



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Adaptation des ouvrages aux défis du changement climatique

**Evaluation de l'impact du changement climatique sur les aléas
gravitaires : prévisions basées sur une analyse probabiliste des
événements historiques**



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



I prévoir et gérer les phénomènes gravitaires : est ce possible?

Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

I Prévoir et gérer les phénomènes gravitaires : est ce possible?

La route du littoral – île de la Réunion

Contexte :

- axe stratégique reliant le Port à l'aéroport
 - route située en pied de falaise
 - exposée à l'aléa chutes de blocs
 - 1983 : basculement de la route pour des pluies supérieures à 15mm :
- fermeture de la route coté falaise et basculement de la circulation sur une voie coté mer
 - durée du basculement : 3 jours !
 - Route basculée 16% du temps ...



Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

I Prévoir et gérer les phénomènes gravitaires : est ce possible?

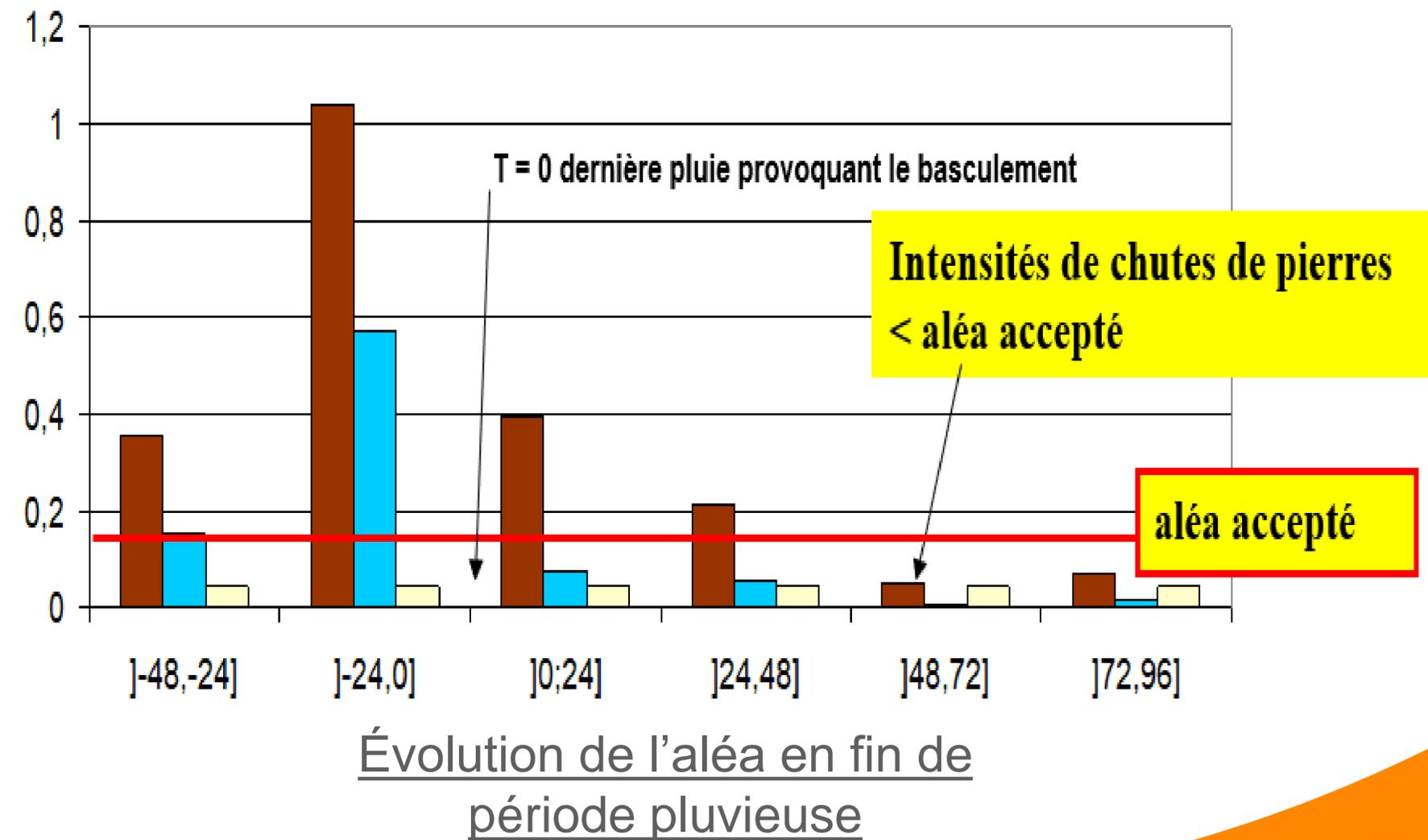
La route du littoral – île de la Réunion

Etude pour la région Réunion

- Préciser les lois d'évolution de l'aléa
- optimiser les règles de basculement



intensités de chutes de pierres pour des cumuls >50mm, en chutes/j



Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

I Prévoir et gérer les phénomènes gravitaires : est ce possible?

La route du littoral – île de la Réunion

Résultats :

➡ Réduction de 60% des temps de basculement

- optimisation mathématique des règles de basculement (connaissance fine des lois d'évolution de l'aléa avec la pluvio)
- travaux de sécurisation par filets

Nouvelle règle de basculement (2009)

Si le cumul pluviométrique sur 24h > 50mm

=> basculement de 48h

50 mm > pluvio sur 24h > 30mm

=> basculement de 24h

ARRETE

ARTICLE 1 - Sur la RN 1 dite Route du Littoral entre les PR 3+500 et 12+900, la circulation sur les 2 voies de la chaussée côté montagne (sens La Possession vers Saint-Denis) est neutralisée et basculée sur la chaussée côté mer lorsque la hauteur de pluie cumulée sur 24 heures dépasse le seuil de 30 mm sur l'un des pluviomètres situés aux PR 5+500, 8+500 et 12+900.

La circulation sur la chaussée côté mer est alors exploitée en mode bidirectionnel alternatif sur 3 voies (2+1).

Le basculement peut être limité à la section La Possession (PR 12+900) – La Grande Chaloupe (8+500) lorsque le dépassement du seuil de 30 mm ne porte que sur le pluviomètre situé au PR 12+900.

ARTICLE 2 - Les durées de basculement de circulation sont les suivantes en fonction du niveau de pluviométrie :

- a) Lorsque la hauteur de pluie cumulée sur 24h00 dépasse 30 mm mais reste inférieure ou égale à 50 mm, le basculement est maintenu pendant une durée de 24 heures à compter de la fin de l'événement pluvieux.
- b) Lorsque la hauteur de pluie cumulée sur 24h00 dépasse 50 mm, le basculement est maintenu pendant une durée de 48h00 à compter de la fin de l'événement pluvieux.



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

II Evaluation de l'aléa historique glissement de terrain (et chutes de blocs)

Évaluation de l'aléa historique mouvement de terrain

Introduction

2008 : projet 

Risque HYdrométéorologique en Territoire de Montagne et Méditerranéen

Objectifs :

- prévision des aléas d'origine Hydrométéorologique
- établir des cartes d'avertissement à destination des services gestionnaires

Intervenants Cerema :

- D. Batista (aspects géotechniques et statistiques),
- P. Azémard, H. Giroux (aspects géologiques)
- JL Genois (scénarii climatiques et SIG),
- M. Boutry, M. Dumalin, A.C. Rougé, F. Rénel, T. Haulbert,

Évaluation de l'aléa historique mouvement de terrain

Méthodologie

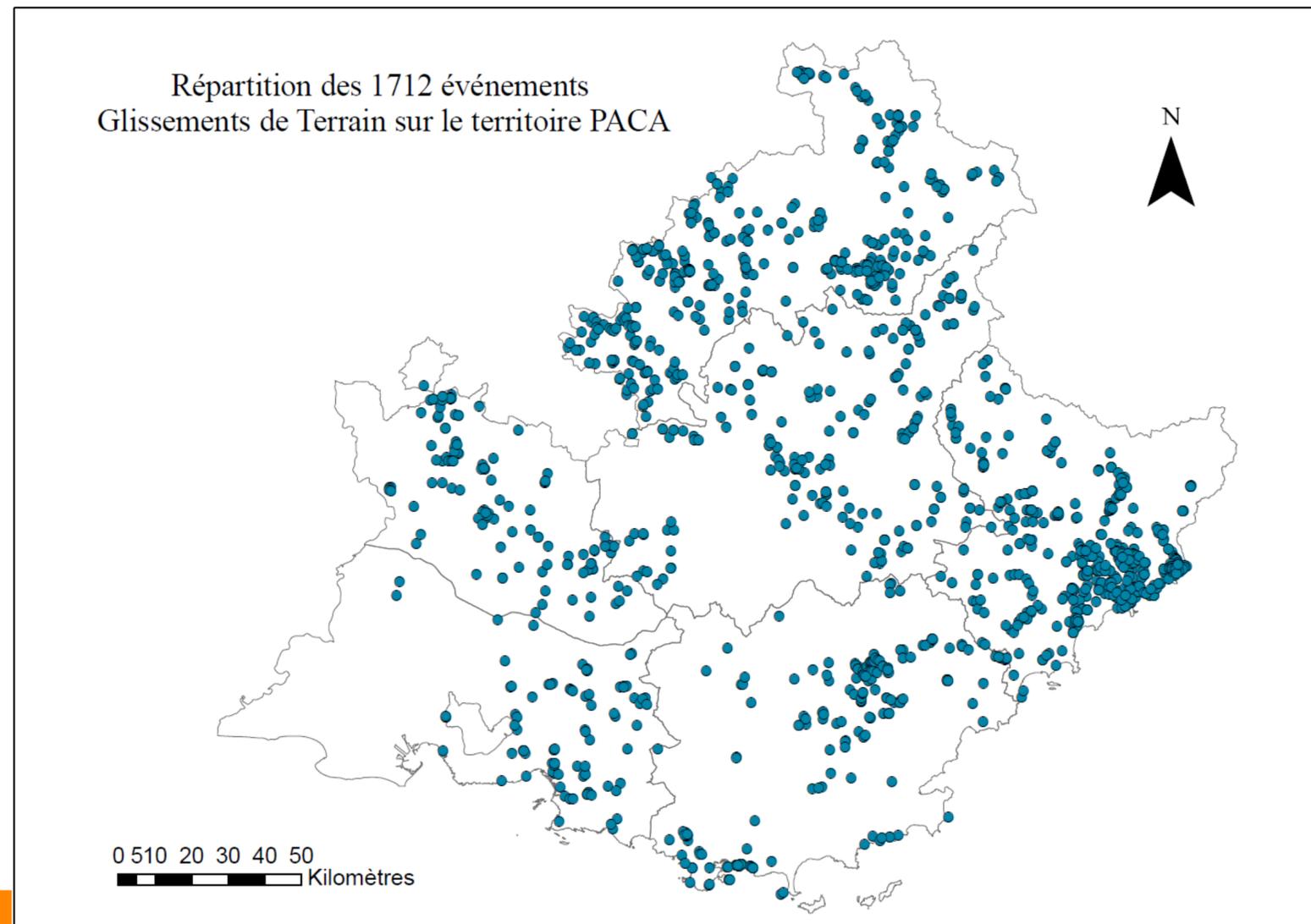
A l'échelle d'une région...

1. Faire un inventaire « complet » des glissements de terrains et chutes de blocs recensés en région PACA,
2. Analyser l'ensemble des lithologies affectées par l'aléa et constituer des «groupes géotechniques homogènes »
3. Étudier les principaux facteurs de prédisposition sur chaque groupe et réaliser une cartographie « fine » de l'aléa historique,
4. Évaluer les facteurs météorologiques de déclenchement

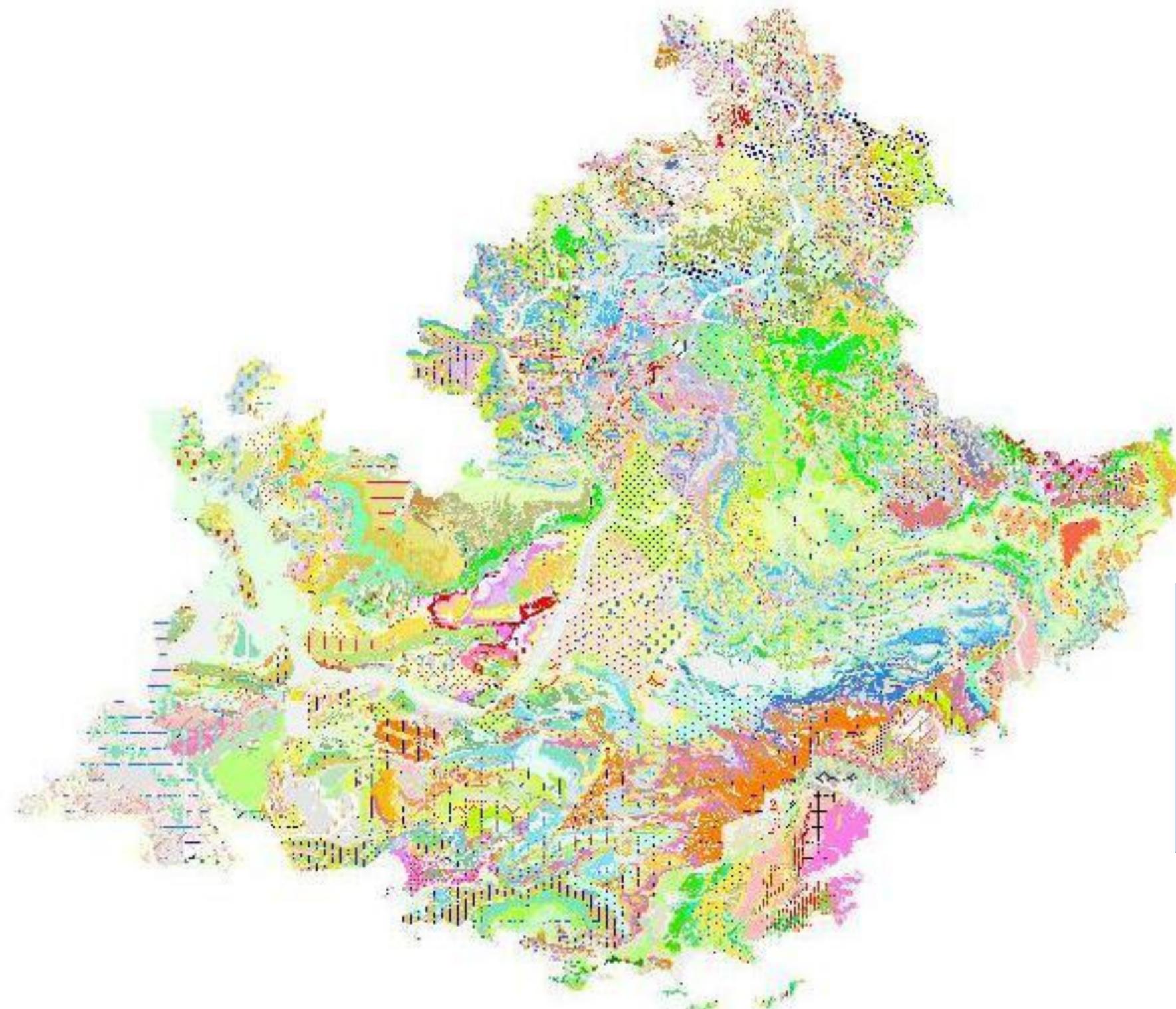
Évaluation de l'aléa historique mouvement de terrain

Création de la base glissements de terrain

Base de 1712 évènements glissements recensés depuis 1900



Glissements de terrain : une complexité géologique imposant un regroupement en zones géotechniques homogènes



**1712 évènements
glissements
répartis sur 343
lithologies**

**343 lithologies
à regrouper en
zones
géotechniques
homogènes**

Carte géologique de la région PACA, source : CHARM50, BRGM

Glissements de terrain : découpage du territoire PACA en 13 zones «géotechniques homogènes»

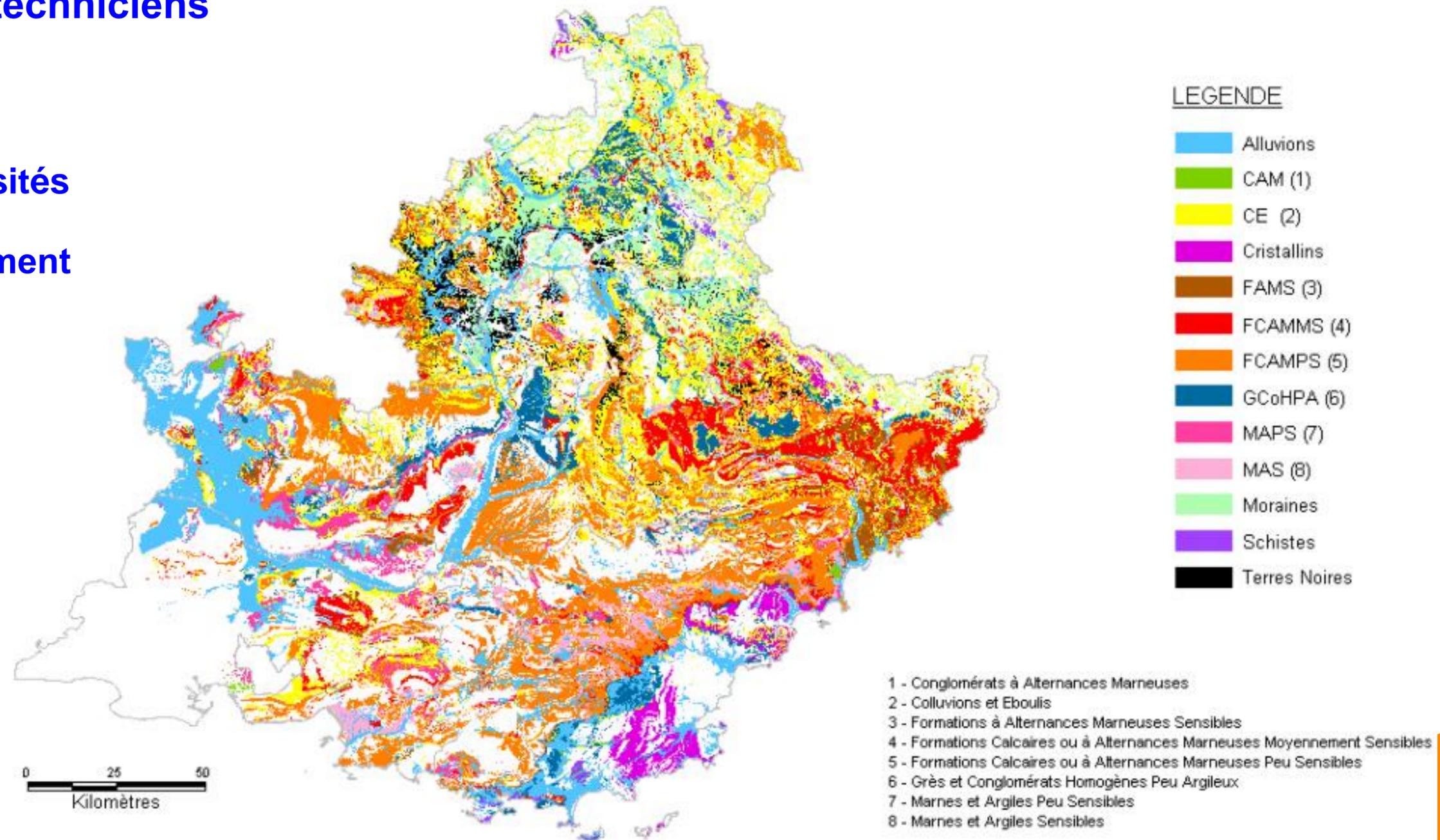
Démarche multidisciplinaire

➤ regroupement des lithologies à dire d'expert : géologues et géotechniciens

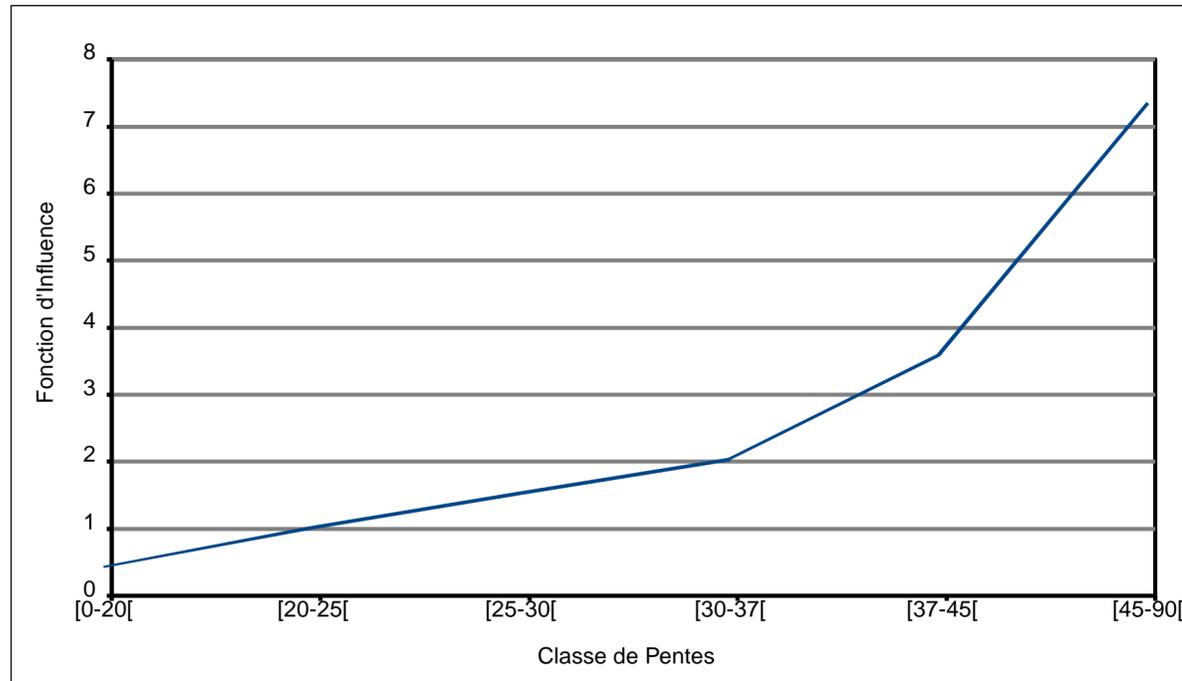
➤ affiné statistiquement :

➤ Test statistique sur les densités d'évènements pour évaluer l'homogénéité du regroupement

CARTE DE LOCALISATION
DES REGROUPEMENTS GEOTECHNIQUES

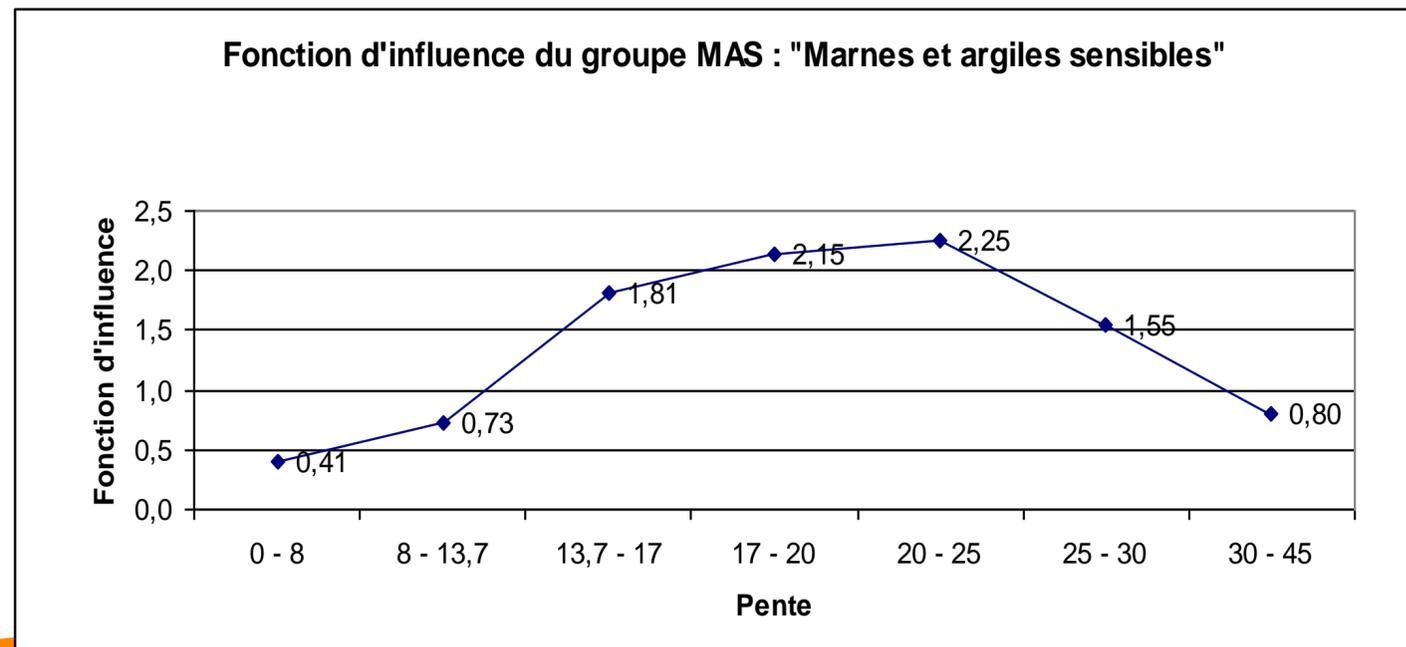


Influence de la pente sur la localisation des évènements



Fonction d'influence de la pente pour les chutes de blocs

- la fonction d'influence quantifie le sur-aléa, associé à chaque classe de pente.
- l'aléa chute de blocs est strictement croissant avec la pente



Influence de la pente pour les glissements de terrain dans le groupe MAS

- l'aléa glissement de terrain présente fréquemment un pic de densité

Évaluation de l'aléa historique

Construction des cartes d'aléa historique

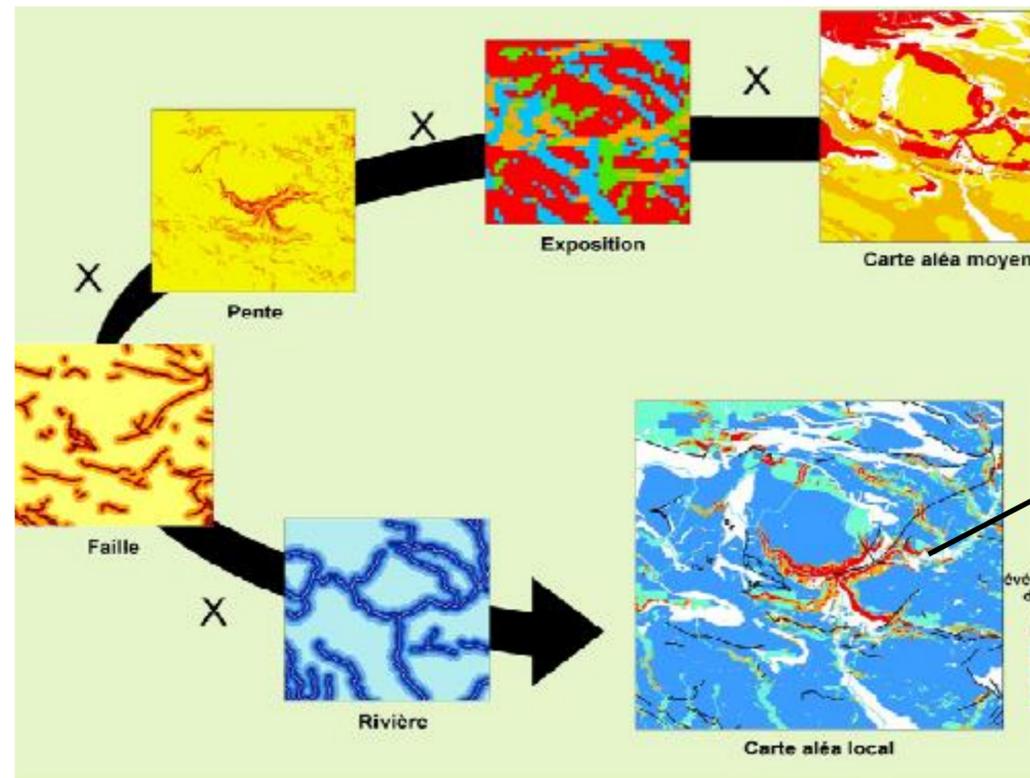


Figure 3 : Modulation de l'aléa moyen en fonction de la distribution des facteurs de prédisposition

CARTE HISTORIQUE DE L'ALEA
GLISSEMENT EN FONCTION DES
FACTEURS DE PREDISPOSITION

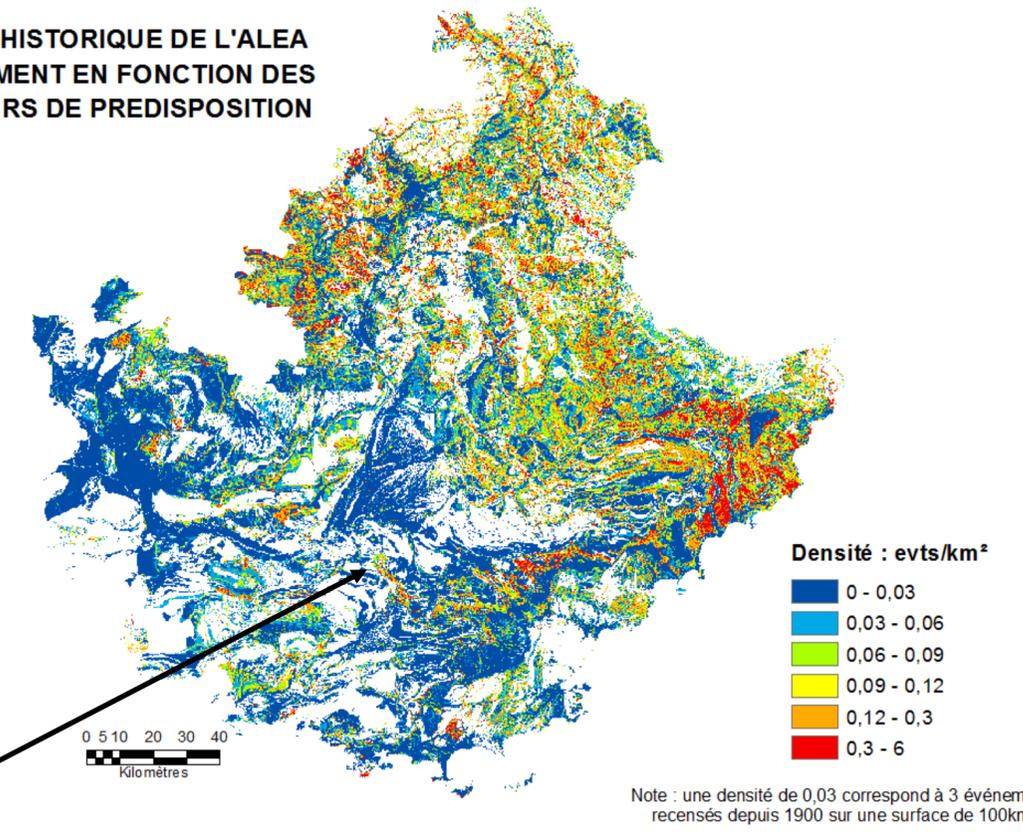


Figure 4 : Raster historique de l'aléa glissement de terrain en fonction des facteurs de prédisposition, au pas de 50 mètres.

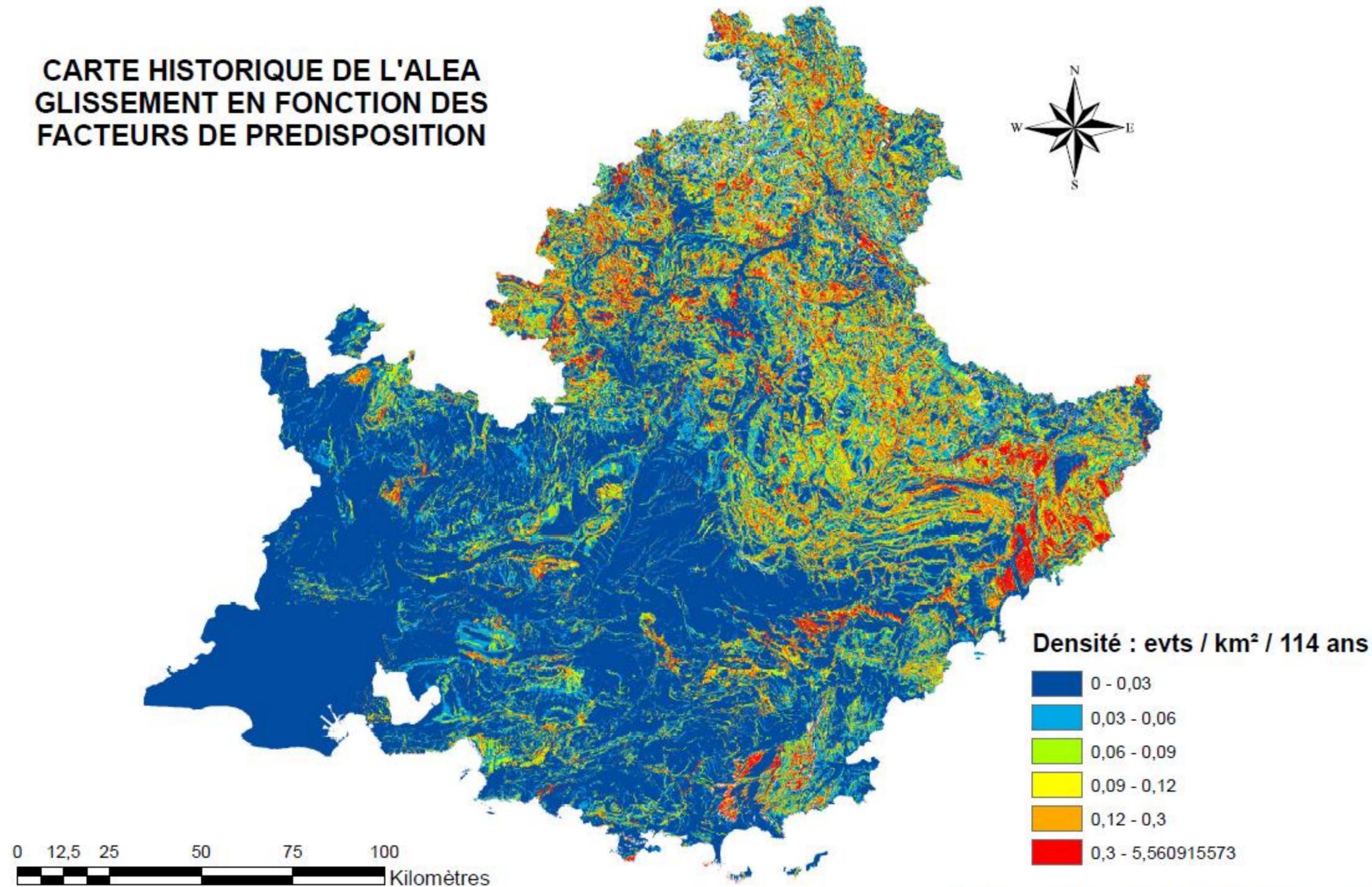
L'aléa historique local est le produit de

- l'aléa historique moyen du groupe
- des fonctions d'influence régulant la répartition spatiale de l'aléa (facteurs de prédisposition)

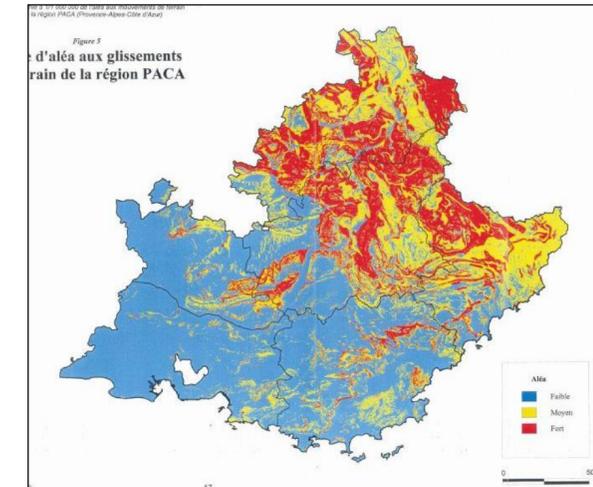
$$Alea_{hist} = Alea_{moy} F_{faille}(d_{faille}) F_{hydro}(d_{hydro}) F_{expo}(expo) F_{pente}(pente)$$

Cartographie quantitative de l'aléa historique glissement de terrain

CARTE HISTORIQUE DE L'ALEA
GLISSEMENT EN FONCTION DES
FACTEURS DE PREDISPOSITION



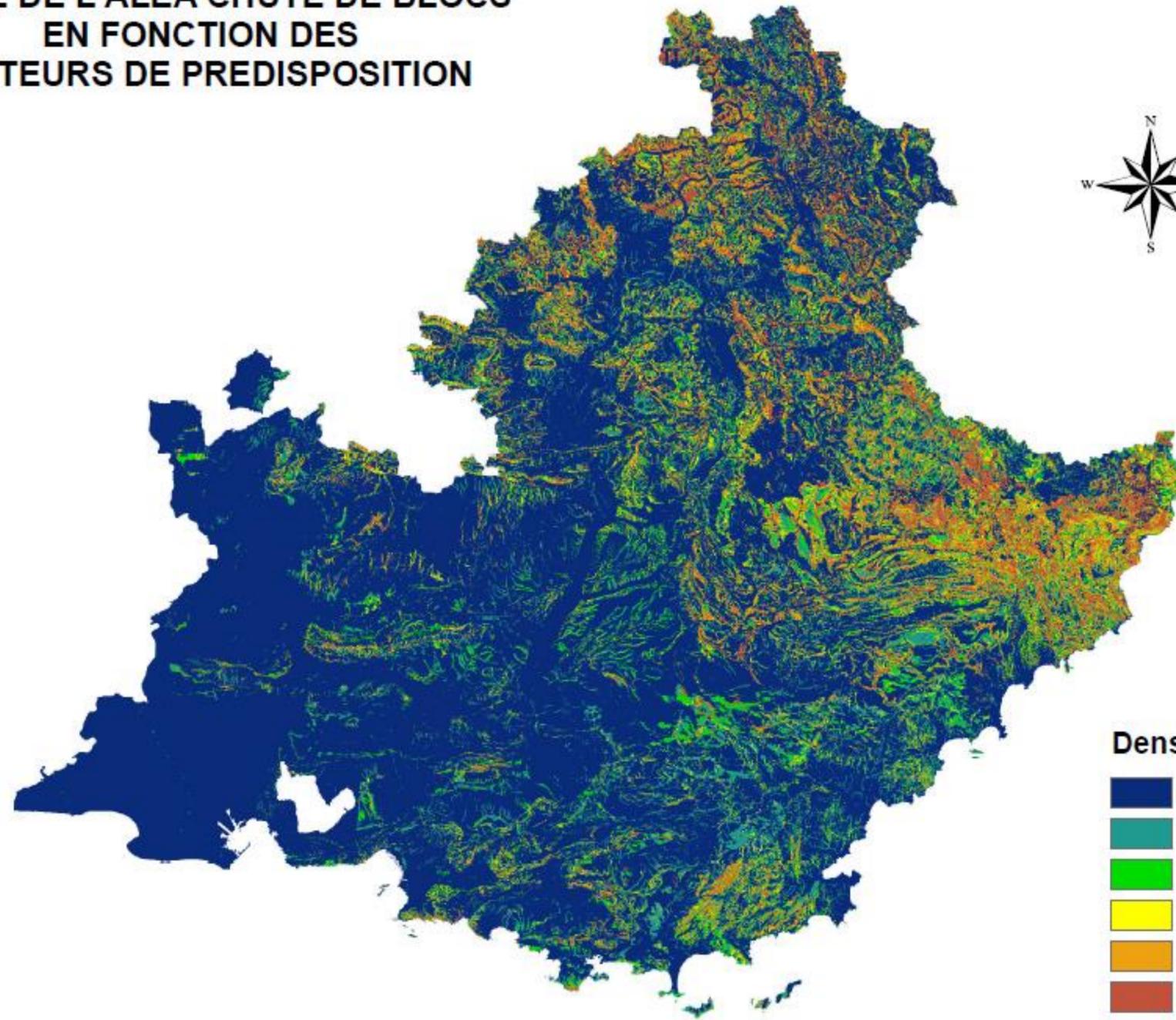
Note : une densité de 0,03 correspond à 3 évènements sur 100 km² depuis 1900.



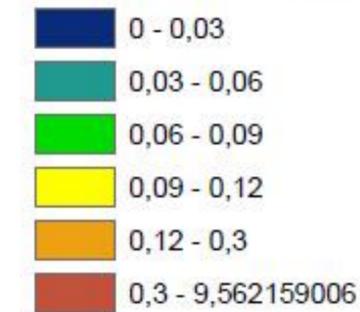
Carte BRGM

Cartographie quantitative de l'aléa historique chutes de blocs

CARTE DE L'ALEA CHUTE DE BLOCS
EN FONCTION DES
FACTEURS DE PREDISPOSITION



Densité : evts / km²/ 114 ans



Note : une densité de 0,1 correspond à 10
événements recensés sur 100 km² depuis 1900.

0 12,5 25 50 75 100
Kilomètres



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

III Construction de lois d'évolution de l'aléa avec la pluviométrie

Méthodologie

- événements postérieurs à 1958 : récolte de la pluviométrie 3 ans avant chaque événement (SAFRAN-Météo-France).
- Constitution BDD : séquences événements/pluvio pour chaque groupe géotechnique
- Code FORTRAN modélisant l'application d'une règle de gestion de l'aléa sur cette population événements/pluvio :
 - Simule sur chaque série météo l'application d'une règle d'alerte
 - Alerte dès que cumul pluvio > seuil critique (la règle diffère en période sèche et pluvieuse)
 - calcule pour chaque règle d'alerte
 - le nombre de jours d'alertes
 - le nombre d'événements détectés (pendant les alertes),

aléa instantané mouvement de terrain

Élaboration de lois d'évolution de l'aléa

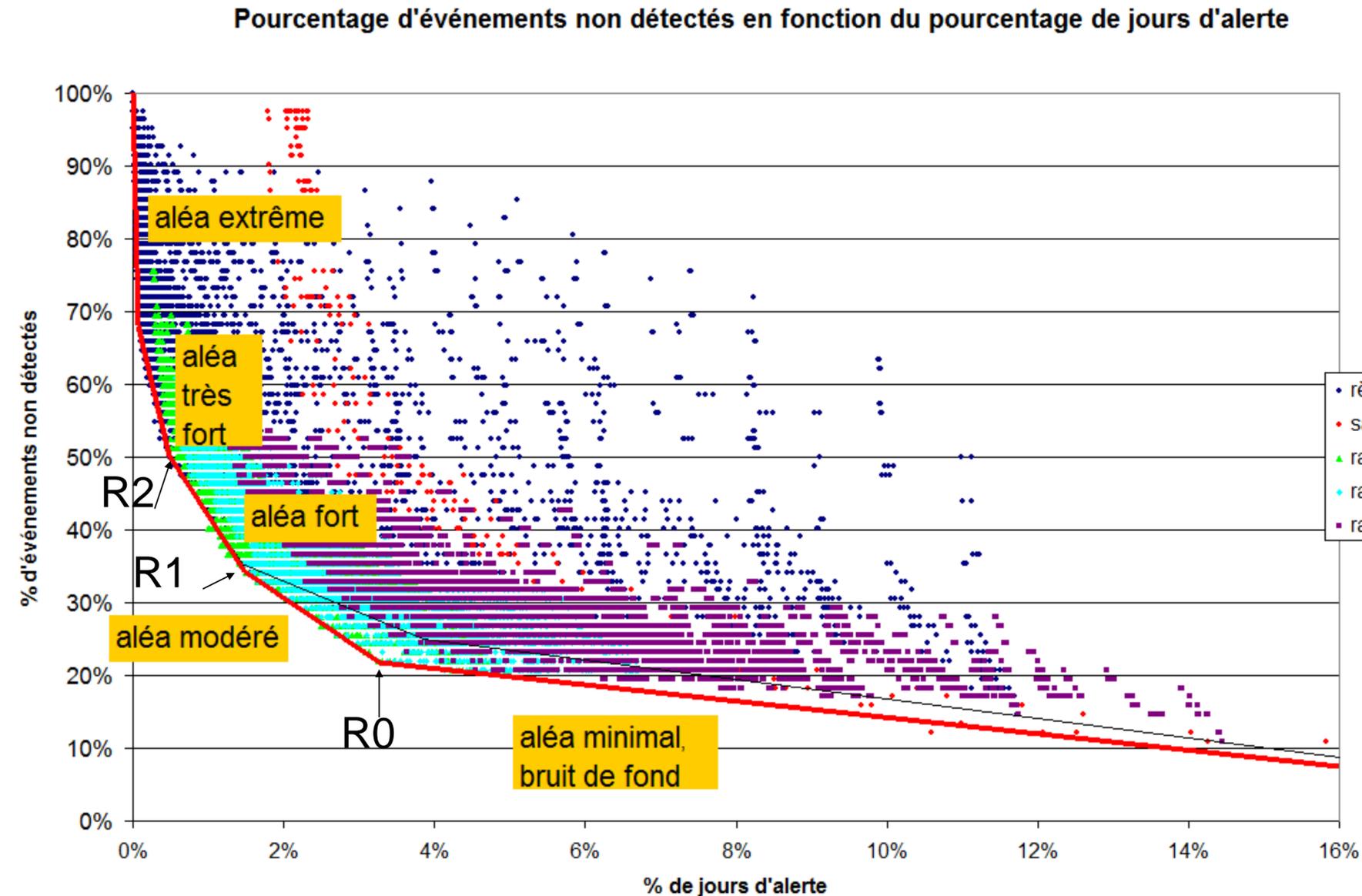
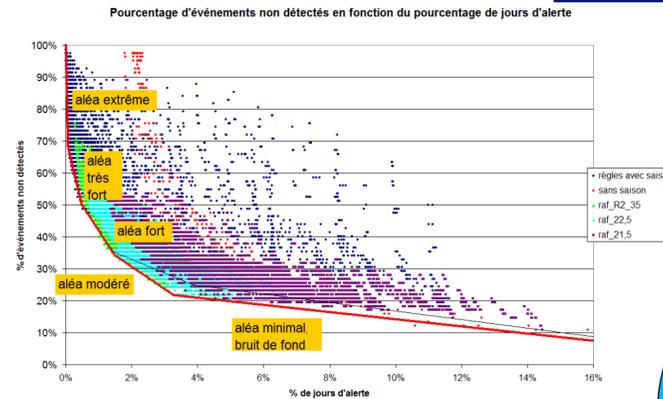


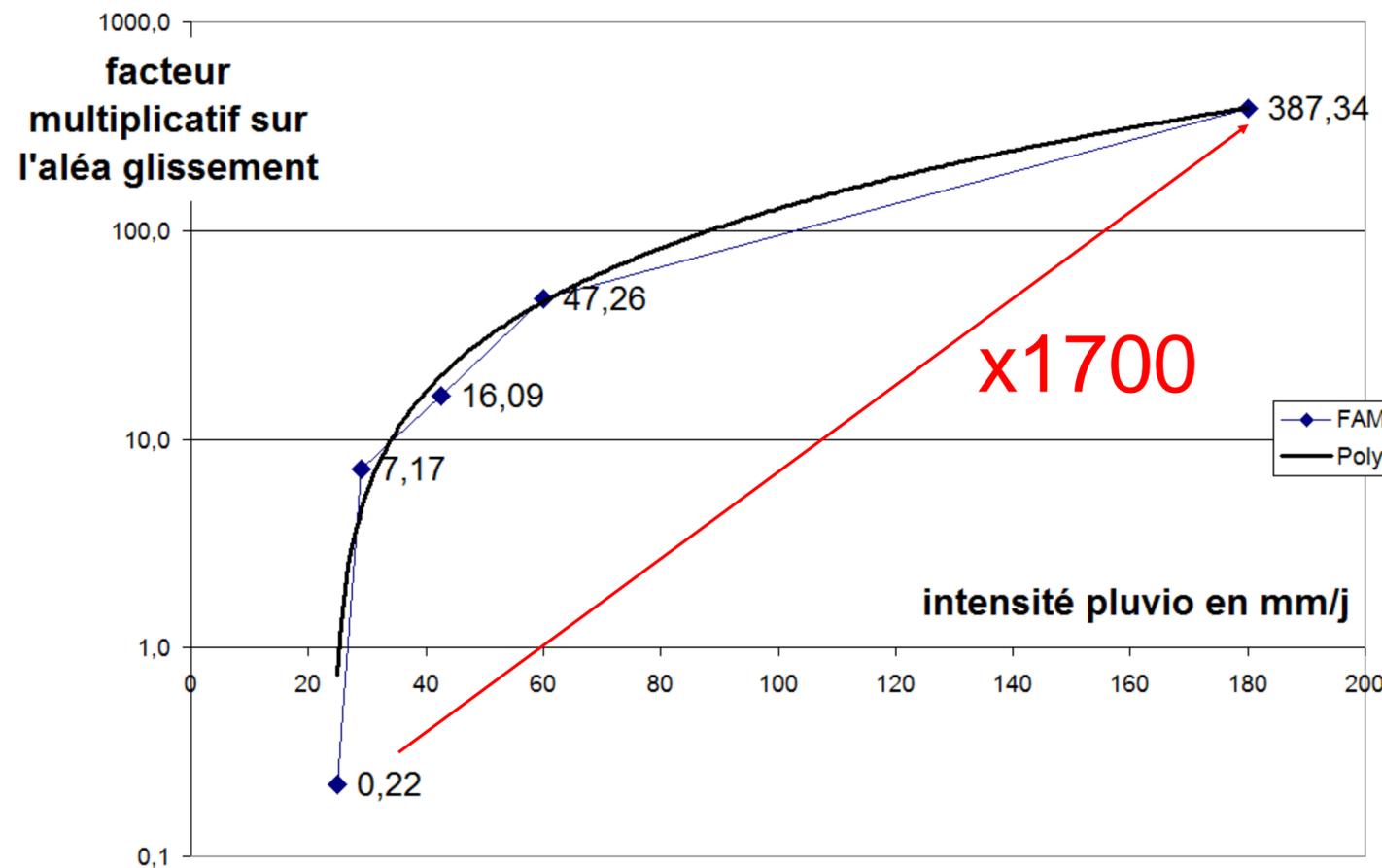
Figure 10 : Graphique d'efficacité des règles d'alerte - groupe géotechnique des Formations à Alternances Marneuses Sensibles (FAMS).

Glissements



	Régime d'aléa	aléa période spécifique	f° d'influence météo	intensité pluv moyenne	nb evt classe
R0	aléa minimal	2,07E-04	0,22	25,0	18
R1	aléa modéré	6,78E-03	7,17	29,0	10
R2	aléa fort	1,52E-02	16,09	42,5	13
R3	aléa très fort	4,46E-02	47,26	60,0	15
R4	aléa extrême	3,66E-01	387,34	180,0	26
					82

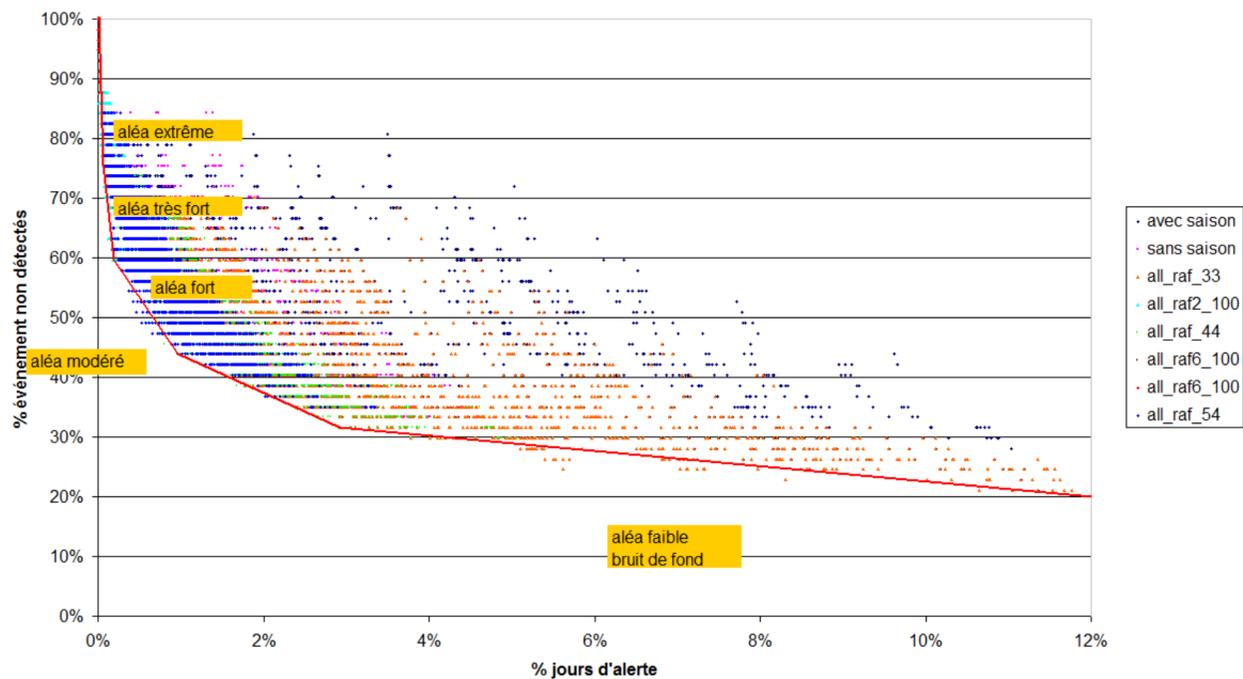
F° d'influence pluviométrique pour les FAMS



L'inversion des graphes d'efficacité permet de construire la fonction d'influence pluviométrique qui mesure le sur-aléa induit par une sollicitation pluviométrique

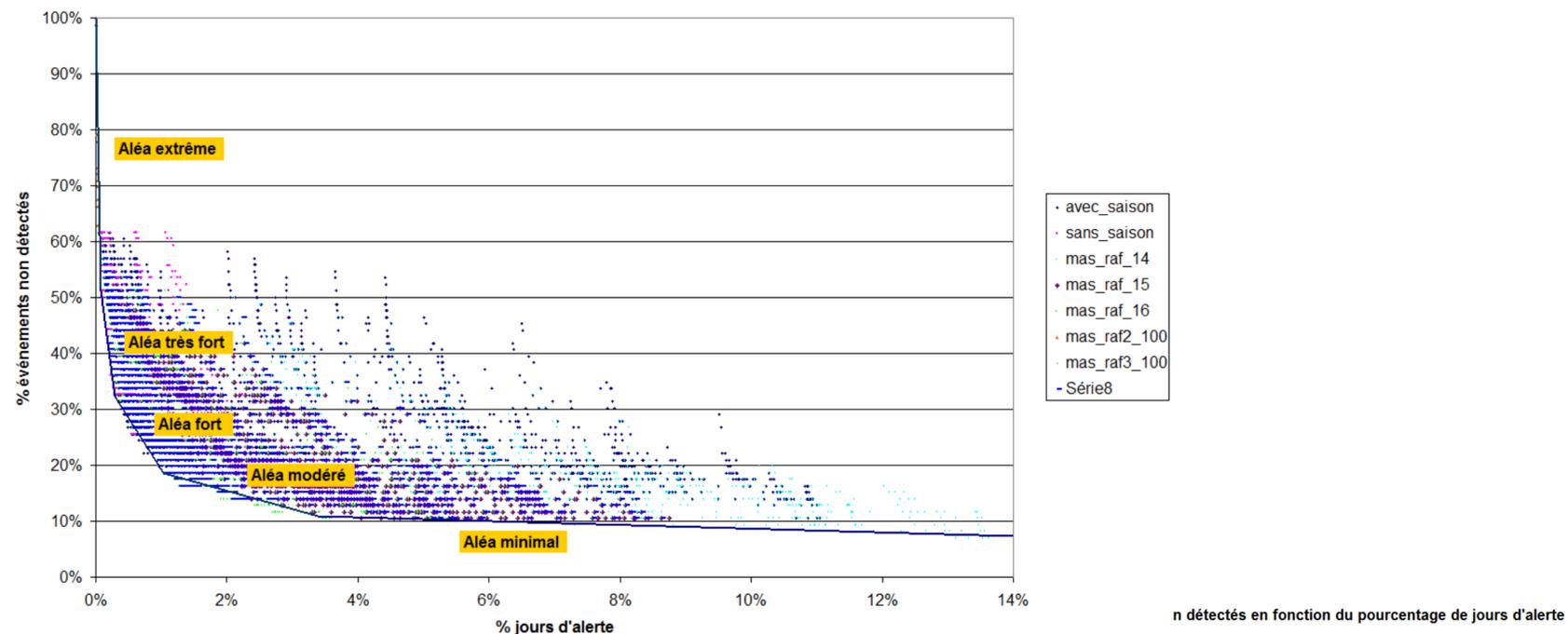
Figure : fonction d'influence pluviométrique simplifiée pour le phénomène glissement de terrain - groupe des Formations à Alternances Marneuses Sensibles

Pourcentage d'événements non détectés en fonction du pourcentage de jours d'alerte



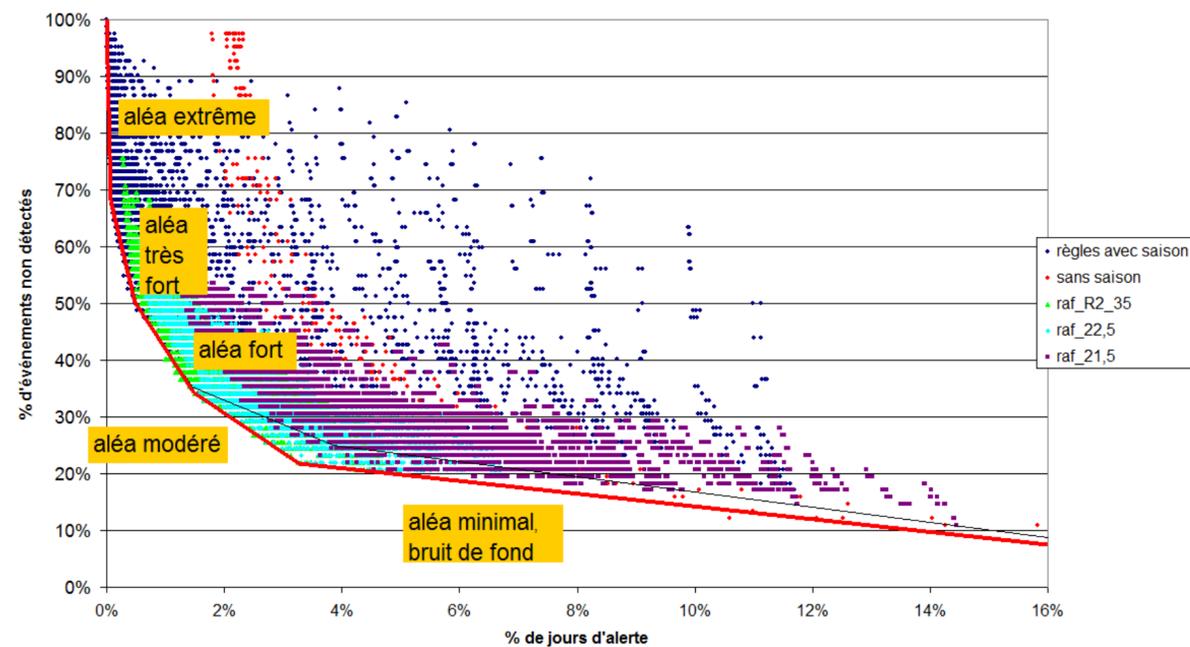
Alluvions

Pourcentage d'événements non détectés en fonction du pourcentage de jours d'alerte



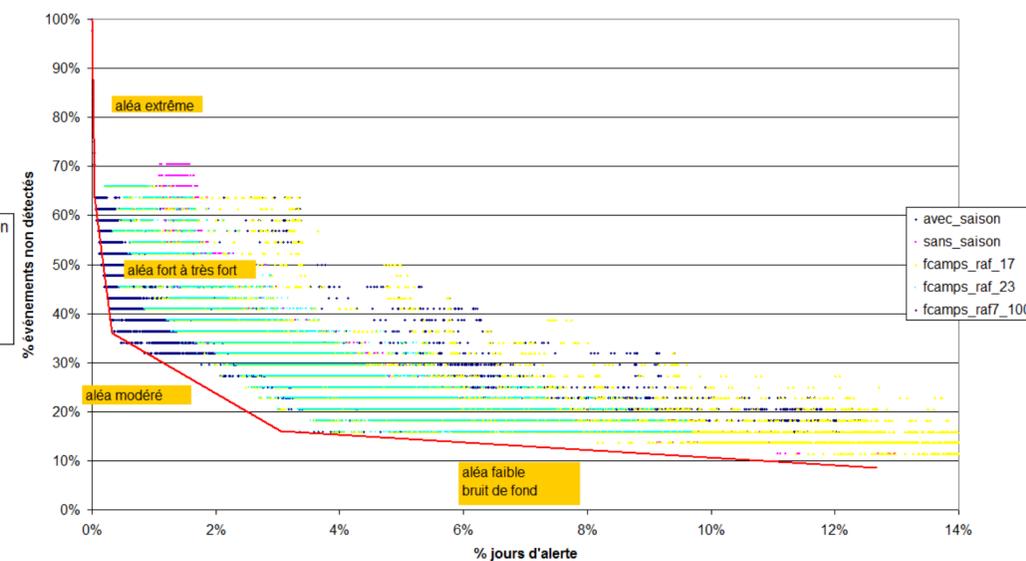
MAS

Pourcentage d'événements non détectés en fonction du pourcentage de jours d'alerte

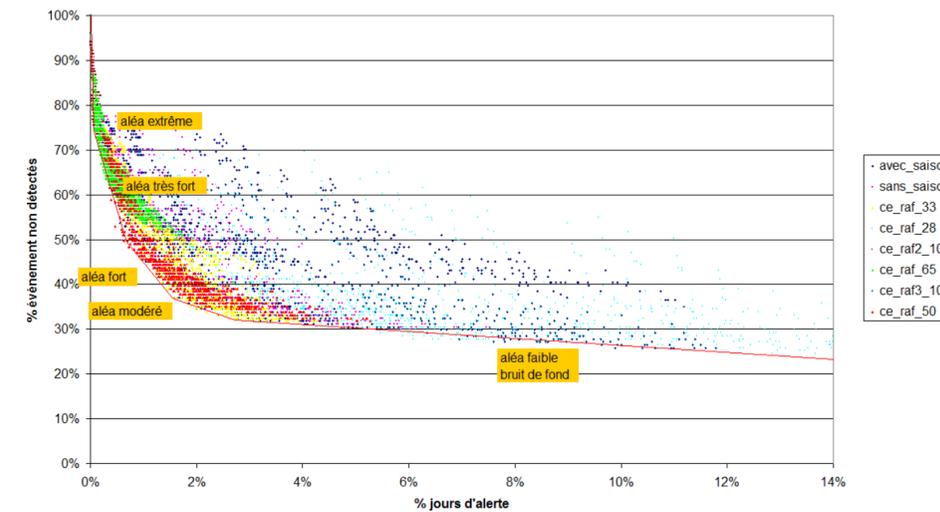


FAMS

Pourcentage d'événements non détectés en fonction du pourcentage de jours d'alerte



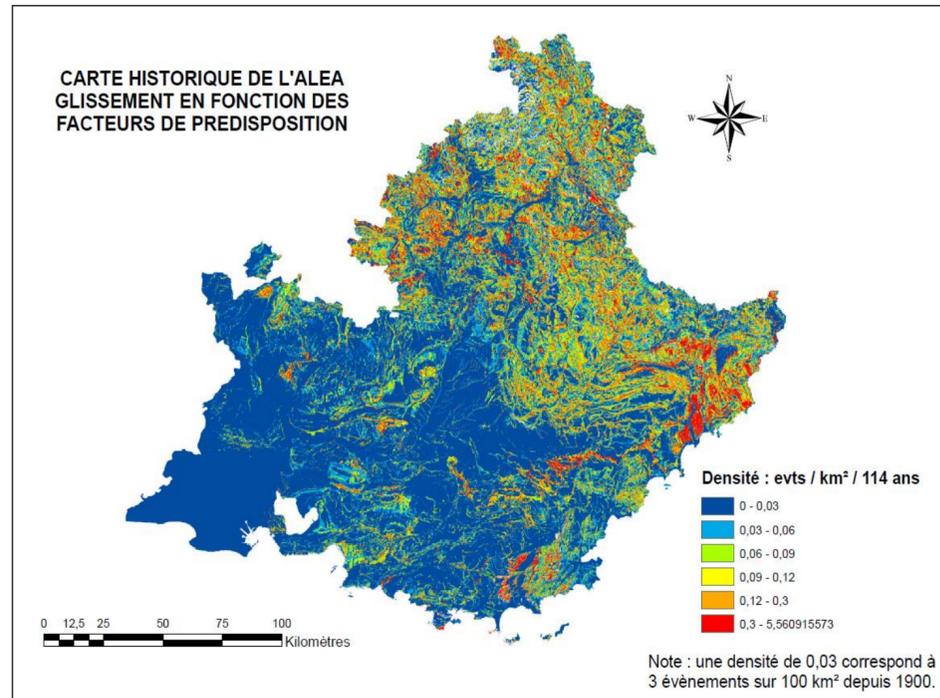
FCAMPS : 40599 règles avant raffinement + 51030 post raffinement



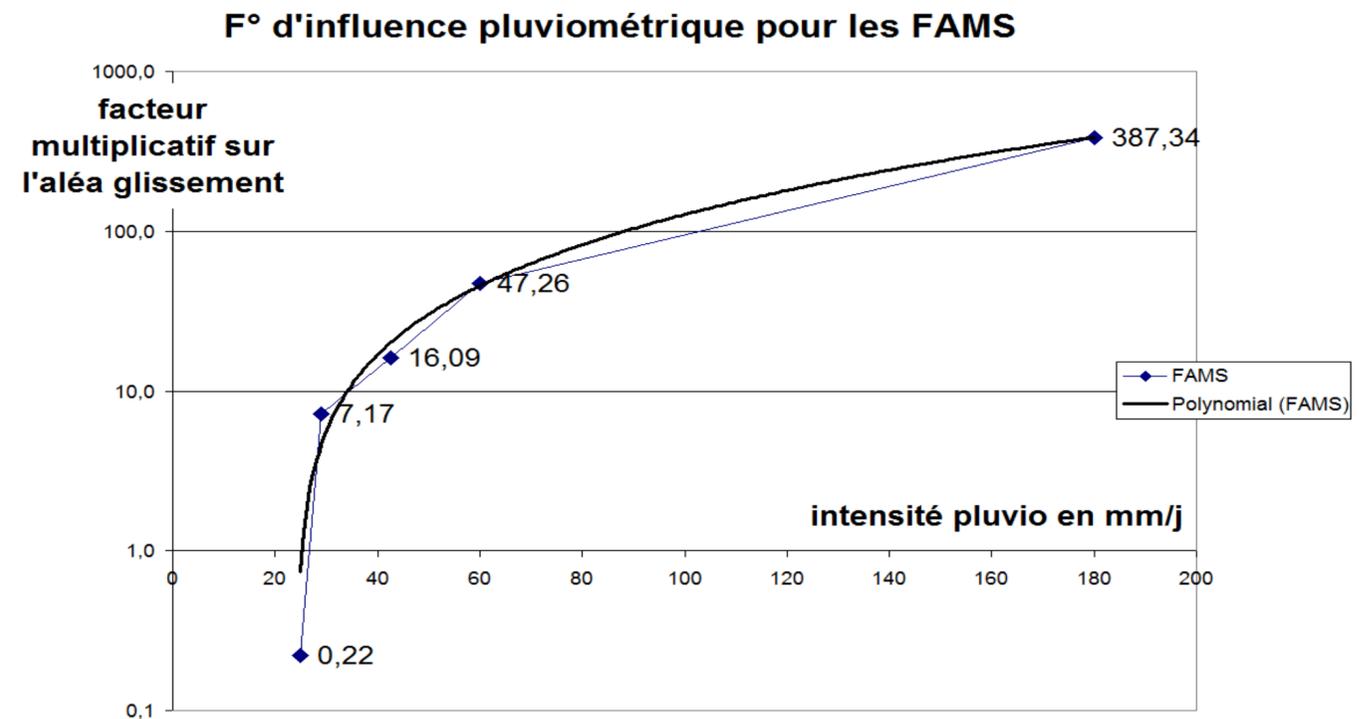
CE : 2880 règles avant raffinement + 11736 post raffinement

• graphes d'efficacité pour l'aléa glissement de terrain maximisant l'aléa détecté pour un % d'alerte donné

aléa instantané mouvement de terrain



X



= Aléa instantané

- Pour chaque pixel : on lit la valeur d'aléa historique local
- On évalue la f° d'influence pluviométrique en fonction des données météorologiques
- Aléa instantané = aléa historique X f° d'influence pluviométrique

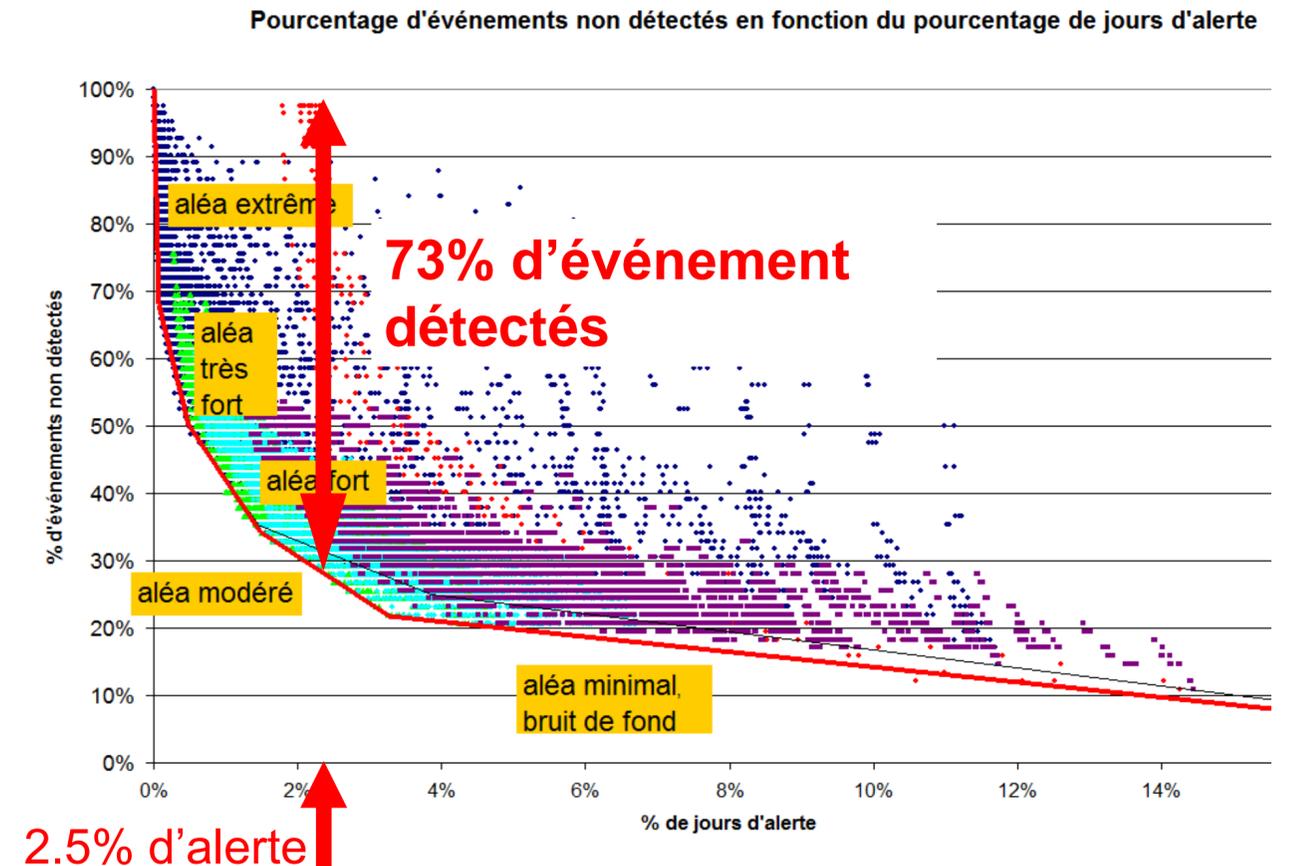
Prévision de l'aléa glissement de terrain

Efficacité des prévisions sur la BDD historique 1958-2012 :

- **FAMS** : 73% d'événements détectés pour 2.5% de temps d'alerte
- en moyenne sur les formations sensibles : 70% d'événements détectés pour 2.5% de jours d'alerte

Efficacité des prévisions sur 2012-2014

- 65% des glissements dans les formations sensibles sont détectés pour 2.4% de jours d'alerte
- **forte localisation temporelle de l'aléa glissement de terrain**
- **capacité de prévision de l'ordre de 65% des glissements sur les formations sensibles pour des temps d'alerte limités à 2.5%**





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

IV Détermination de l'aléa instantané et évaluation de l'impact du changement climatique

Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

Tempête Alex : phénomène météorologique exceptionnel avec des conséquences exceptionnelles

➡ Ouvrage mis en service en 1928



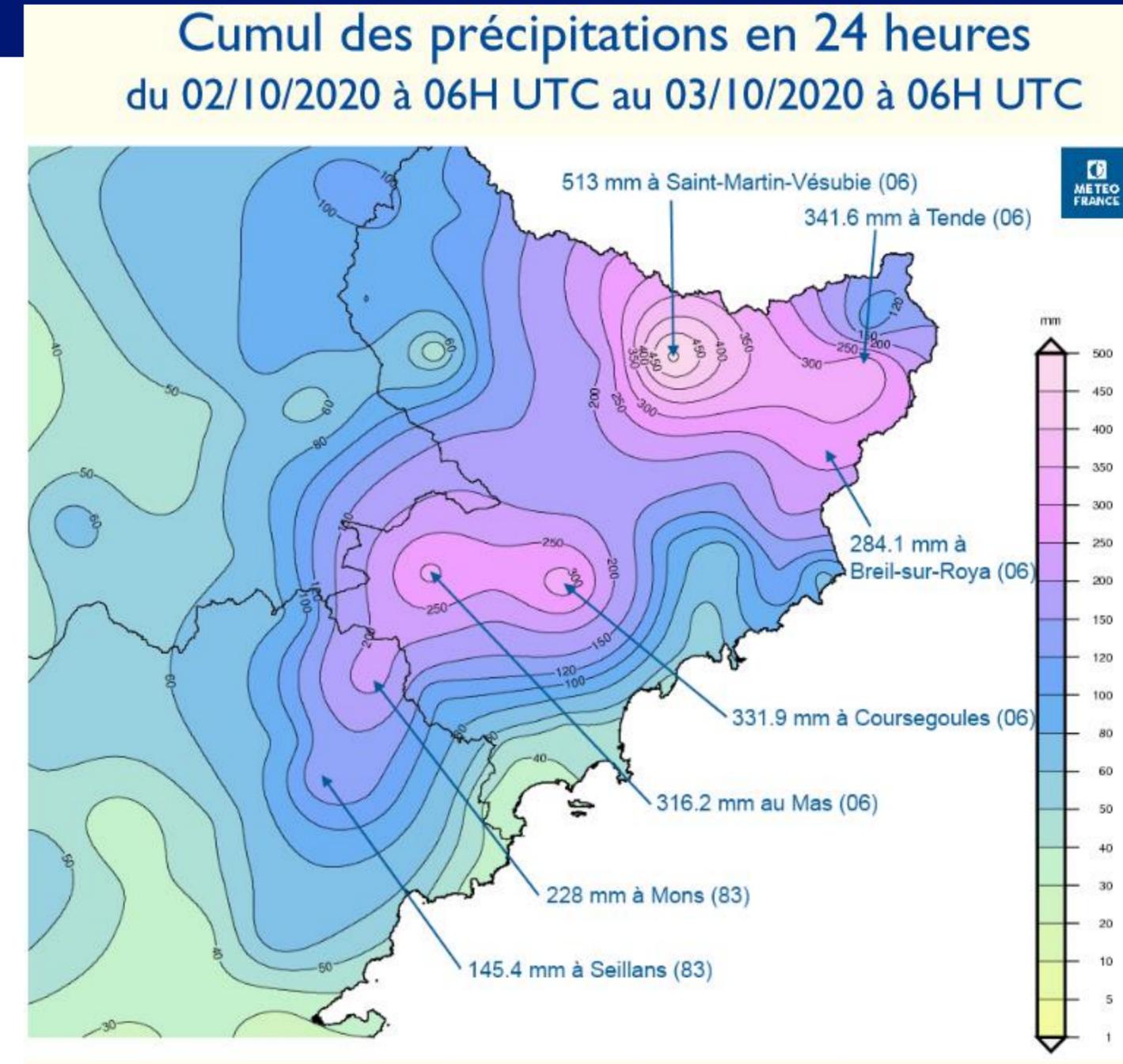
Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

Tempête Alex, références pluvio et scénario RCP8.5

Des pluies diluviennes : cumul journalier de 300 à 600 mm de pluie :

Station météo	Cumul pluviométrique du 2 au 3 octobre
Coni	549mm
Saint Martin de Vésubie	513 mm
Tende	341mm

La tempête Alex : phénomène exceptionnel pluri centenal dépassant les prévisions RCP8.5

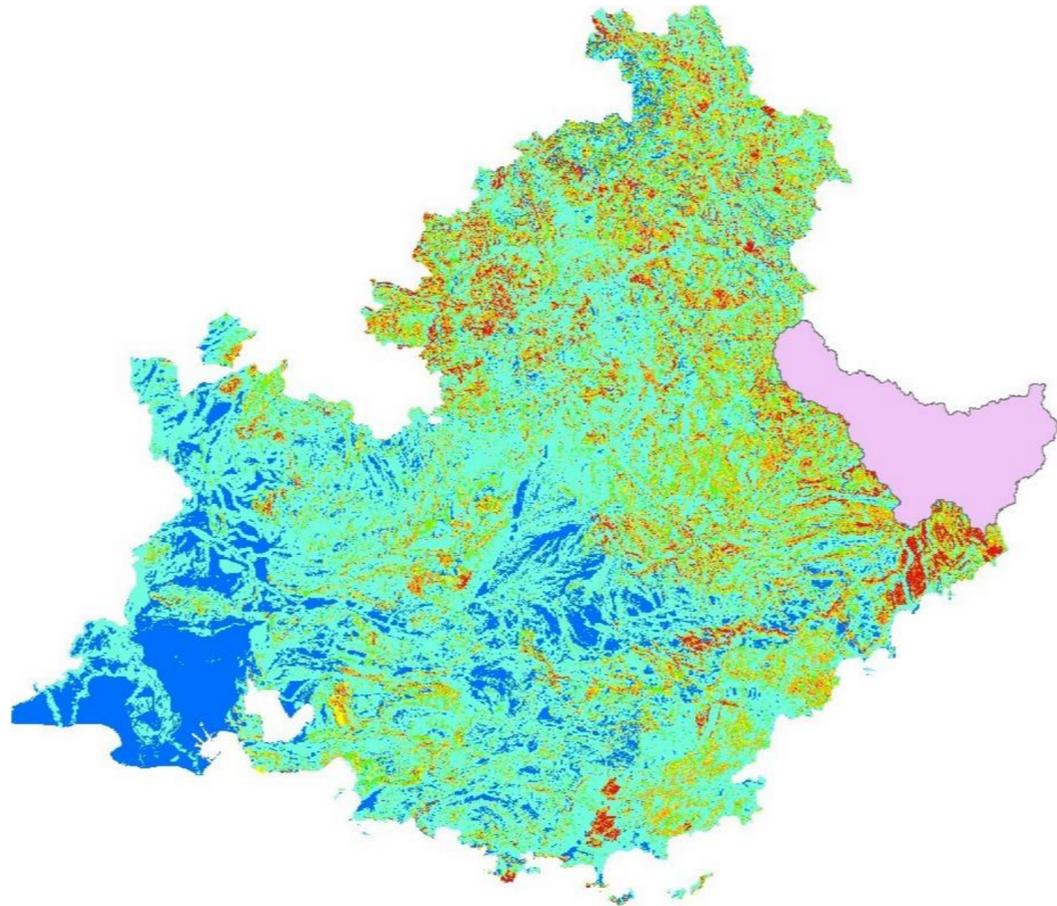


Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

Calcul de l'aléa prévisible sur la période 2066-2100 (scénario RCP8.5)

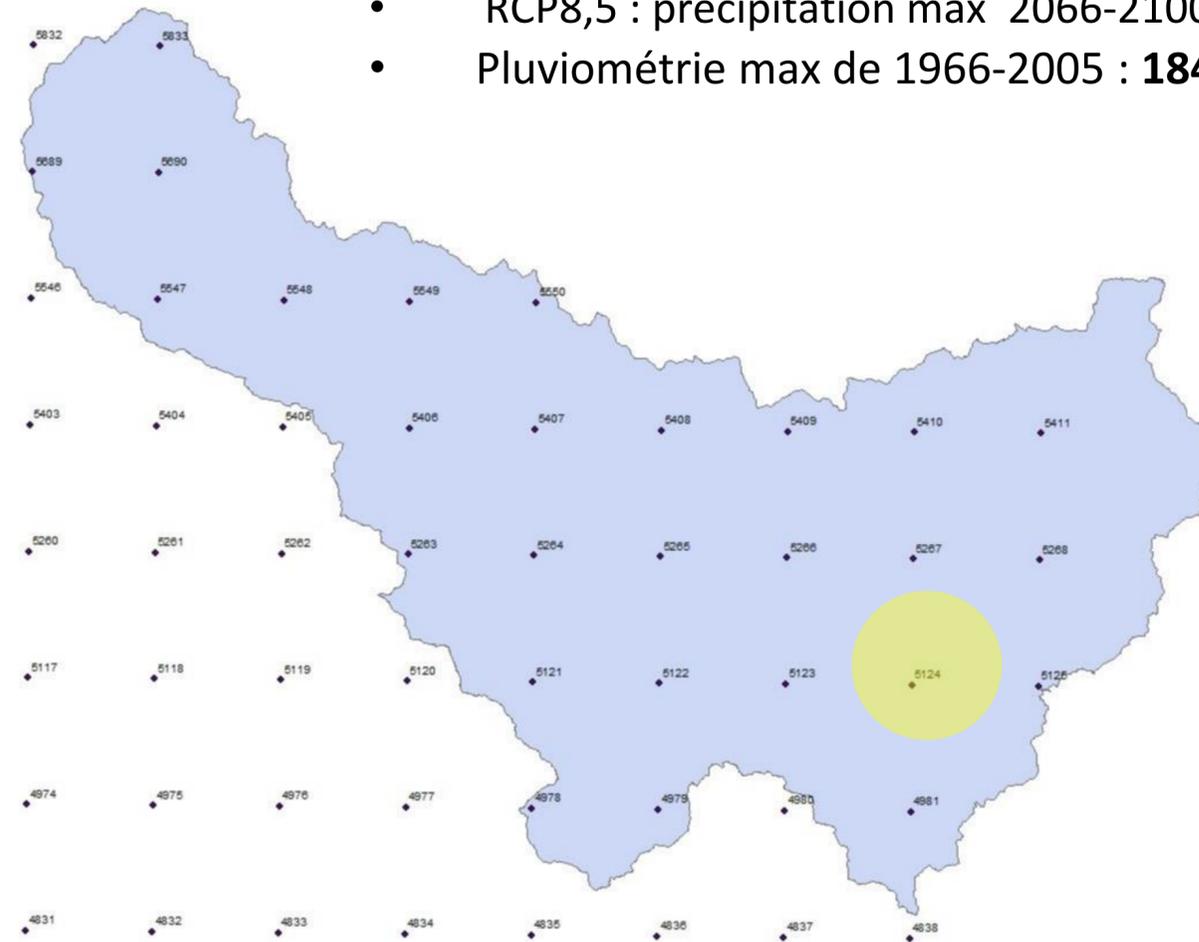
Calcul de l'effet du changement climatique dans les vallées Roya/Tinée/ Vésubie

Extraction de l'aléa historique dans les 3 vallées



Sélection d'un point de référence météorologique : pt 5124

- RCP8,5 : précipitation max 2066-2100 : **305mm**
- Pluviométrie max de 1966-2005 : **184 mm**



Localisation des points de Projections météorologiques – 2006-2100 – RCP 8.5

Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

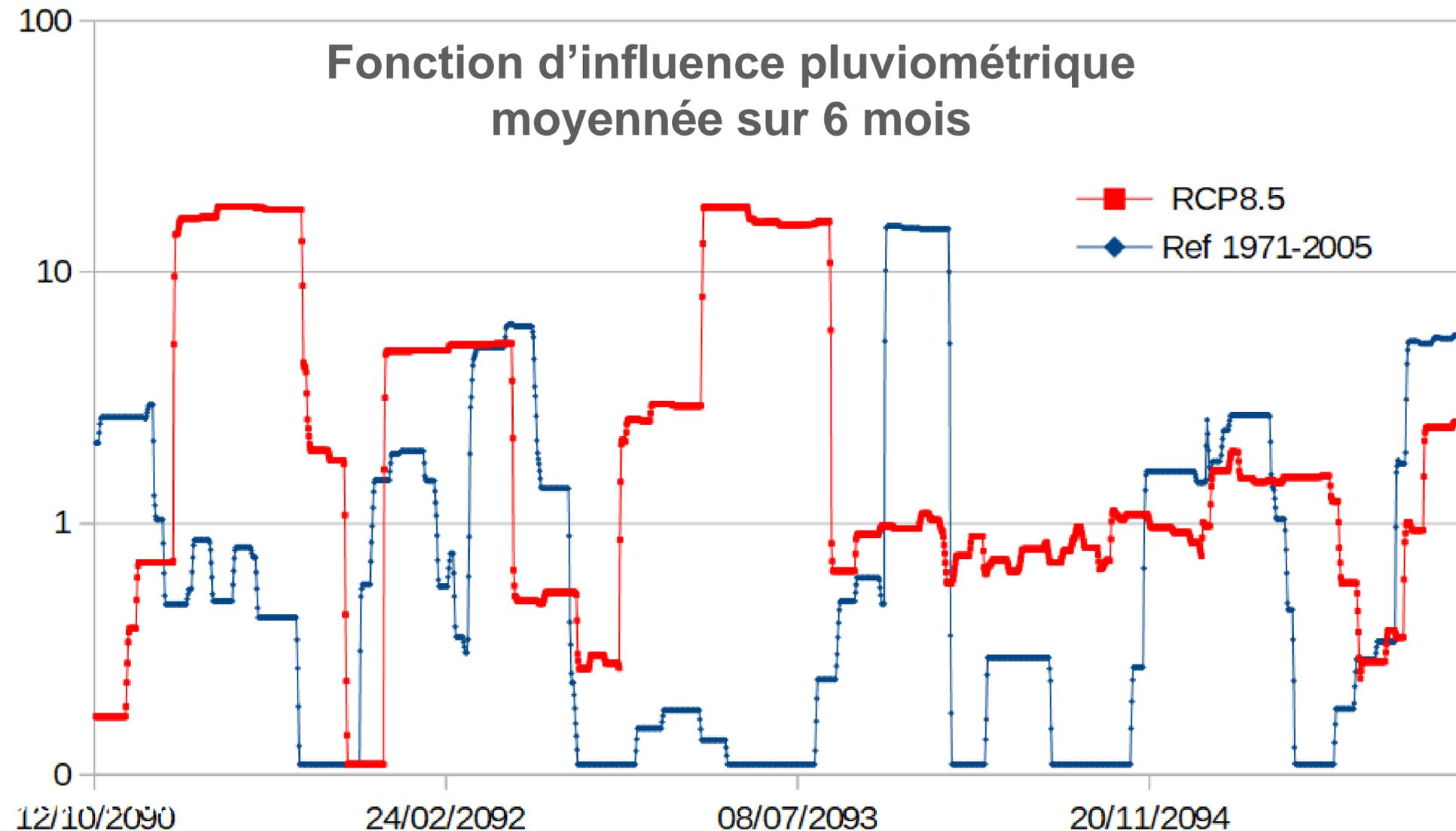
Calcul de l'aléa prévisible sur la période 2066-2100 (scénario RCP8.5)

Calcul de l'effet du changement climatique dans les vallées Roya/Tinée/ Vésubie

➤ Calcul, pour chaque groupe géotechnique, de l'aléa instantané sur une période de 35 ans

- Avec le scénario RCP8,5 : données 2066-2100 fournies par Météo France
- Avec la pluviométrie de référence : période 1966-2005

$$Alea_{instant} = Alea_{hist} \times F_{influence}(pluvio)$$



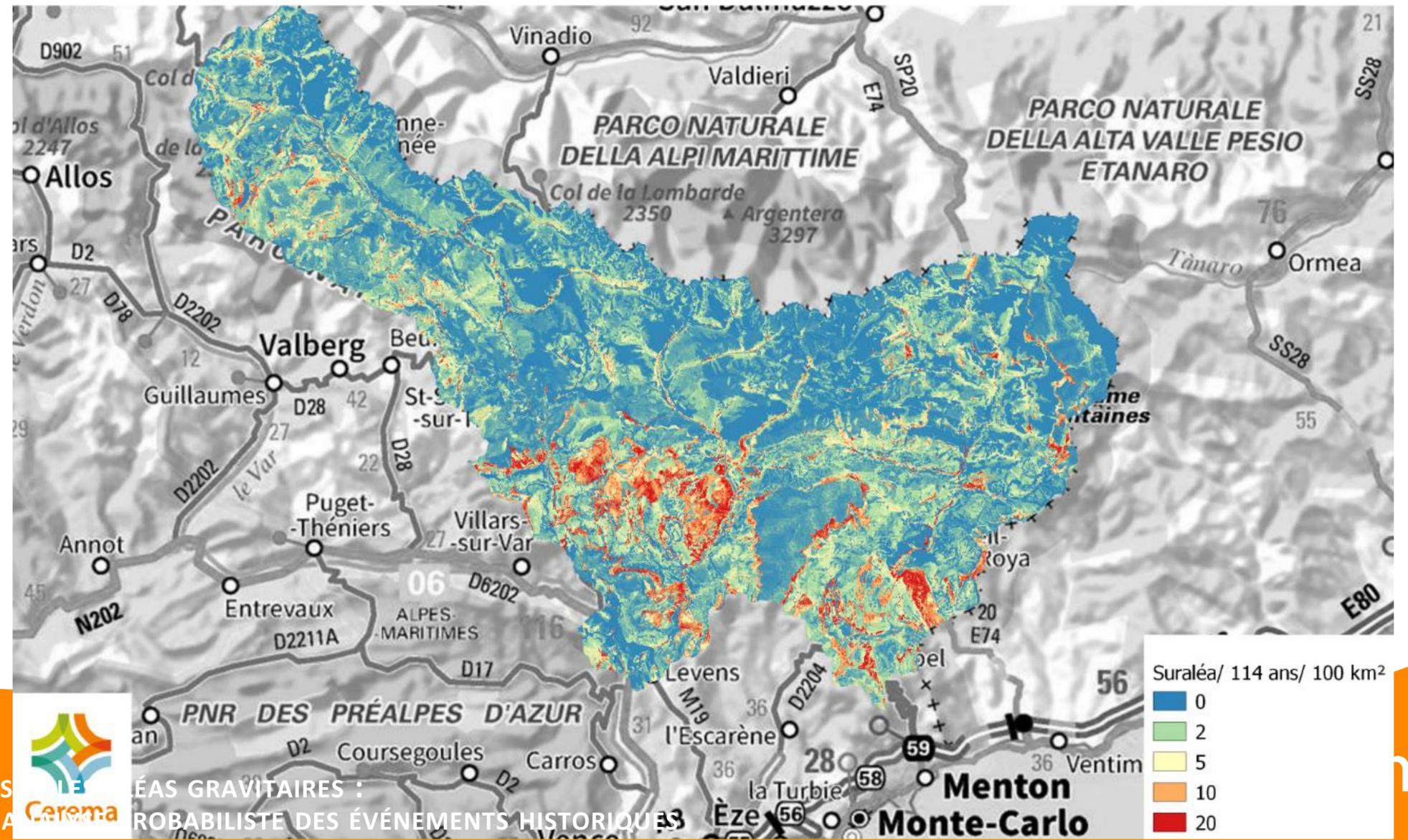
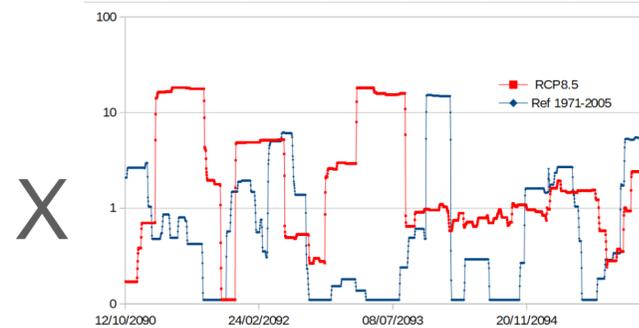
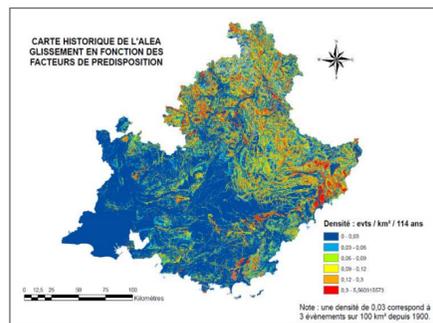
Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

Calcul de l'aléa prévisible sur la période 2066-2100 (scénario RCP8.5)

Calcul de l'effet du changement climatique dans les vallées Roya/Tinée Vesubie

Répartition spatiale du suraléa glissement de terrain avec le scénario RCP8.5 : comparaison entre la période de référence 1971- 2005 et la période 2066- 2100

$$Alea_{instan} = Alea_{hist} \times F_{influence}(pluvio)$$



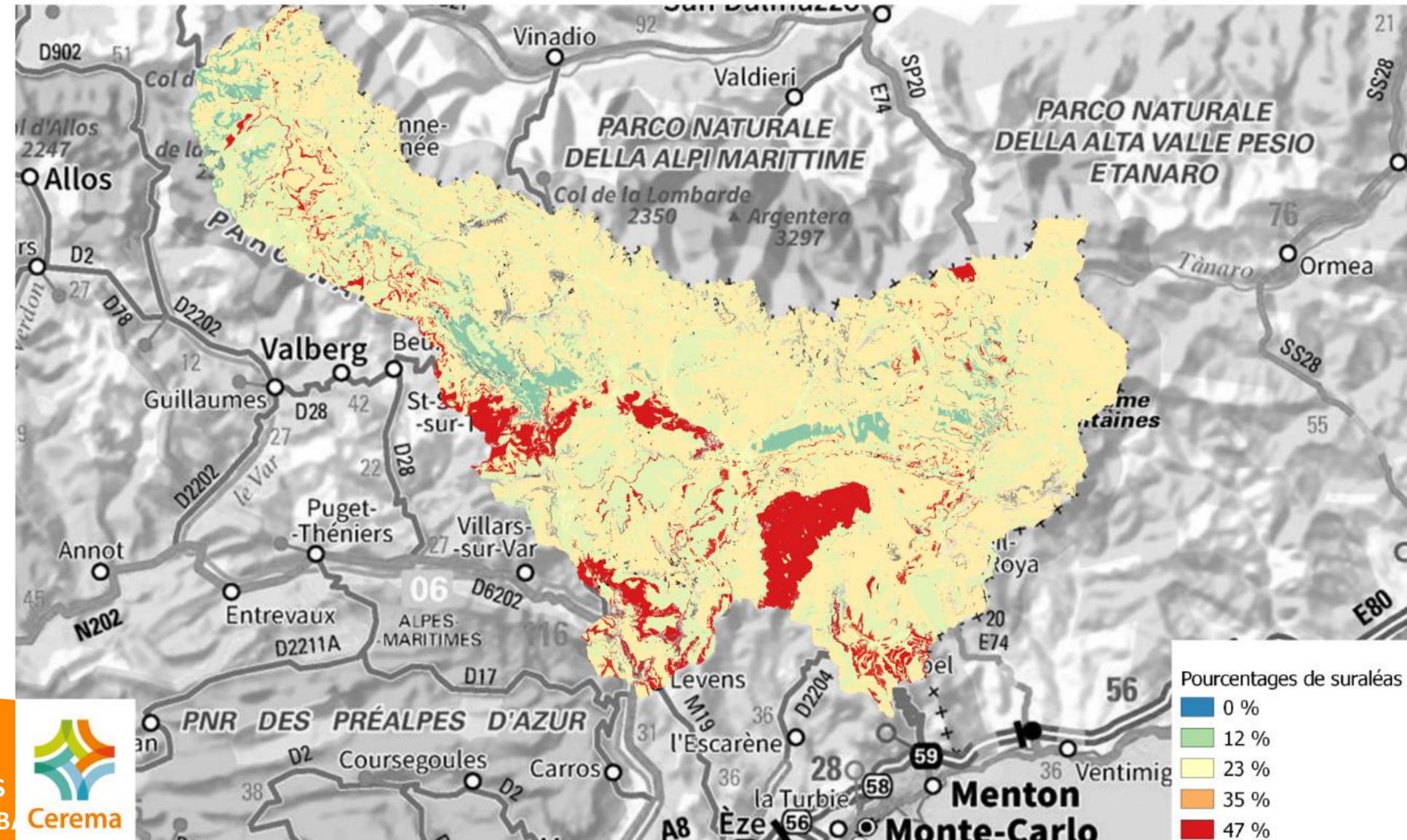
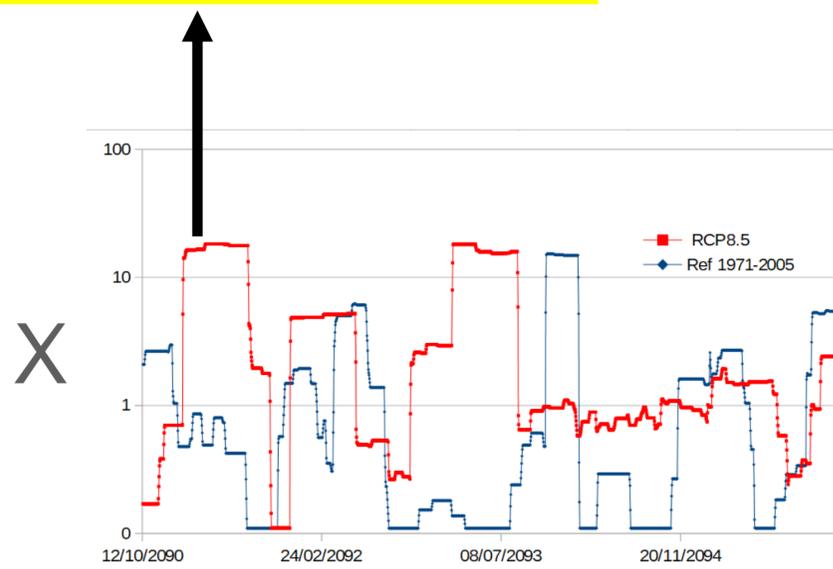
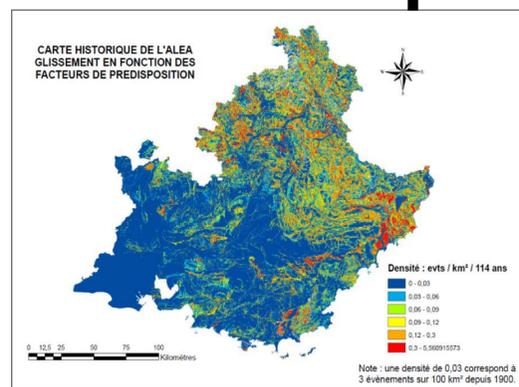
Impact du changement climatique sur les aléas gravitaires

Calcul de l'aléa prévisible sur la période 2066-2100 (scénario RCP8.5)

Calcul de l'effet du changement climatique dans les vallées Roya/Tinée Vesubie

Répartition spatiale du suraléa glissement de terrain avec le scénario RCP8.5 : comparaison entre la période de référence 1971- 2005 et la période 2066- 2100

$$Alea_{instan} = Alea_{hist} \times F_{influence}(pluvio)$$





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

V Conclusions

Conclusions et perspectives

Cartographie quantitative des aléas historiques :

- f° de facteurs de prédisposition et couvre la zone PACA
- REX : 1ères validation
- Perspectives : amélioration continue du modèle par intégration d'évènements nouveaux :
 - recensement de nouveaux évènements,
 - affinage des groupes géotechniques,
 - et réévaluation de l'aléa historique

Lois d'évolution de l'aléa avec la pluviométrie

- code Fortran : évaluation de l'aléa instantané pour chaque groupe géotechnique
- Capacité de prévisions intéressantes pour les glissements de terrain
- Possibilité d'étudier des corrélations entre aléa instantané et évolution de glissements actifs
- Amélioration continue du modèle via l'étude du déclenchement des éléments nouveaux :
 - amélioration des lois d'évolution de l'aléa
 - nouveaux facteurs de déclenchement : fonte des neiges, gel-dégel ?

Conclusions et perspectives

Premières évaluation de l'impact du changement climatique:

- ✓ : +23% de glissement de terrain sur Roya/Vésubie/Tinée avec RCP8.5
- ✓ Jusqu'à +47% pour certaines formations

Perspectives à moyen terme :

- Evaluation de l'impact du changement climatique sur l'ensemble de la région PACA
- Établissement de carte d'aléa en « temps réel » fonction des lames d'eau radar disponibles
- Influence combinée de la pluie et des sollicitations sismiques sur le déclenchement des phénomènes gravitaires ?



Dominique Batista, Cerema, Aix en Provence
dominique.batista@cerema.fr