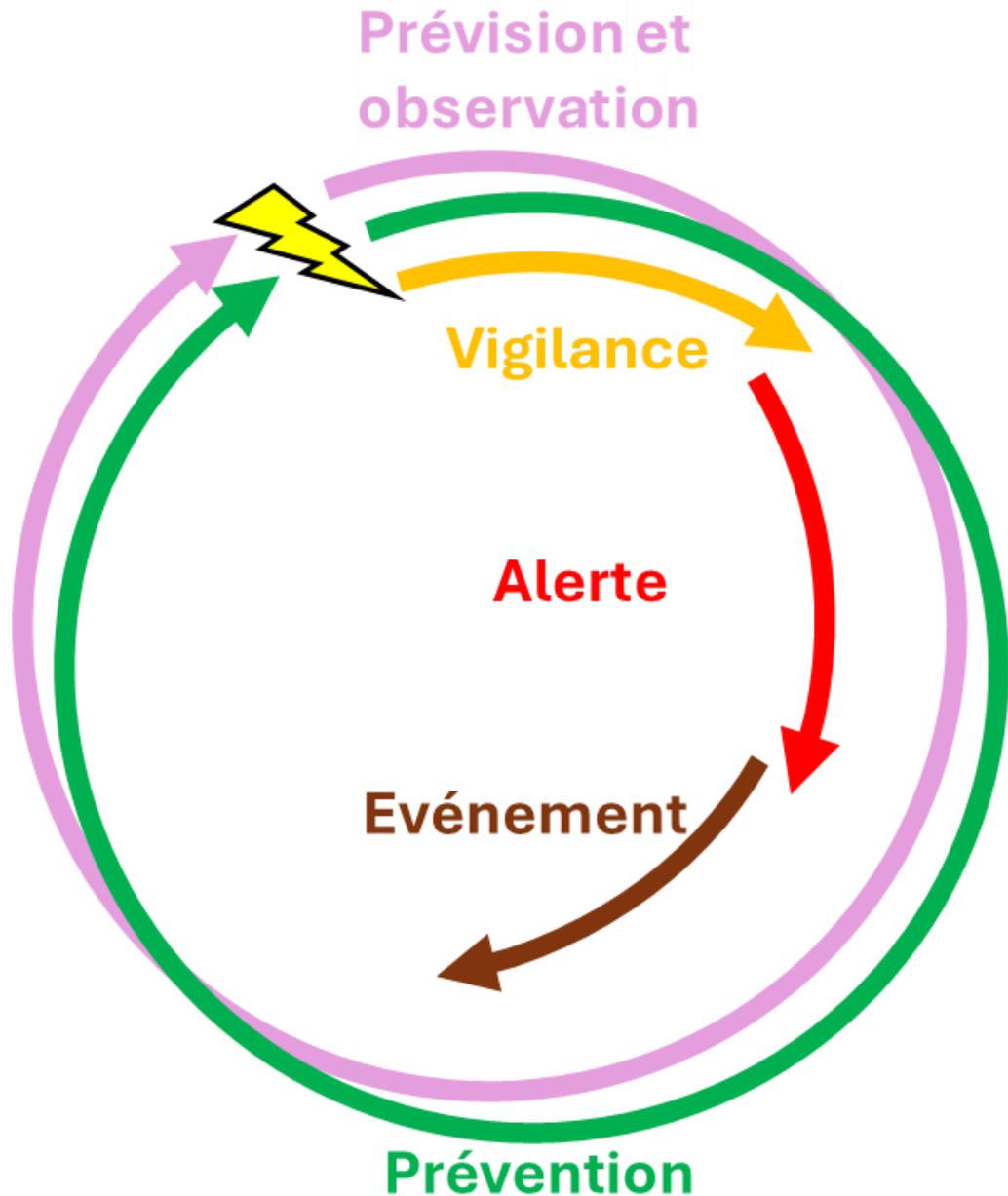
<i>Echelle biophysique</i>		
<b>Raphaëlle Dreyfus</b> <i>Responsable du pôle Hydro Météo &amp; Gestion de crise</i>	Syndicat Mixte pour les Inondations l'Aménagement et la Gestion de l'Eau (SMIAGE)	2h 05 min 57 sec
<b>Morgane Lambourg</b> <i>Responsable Steprim</i>	Syndicat Mixte pour les Inondations l'Aménagement et la Gestion de l'Eau (SMIAGE)	1h 24 min 39 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Christine Lac</b> <i>Directrice du Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle du CNRM</i>	Météo France	1h 23 min 59 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Romain Lacoste</b> <i>Chef de service territorial de la Vésubie</i>	Parc National du Mercantour	1h 47 min 46 sec

<i>Echelle intercommunale</i>		
<b>Véronique Cornillon</b> <i>Adjoint au chef de service Risques Majeurs et Responsable du pôle Astreintes et Gestion de Crise chez métropole Nice Côte d'Azur</i>	DPRM Métropole Nice	2 h 35 min 54 sec
<b>Laurence Serandour</b> <i>Responsable Agence de Sécurité Sanitaire Environnementale et Risques</i> <b>Charlotte Thomin</b> <i>Géographe à l'Agence de Sécurité Sanitaire Environnementale et Risques</i>	Agence de Sécurité, Sanitaire Environnementale et Risques de la Métropole de Nice	2h 26 min 57 sec
<b>Ladislav Polski</b> <i>Vice-président Métropole Nice Côte d'Azur (médecin)</i>	Métropole Nice	1h07 min 58 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Jean-Christophe Martin</b> <i>Responsable du service GEMAPI et Milieux Marins</i>	Communauté d'agglomération de la Riviera française - CARF Responsable GEMAPI	2h 09 min 51sec

<i>Echelle communale</i>		
<b>Ivan Mottet</b> <i>Maire de Saint-Martin-Vésubie</i>	Mairie Saint-Martin de Vésubie	1h 59 min 17 sec
<b>Thierry Ingigliardi</b> <i>3<sup>ème</sup> adjoint délégué aux sports et à la reconstruction</i>	Mairie Saint-Martin de Vésubie	35 min 02 sec
<b>Zoé Candaux</b> <i>Ingénieur en gestion des risques naturels</i>	PREDICT (gestion du risque météorologique)	4h 19 min 02 sec <a href="#">en zoom</a>
<b>Stéphane Pansier</b> <i>Service Hygiène, santé et sécurité</i>	Mairie Menton	1h 41 min 04 sec
<b>Georges Corniglion</b> <i>Adjoint à la sécurité</i>	Mairie de Roquebillière	1h 34 min 29 sec <a href="#">en zoom</a>



# Outils par temporalité (vigi-alerte-crise)



## Outil Prévention:

- Précaution pour éviter l'exposition des enjeux (PPR, PLU, etc)
- Préparation à la crise (PCS, Exercice de simulation, etc)
- Information - sensibilisation (DICRIM, etc)

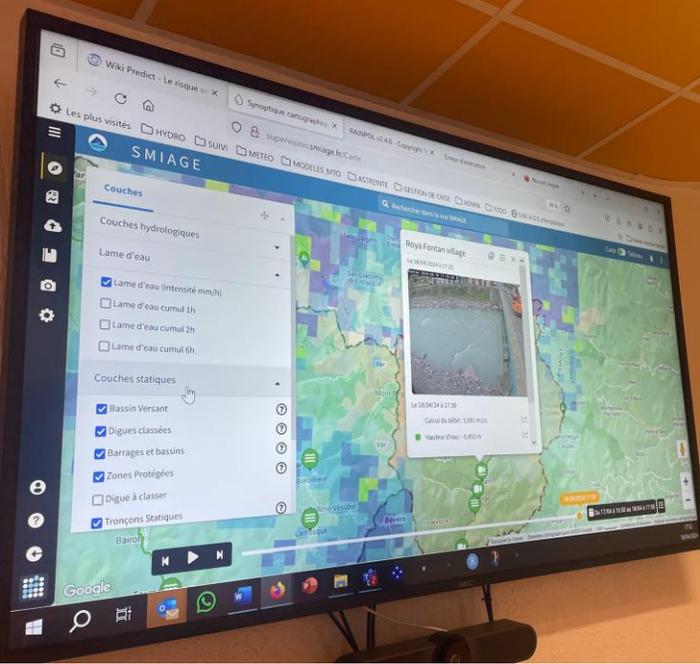
Outils d'observation du phénomène (outils de mesures)

Outils de prévision (modélisateurs)

## Outils de gestion de crise

- Outil de la **vigilance**
- Outils de d'**alerte** > information (fr alerte...)
- Outils de gestion de l'**événement** (état de crise effective- appli du PCS via des outils des PREDICT, Jaguar, Crimson Pumax.

→ différents types d'outils utilisés



Outils d'observation des phénomènes météorologiques

-Outils d'aide à la décision des communes à la gestion de crise  
 -Outils d'information des citoyens  
 -Outil de veille de PREDICT

-Outil d'observation des phénomènes de crues  
 -Outils qui croise des données de dépassement de seuil, dépassement pluvio, capteurs pluvios, caméras

utilisé par PREDICT

utilisé par SMIAGE

Outils de gestion de crise

Outils de messagerie à diffusion massive

	Prévention	Vigilance	Alerte	Phénomène	Crise	Post catastrophe
Météofrance						
Bulletins (météo france : météo, avalanche )						
Météociel : arpege et arome						
Windy						
Vigicrues et vigicrues flash						
Synop						
Sites de consultations (ex : météo bleue, météo06, Nice météo, Météo Côte d'azur en direct)						
Projet Aquavar						
Wikipredict						
Mypredict						
Predict analyser et observer						
Rainpol (caméras, radar)						
Superviseur						
Jaguards (main courante)						
Projet PUMA X						
Crimson						
Fr-Alerte						
Cii-rélécom						
Gedicom						
Télé-alerte						
Assurances						

→ un grand nombre d'outils

**46** outils recensé pour des entretiens portant sur la vigilance et l'alerte

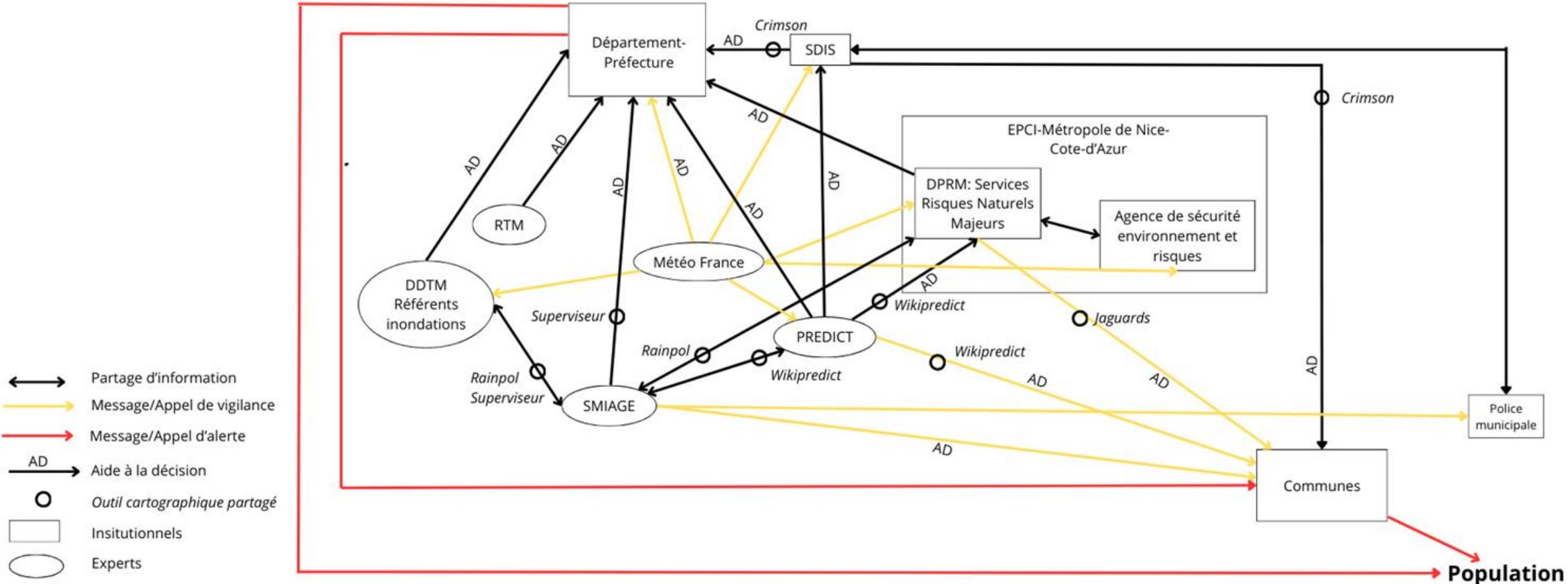
dont

- 16 en prévision
- 9 outils en vigilance
- 26 outils en alerte
- 11 outils en obs du phénomène
- 13 en crise
- 7 en post-catastrophe

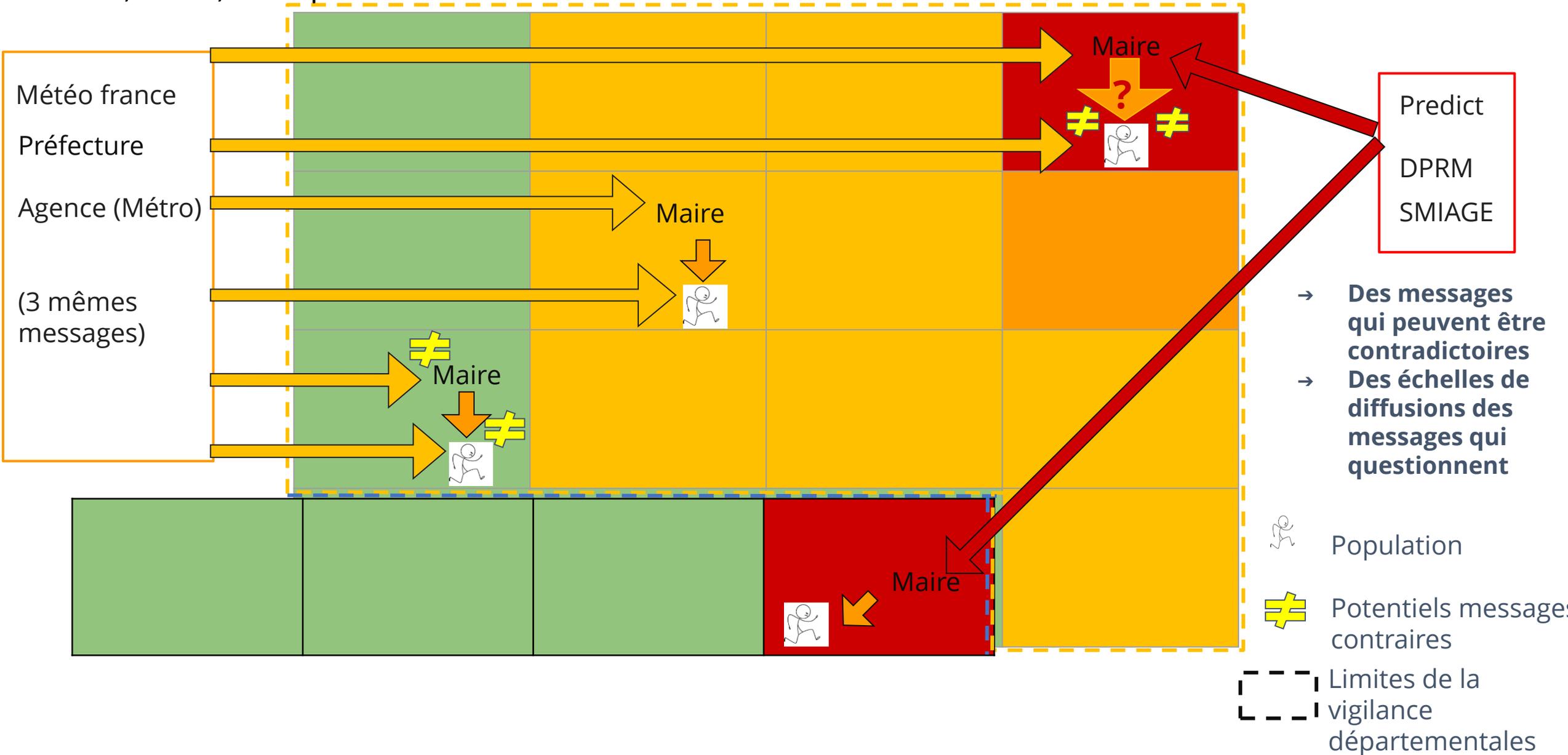
		Prévention	Vigilance	Alerte	Phénomène	Crise	Post catastrophe
Outils de diffusion de l'information	Réseaux sociaux (Facebook, X)						
	Presse						
	Canaux de communication (ex: Whatsapp)						
Plan de sauvegarde	PCS						
	PICS						
	ORSEC						
Information préventive et/ou protection, surveillance (réglementaire)	DICRIM						
	DDRM						
	GEMAPI						
Outils juridique décrivant les tous les faits lors de l'événement	PPR						
	PLU						
	Main courante						
Programme d'actions	StePRIM						
	GIRN						
	PAPI						
Appel des gens si souci	Participation citoyenne	Allô mairie (Nice)					
	Sonore	Sirène					
Pour l'observation des dégâts	Matériel	Radios					
		Drônes					
		Téléphones portable					
		Téléphones satellite					
		Caméras					
		Radars					
		Groupe électrogène					
		Essence					

# Multitude d'outils plus ou moins utilisés et partagés

Intéactions des acteurs et des outils cartographiques en temps de vigilance-alerte



# Questions d'échelles versus responsabilités - Messages de vigilance et d'alerte : radio, sms, téléphone ou notification



# A VENIR...

- Entretien préfecture / IRMA / prévisionniste Météo-France
- Enquête auprès de la population
- Impact des messages d'alertes sur la population
- Etude fine de la formulation des messages d'alerte (*ex. doc ORSEC p. 62*)

## Réflexion sur:

- La transférabilité du message de vigilance et d'alerte aux mouvements de terrain
- La transférabilité à d'autres territoires (sur le département des alpes maritimes)

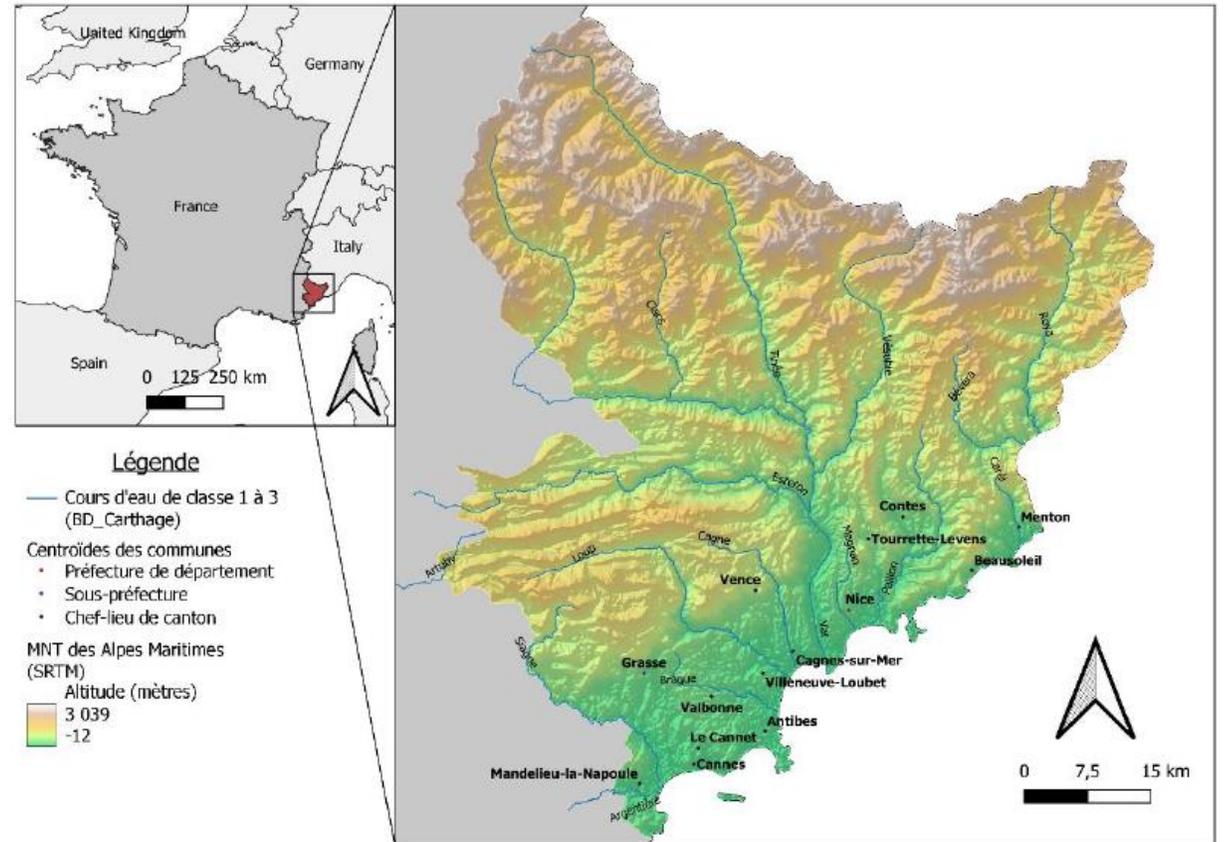
# Systeme d'alerte precoce pour les glissements de terrain superficiels à echelle regionale

## Trois etapes principales :

- Analyse regionale des seuils de declenchement de glissements de terrain superficiels
- Combinaison des conditions spatiales et temporell
- Couplage des resultats avec des modeles de propagation

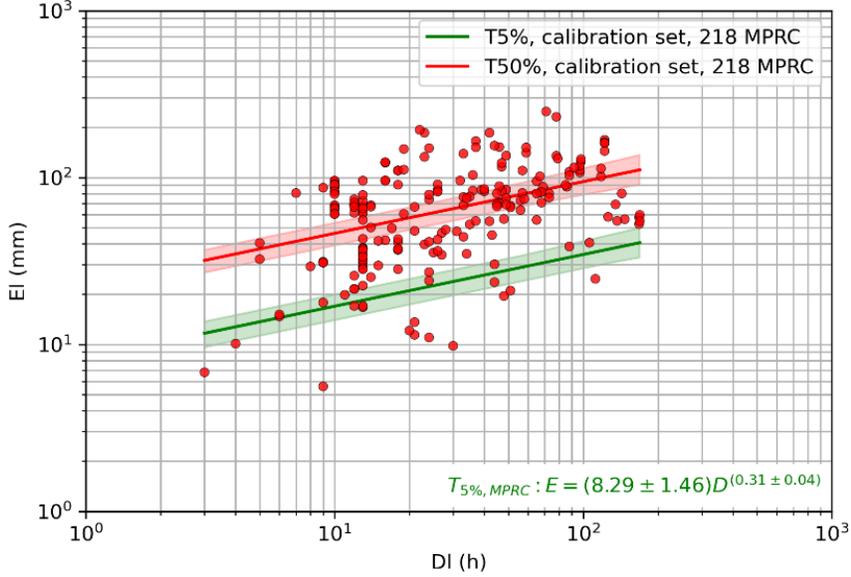
## Objectifs :

- Ameliorer la qualite des seuils :
  - Nouveaux parametres
  - Donnée d'entree de meilleure qualite
  - Comprendre les mecanismes
- Comment spatialiser les seuils ?
  - Mettre en relation des parametres statiques et dynamiques
  - plusieurs approches envisagees



*Département des Alpes-Maritimes (Rapport de stage Sophie Barthélemy, 2021)*

# TRAVAUX ANTÉRIEURS : Analyse de seuils pluviométriques

<p>Results obtained for Most Probable Rainfall Conditions (<b>MPRC</b>) (1 condition per landslide) <math>E = (\alpha \pm \Delta\alpha)D^{(\gamma \pm \Delta\gamma)}</math></p>	<p>Conditions below T5% and T50% thresholds</p>	<p><b>Relative uncertainty</b> <math>\frac{\Delta\alpha}{\alpha}</math></p>
 <p> <span style="color: green;">—</span> T5%, calibration set, 218 MPRC  <span style="color: red;">—</span> T50%, calibration set, 218 MPRC         </p> <p style="color: green;"><math>T_{5\%, MPRC} : E = (8.29 \pm 1.46)D^{(0.31 \pm 0.04)}</math></p>	<p>T5%: 15 (7%)</p> <p>T50%: 102 (47%)</p>	<p style="background-color: #e0f0e0; padding: 5px;">&lt; 0.1 in an operational LEWS (Peruccacci and al., 2012)</p> <p style="text-align: center;">0.18</p>

# THE LANDSLIDE INVENTORY MAP

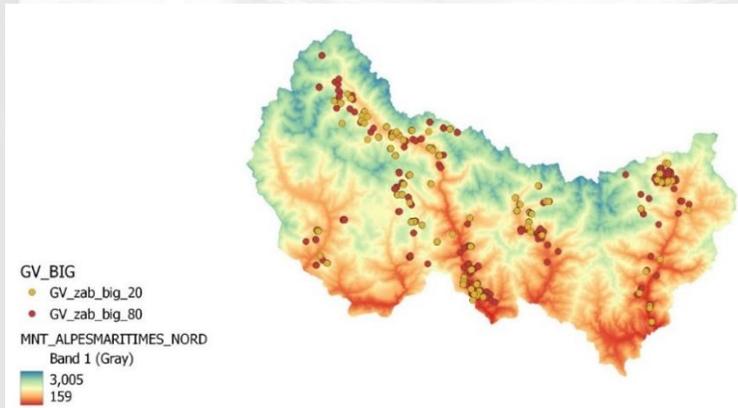


Fig 2: Landslide Inventory Map, Maritime Alps (polygons)

Landslide inventory map as a combination of:

- ❑ **BDMvT inventory** (Database of Land Movements) managed by BRGM, CEREMA and RTM, (location, occurrence data, surface, volume, depth of rupture)
- ❑ **CEREMA AND RTM inventory** (information collection of landslides immediately after storm Alex)
- ❑ **BRGM – RGF Alps inventory** ( landslides triggered by Alex storm in Tinee, Vesubie and Roya valleys)
- ❑ **Previous studies** (Field and othophoto inventory)

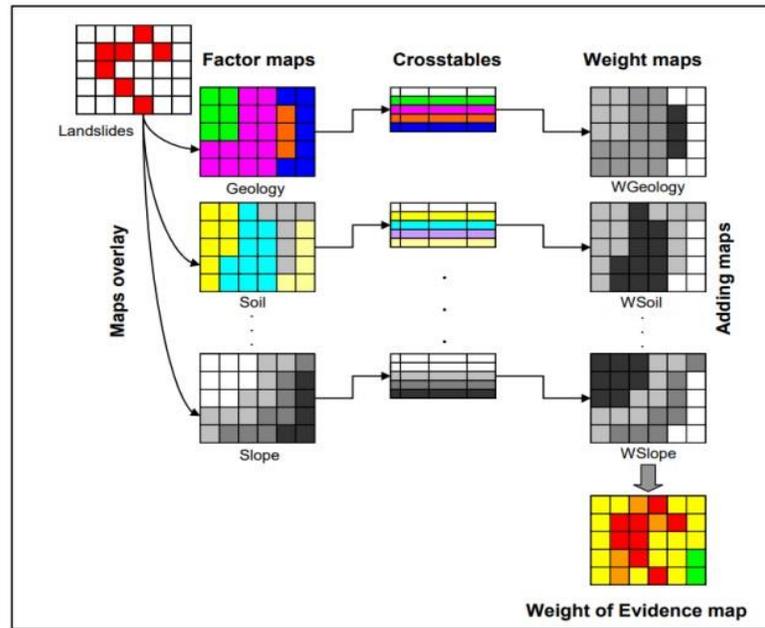
✓ **3603 slope instabilities overall**

✓ **2544 landslides and flow slides** (glissement de versant and glissement coulee)

✓ **1788 slope instabilities** occurred during the Alex storm (landslides, flow slides, bank erosion ...) for La Roya, La Vésubie and La Tinée valleys



# LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY OF THE NORTH: THE WOE MODEL



$$W_i^+ = \log_e \frac{P\{B_i | S\}}{P\{B_i | \bar{S}\}}$$

$$W_i^- = \log_e \frac{P\{\bar{B}_i | S\}}{P\{\bar{B}_i | \bar{S}\}}$$

$B_i$  = presence of a potential landslide conditioning factor,  
 $\bar{B}_i$  = absence of a potential landslide conditioning factor,  
 $S$  = presence of a landslide, and  
 $\bar{S}$  = absence of a landslide

Fig 3: WOE workflow (Castellanos Abella , 2008)

WOE (WEIGHT OF EVIDENCE, Bonham-Cater, 1996) model:

## INPUT DATA

- VM: variables to model (set of landslide choosen)
- PV: predicted variables, as reclassified raster maps (predisposing factors)

## MODEL COMPUTATION:

- $W+$  and  $W-$  calculation for each category of PV
- **Prior Probability**: probability that a pixel contains the VM from the density of a PV.

## OUTPUT:

- ✓ **Posterior Probability**: the susceptibility map which allows to assess a low or high probability of the presence of VM by combining the different PVs.



# THE SUSCEPTIBILITY MAPS OF FLOW SLIDES IN ABLATION

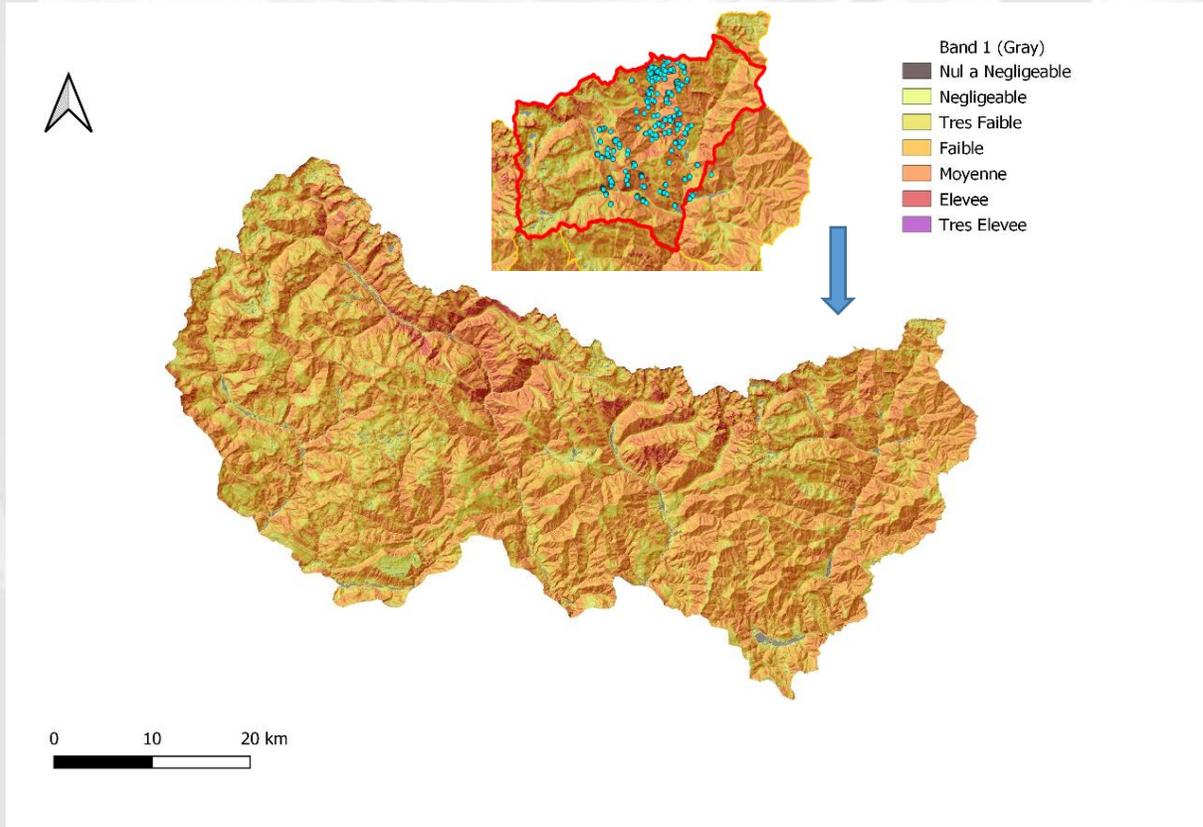
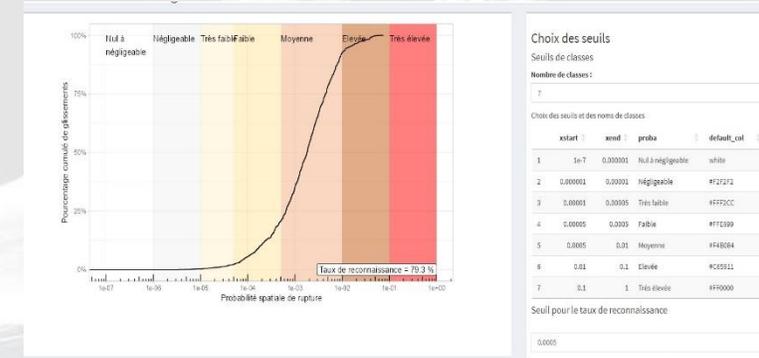
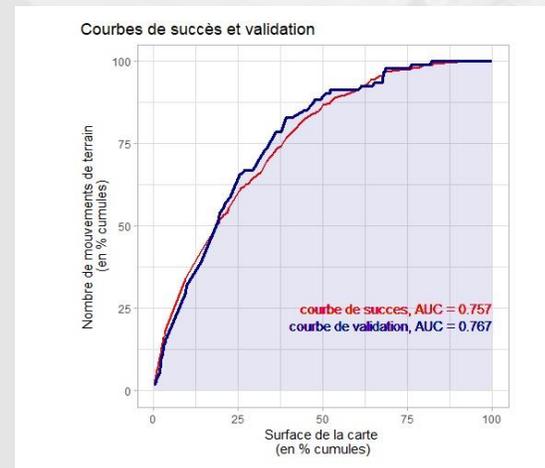


Fig 23: Susceptibility map with JTC-1 threshold adjusted for flow slides greater than 400 m<sup>2</sup>.

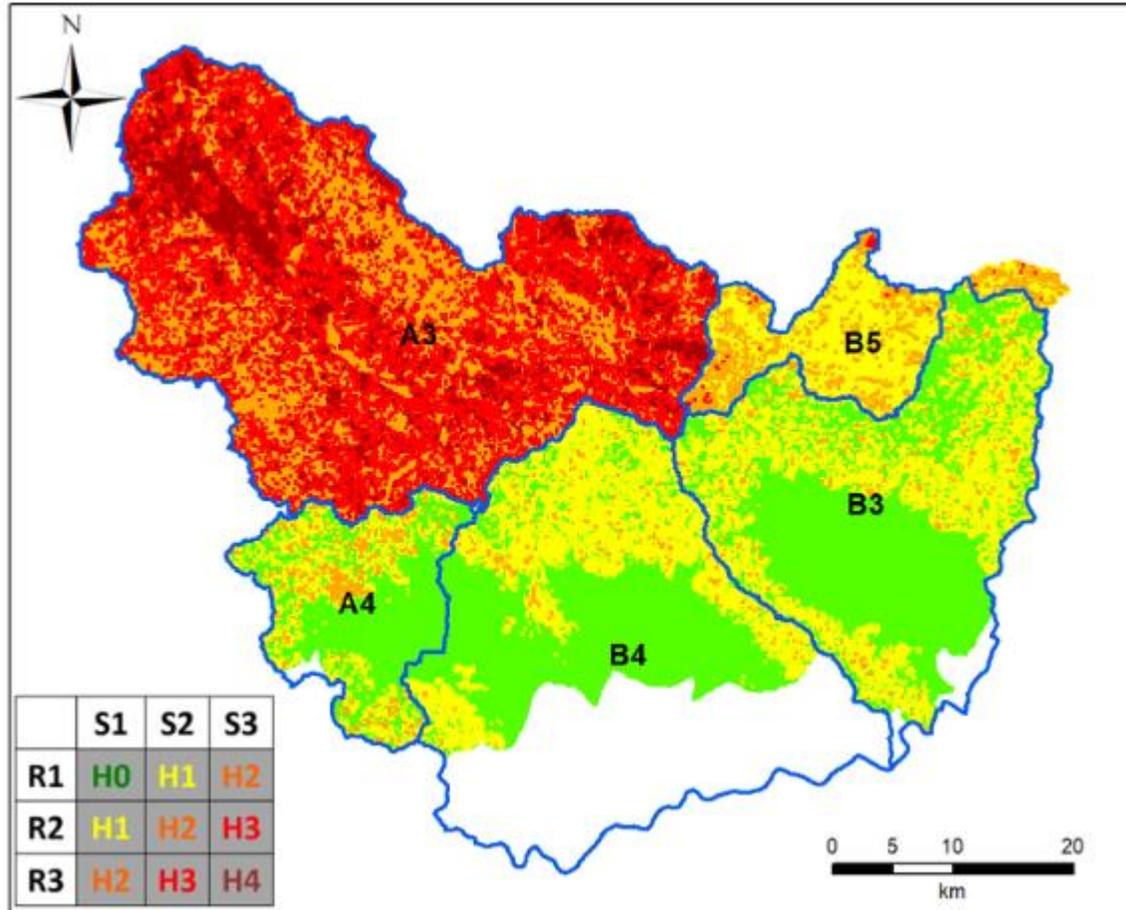


Probabilité spatiale de rupture	Classes JTC-1
1e-00 à 1e-01	Très élevée
1e-01 à 1e-02	Élevée
1e-02 à 1e-03	Moyenne
1e-03 à 1e-04	Faible
1e-04 à 1e-05	Très faible
1e-05 à 1e-06	Négligeable
1e-06 à 1e-07	Nul à Négligeable

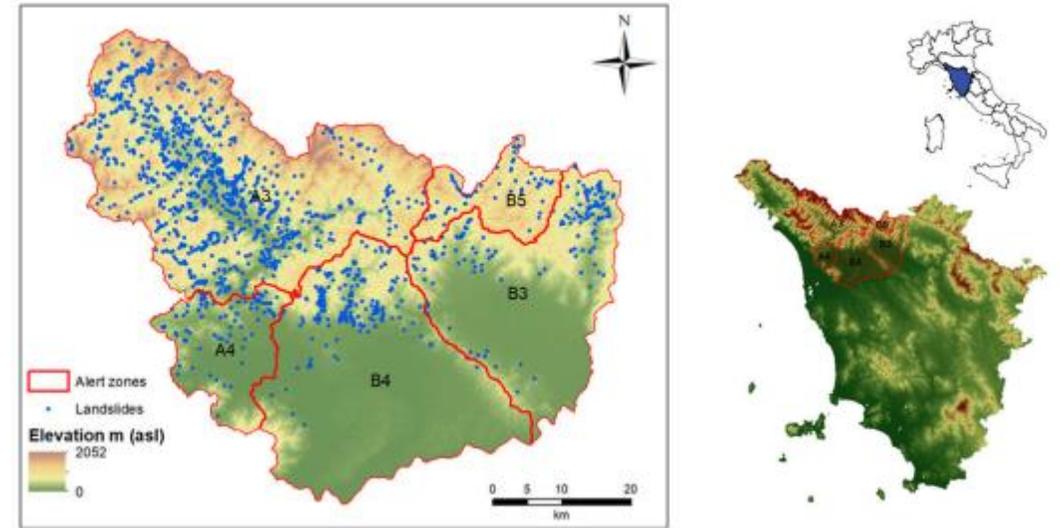


# SPATIALISATION DES SEUILS

→ Première approche : croisement seuils et susceptibilité



Exemple of dynamic hazard map obtained from Segoni et al., 2018



Previous work

Mosaic of rainfall threshold  
(Rosi et al., 2015)

Additional  
threshold for  
each alert zone

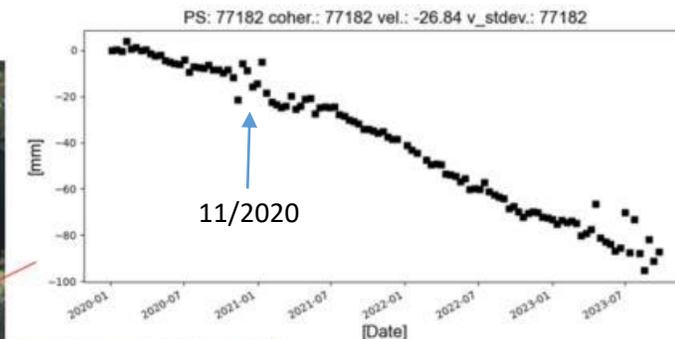
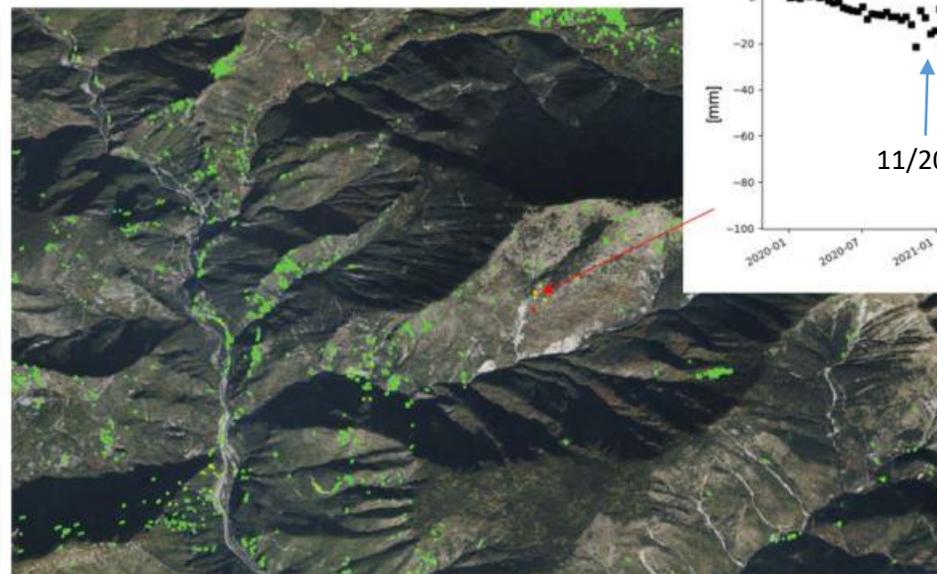
Susceptibility assesement  
(Segoni et al., 2016)

Reclassified  
susceptibility  
map

	S1	S2	S3
R1	H0	H1	H2
R2	H1	H2	H3
R3	H2	H3	H4

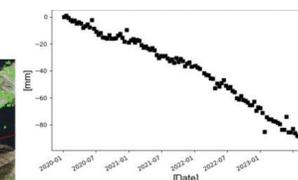
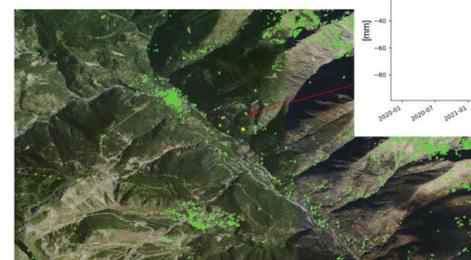
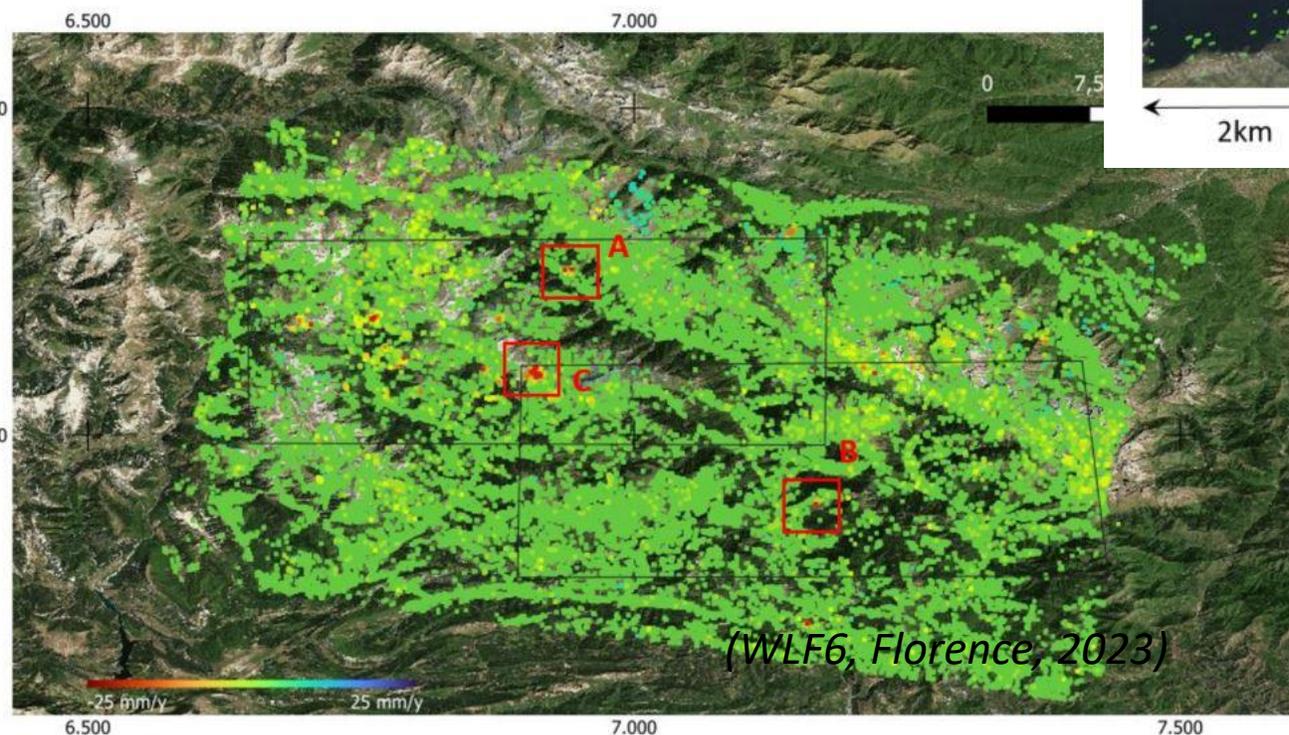
➔ **Objectif** : mettre à jour en temps réel les seuils de précipitations

# Traitement interférométrique (Alpes Hautes Provence/Alpes Maritimes)

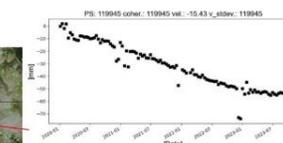
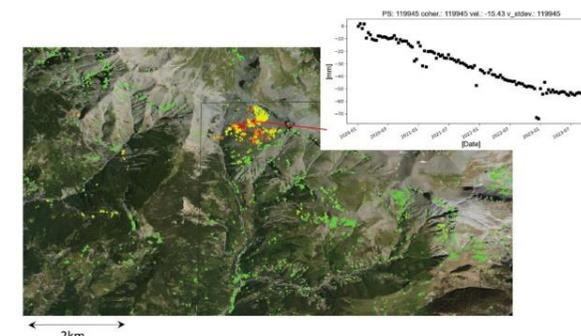


2km

Zoom of B (Marie) area, with time series

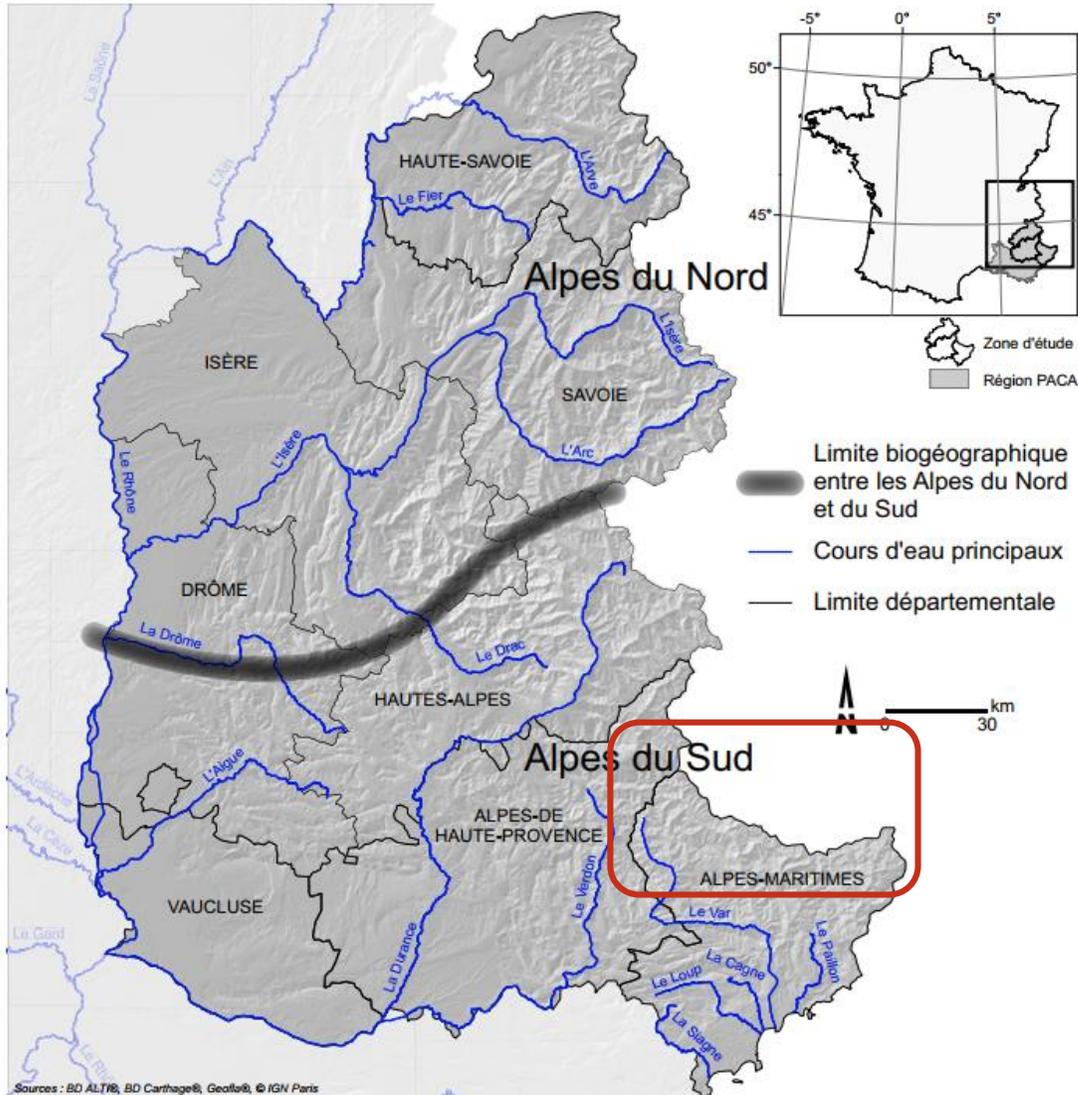


Zoom of A (clapière) area, with time series



Zoom of C area (Péone), with time series

# Analyse des forçages géomorphologiques et météorologiques aux déclenchements des phénomènes de laves torrentielles



M. Bertrand, 2014

## ► Données météorologiques :

- Données du site du Réal
- Lame d'eau **ANTILOPE** sur la période 02/2011 – 01/2024
- Impacts de foudre

## ► Données géomorphologiques :

- Découpage des bassins de réception (ou zones potentielles de déclenchement) (Thèse de M. Bertrand) : « **BR** »
- LIDAR HD 2021

## ► Autres :

- BDD RTM
- Orthophotos IGN (fréquence de 3 ans)

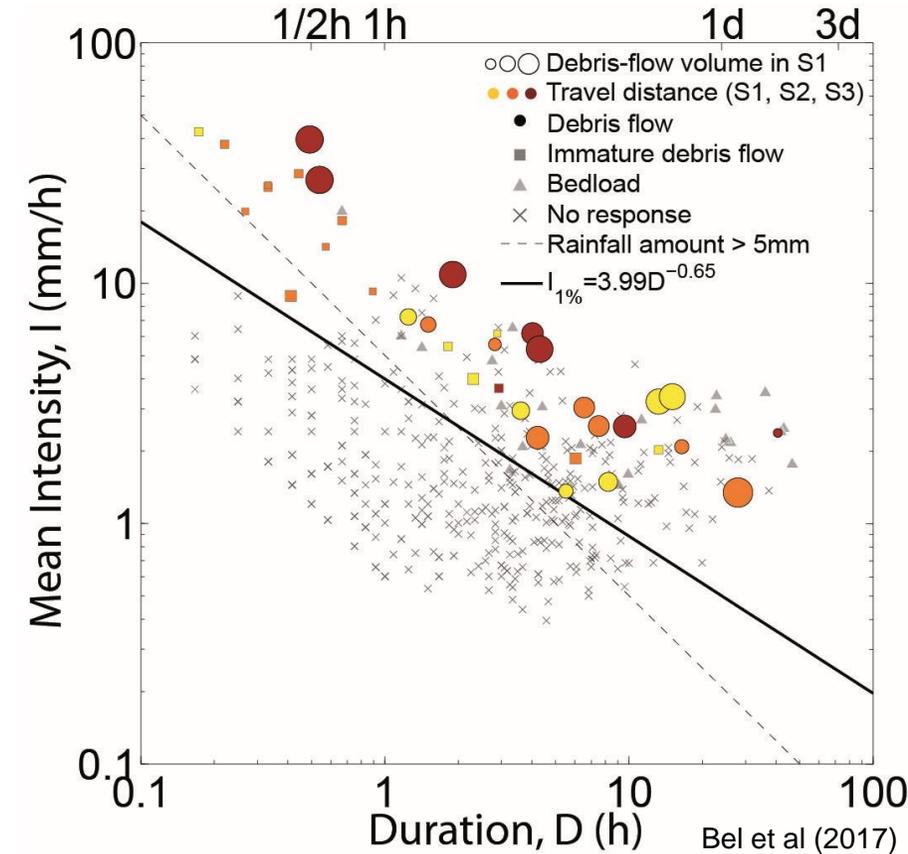
# Contexte scientifique

## ► Des facteurs de déclenchement :

- Détermination du premier **seuil Intensité-Durée** des Alpes Françaises par C. Bel (2017) sur le torrent du Réal
- Seuil **conservatif** pour les Alpes du Sud  
→ Des **faux-positifs**

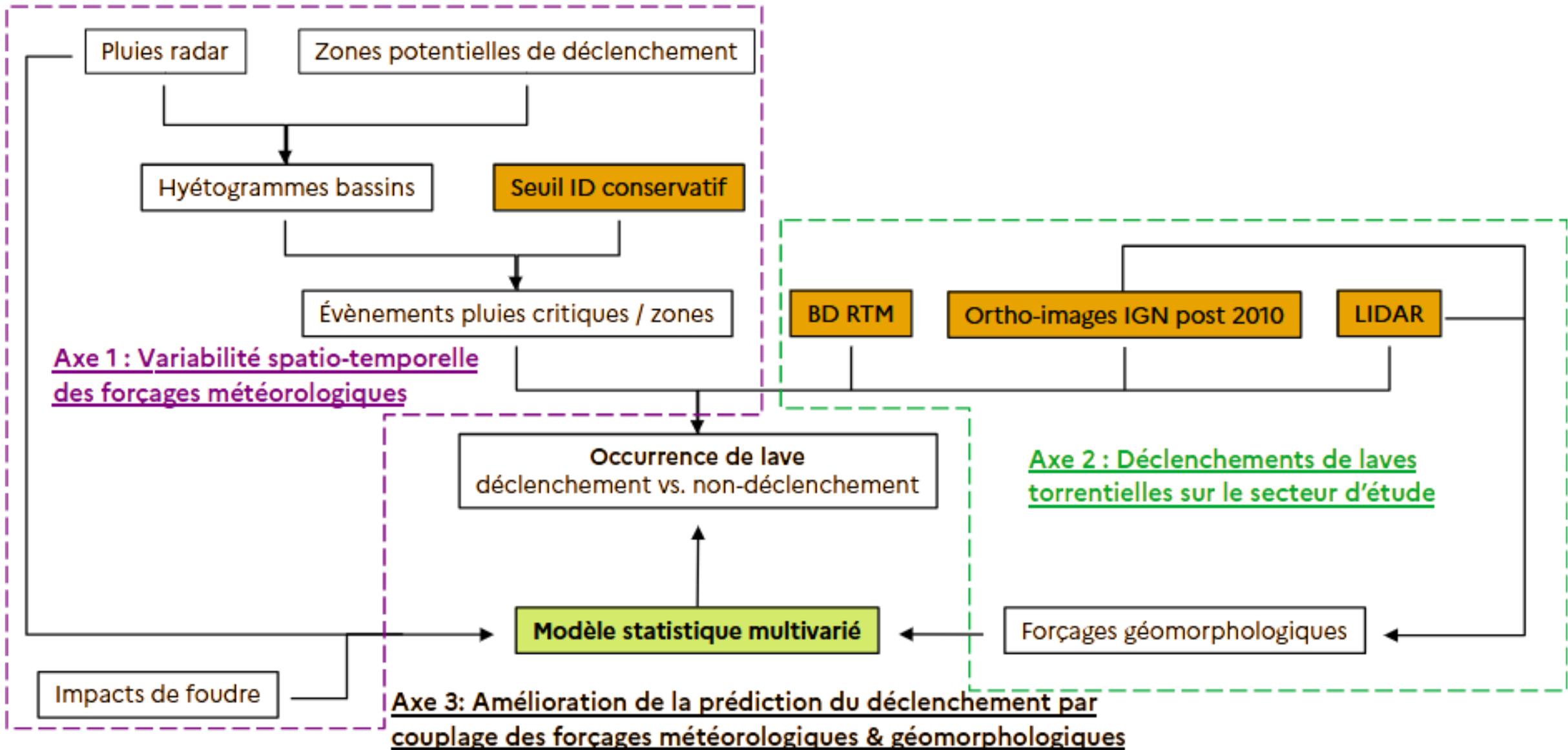
## ► Des facteurs de predisposition :

- Cartographie de la susceptibilité aux laves torrentielles sur les Alpes du Sud par M. Bertrand (2014)  
→ Surestimation des **sédiments réellement mobilisés**



Comment améliorer la prédiction du déclenchement des laves torrentielles sur les Alpes du Sud ?

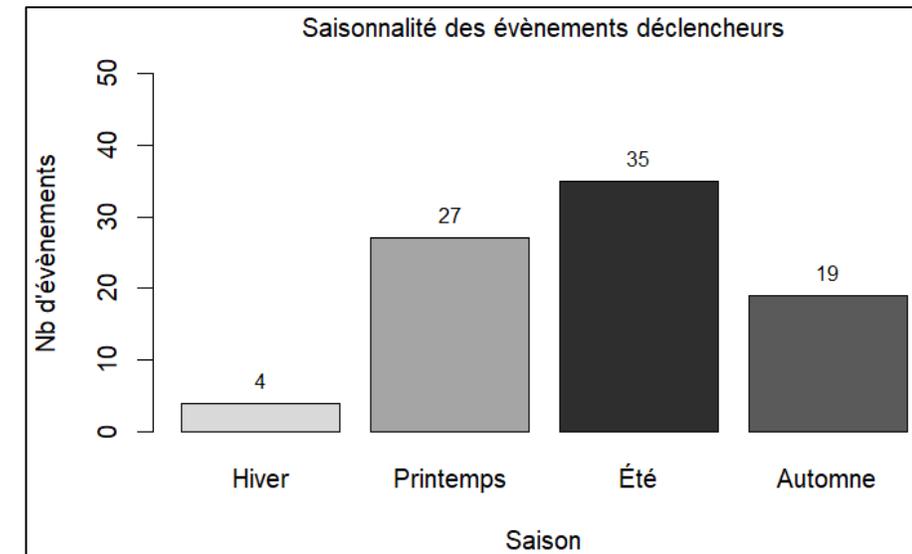
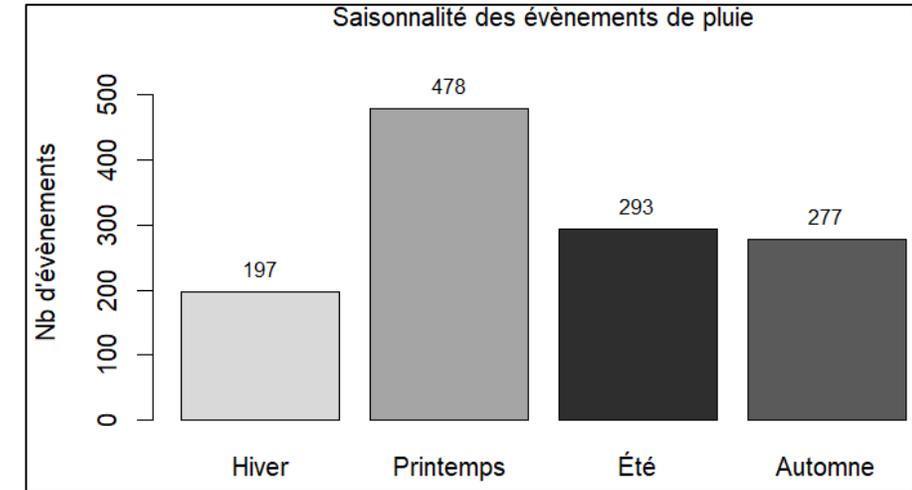
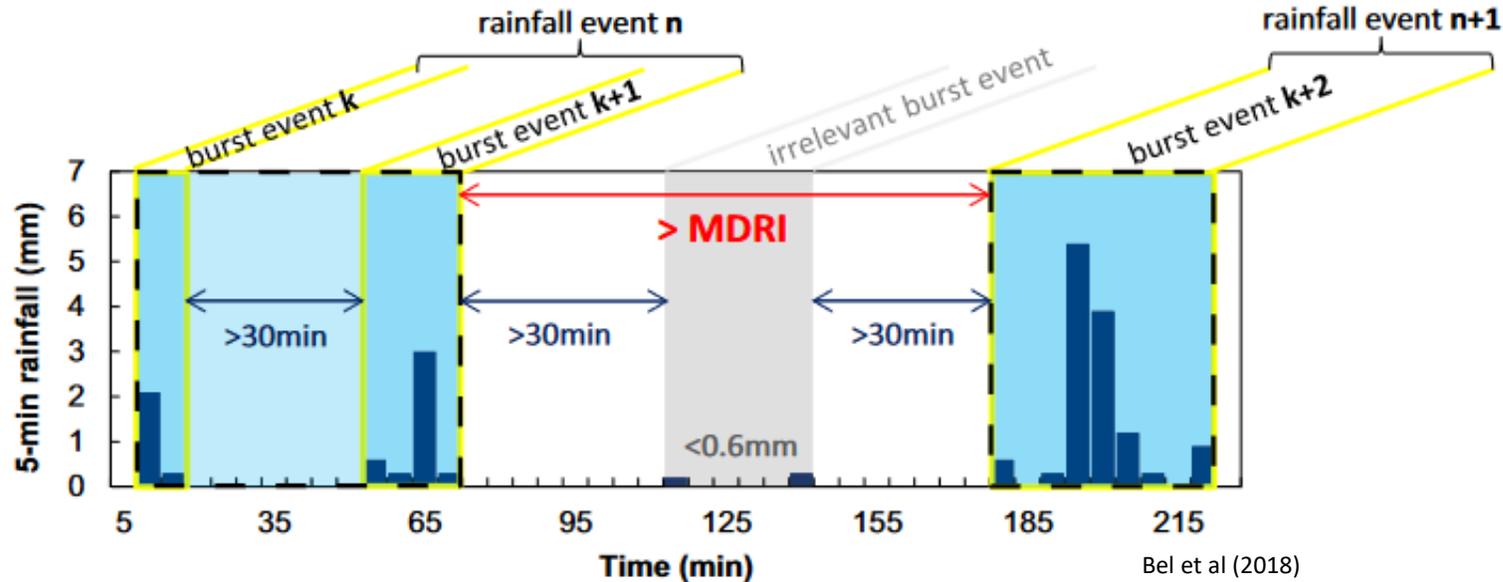
# Système d'alerte précoce des laves torrentielles



# Mise à jour du seuil ID

## ► Méthodologie de mise à jour du seuil – le découpage des évènements de pluie:

- Application de la **méthodologie de classification** :



Période d'analyse	Evènements de pluie	Evènements de lave (DF/IDF)
03/2013 – 03/2016 (1126 jours / 30 %)	521 (43 %)	39 (45 %)
04/2016 – 06/2023 (2646 jours / 70 %)	704 (57 %)	48 (55 %)
03/2013 – 06/2023 (3772 jours)	1245	87

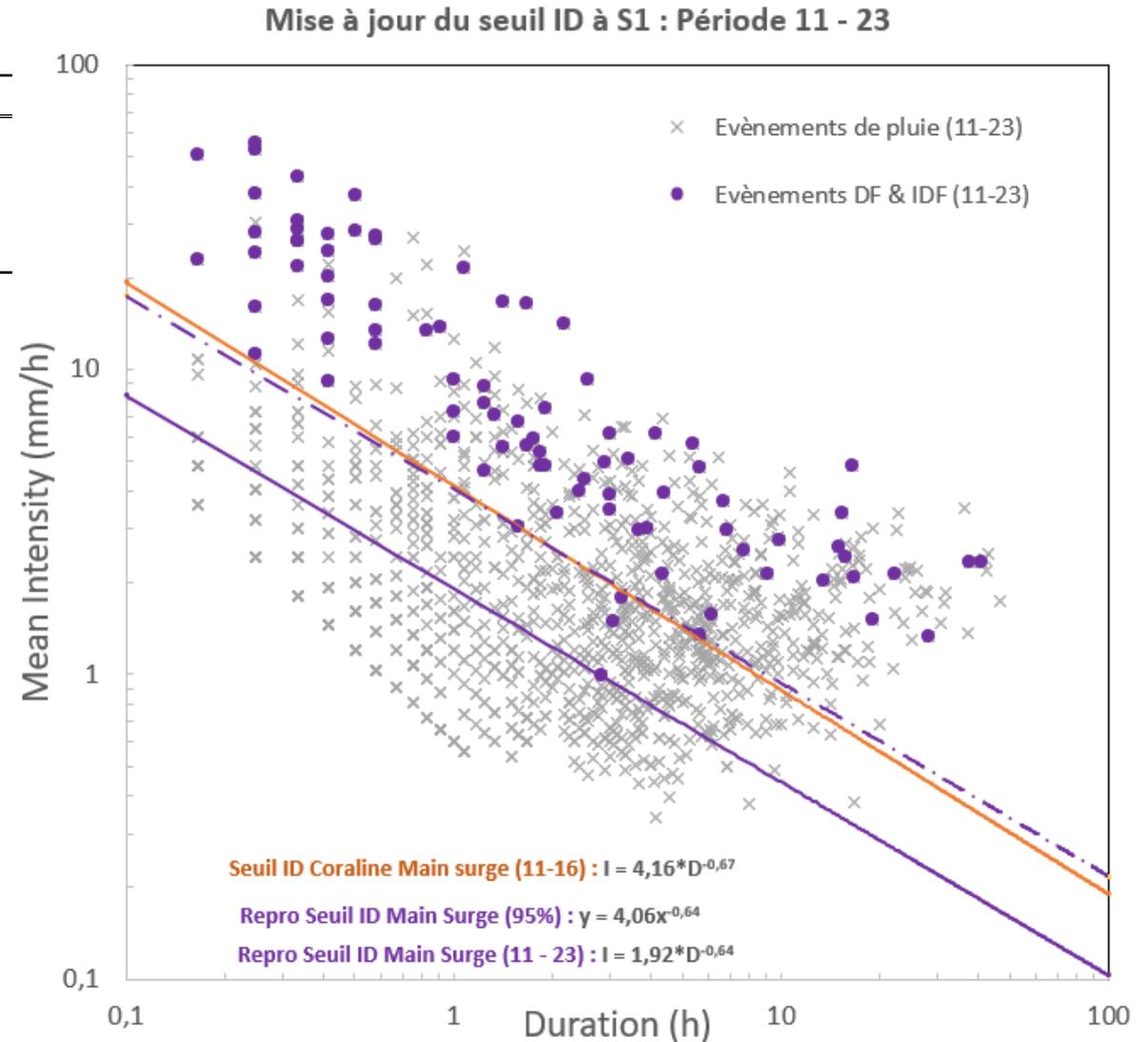
# Mise à jour du seuil ID

## ► Premiers résultats :

Seuil	Faux positifs	Durée > 1 h / Durée < 1 h	Cumul > 5mm / Cumul < 5mm
CB	151 / 566 (27%)	27 / 12	38 / 1
TW 95 %	379 / 1245 (30%)	51 / 33	79 / 5

## ► Perspectives :

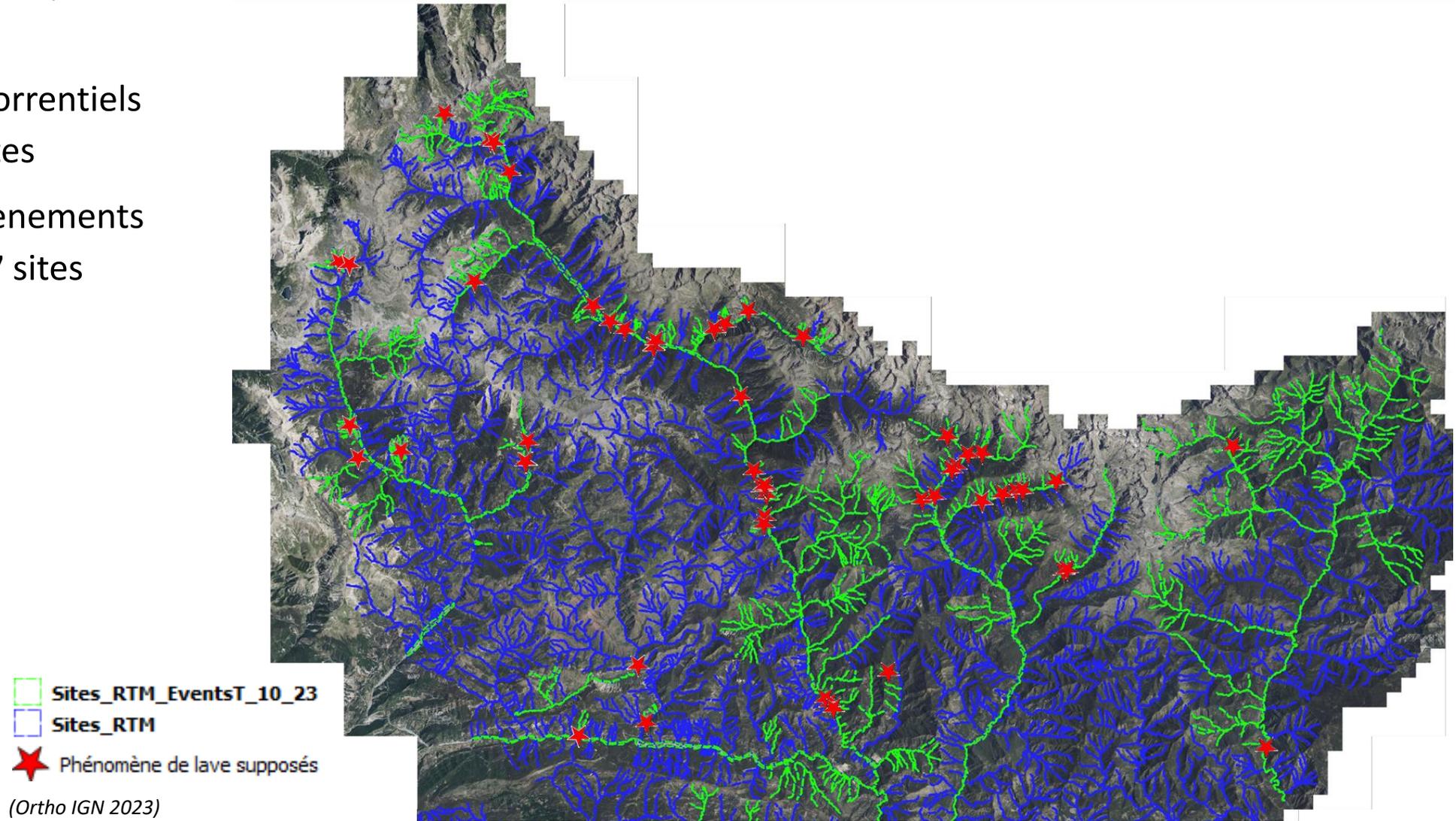
- Combien d'évènements pour **obtenir un seuil stable** ?
- Comment **diminuer les FP** ? (cf. chaine d'analyse de Coraline : nb de jours depuis fin de l'hiver, intensité max sur 5min, ..)
- Quid de la **reproductibilité sur les Alpes du Sud** ?
  - MDRI, Surface, Autres seuils, ..



# Analyse de la BD RTM

## ► Présentation de la chronique 2010 - 2023 :

- **182** évènements torrentiels répartis sur **125** sites
- Sans Alex : **112** évènements torrentiels pour **67** sites

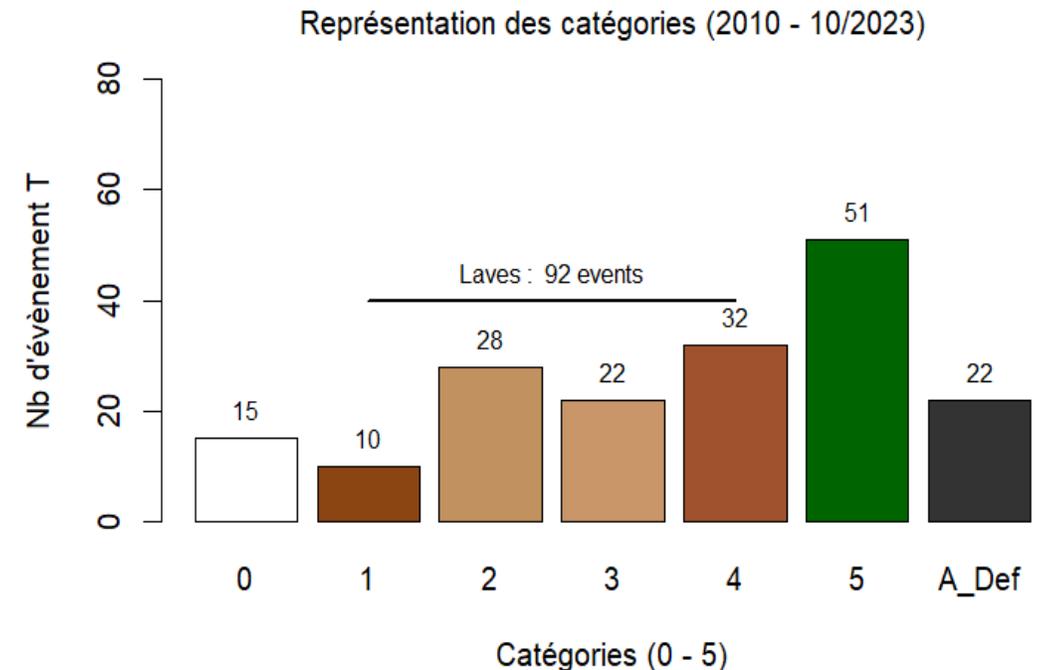


# Analyse de la BD RTM

## ► Mise en place d'une méthodologie de classification :

- Classement en 6 classes basée sur :
  - **Fiche RTM** (description agent, localisation, photos)
  - **Analyse diachronique** des orthophotos IGN (09/12/14/17/20/23)
  - **À compléter avec LIDAR** quand disponible

Catégorie	Définition
0	Un évènement T sur <b>un BR sans lave</b>
1	Lave contenue <b>dans un BR</b>
2	Lave propagée à <b>l'aval d'un BR</b>
3	Lave propagée sur un <b>bassin orphelin</b>
4	Lave observée à <b>l'aval de plusieurs BR</b>
5	Evènement T qui n'est <b>pas une lave</b> identifié à <b>l'aval de plusieurs BR</b>



# À venir

- **Définition de seuils critiques de précipitations &** caractérisation de la **variabilité spatiale** des conditions de déclenchement des LT et GT superficiels
- Intégrer des **modèles de propagation**
- GT actifs et profonds: production automatique de séries temporelles de mouvements du sol en utilisant des **données INSAR** (fréquence mensuelle)

## **Développer un système de prévision et d'alerte opérationnel** et appropriation par les utilisateurs

- Coupler les prévisions de précipitations avec : i) les seuils de déclenchement ; ii) cartes de susceptibilité iii) propagation des phénomènes
- Intégrer des cartes de vigilance de GT et de LT en temps réel dans les SA disponibles avec la définition de niveaux de vigilance et l'analyse des incertitudes associées



## Des questions ?

This work is financed by the ANR VIGIMONT project VIGilance MONTagne – Mountain Vigilance : Forecasting the risk of landslides and debris flows in mountainous areas. **ANR-22-CE04-0021.**

<https://vigimont.fr/>

