



## 5<sup>ème</sup> séminaire scientifique du ROLNP.

### ‘La Gestion du littoral : Connaître le passé pour comprendre le présent et préparer l’avenir’

Seuils hydro-climatiques critiques au déclenchement de mouvements de terrain le long des côtes du Calvados :  
application au glissement du Cirque des Graves à Villerville

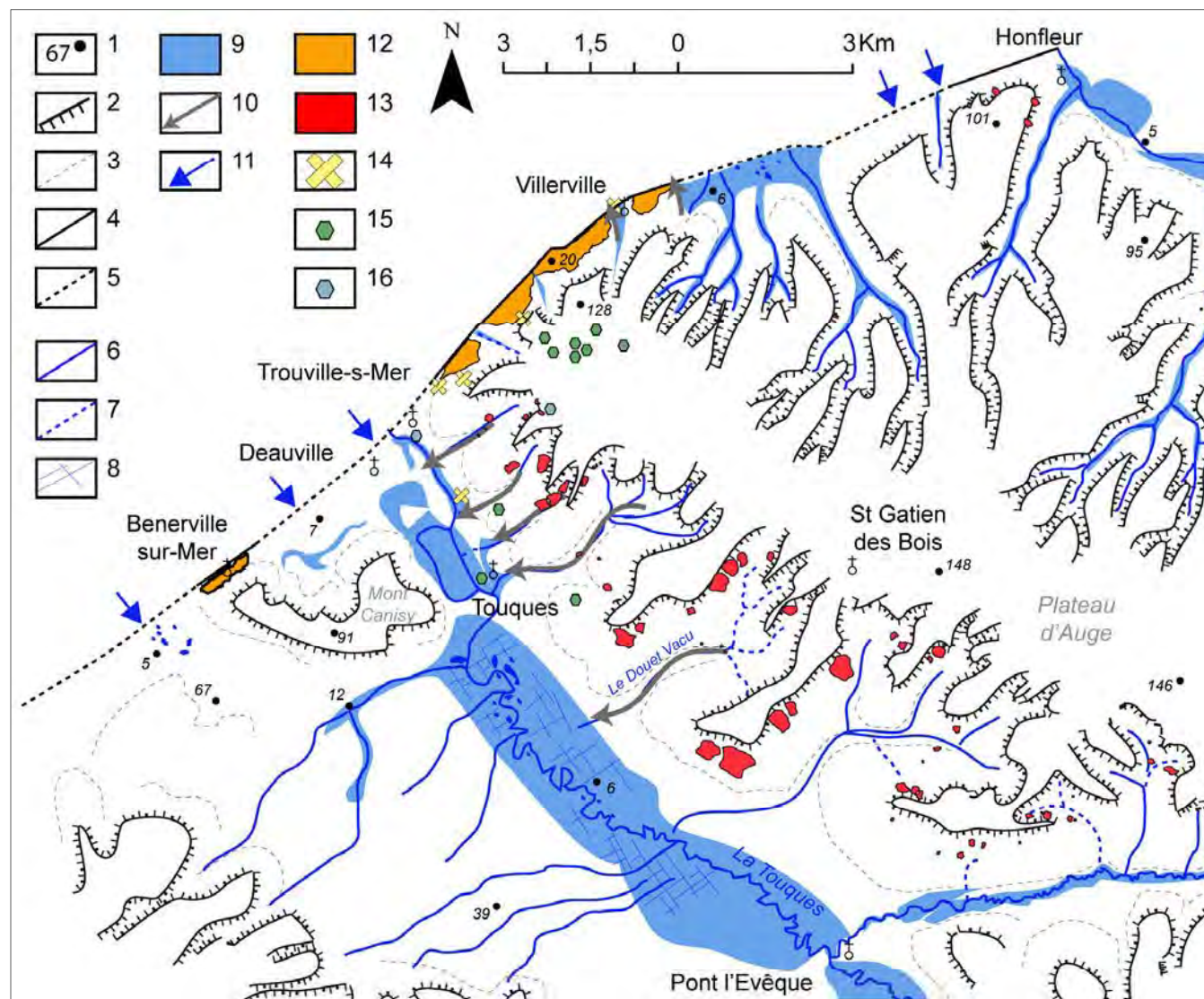
Olivier MAQUAIRE, Candide LISSAK, Stéphane COSTA

*U.F.R. SEGGAT, Université de Caen Normandie  
Laboratoire LETG-Caen Géophen, UMR 6554 CNRS*

# Introduction et contexte

Pays d'Auge : un secteur 'à risques' multiples.

**Inondations** (débordements, écoulements hyper-concentrés, submersion de tempête.

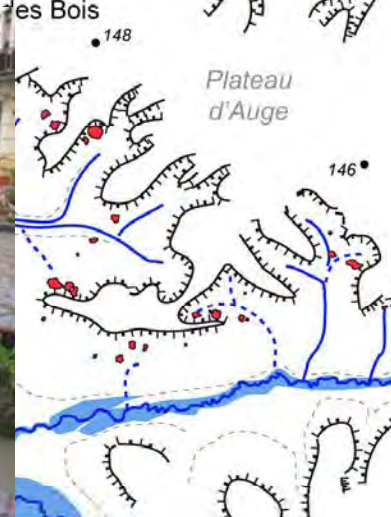
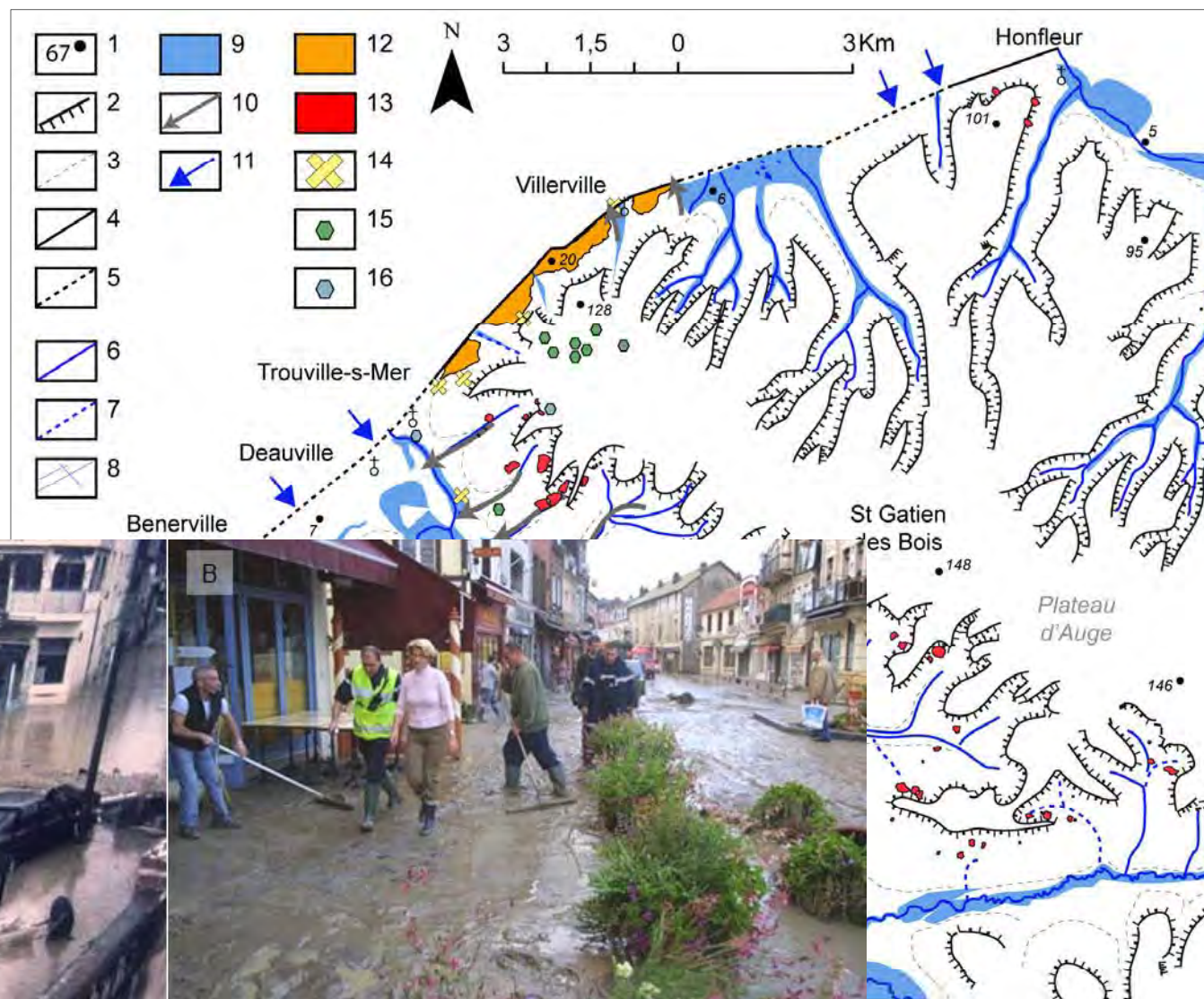


(In: Thèse C. Lissak, 2012)

# Introduction et contexte

Pays d'Auge : un secteur 'à risques' multiples.

**Inondations** (débordements, écoulements hyper-concentrés, submersion de tempête).



(In: Thèse C. Lissak, 2012)

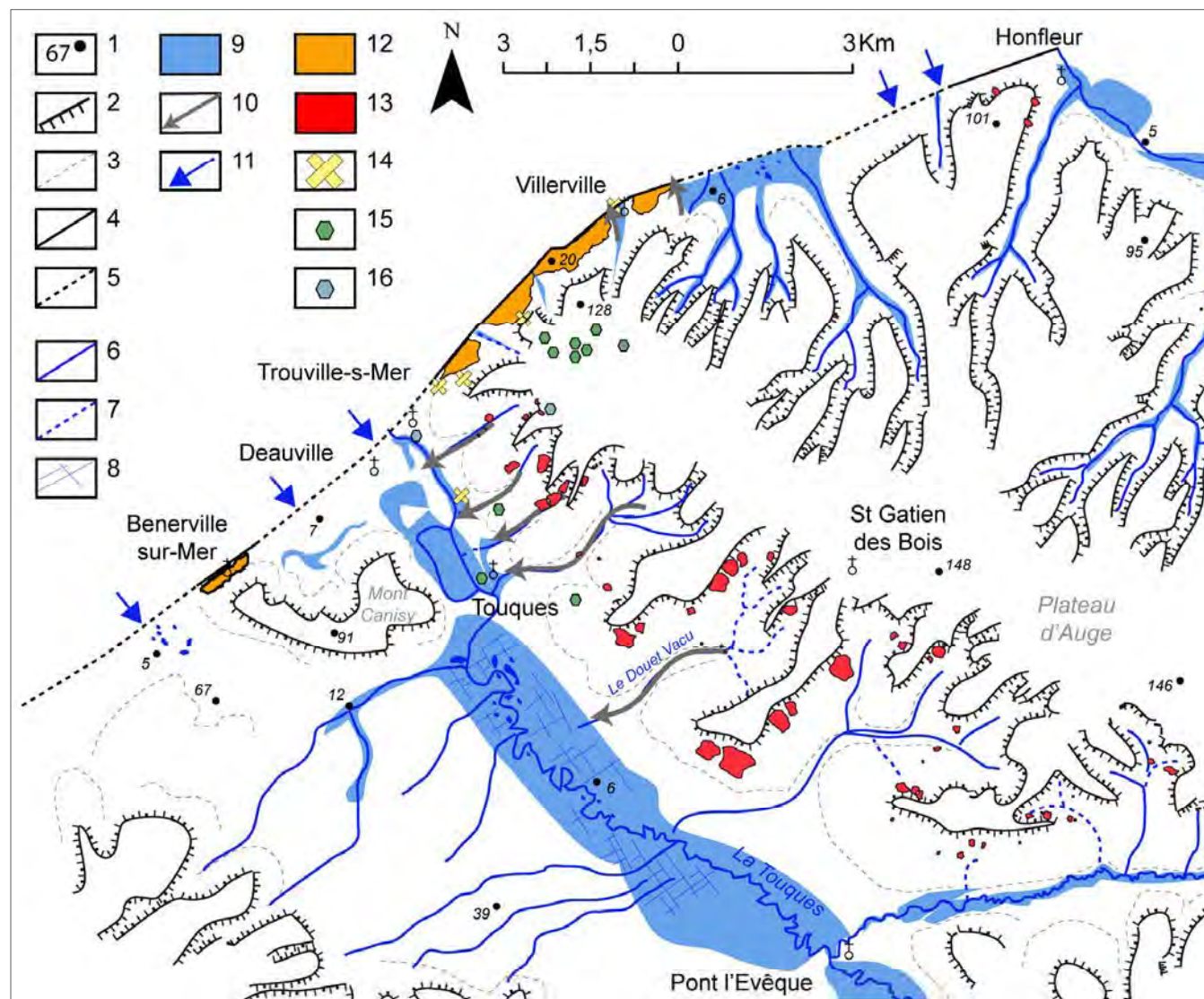
# Introduction et contexte

Pays d'Auge : un secteur 'à risques' multiples.

**Inondations** (débordements, écoulements hyper-concentrés, submersion de tempête.

**Effondrements** : cavités karstiques ou anthropiques

**Glissements de terrain** : actifs



(In: Thèse C. Lissak, 2012)

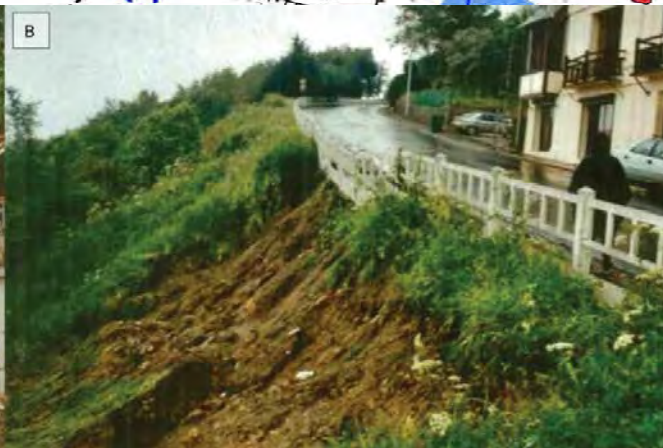
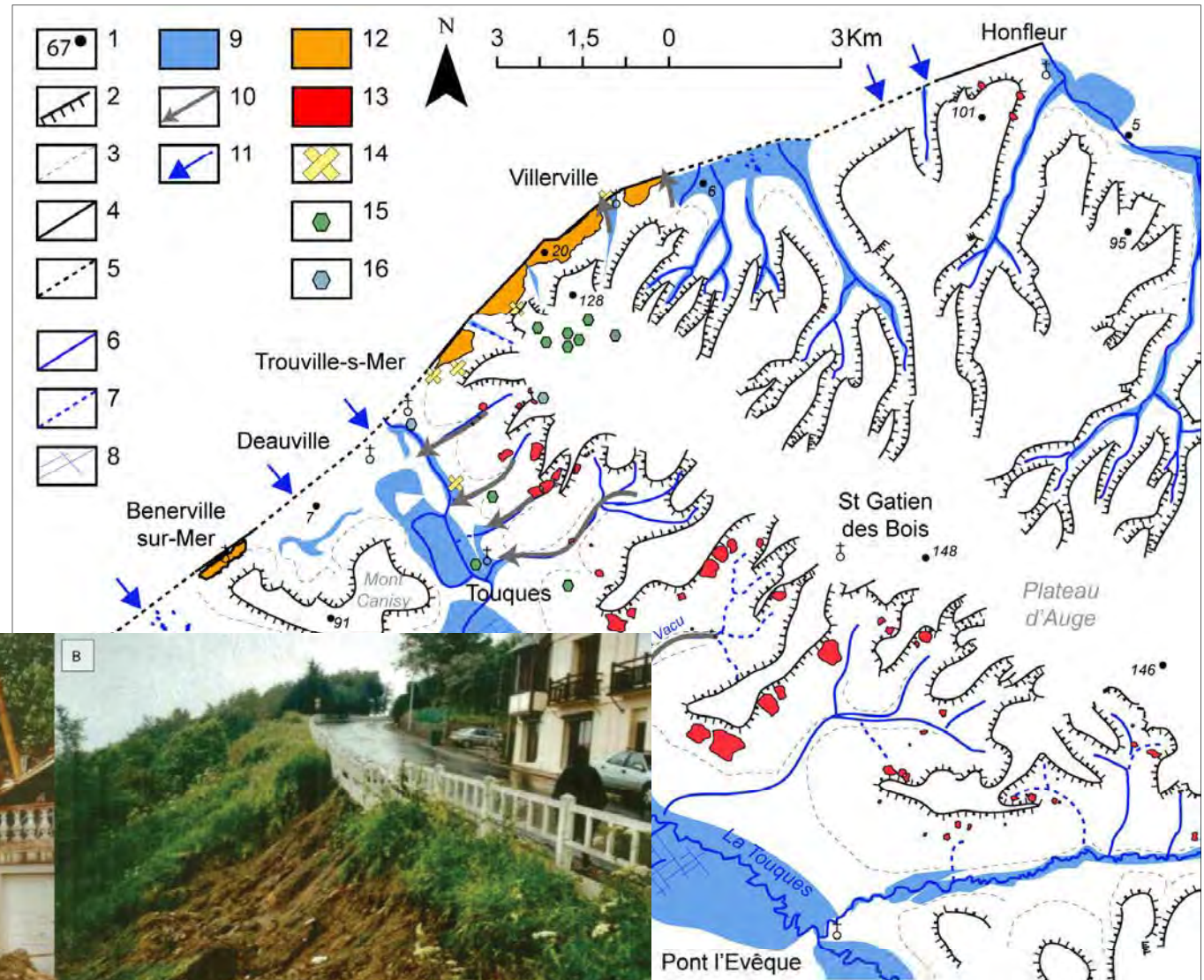
# Introduction et contexte

Pays d'Auge : un secteur 'à risques' multiples.

**Inondations** (débordements, écoulements hyper-concentrés, submersion de tempête.

**Effondrements** : cavités karstiques ou anthropiques

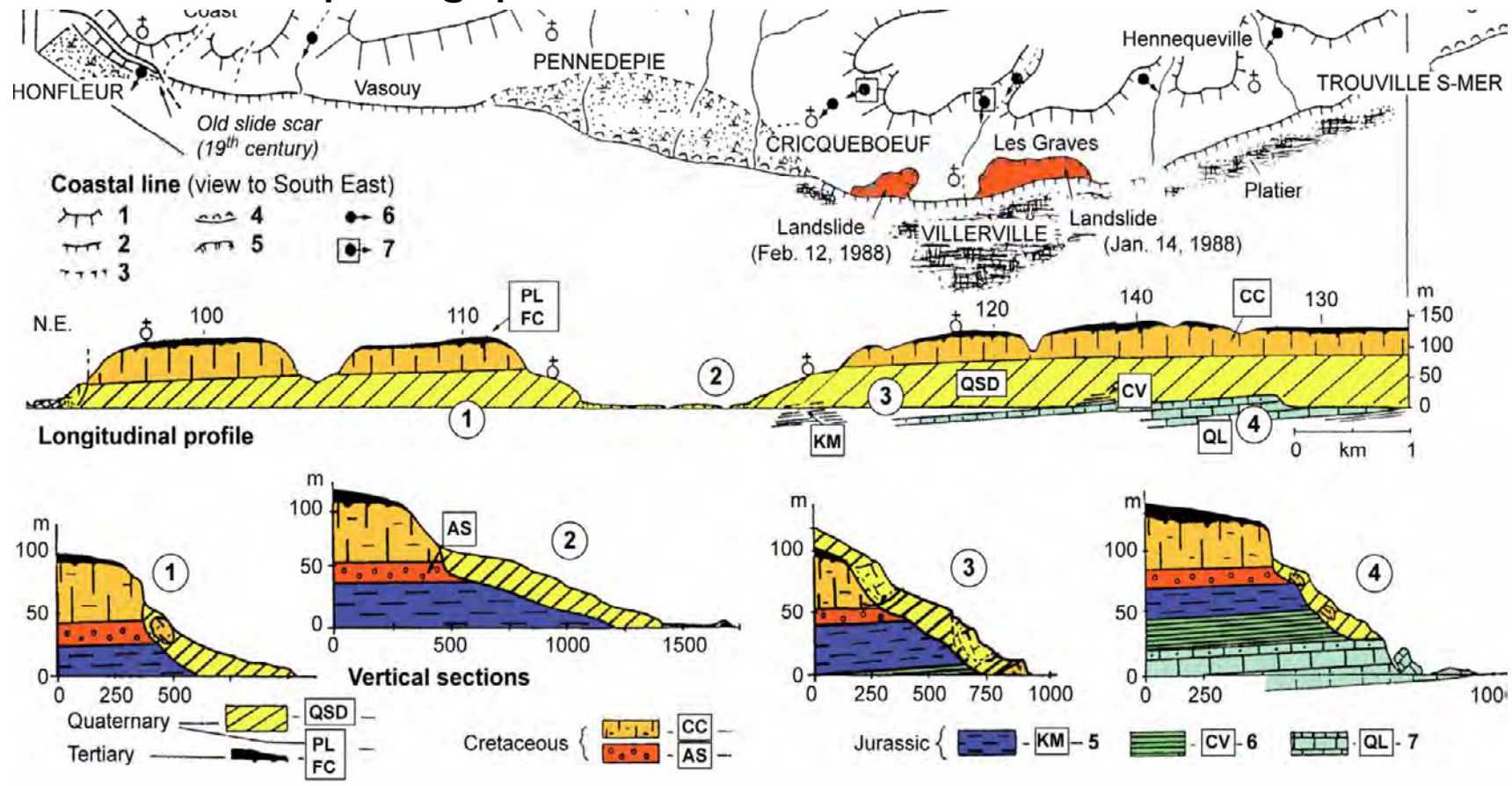
**Glissements de terrain** : actifs



(In: Thèse C. Lissak, 2012)

# Introduction et contexte

## Contexte morphologique



**Coastal line:** 1. Ledge, 2. Active cliff, 3. Old cliff, 4. Sand bar, 5. Crown scarp, 6. Uncatched spring (Emergence), 7. Caught spring.

**Longitudinal profile:** 1. Quaternary surficial deposits, 2. Plateau loam and flint clay, 3. Cenomanian chalk, 4. Albian sands, 5. Kimmeridgian marls, 6. Villerville clays (Oxfordian), 7. Sandy limestones of Hennequeville.

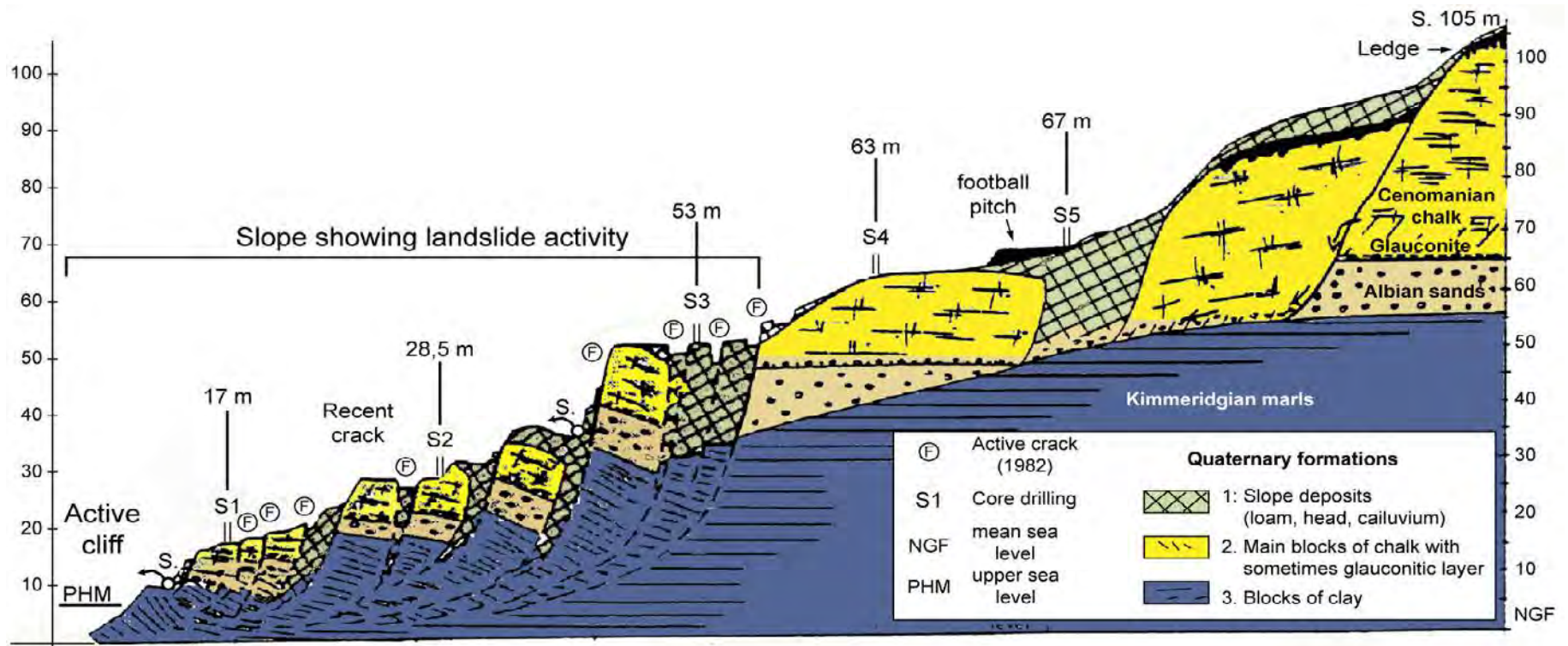
**Morphological setting of Pays d'Auge cliffs** (modified from Flageollet & Helluin, 1987) .

# Introduction et contexte

## Contexte morphologique

Matériaux hétérogènes composés de larges panneaux et blocs de craie et de débris (craie, limons, sables et cailloux) .

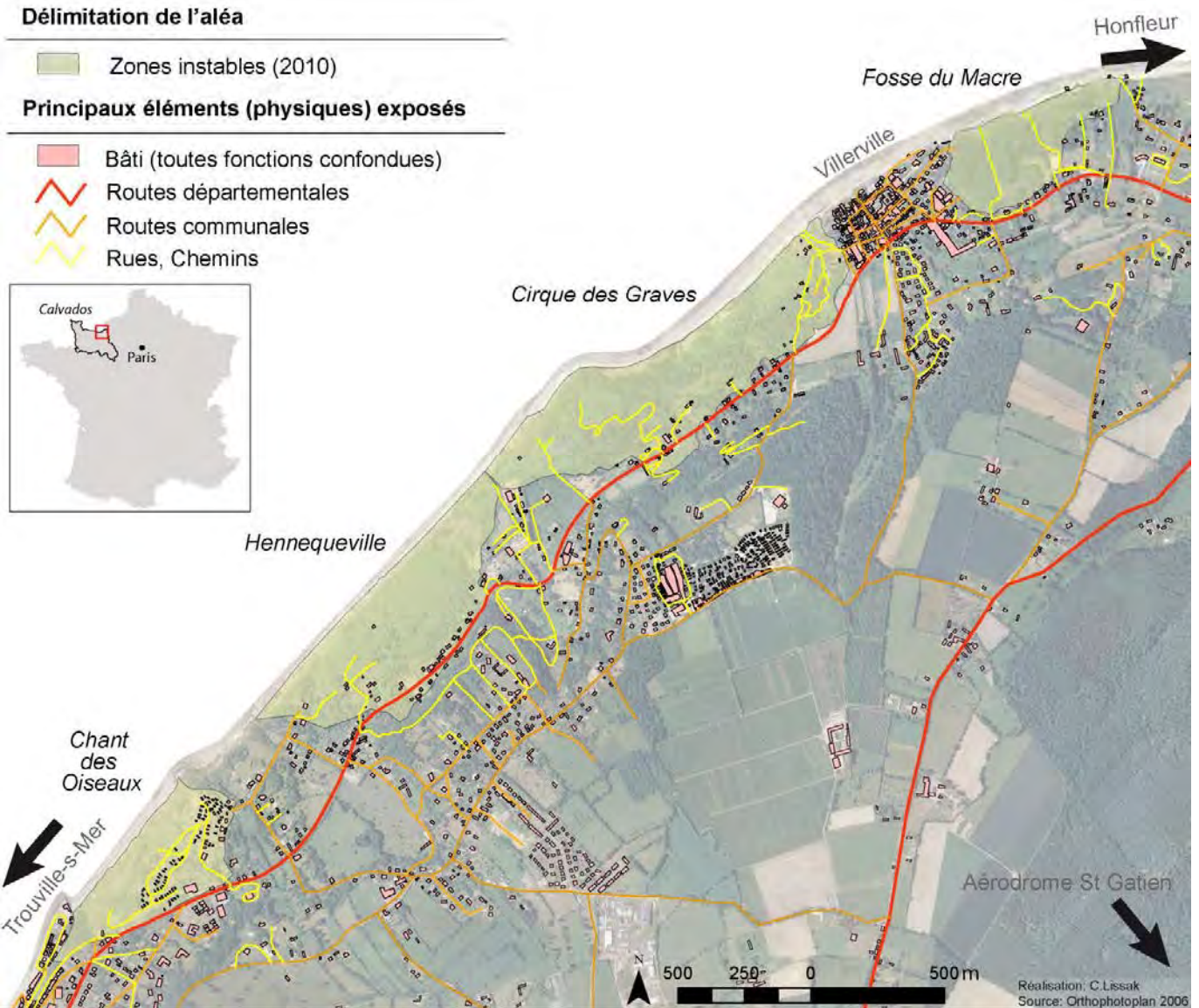
Ces formations ont été mises en place (> 10 000 ans).



Coupe géologique du versant de Villerville (d'après Flageollet & Helluin, 1987) .

# Introduction et contexte

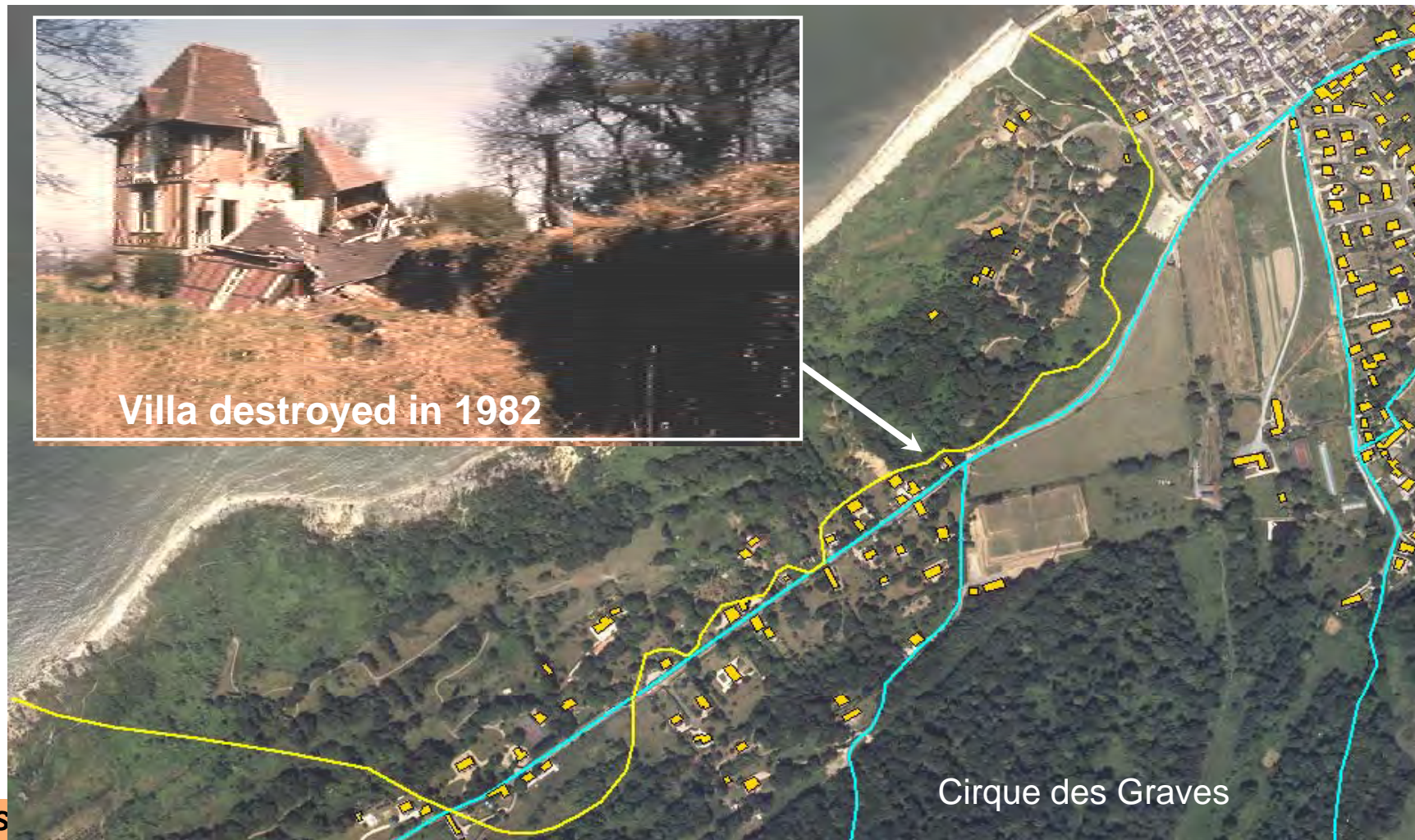
## Crises majeures



# Introduction et contexte

## Crises majeures

1ère crise : les **10/11 Janvier 1982**, un glissement majeur détruit partiellement ou totalement **une trentaine de bâtiments** et endommage la route en **2 endroits** (affaissement d'env. 2 m).



# Introduction et contexte

## Crises majeures

1ère crise : les **10/11 Janvier 1982**, un glissement majeur détruit partiellement ou totalement une trentaine de bâtiments et endommage **la route en 2 endroits** (affaissement d'env. 2 m).



# Introduction et contexte

## Crises majeures

1ère crise : les **10/11 Janvier 1982**, un glissement majeur détruit partiellement ou totalement une trentaine de bâtiments et endommage **la route en 2 endroits** (affaissement d'env. 2 m).



Route affaissée (Mirella)



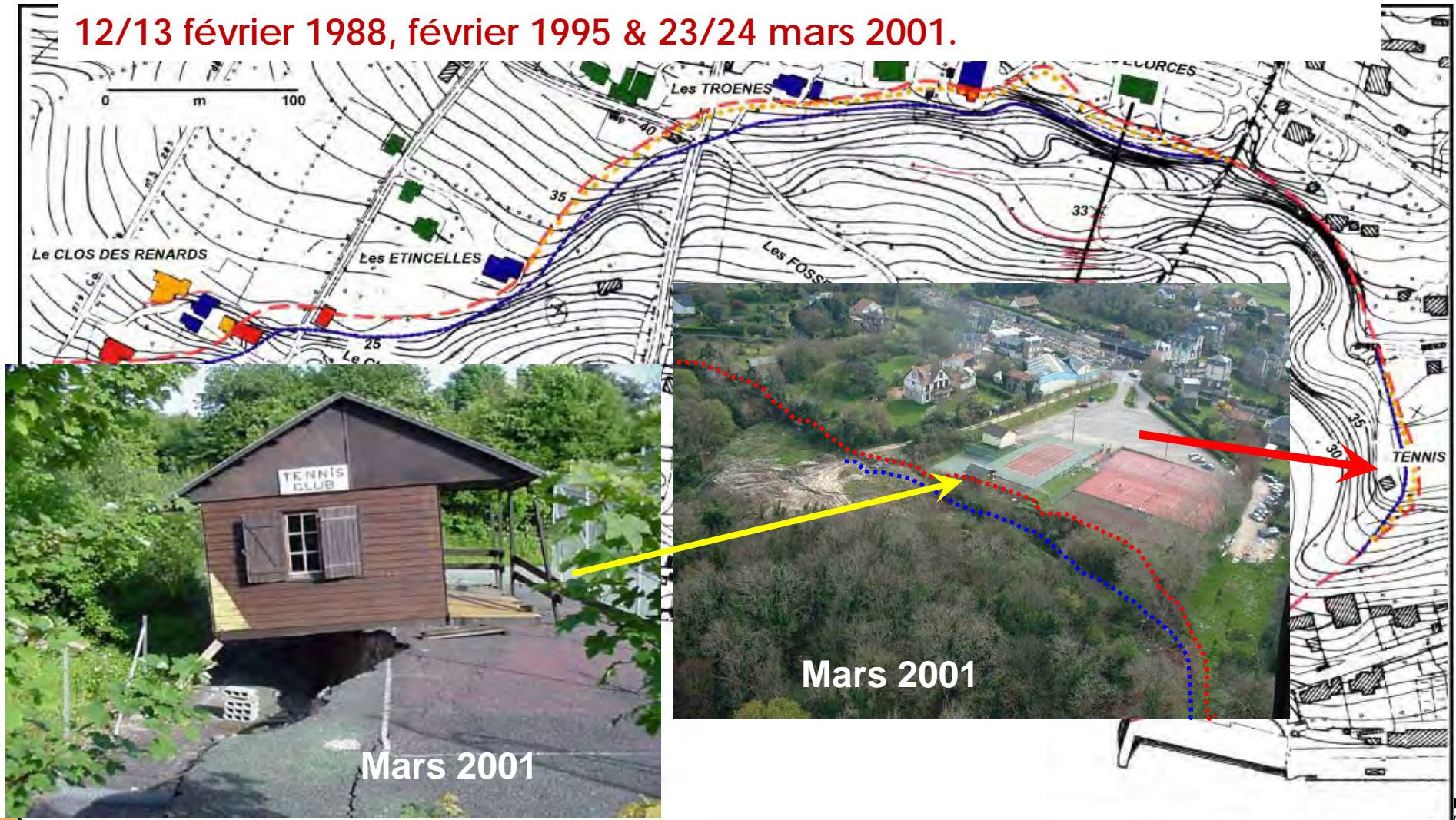
Cirque des Graves

# Introduction et contexte

## Crises majeures

1ère crise (10/11 Janvier 1982) suivie par trois réactivations majeures:

12/13 février 1988, février 1995 & 23/24 mars 2001.



# Introduction et contexte

## Crises majeures

1ère crise (10/11 Janvier 1982) suivie par trois réactivations majeures:

12/13 février 1988, février 1995 & 23/24 mars 2001.

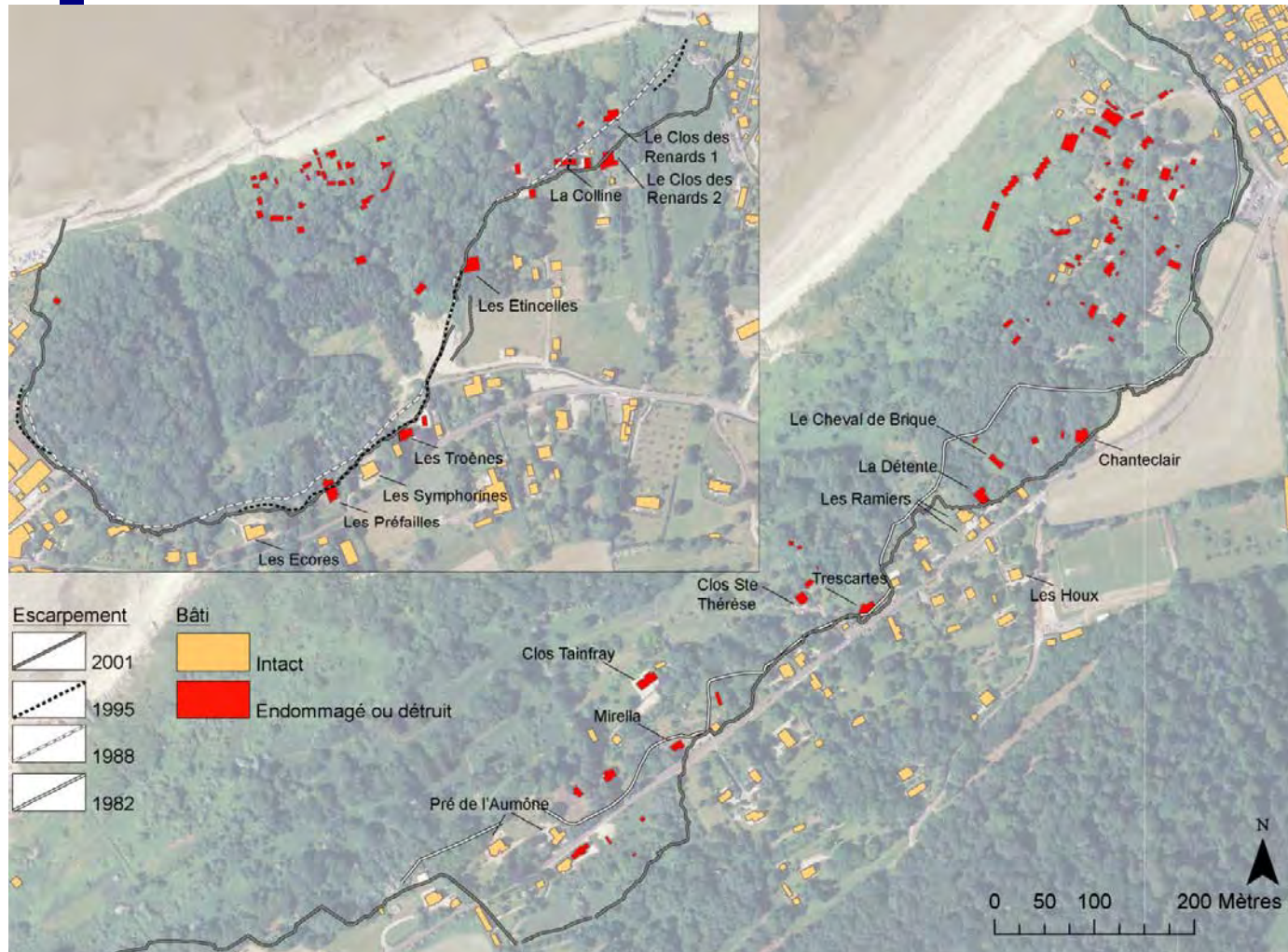


- Threatened construction (long-term)
- Main cracks
- Extension of the scarp (february 1988)
- Extension of the scarp (march 1995)
- Extension of the scarp (actual)

# Introduction et contexte

Crises majeures

→ Conséquences importantes



Comment anticiper ?

Quelles vitesses et rythmes ?

Causes ? Les processus responsables, ...

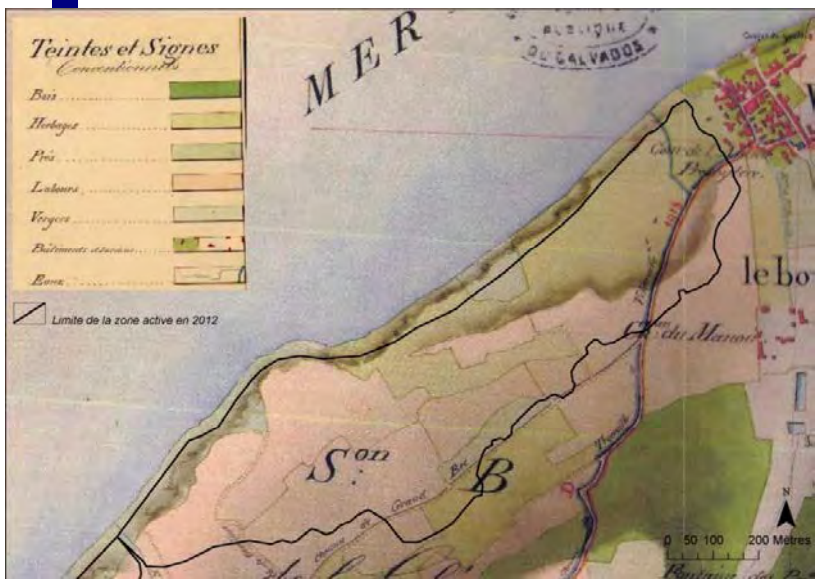
**Définition de seuils de déclenchement et de réactivation**

**→ Réseau de surveillance**

D'après thèse C. Lissak, 2012.

# Connaître le passé ....

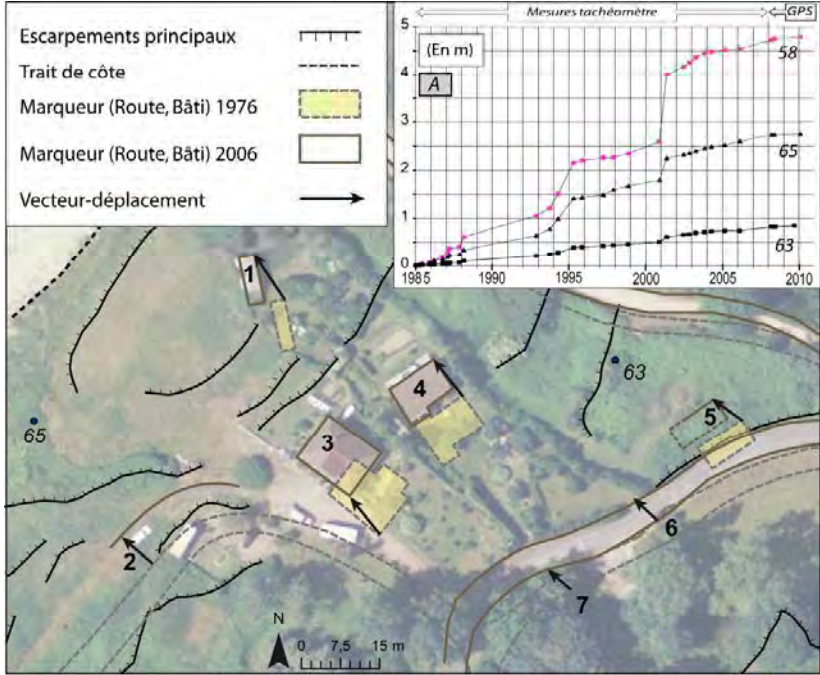
Analyse des cartes anciennes, cadastres, photographies IGN, textes, etc ...



Extrait cadastre 1829, Villerville, Calvados



(In: Thèse C. Lissak, 2012)

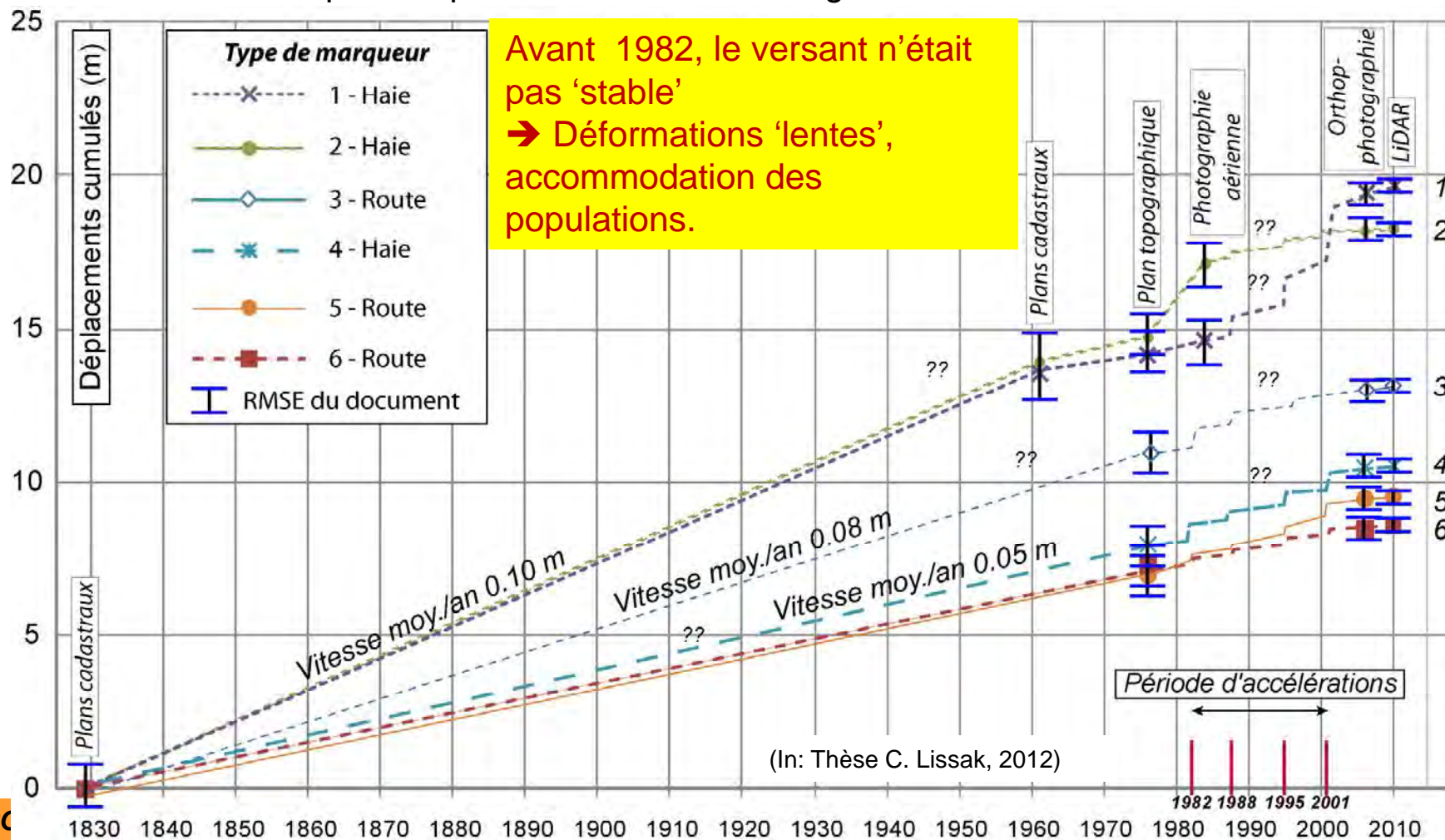


Superposition de plusieurs photos aériennes (Villerville, Calvados)

# Connaître le passé ....

## Synthèse : versant 'littoral' de Villerville (Calvados)

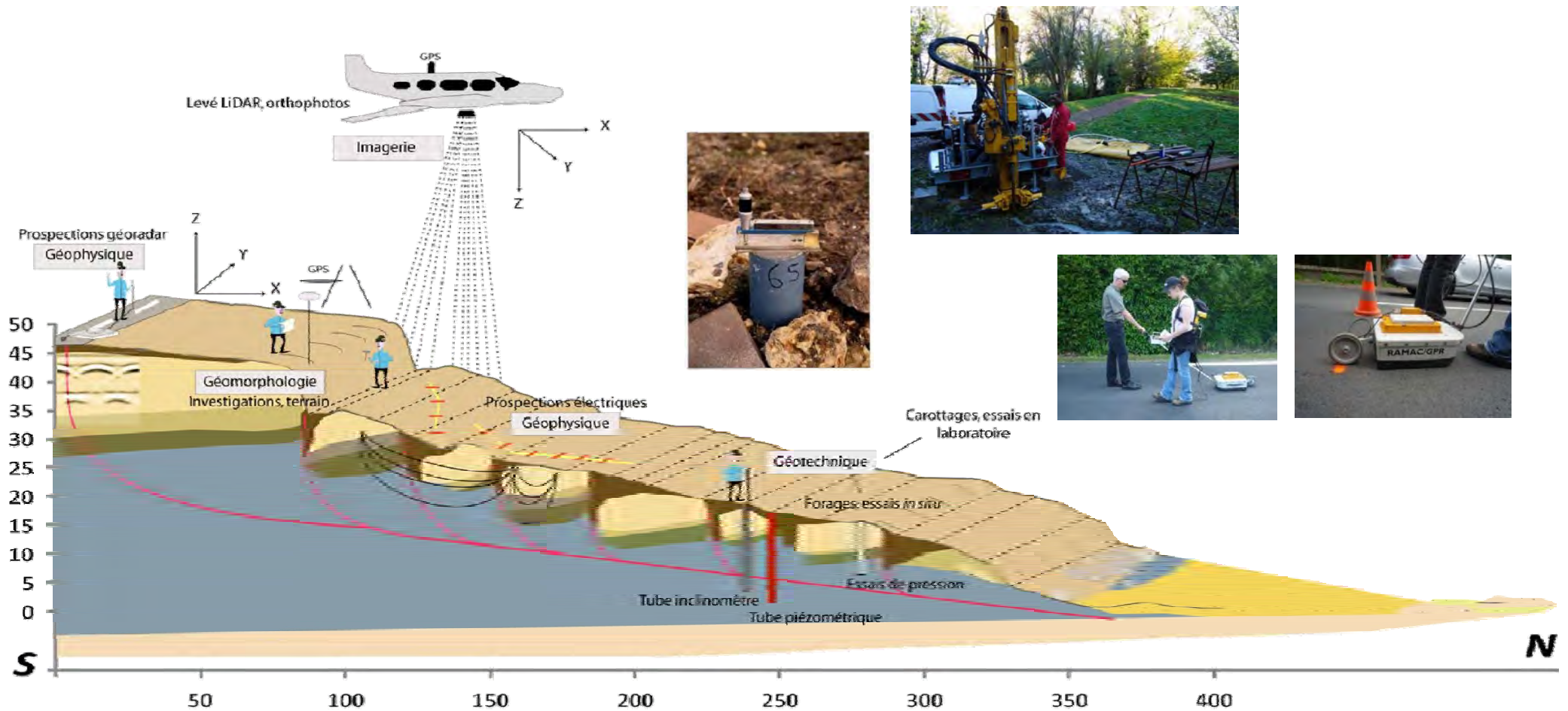
- Compartimentage de la zone en 'mouvement'
- Déplacements cumulés depuis 1829 compris entre 10 à 20 m ( +/-2m)
- Valeurs complétées par réseau de monitoring



# .. Comprendre le présent .. (Réseau de surveillance)

## ➤ *Investigation et suivi*

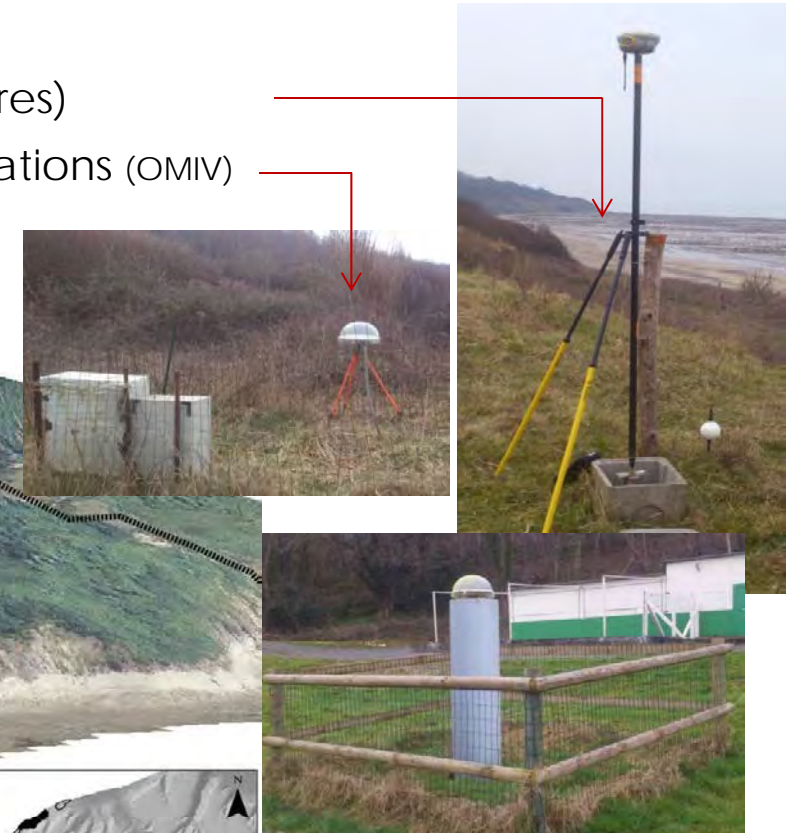
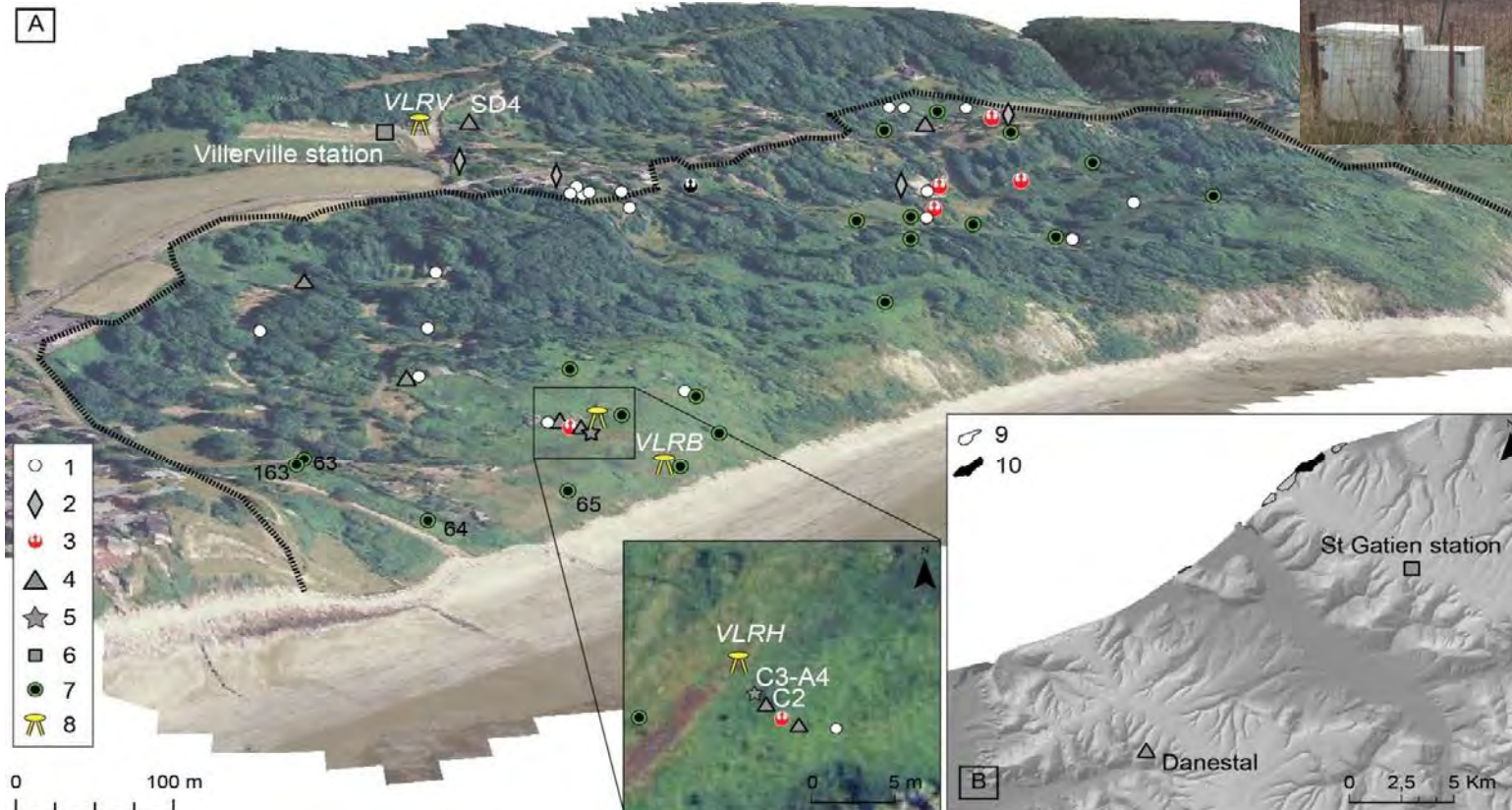
- Réseau de surveillance dès 1984 (> 70 repères)



## .. Comprendre le présent .. (Réseau de surveillance)

### ➤ *Distribution spatiale & temporelle des déplacements de surface*

- Réseau de surveillance dès 1984 (> 70 repères)
- Nouveau réseau géodésique depuis 2008 (24 repères)
- GNSS permanent double fréquence depuis 2009 stations (OMIV)

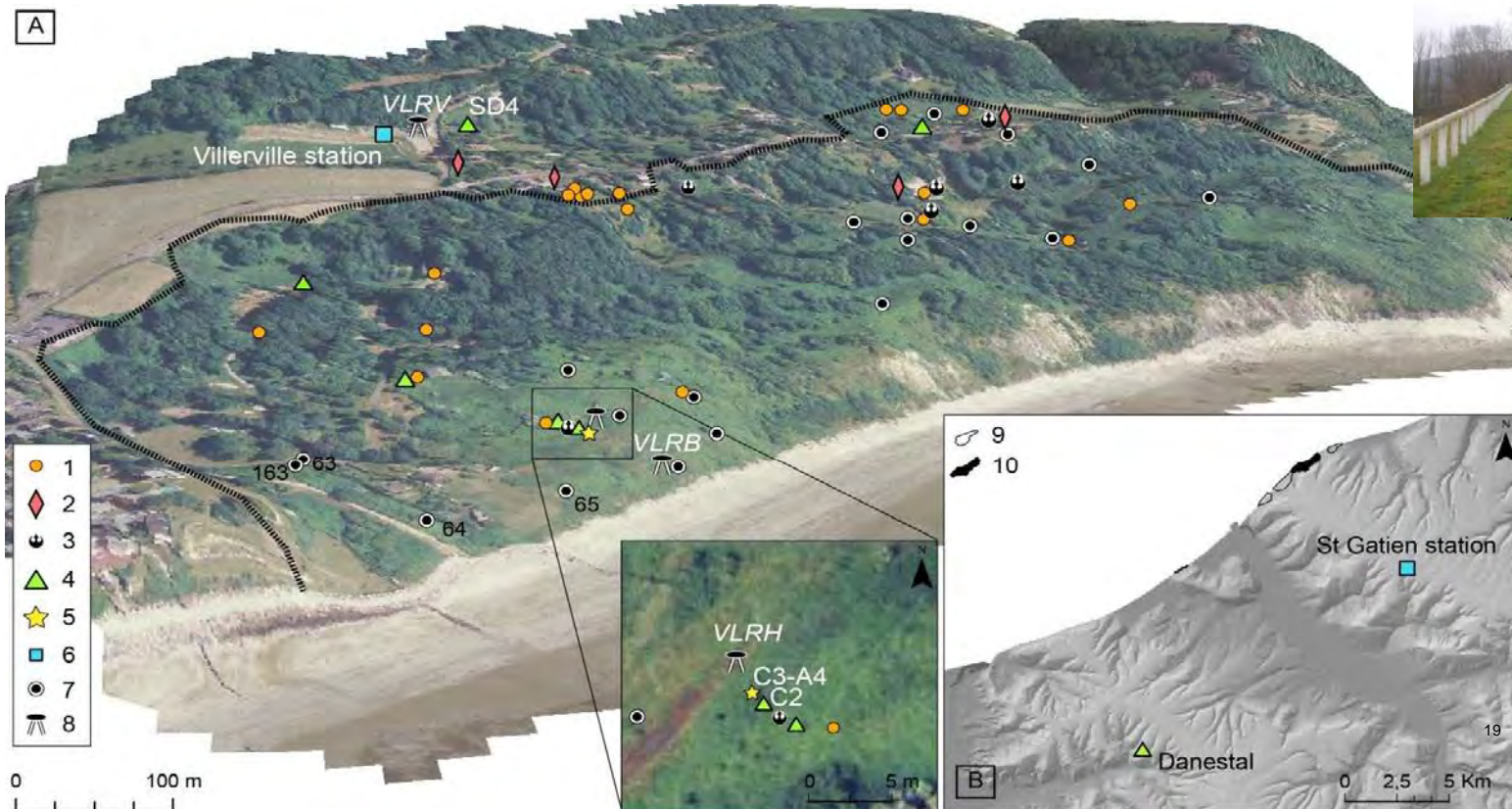


1. Piézomètre
2. Puits
3. **Inclinomètre**
4. Piézomètre avec capteur permanent
5. **Sonde Geobead**
6. Station Météo.
7. **Repère topographique**
8. **Récepteur GNSS**

## .. Comprendre le présent .. (Réseau de surveillance)

### ➤ *Conditions hydro-climatiques*

- Analyse des données historiques et investigation terrain
- **Nappe (GWL)** = 29 points d'observation : 4 puits, 7 tubes inclinomètre, 18 piézomètres (6 sondes automatiques) + 1 piézomètre sur le plateau depuis 1974
- **Précipitations** = 2 stations météorologiques: Villerville depuis 2013 + 1 station sur le plateau (Saint-Gatien-des-Bois) depuis 1949

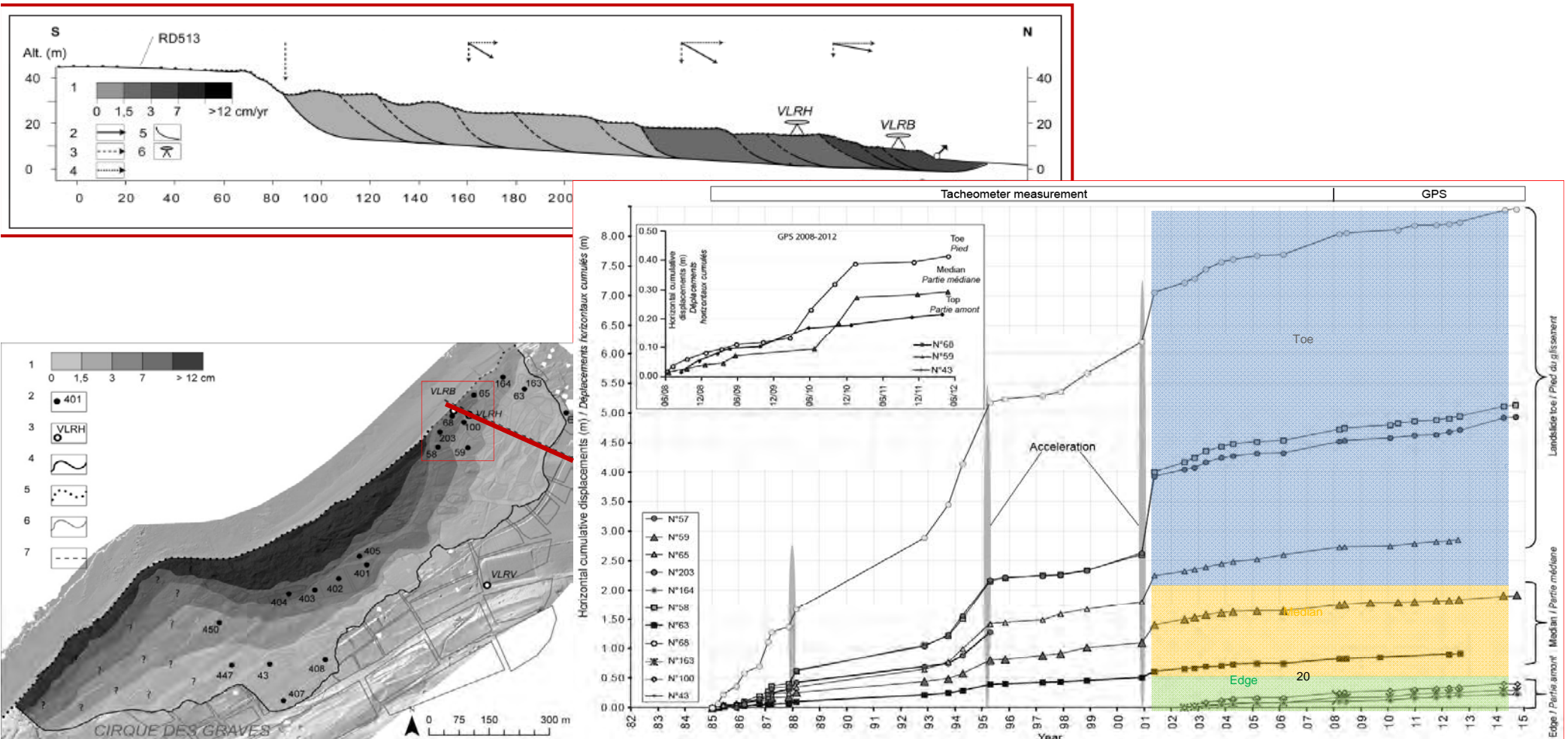


1. Piézomètre
2. Puits
3. Inclinomètre
4. Piézomètre avec capteur permanent
5. Sonde Geobead
6. Station Météo.
7. Repère topographique
8. Récepteur GNSS

## ... Comprendre le présent ...

### ➤ *Modèle cinématique du glissement de terrain : hétérogénéités spatiales*

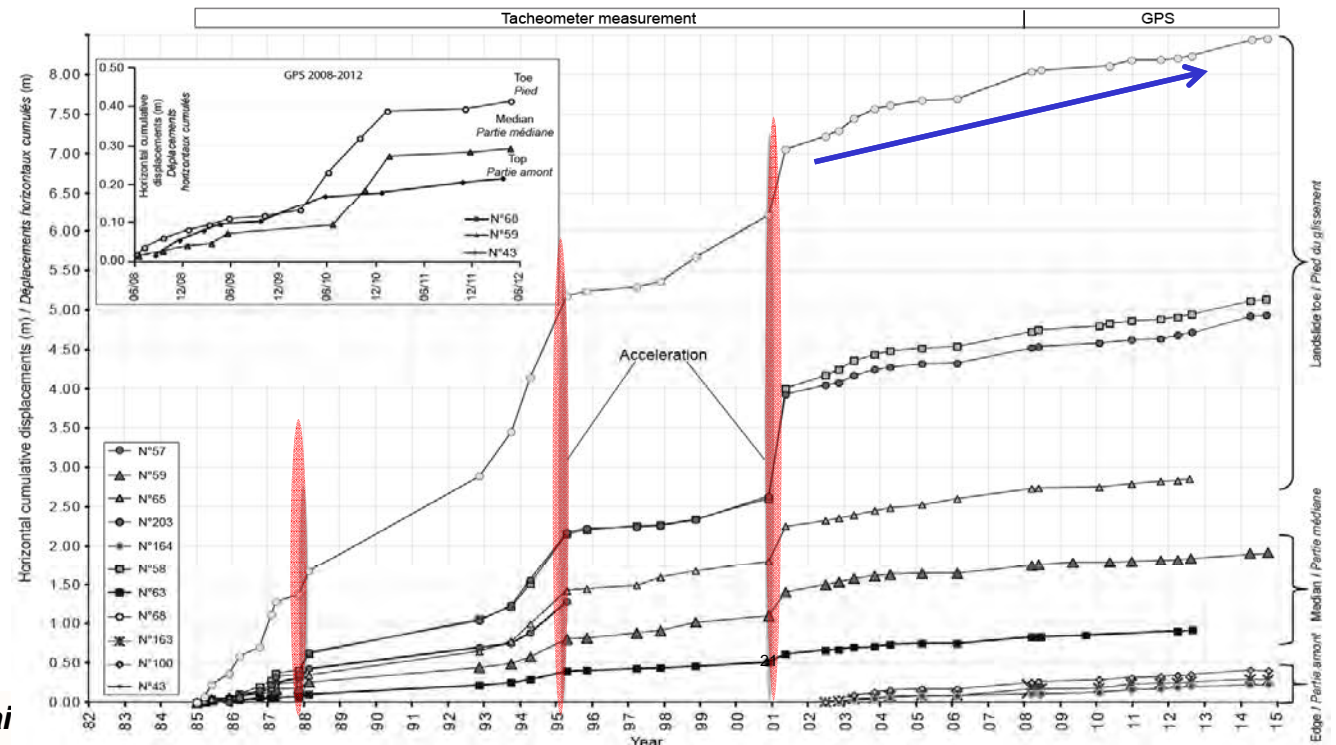
- Organisation concentrique autour d'un **noyau médian central**
- Evolution régressive de l'aval vers l'amont
- **Plusieurs unités morpho-structurales** (ou compartiments) liées à l'existence e panneaux de craie



## ... Comprendre le présent ...

### ➤ *Modèle cinématique du glissement de terrain : hétérogénéités temporelles*

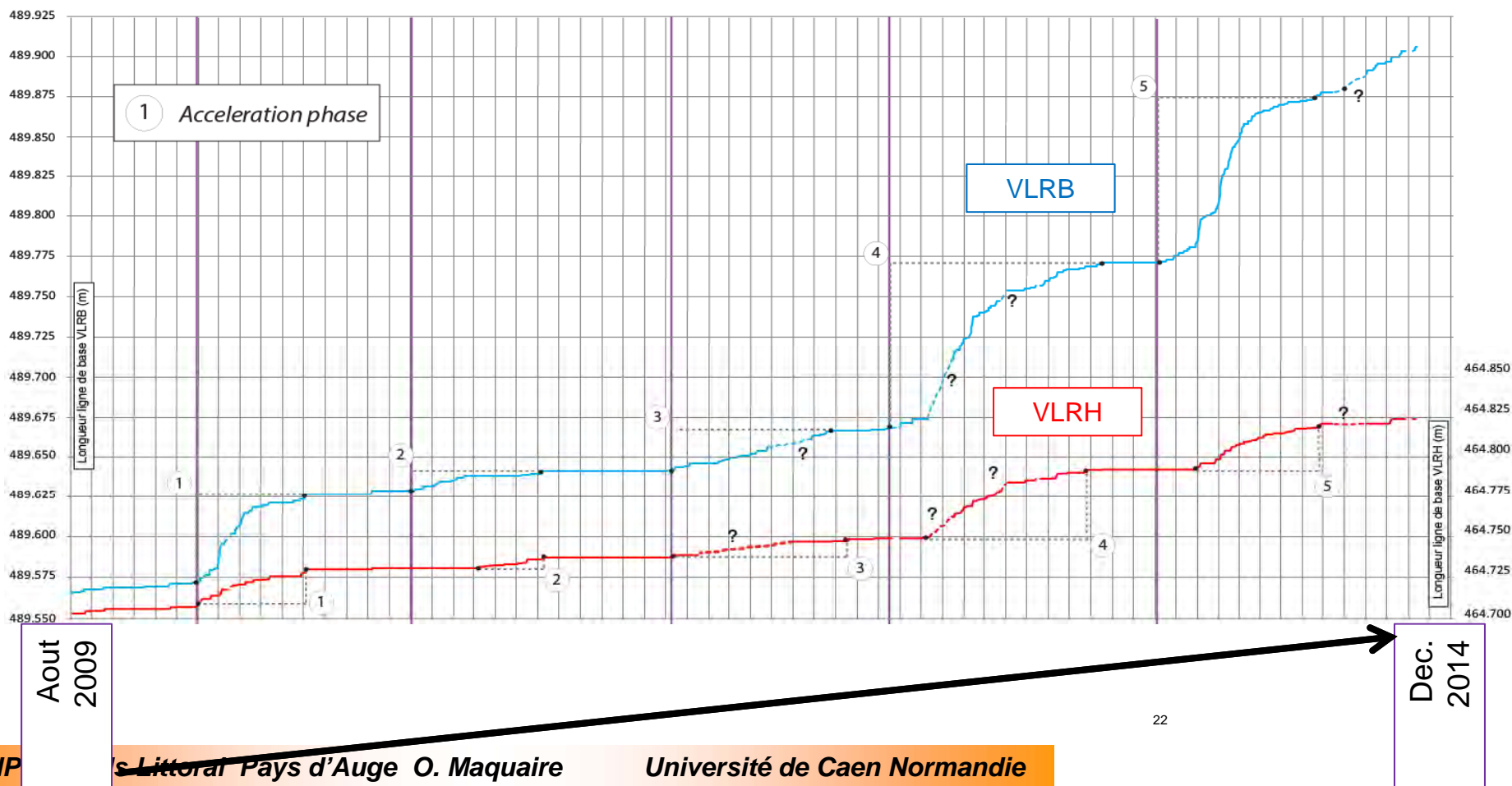
- 3 accélérations majeures (1988, 1995, 2001) avec plusieurs décimètres ou plusieurs mètres de déplacement
- Un 'fluage' continu entre deux 'accélérations' majeures



## ... Comprendre le présent ...

### ➤ *Modèle cinématique du glissement de terrain : hétérogénéités temporelles*

- Le **fluage continu** est confirmé par l'analyse des **données haute résolution**
- Depuis 2009 = **35cm** de déplacements VLRB, **12cm** VLRH
- **Comportement saisonnier** avec phases d'accélération ( $\neq$  amplitude)
- **Délai** entre stations varie entre 1 et 4 jours pour les différentes phases



# ... Comprendre le présent ...

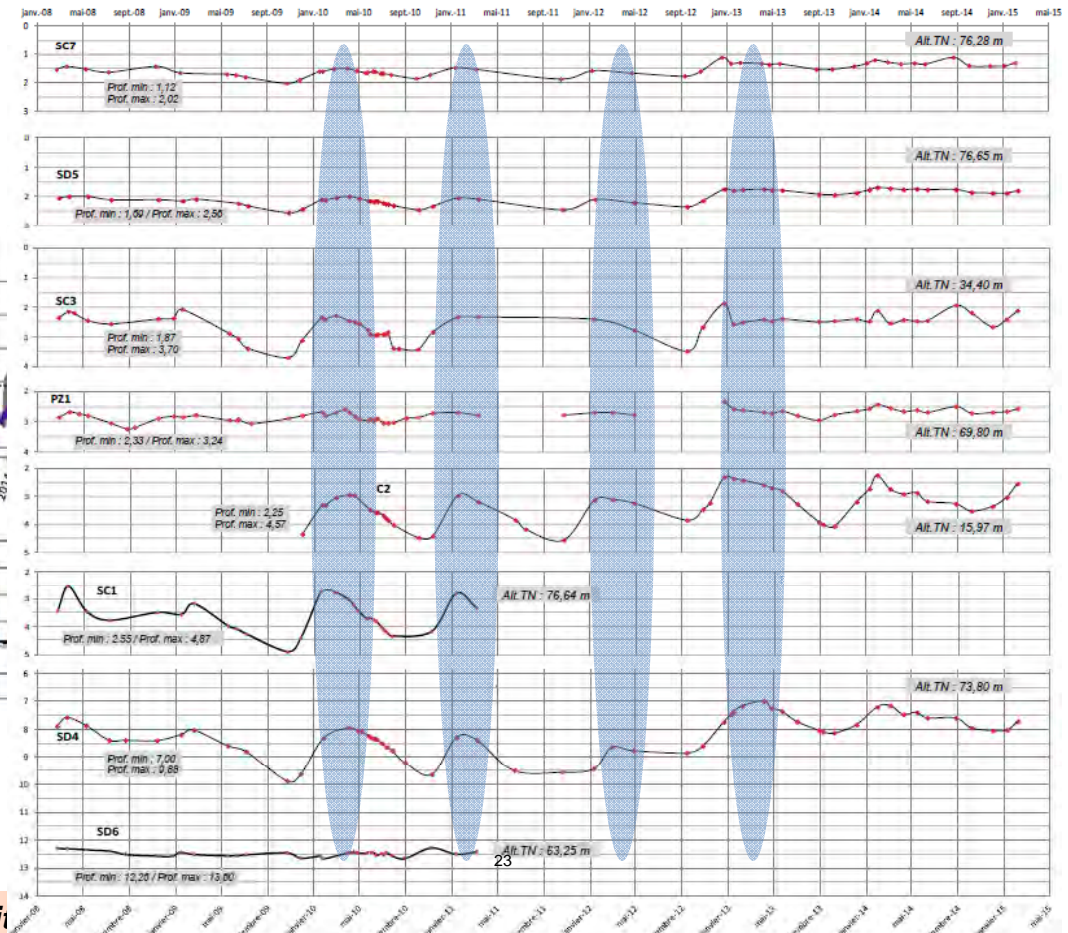
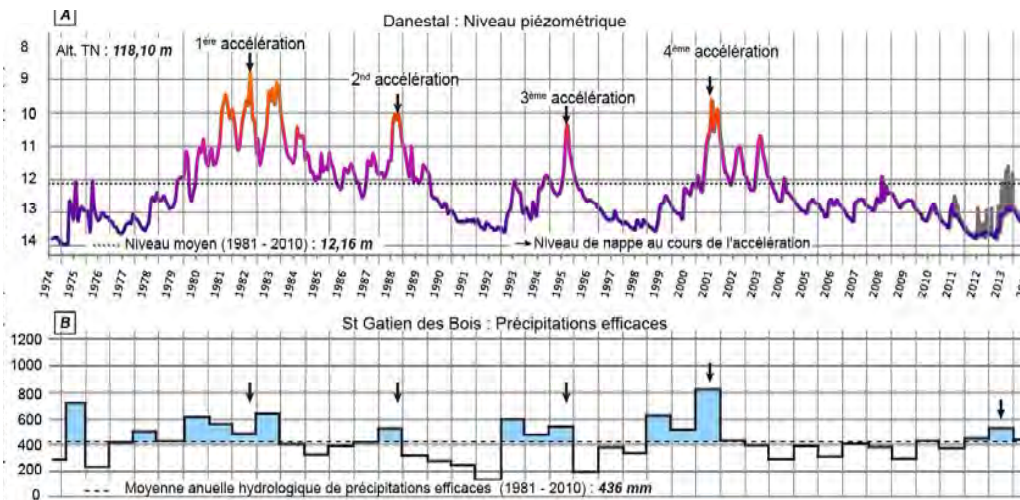
## ➤ Relations *pluviométrie - niveaux piézométriques*

- Périodes de **recharge** de la nappe : 1977-1989, 1992 -1996 and 1998-2002
- Périodes de **drainage**: 3 à 4 ans
- **Comportement saisonnier** du réservoir



Zone en glissement (Janv. 2008-mai 2015)

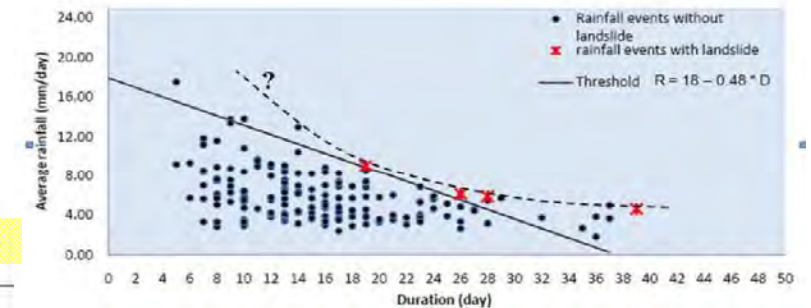
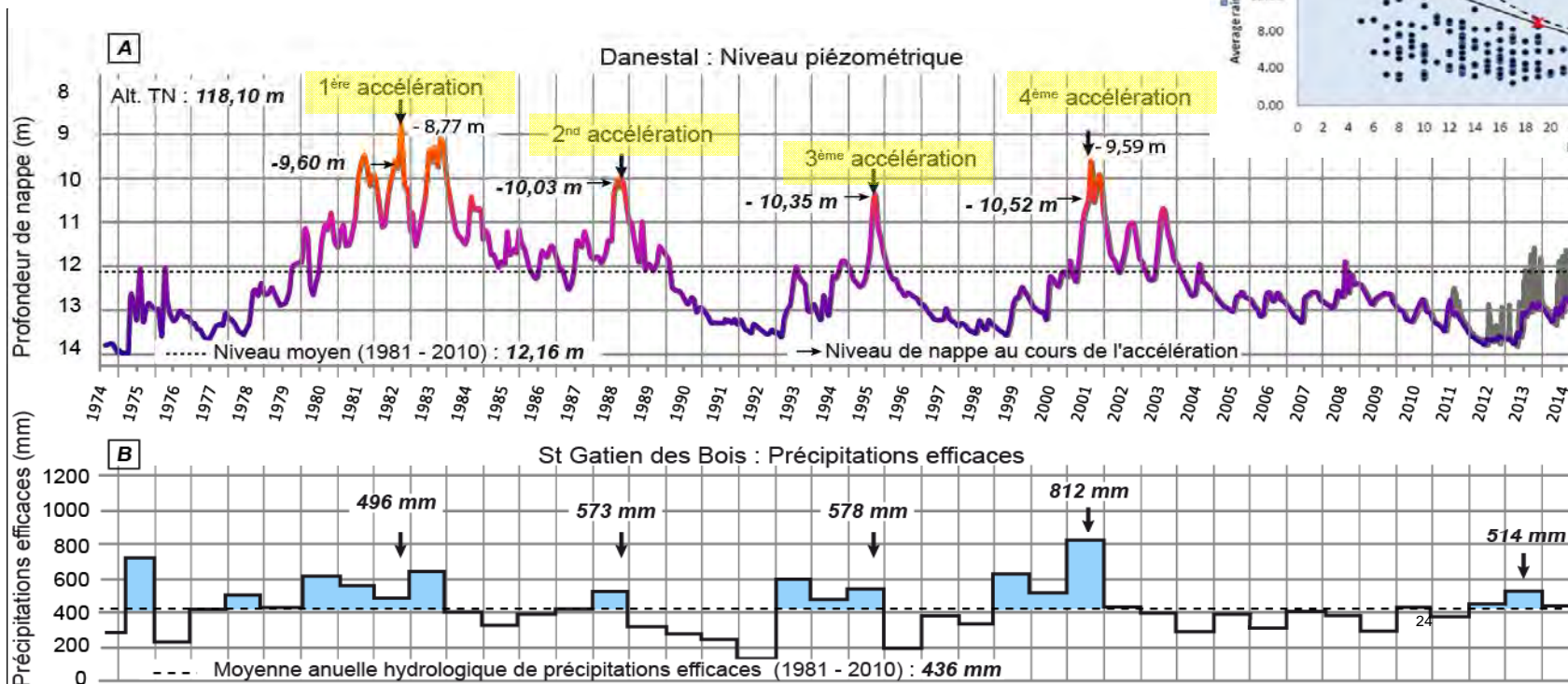
### Plateau (1974-2004)



## ... Comprendre le présent ...

### ➤ *Relations hydrologie - cinématique*

- Seulement 4 accélérations majeures
- Déclenchement-réactivation en **périodes très pluvieuses** avec plusieurs années de **niveaux piézométriques élevés**
- Événement de 1982 = **année hydrologique** (Juillet 1981 - Juin 1982) avec **d'abondantes pluies d'hiver** → Conséquences : nappe de Danestal s'élève > **1.50 m**

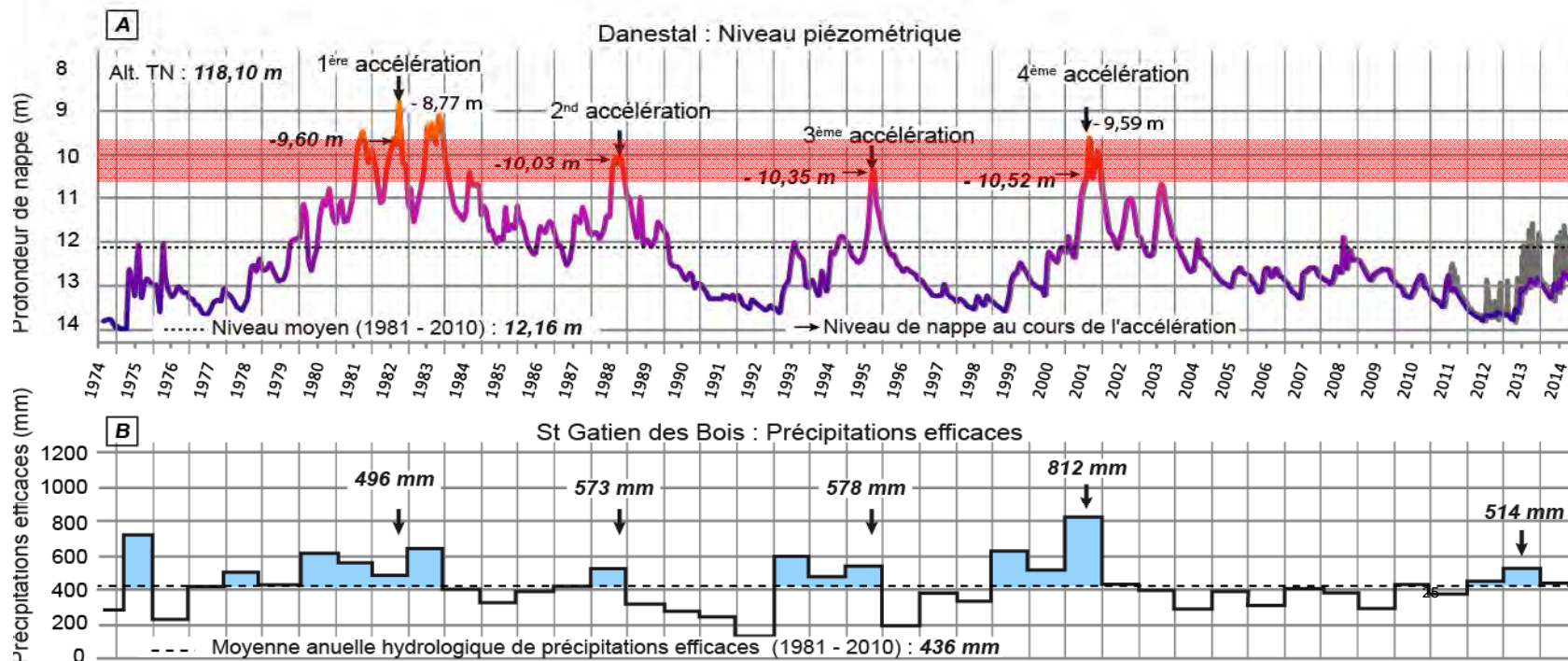


Empirical rainfall duration threshold for Cirque des Graves landslide (Bogaard et al.2011)

## ... Comprendre le présent ...

### ➤ *Relations hydrologie - cinématique*

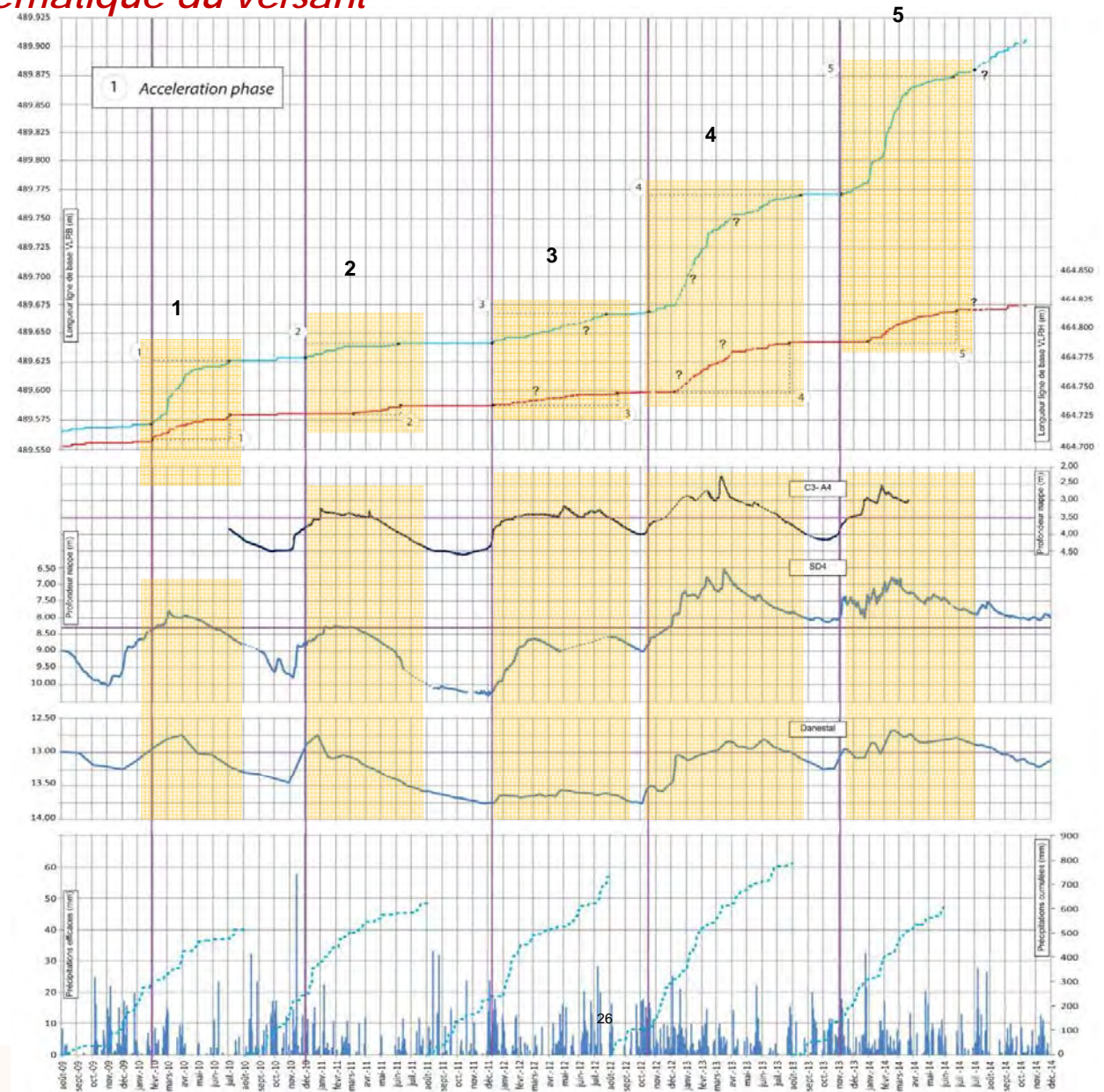
- Seulement 4 accélérations majeures
- Déclenchement-réactivation en périodes très pluvieuses avec plusieurs années de niveaux piézométriques élevés
- Événement de 1982 = année hydrologique (Juillet 1981 - Juin 1982) avec d'abondantes pluies d'hiver → Conséquences : nappe de Danestal s'élève >1.50 m
- Seuil critique 'régional' entre -10.35-9.60 m



## ... Comprendre le présent ...

### ➤ Relations hydrologie & cinématique du versant

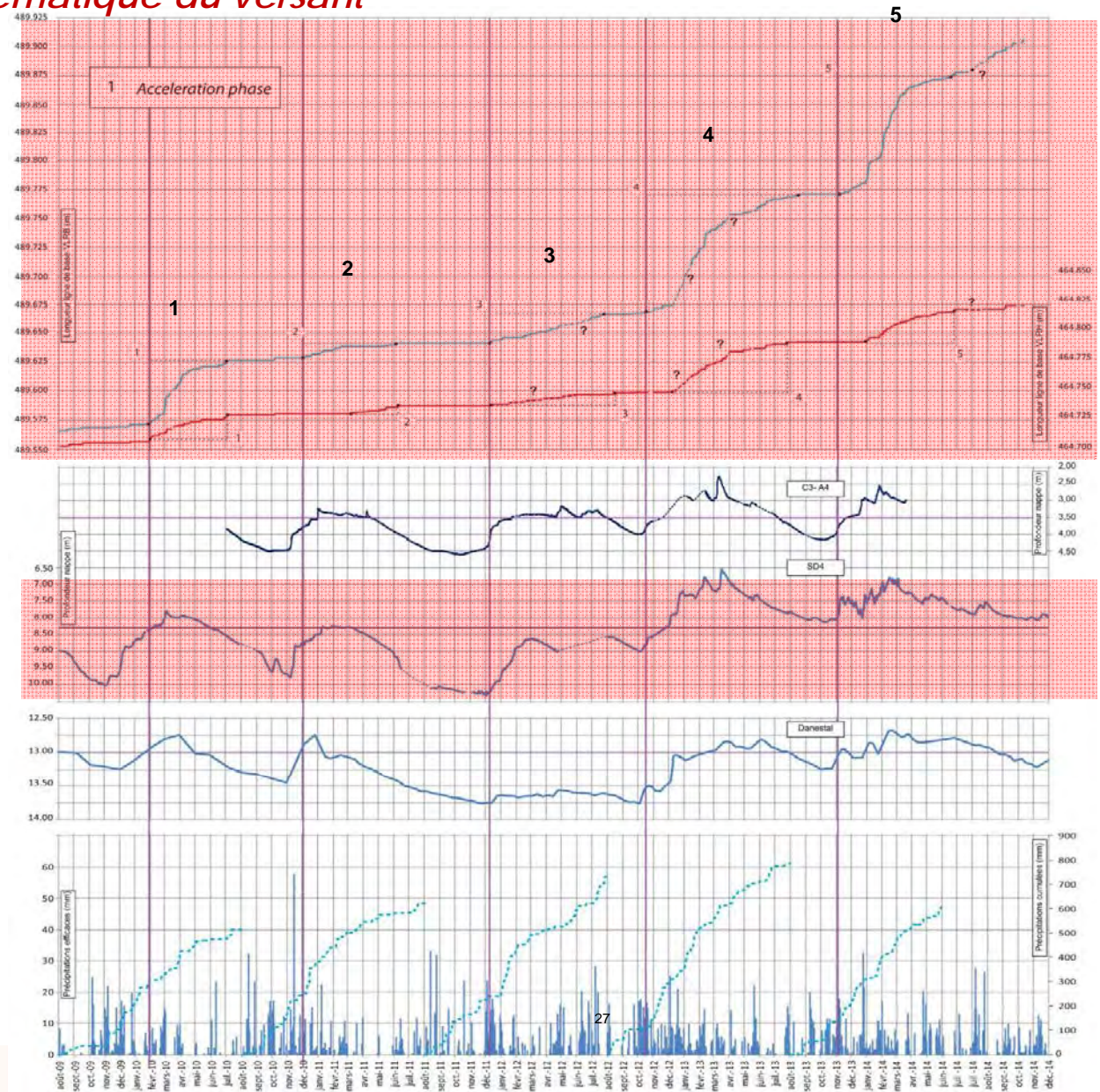
- Comportement **saisonnier** du versant associé à des **recharges saisonnières** de la nappe phréatique
- Y-a-t-il possibilité de définir un niveau critique de nappe (*Critical GW*) par analyse statistique ?



# ... Comprendre le présent ...

## ➤ Relations hydrologie & cinématique du versant

- Focus sur le piézomètre SD4 et les récepteurs GNSS



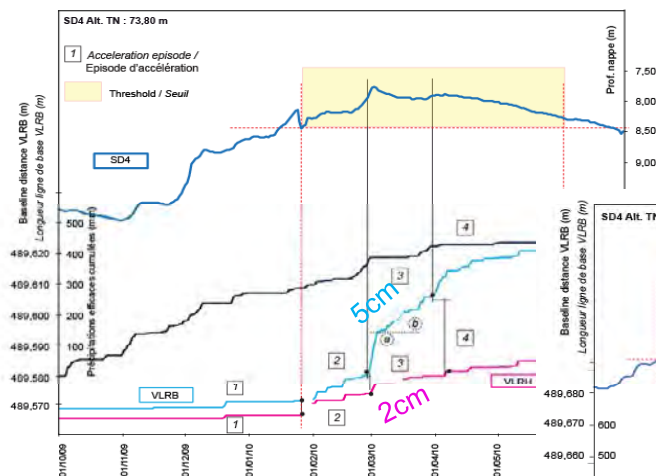
# ... Comprendre le présent ...

## ➤ Relations hydrologie & cinématique du versant

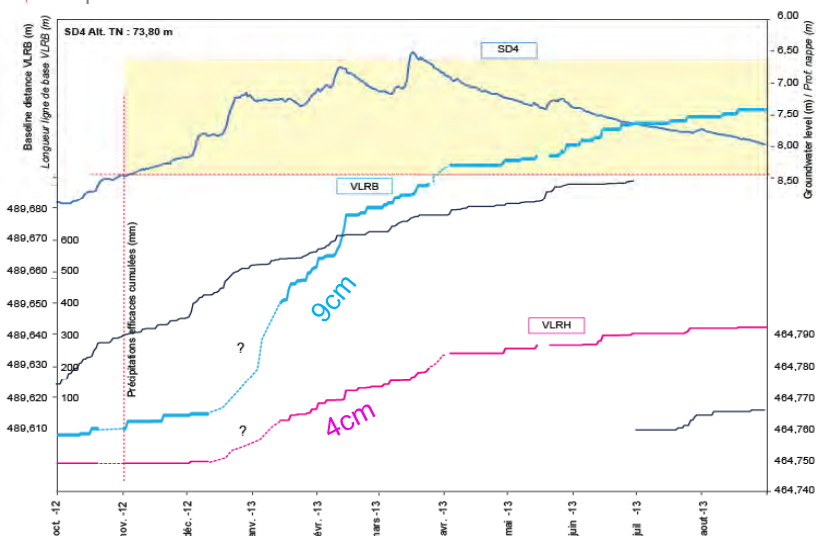
- Focus sur le **piézomètre SD4** et les récepteurs GNSS
- Déplacements augmentent significativement quand le niveau de nappe atteint une profondeur de **8.50 m** (1 & 4) et **8.00 m** (5)

1 – jan 2010

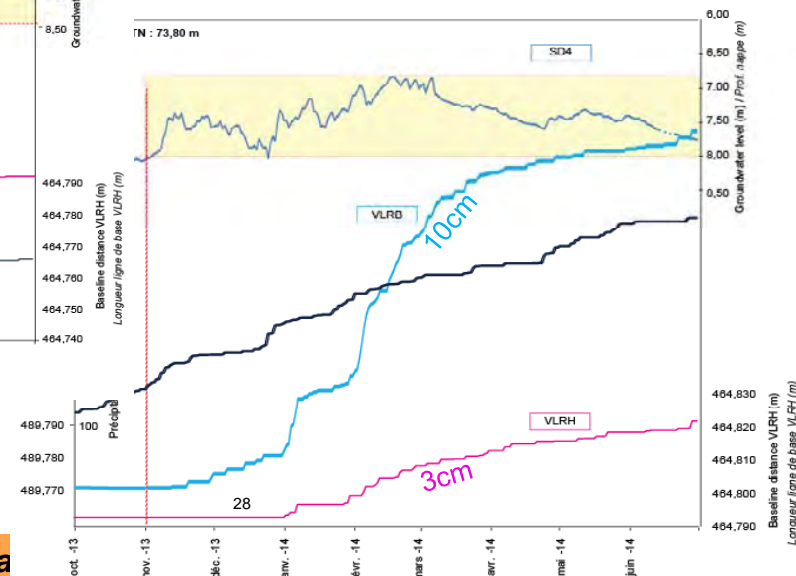
Le versant se stabilise quand la nappe est en dessous de 8 m de profondeur



4 – oct 2012



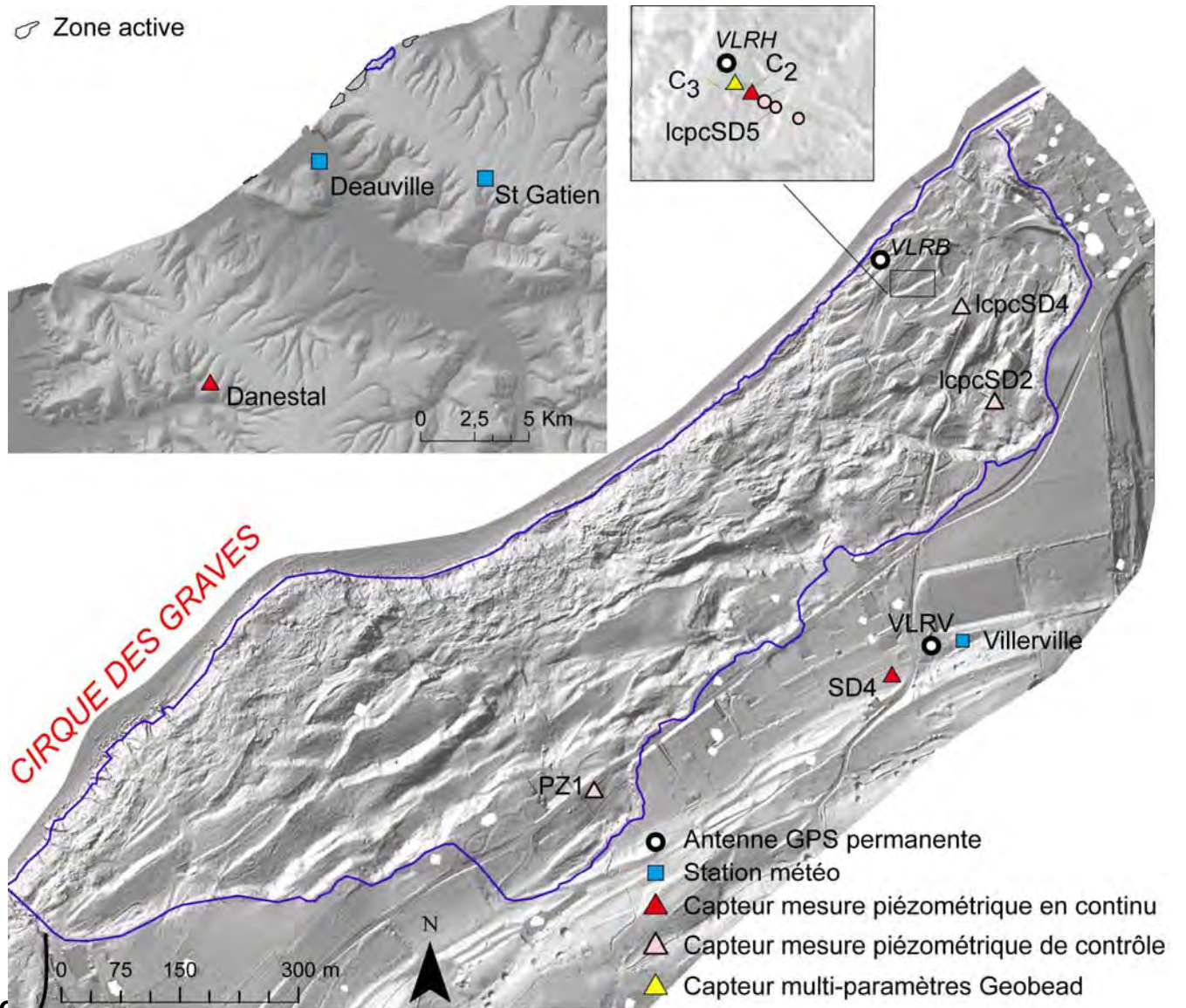
5 – oct 2013



# ... Préparer l'avenir

➤ *Vers un système d'alerte*

➤ **Arbre de décision :**  
approche **régionale**  
(longues séries) et  
**locale** (courtes séries)

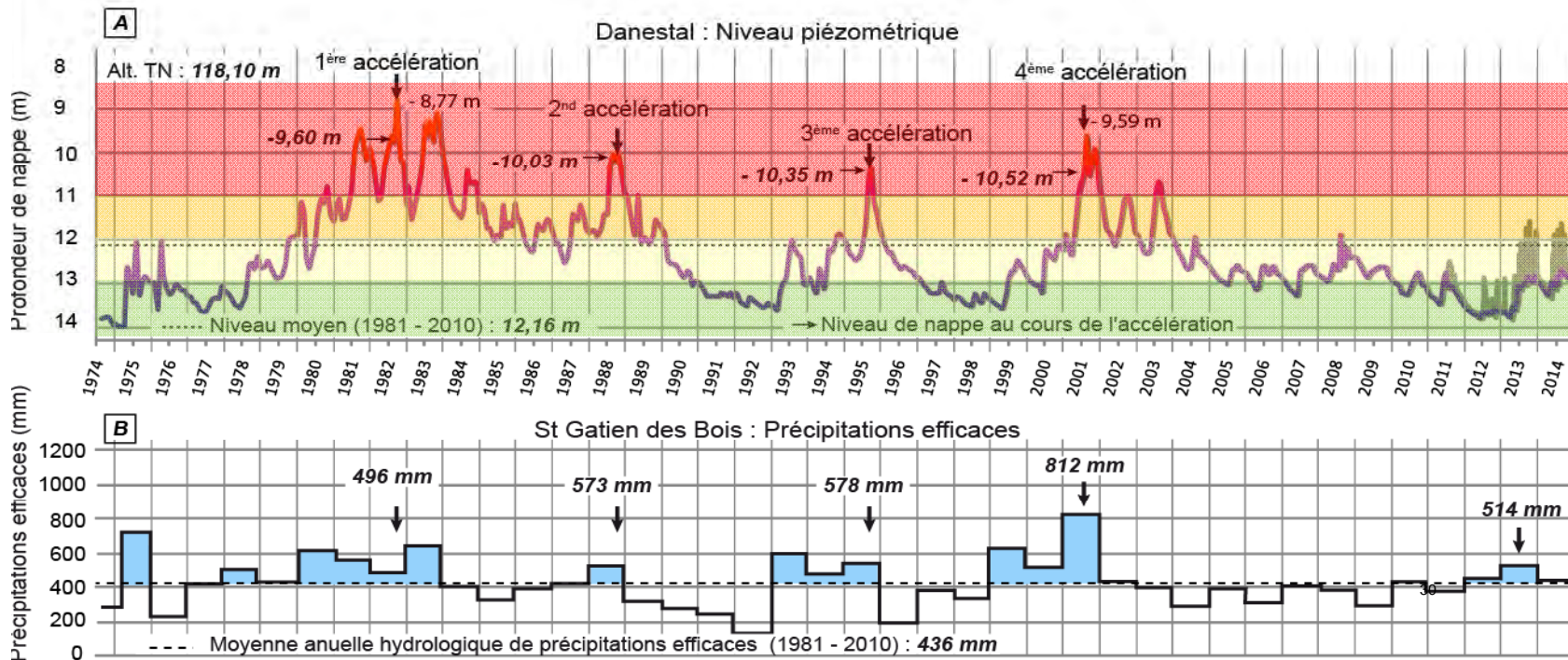


Système de surveillance comprenant des observations 'régionales' et des observations 'locales' sur le versant instable du Cirque des Graves à Villerville.

# ... Préparer l'avenir

## ➤ Vers un système d'alerte

- Seuil critique 'régional' entre -10.35-9.60 m ➔ **Alerte -11m**
- 



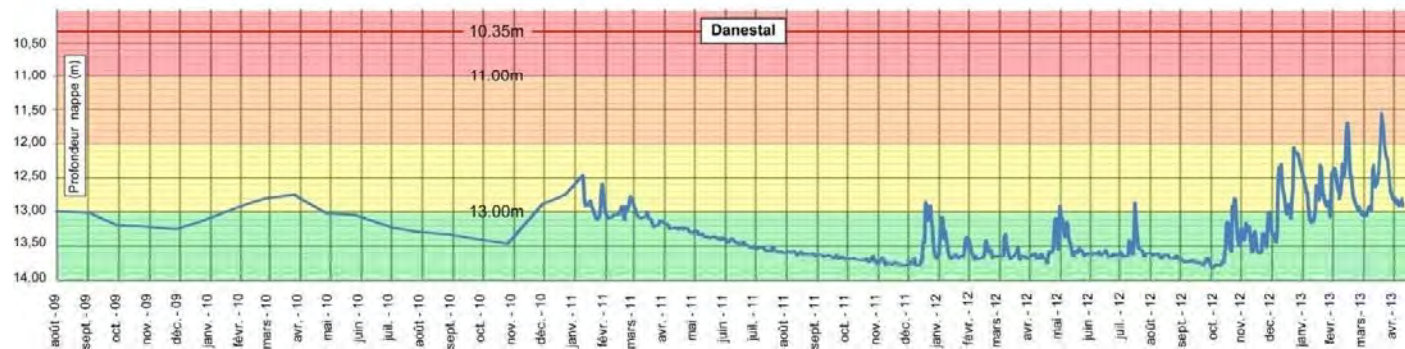
Alerte

Pré-alerte  
Surveillance  
Vigilance

## ... Préparer l'avenir

### ➤ Vers un système d'alerte

- Seuil critique 'régional' entre -10.35-9.60 m → **Alerte -11m**
- Seuil critique 'local' de pré-alerte à -2.00 m (au piézo C3-A4)



## ... Préparer l'avenir

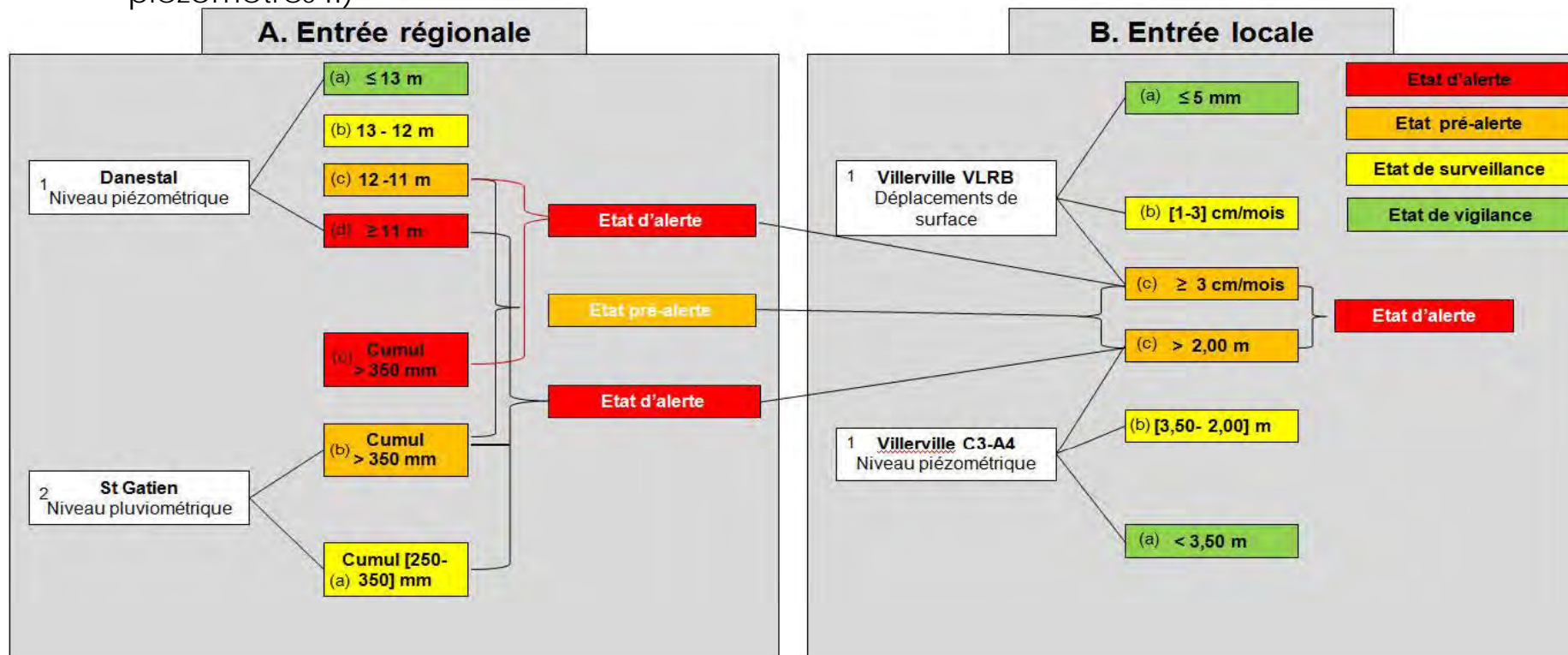
- Système d'alerte basé sur **deux chroniques temporelles de données** :

Analyse du piézomètre de Danestal permet de définir deux seuils 'régionaux' significatifs :

→ une **accélération saisonnière** de faible amplitude = seuil à -13 m

→ une **accélération majeure** de forte amplitude = seuil 10.35 m

En conséquence localement, les **observations in-situ** indiquent que le versant devient instable à partir d'un niveau de nappe de **8.00 /8.50 m en SD4** (seuil à confirmer y compris pour autres piézomètres !!)



Arbre de décision avec deux entrées (régionale et locale) pour le glissement de Villerville

# Connaître le passé pour comprendre le présent et préparer l'avenir

- Un cas typique de glissement profond à commande hydrologique
- **Données historiques + investigation surveillance in-situ** (haute résolution spatiale et temporelle) permettent de montrer :
- évolution régressive du glissement
- Une variabilité spatiale et temporelle des déplacements en relation étroite avec l'évolution des nappes phréatiques
- Stabilité précaire (en l'absence de crises majeures depuis 2001)

→ Soutien d'une politique de suivi long terme, fiable, homogène et précis d'où **l'intérêt des observatoires normalisés pérennisés.**

→  **système de surveillance pouvant être transformé en système d'alerte !**

**Merci pour votre attention**