



Suivi des falaises et versants littoraux en Normandie (France)

Stéphane Costa, Olivier Maquaire, Pauline Letortu, Candide Lissak,
Robert Davidson

LETG-GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, Université de Caen-Basse-Normandie

Avec la collaboration de:

Christophe Delacourt⁽¹⁾, Jean-Philippe Malet⁽²⁾, Hervé Quenol⁽³⁾,
Serge Suanez⁽⁴⁾

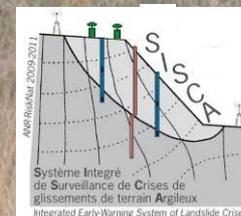
(1) Institut Universitaire Européen de la Mer UMR 6538 Domaines Océaniques, Brest

(2) Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR 7516 CNRS, University of Strasbourg

(3) LETG- COSTEL, UMR 6554 CNRS, Université de Rennes.

(4) LETG- GEOMER, UMR 6554 CNRS, Université Bretagne Occidentale, Brest

Soutien financier :
CG 76, CRHN, CERG,
ANR SISCA, CPER
GR²TC

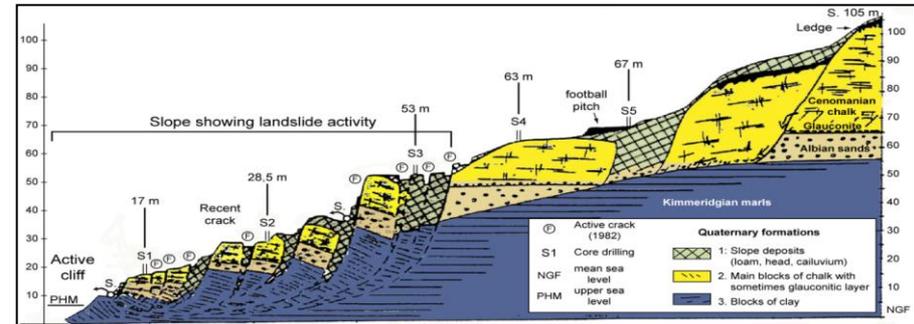


Introduction

Évolution des falaises/versants littoraux :

- Falaise s.s

- Versant 'littoral'



➔ Évolution du pied et du sommet

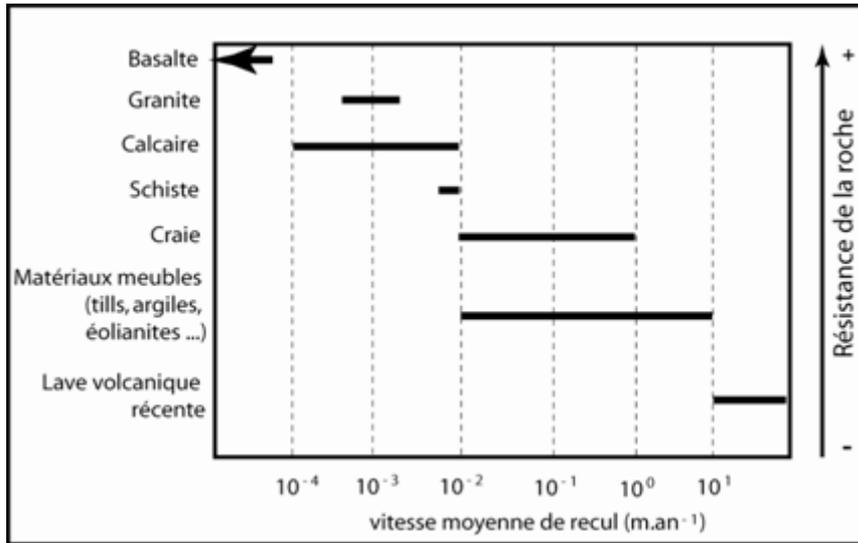
Introduction

Évolution des falaises/versants littoraux :

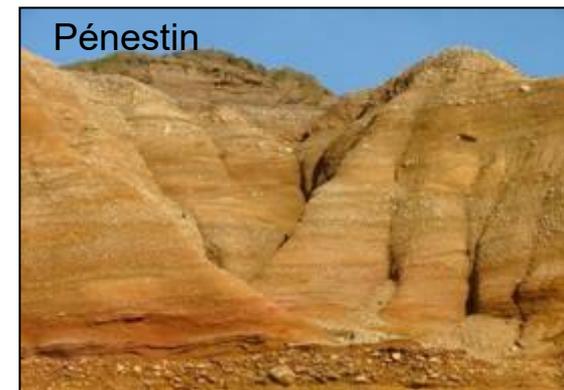
- érosion continue mais recul par à coups ;
- recul sur pas de temps long : **érosion en pied** pendant 10,20, 30, 50 ans) puis un jour **événement majeur brusque** i.e. 'crise' (chutes de blocs, éboulements, écroulements, effondrements, glissements, ...)
- recul '**proportionnel**' aux matériaux en présence (nature, résistance, épaisseur, disposition, structure, ...) et au contexte climatique ;

Introduction

- Recul **'proportionnel'** aux matériaux en présence



Vitesses de recul des falaises



Introduction

Évolution des falaises/versants littoraux :

- érosion continue mais recul par à coups ;
- recul sur pas de temps long : **érosion en pied** pendant 10,20, 30, 50 ans) puis un jour **événement majeur brusque** i.e. 'crise' (chutes de blocs, éboulements, écroulements, effondrements, glissements, ...)
- recul '**proportionnel**' aux matériaux en présence (nature, résistance, épaisseur, disposition, structure, ...) et au contexte climatique ;
- résultat d'une **combinaison de facteurs préparatoires, de prédisposition et déclenchants** (marins et sub aériens ou continentaux).

Introduction

- **identification des facteurs préparatoires (et prédisposition) & déclenchants**

Versant 'littoral' est sous l'influence de **plusieurs processus**.

Processus marins : houles (direction, hauteur, ...), marées, tempêtes, courants, ...

Processus sub-aériens (ou continentaux) : météorisation (précipitations, , gel-dégel, ...), infiltration, ruissellement, hydrologie (variations nappes phréatiques), ...

Activités anthropiques : excavation, modification de l'occupation/usage du sol, urbanisation, drainage, ...

Facteurs préparatoires (et prédisposition) : topographie, lithologie, structure, occupation/usage du sol ... → **susceptibilité à tel ou tel phénomènes**

Facteurs déclenchants : **conditions climatiques** (précipitations, t°, ...), **érosion marine**, séismes, actions anthropiques,;

- **Évaluation du rôle de chaque facteur** par le calcul d'un **coefficient (facteur) de sécurité Fs**.

Le versant est stable quand les **forces résistantes** sont supérieures ou égales aux **forces motrices** (forces déstabilisatrices). Le rapport entre forces résistantes & forces motrices correspond au facteur de sécurité Fs.

→ Facteur de sécurité évolue dans le temps selon l'influence de chaque facteur.

Introduction

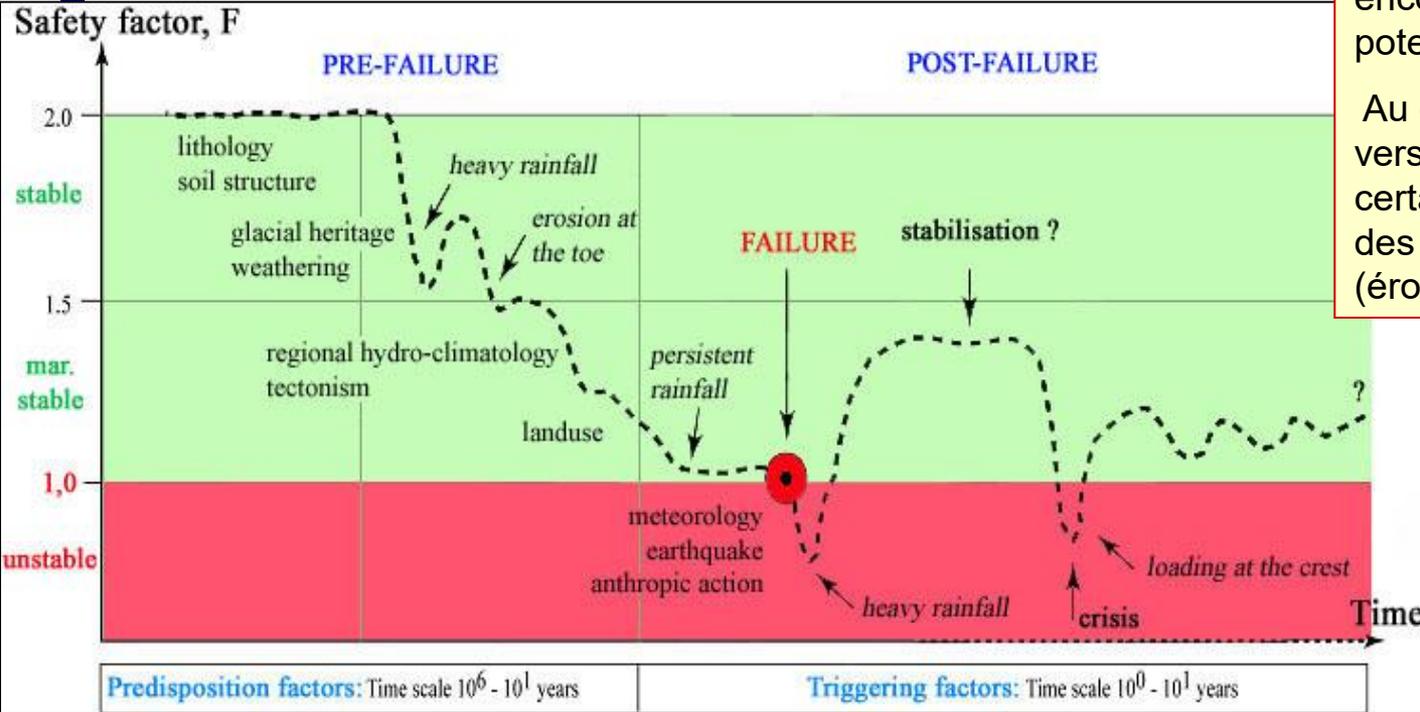
- Évaluation du rôle de chaque facteur (**facteur de sécurité F**).

→ **Stabilité des versants** (modélisation mécomécanique)

Évolution future du versant littoral dépend de la valeur 'actuelle' du coefficient de sécurité:

Très proche de 1, le versant est encore 'stable' mais potentiellement 'instable'.

Au contraire, si $F > 2-3$, le versant sera stable pendant un certain 'temps' suivant l'action des facteurs déclenchants (érosion en pied de versant, ...)



Évolution du facteur de sécurité selon le temps - influence des facteurs de prédisposition et déclenchants sur l'instabilité (d'après van Asch *et al.*, 2007)

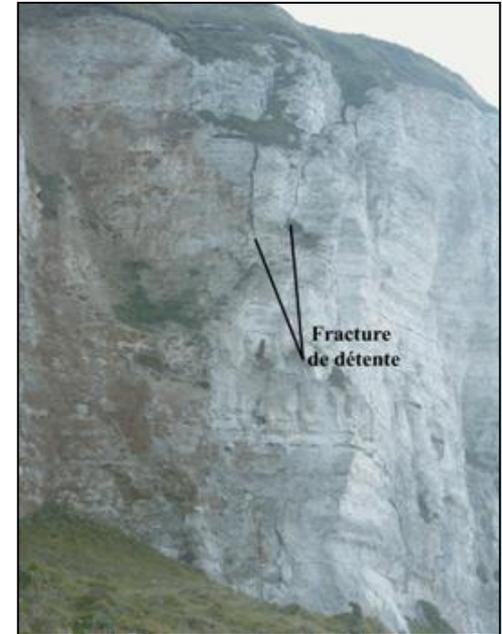
Instabilité dépend d'une combinaison de ces facteurs. Les facteurs de prédisposition changes progressivement au cours du temps alors que les facteurs déclenchants varient fortement..

Pour les falaises et les versants 'littoraux', **influence majeure des variations de nappes phréatiques** (en relation avec précipitations) et de **l'érosion marine** en pied.

Ces deux facteurs principaux doivent être analysés selon les **scénarios de changement climatique**.

Introduction

- Combinaison de facteurs marins et subaériens (ou continentaux)



Introduction

- **Combinaison de facteurs marins et subaériens (ou continentaux)**
Facteurs et processus responsables du recul



Vue latérale de l'évolution d'une encoche de sapement



(a)

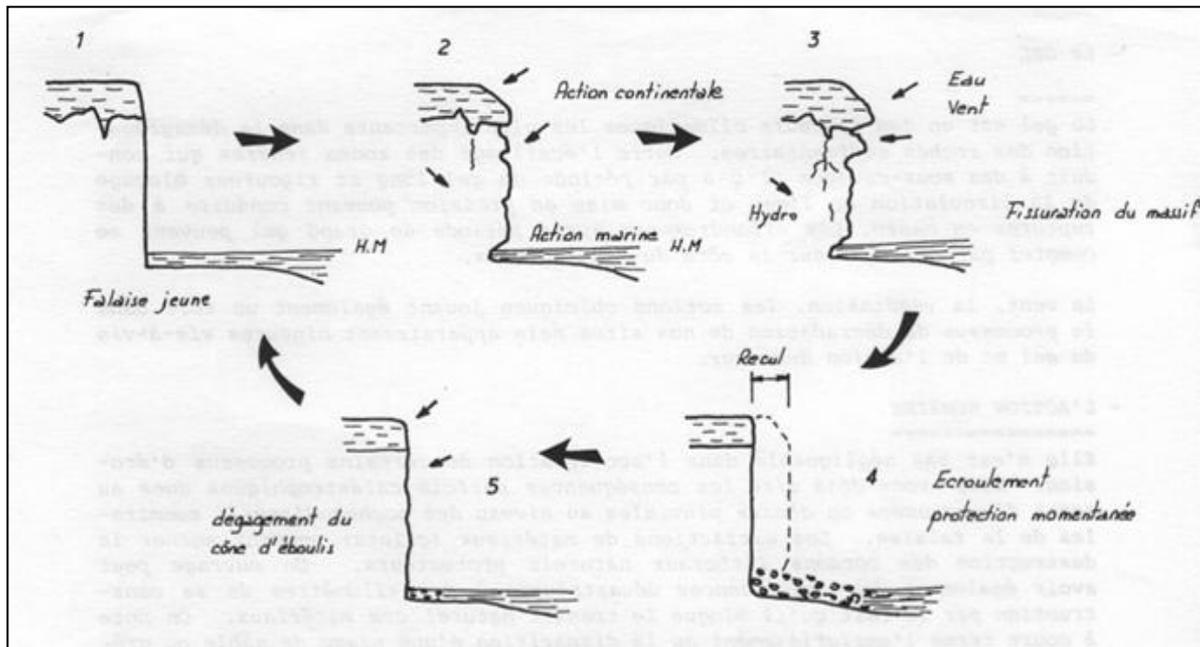
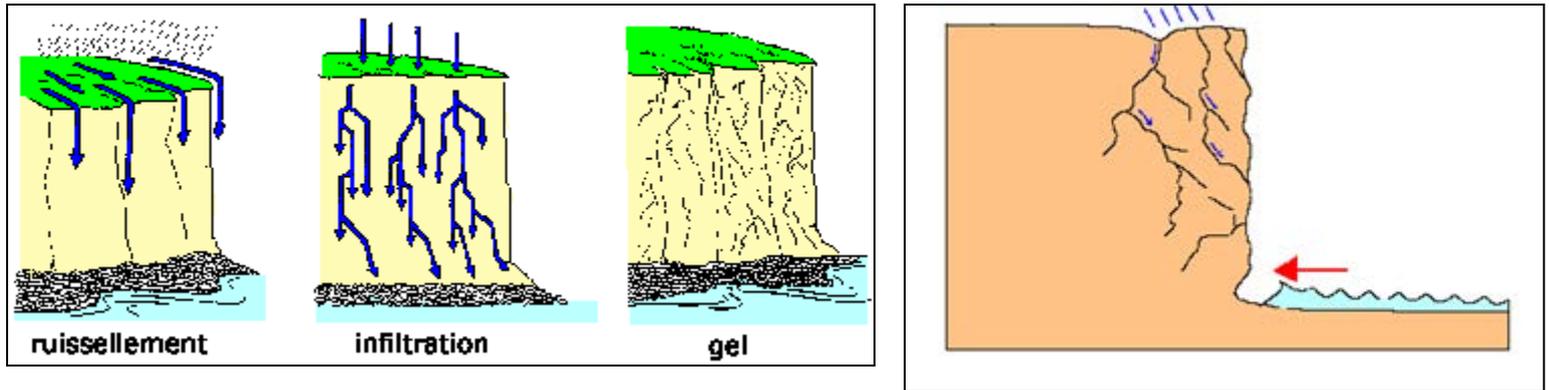
(b)

(c)

Vue de face du cycle d'évolution d'une falaise
(encoche, effondrement, déblaiement)

Introduction

- Combinaison de facteurs marins et subaériens (ou continentaux)



'Cycle' d'évolution des falaises

Introduction

Évolution des falaises/versants littoraux :

- érosion continue mais recul par à coups ;
- recul sur pas de temps long : **érosion en pied** pendant 10,20, 30, 50 ans) puis un jour **événement majeur brusque** i.e. 'crise' (chutes de blocs, éboulements, écroulements, effondrements, glissements, ...)
- recul '**proportionnel**' aux matériaux en présence (nature, résistance, épaisseur, disposition, structure, ...) et au contexte climatique ;
- résultat d'une **combinaison de facteurs préparatoires, de prédisposition et déclenchants** (marins et sub aériens ou continentaux)

→ Difficulté de prévoir **où** et **quand** les '**mouvements brusques**' vont se produire, mais c'est l'objectif !

→ pour cela, Évolution le passé, pour comprendre le présent afin de prévoir l'avenir

Plan

1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

2.3. Suivi topographique (station totale & GPS)

2.4. Synthèse

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance

3.2. Résultats :

- Vers une hiérarchisation des processus responsables
- Vers une définition des seuils au-delà desquels il y a mouvements
- Vers un système d'alerte

4. Conclusion

1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

- **Nombreux mouvements de terrain impliquant un recul du trait de côte**

- Effondrements dans matériaux résistants (craie)



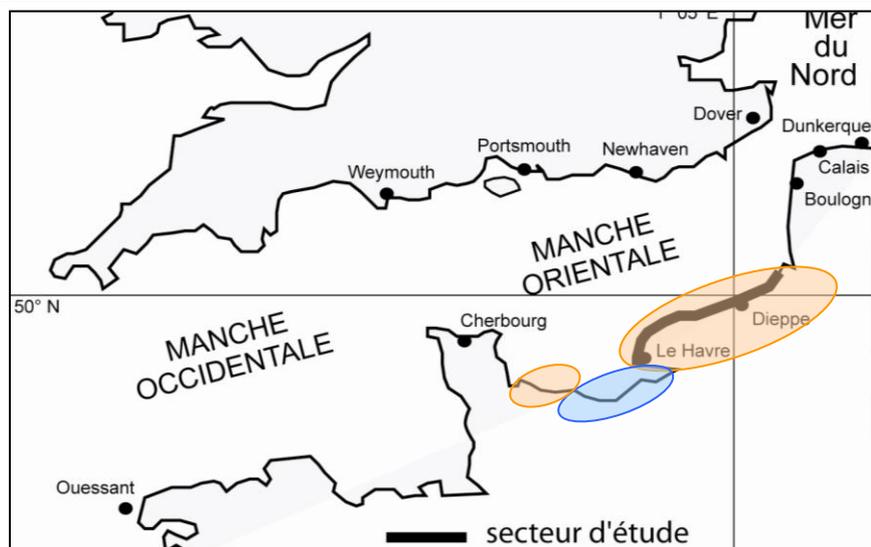
- Glissements et coulées boueuses dans les argiles et marnes



- Des aléas aux conséquences 'importantes' dans les zones urbanisées et à fort potentiel environnemental (problème de gestion des risques)



1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité



-  'Effondrements' dans roches résistantes
-  Glissements & coulées dans roches 'tendres'

Principaux programmes de recherches et soutien :

- Interreg II – BERM 'Beach Erosion of the Rives Manche'
- Interreg II – BAR 'Beaches at Risk'
- CG 76, CR H-N, CERG, ANR 'SISCA', CPER GR²TC



EBOULEMENT



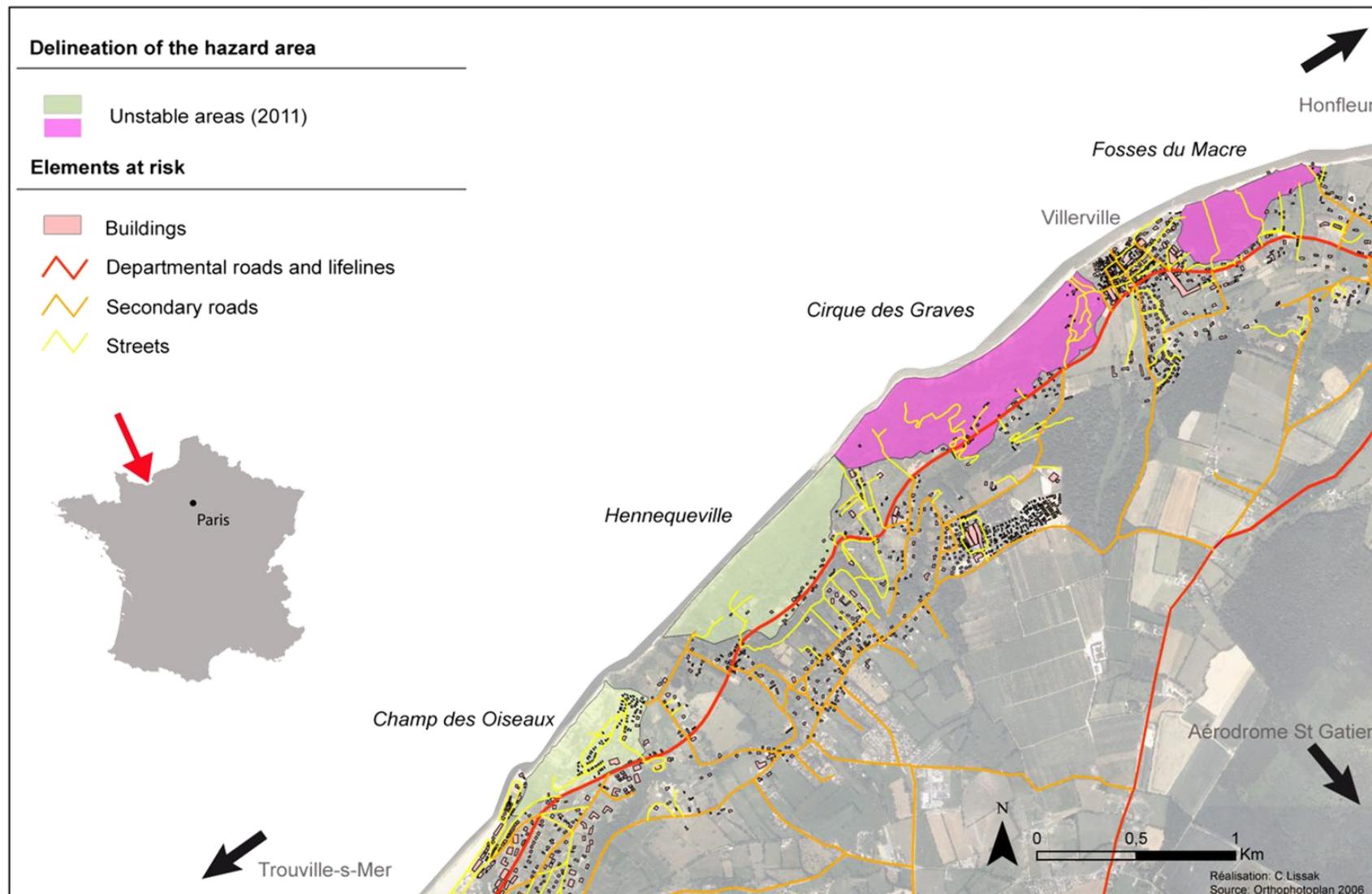
CHUTE DE BLOCS



ECROULEMENT

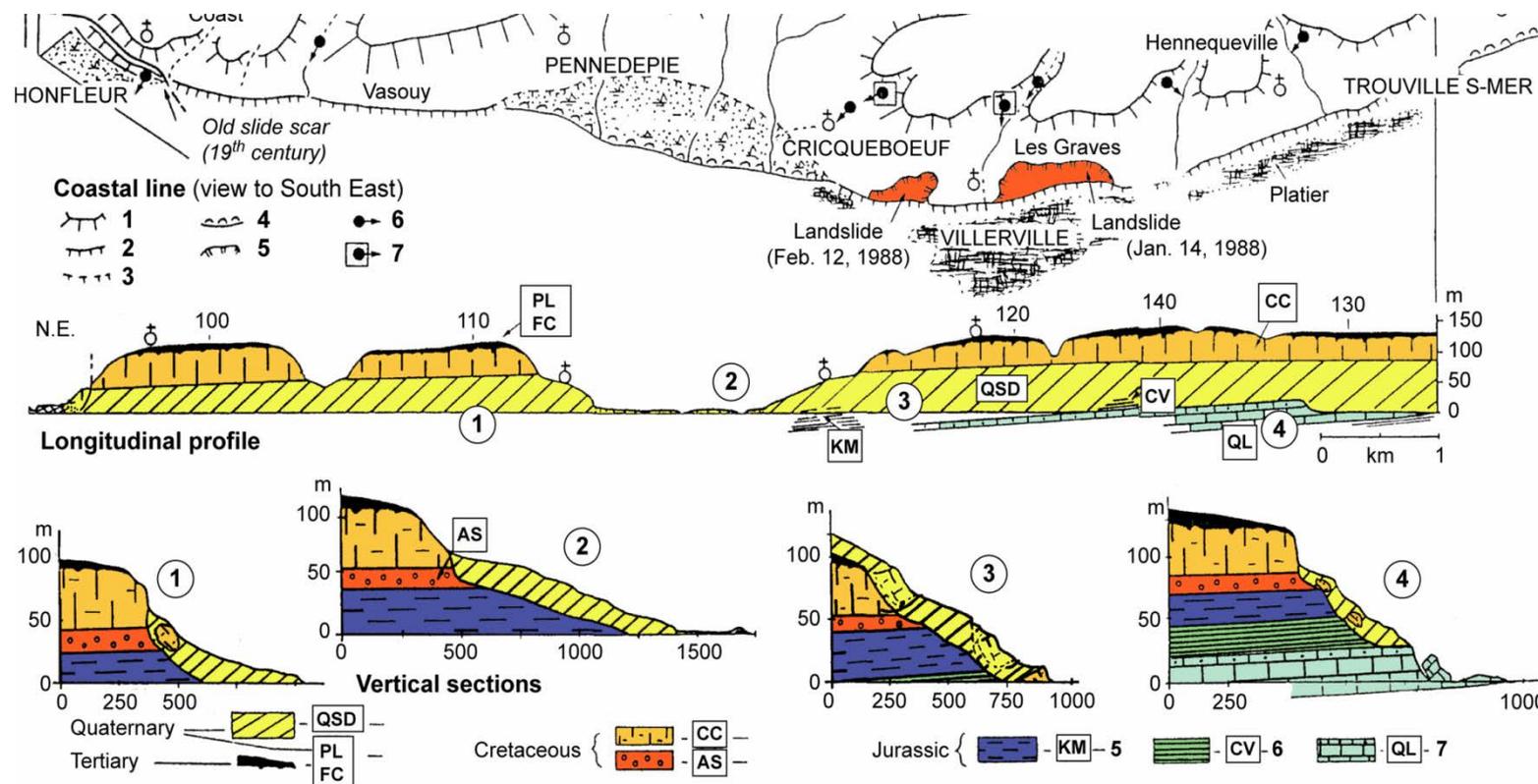
1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

versant 'littoral' du Pays d'Auge : glissement de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)



1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

versant 'littoral' du Pays d'Auge : glissement de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)



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.

Plan

1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

2.3. Suivi topographique (station totale & GPS)

2.4. Synthèse

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance

3.2. Résultats :

- Vers une hiérarchisation des processus responsables
- Vers une définition des seuils au-delà desquels il y a mouvements
- Vers un système d'alerte

4. Conclusion

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

- Question : qu'est ce que l'on mesure ?



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...

- **Intérêt :**

- Document dit Napoléonien datant du 19^{ème} siècle
- Grande échelle (1 000 ou 2 500^{ème})
- Document réactualisé jusqu'à nos jours

- **Toutefois :**

- n'expriment que la limite des parcelles imposables, qui seules, sont parfaitement cartographiées d'un document à l'autre. Par conséquent, le bon calage de ces parcelles est logique.
- rien n'assure, la position exacte de abrupt, par conséquent, on ne peut garantir la véracité de la mesure.

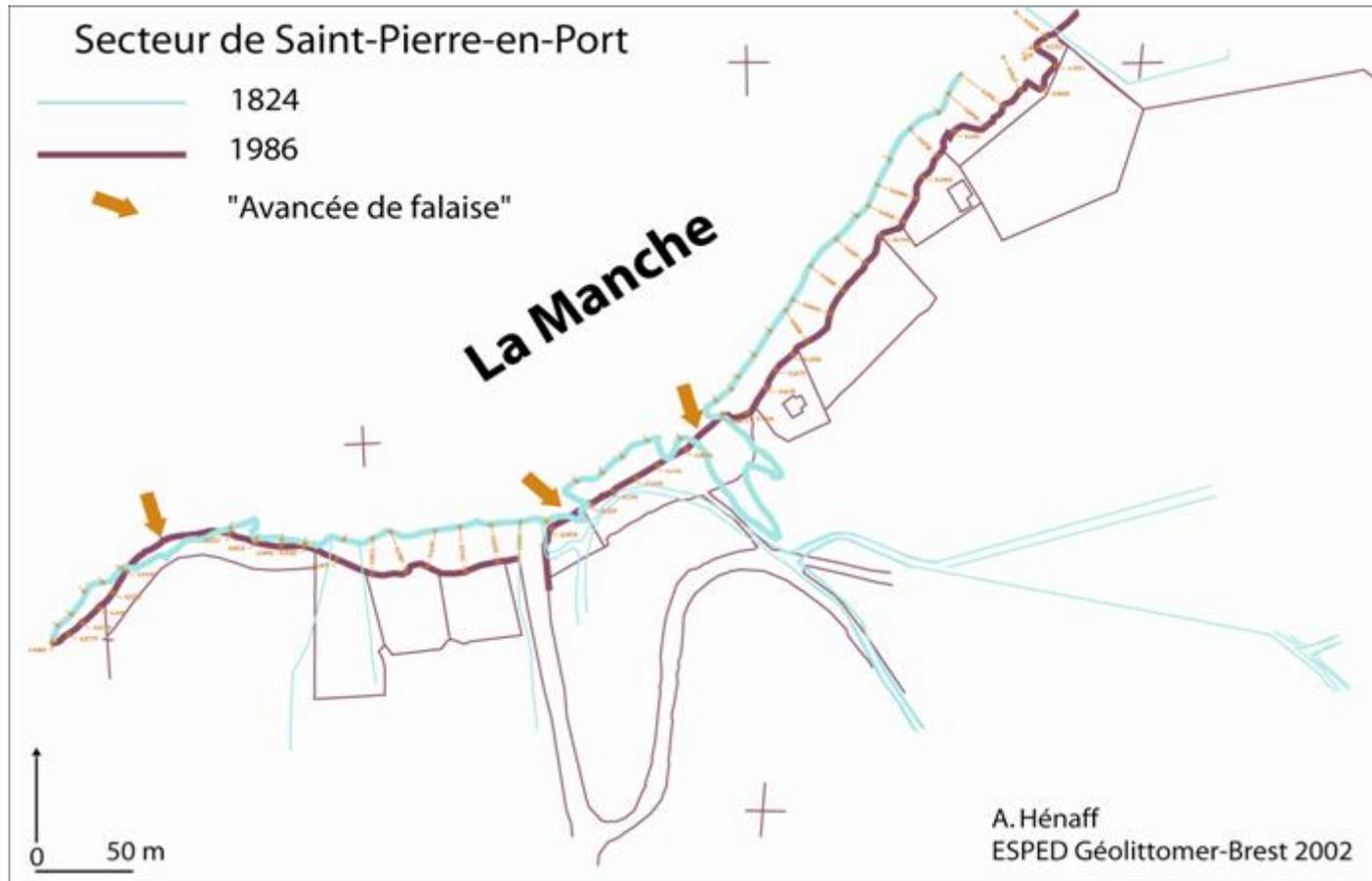


Extrait cadastre 1829, Villerville, Calvados

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...

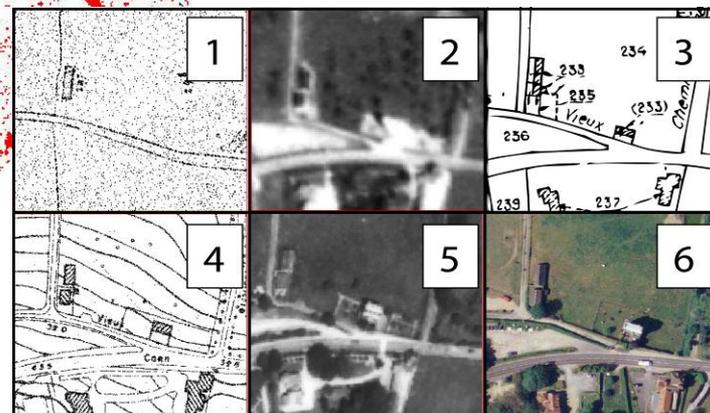
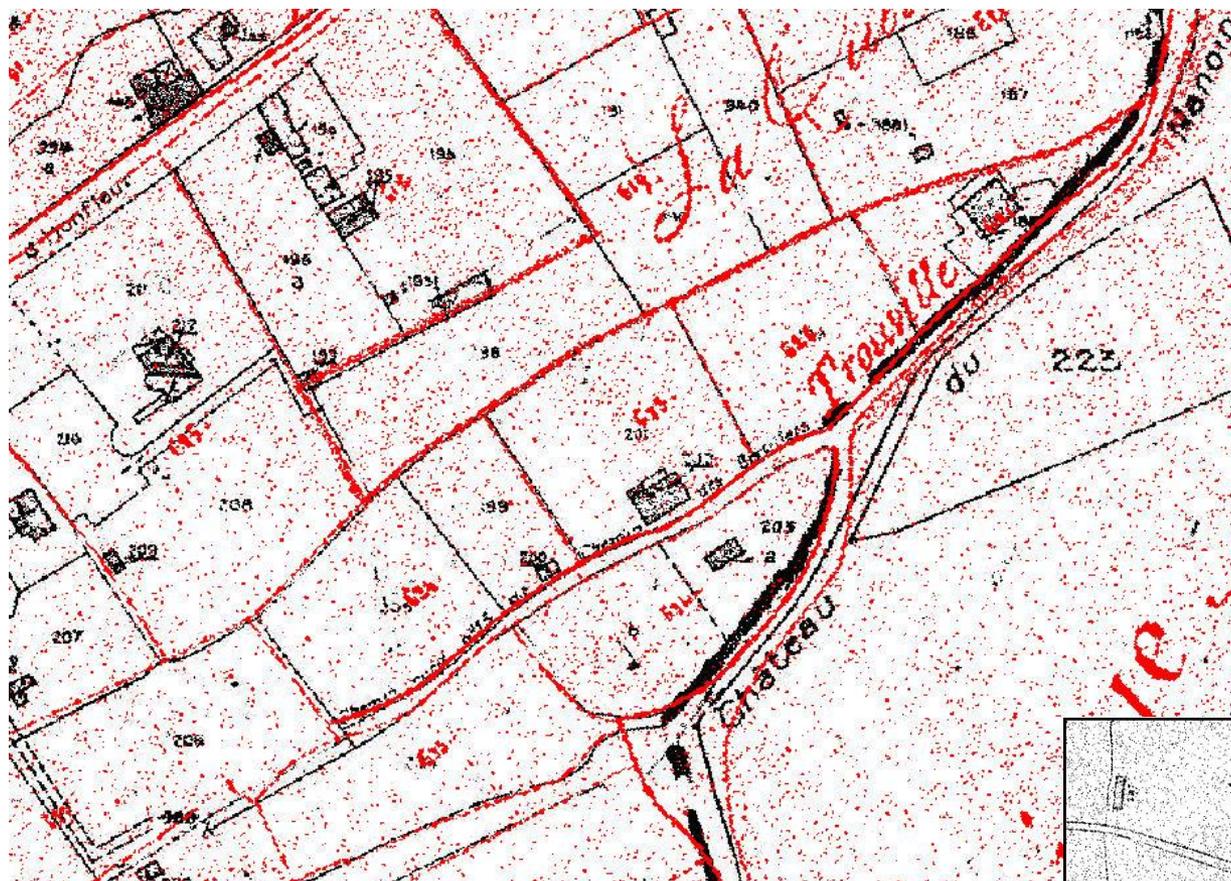
Exemples de comparaison des feuilles cadastrales à St. Pierre en Port (Seine-Maritime) Programme ESPED, 2002.



Localement les falaises avancent !!!

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

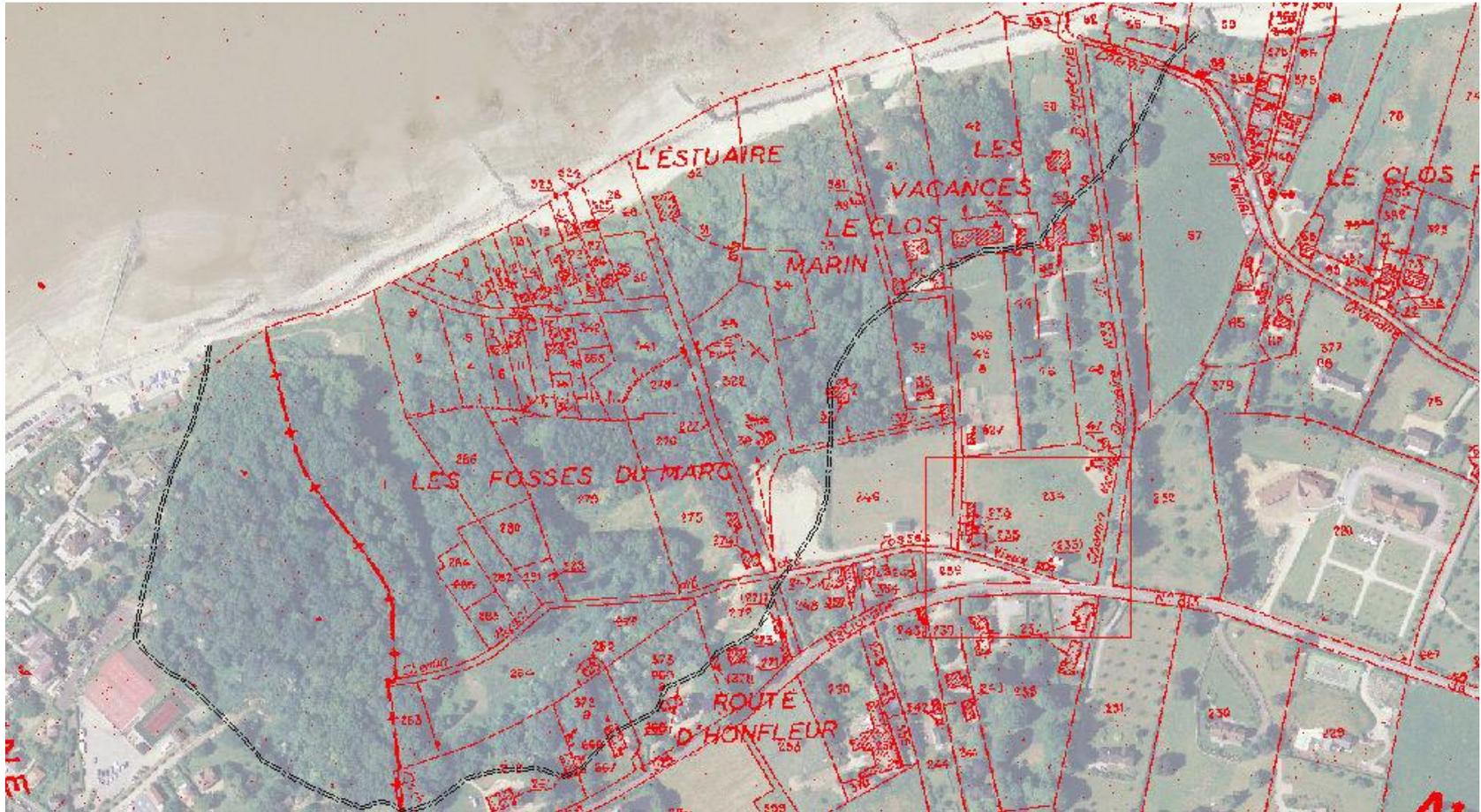
2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...



Comparaison cadastres 1829 et 1960 (versant littoral de Villerville, Calvados)

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...



Superposition et comparaison cadastres 1961 et orthophoto 2006
(versant littoral de Cricqueboeuf, Calvados)

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

- **Intérêts :**
 - Existence de documents datant de 1939, voire 1911.
 - Couverture complète et en stéréoscopie
 - Couverture à intervalle presque régulier (tous les 5 à 7 ans)
+ quelques couvertures liées à des demandes particulières
- **limites :**
 - Petitesse des échelles (20 ou 30 000^{ième})
 - Problèmes de parallaxe entre l'avion et l'objet géographique observé
 - Distorsion d'échelle de la photographie
 - La qualité même des photos

→ Photo-interprétation

→ Photo-grammétrie

illusoire de vouloir cartographier l'ensemble du trait de côte de chaque mission, de les comparer, et de quantifier les modifications de détail.

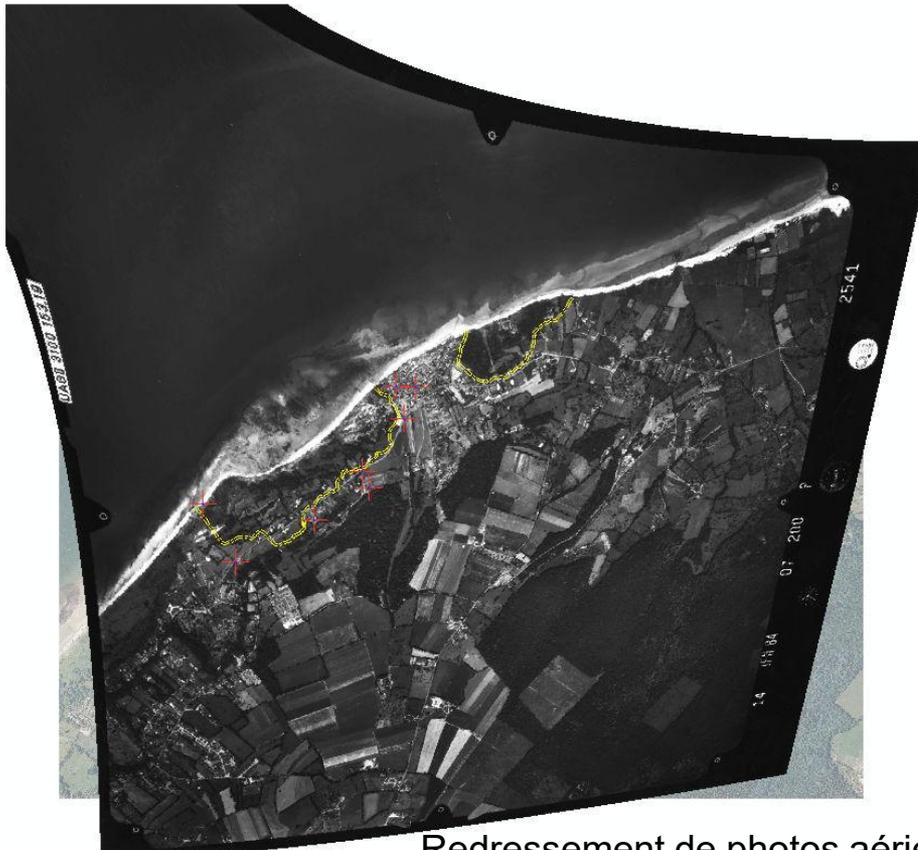


2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : **aériennes (IGN)**, Satellitaire, Laser scan

Aériennes (IGN) : problème de déformation → nécessiter de rectifier/redresser et géoréférencer les images

Limites : ombrage et résolution : donc marge d'erreur importante



Redressement de photos aériennes (Villerville, Calvados). Problème points d'amer en 'mer'



Superposition de plusieurs photos aériennes (Villerville, Calvados)

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

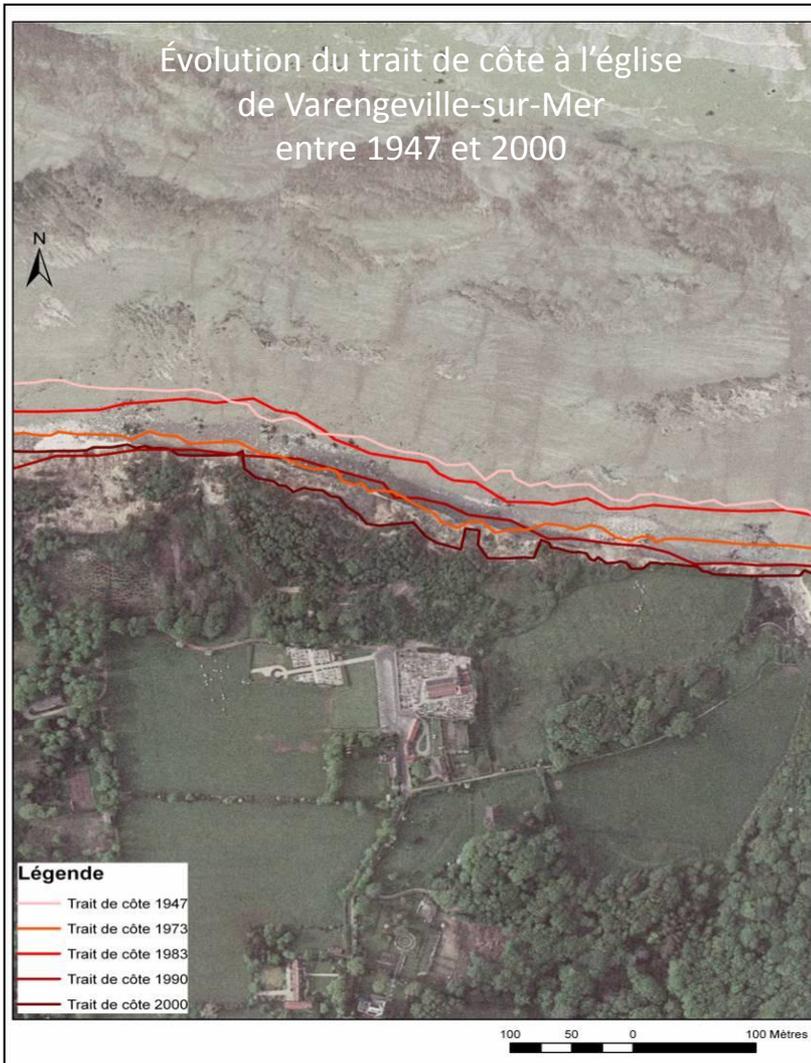


Figure : Évolution du trait de côte à l'église de Varengueville-sur-Mer entre 1947 et 2000

Photo-interprétation

Secteur	Guibout et Letortu (2011)	CPIBP (2000)
	Photographies aériennes (1939-2000) (1947-2000)	Données photogrammétriques (1966-1995)
Quiberville-Pourville	37,6 cm/an	33,3 cm/an
Pourville-Dieppe	40,3 cm/an	31,4 cm/an
Dieppe-Puys	29 cm/an	17,6 cm/an
Puys-Penly	27 cm/an	16,6 cm/an
Penly-Criel	30 cm/an	28,1 cm/an

Tableau : Comparaison des vitesses de recul

Ordres de grandeur dont la marge d'erreur est estimée à ± 7 m

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

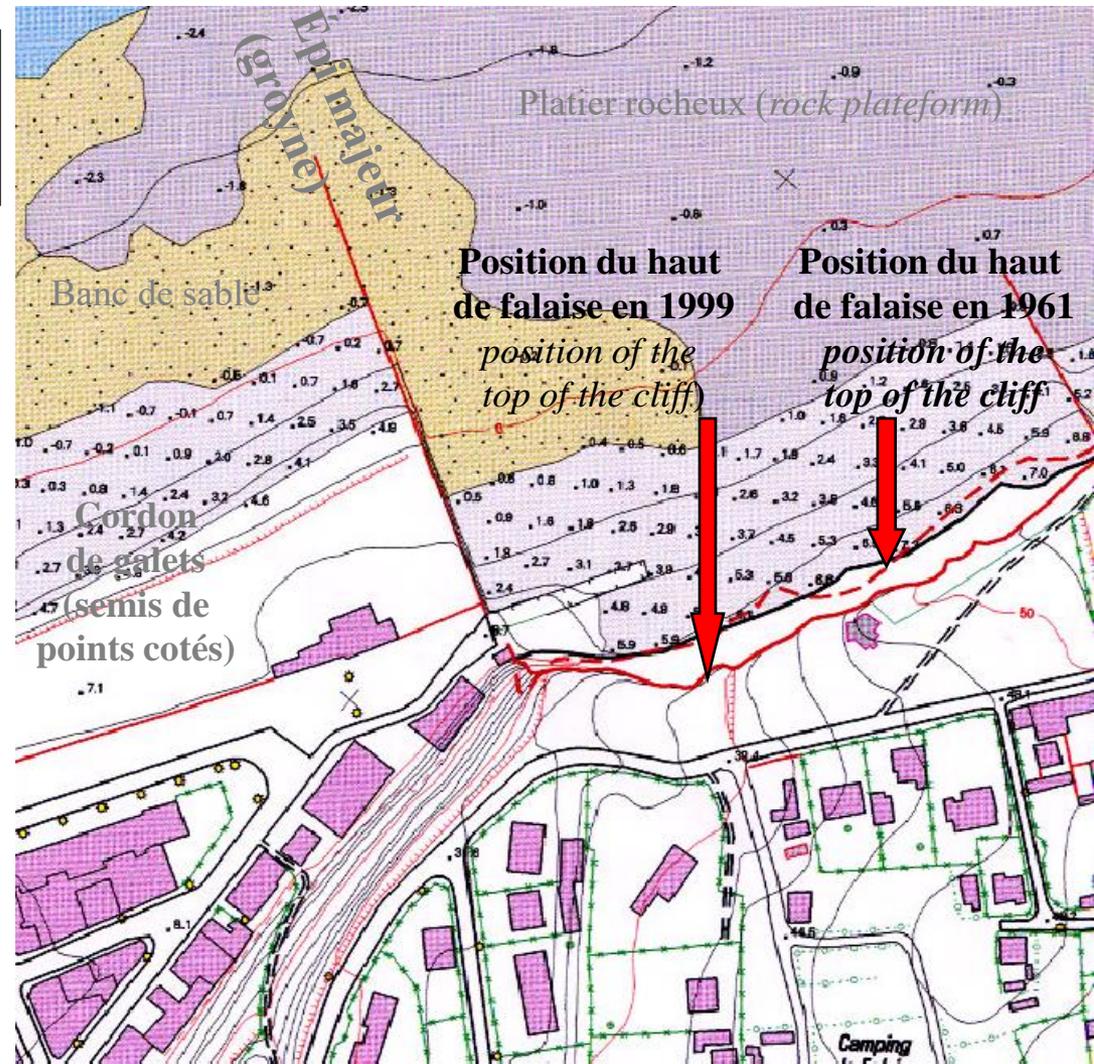
Analyse photogrammétrique (données de référence)

- Une étude réalisée dans le cadre du CPIBP (2000)
- objectif : Mise en place d'une méthode de suivi et de quantification fiable et homogène de la dynamique côtière normano-picarde.

Établissement d'un levé photogrammétrique.

- pré-balisage au sol puis aérotriangulation et stéréo préparation des clichés permettant un positionnement précis dans le système de projection Lambert (= un point connu tous les 10 à 12 m), et IGN 69.
- repérage sur les photos aériennes verticales des objets géographiques et attribution d'une position en XYZ
- restitution des données à l'échelle 1/2 000 sous format papier et numérique

Mers-les-Bains : position du haut de falaise entre 1961 & 1999 (1/2 000; CPIBP)



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : **aériennes (IGN)**, Satellitaire, Laser scan

Analyse photogrammétrique (données de référence)

Les intérêts de la méthode

Très grande précision.

- Pour la position du trait de côte : Précision à $\pm 0,30$ m alors que celle des autres études était plurimétrique
- Pour le calcul des volumes de galets : marge d'erreur de l'ordre de 10 % alors que celle des autres études était de près de 40%.

Données numérisées et géoréférencées permettant de constituer ou d'être intégrées dans un SIG

Comparaison possible avec toutes autres données géoréférencées anciennes ou futures

Fourniture des résultats à toutes les échelles désirées (à l'échelle des cellules et sous-cellules hydro-sédimentaires, puis tous les 50 m).

Limite de la méthode

Représentativité temporelle (détermination des vitesses de recul entre deux dates -1966/1995)

Les rythmes d'évolution ?

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), **Satellitaire**, Laser scan

Mêmes problèmes que photographies aériennes

L'image Spot 5 : résolution géométrique de 2,5 m en supermode

- Problème d'ombrage (heure de levée : matin)
- précision par encore suffisante pour cette problématique
- mais problème de choix de l'information radiométrique (panchromatique ou infrarouge pour la végétation)

→ une résolution fine mais difficilement exploitable pour la détermination du haut de falaise

→ Voir image THR IKonos, ...



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

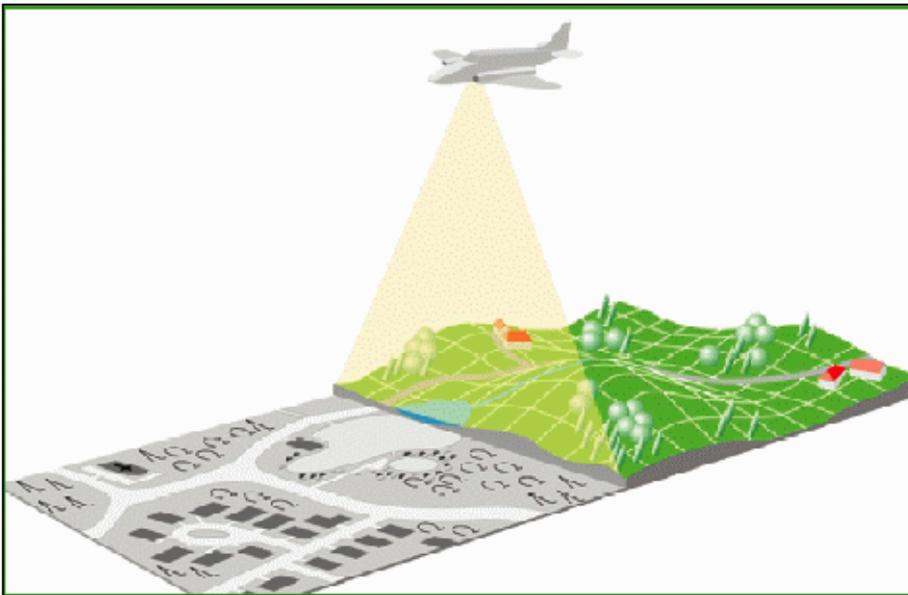
2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan (lidar aéroporté)

Le Laser à Balayage Latéral Aéroporté ou lidar topographique permet :

- définir l'altimétrie de la surface terrestre (+/- 5 à 7 cm sur sol nu) ;
- de couvrir des surfaces de 35 à 40 km² / heure de vol ;
- densité de points de l'ordre de 1 point au m².

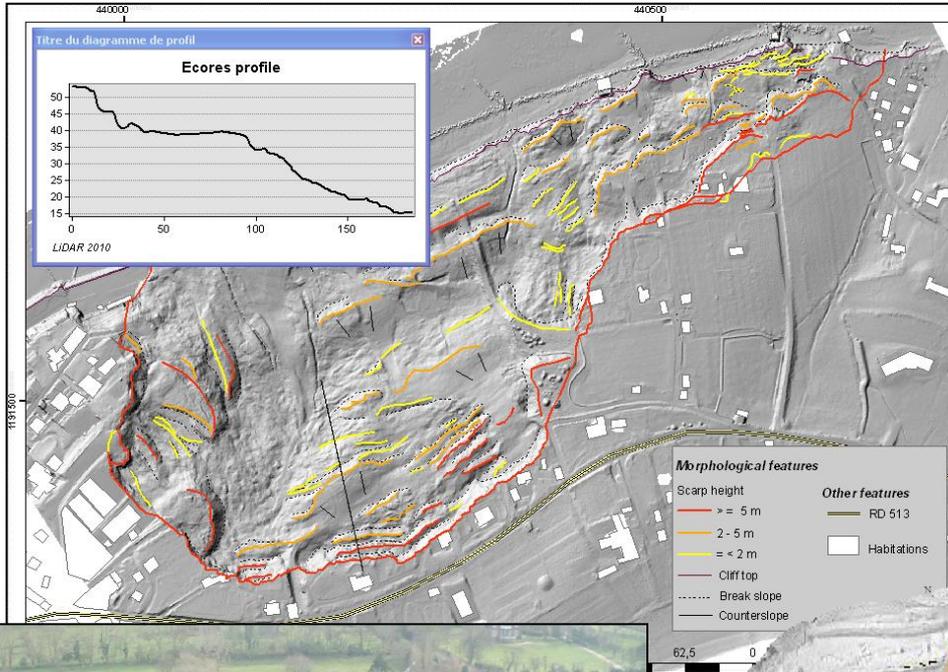
Par conséquent 50 à 80 000 mesures de distances entre le sol et l'avion/seconde le long d'une bande de terrain de 1000 à 1500 m de largeur.

- Grande résolution et couverture sur de grands espaces
- mais coût encore très élevé



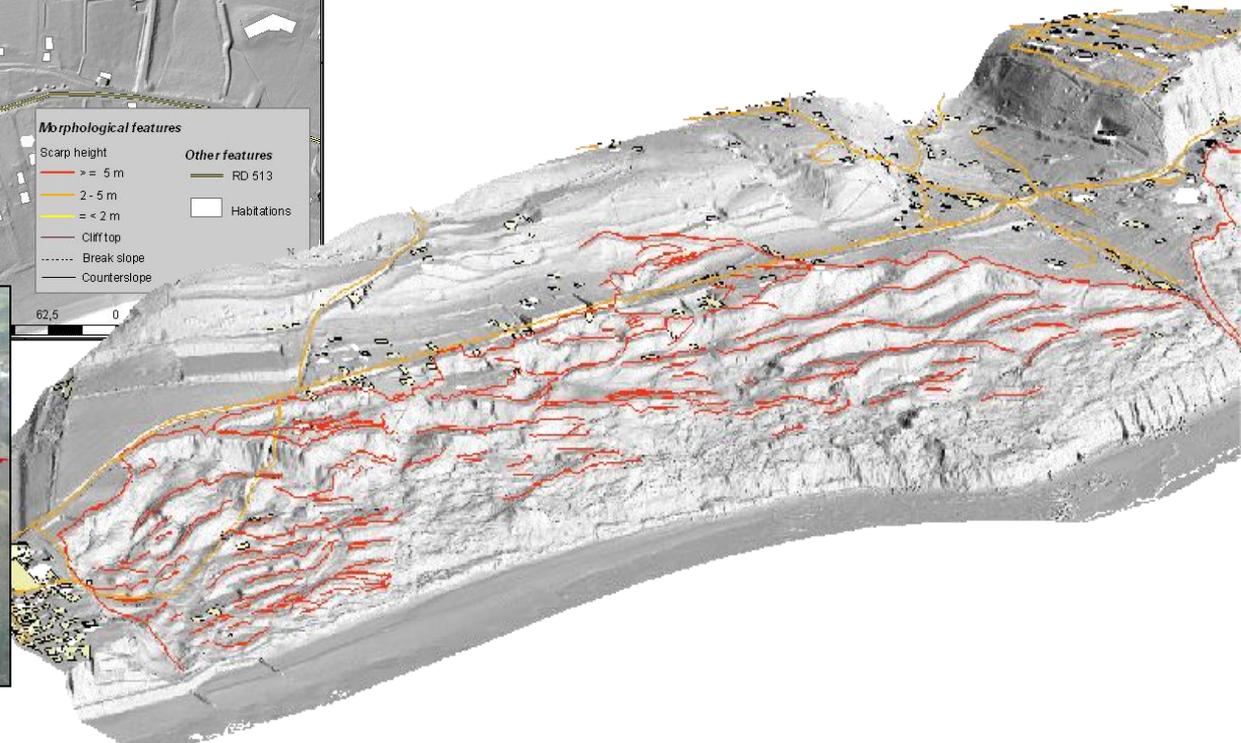
2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan (lidar aéroporté)



MNT généré à partir d'un réseau de points obtenus par Lidar aéroporté (versant littoral de Villerville et Cricqueboeuf, Calvados).

Interprétation morphologique



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan (TLS)

TLS : Scanner Laser Terrestre

→ Vitesse d'évolution : Échelle de l'événement 'mouvement particulière et mouvement de masse' à très haute résolution



Photographie : TLS RIEGL LMS Z390i

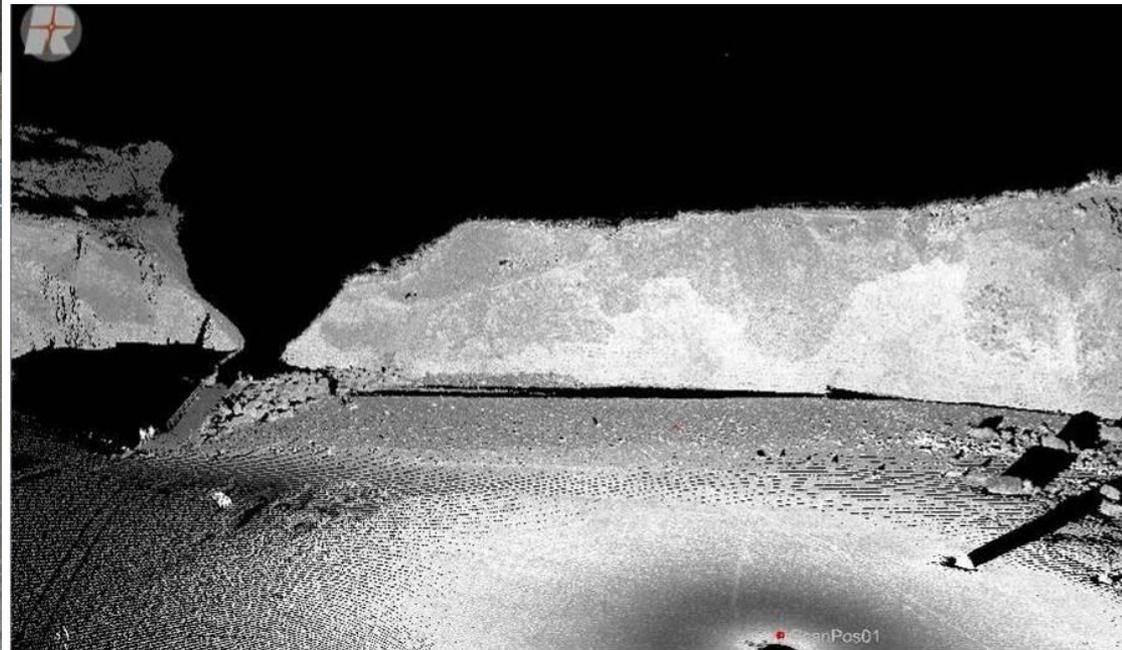


Figure : Nuage de points acquis après le levé à *la glacière*, Varengeville-sur-Mer

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, **Laser scan (TLS)**

TLS : Scanner Laser Terrestre

1) Varengueville-sur-Mer (falaise vive avec forte dynamique érosive)



Photographie : Panorama du site de *la glacière*, Varengueville-sur-Mer

2) Dieppe (contexte de falaise morte)



Photographies : Panorama des sites de Dieppe

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan (TLS)

TLS : Scanner Laser Terrestre

- Levés semestriels : octobre 2010 (2 sites), février 2011 (2 sites), juillet 2011 (1 site), septembre 2011 (1 site)
- Traitements : création de MNT successifs

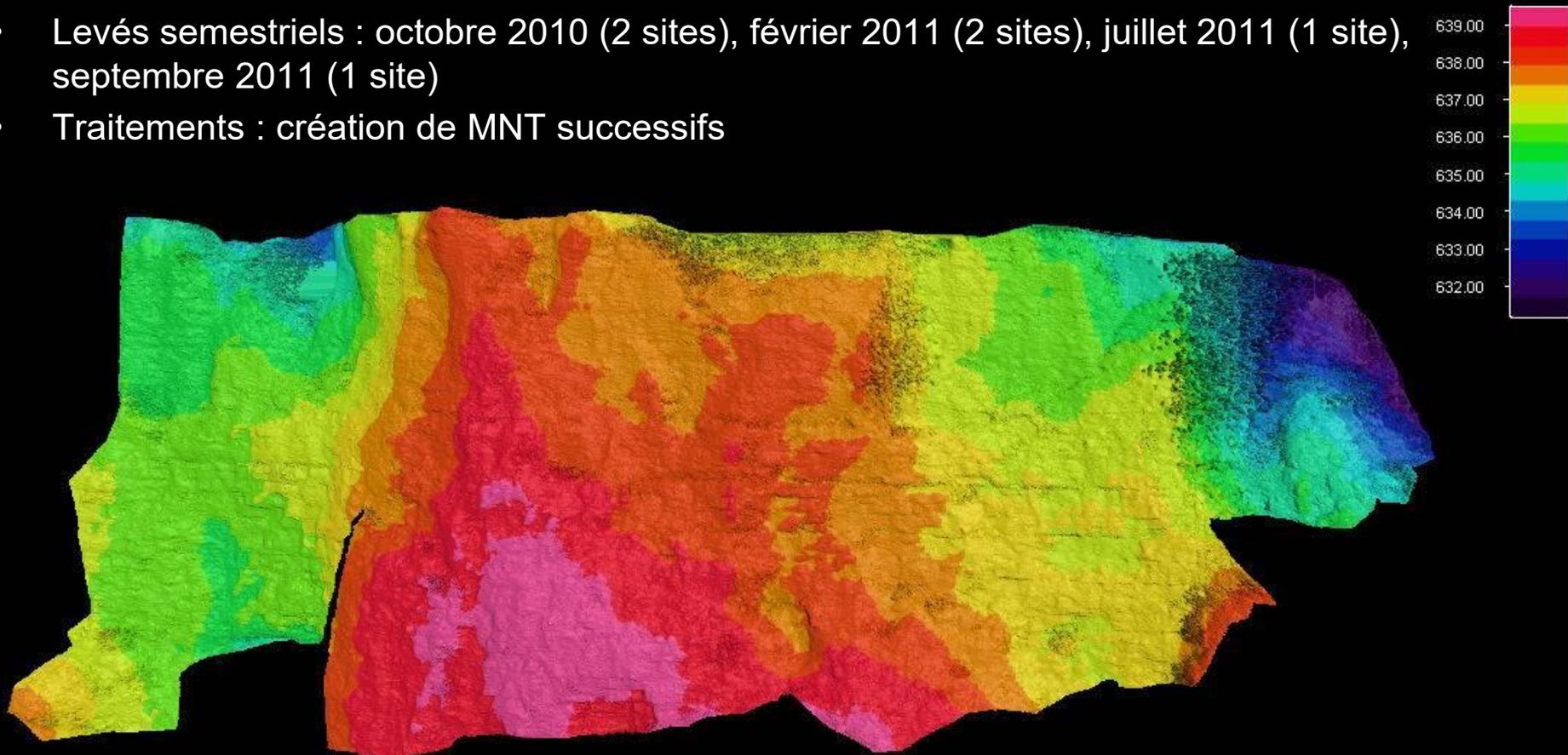


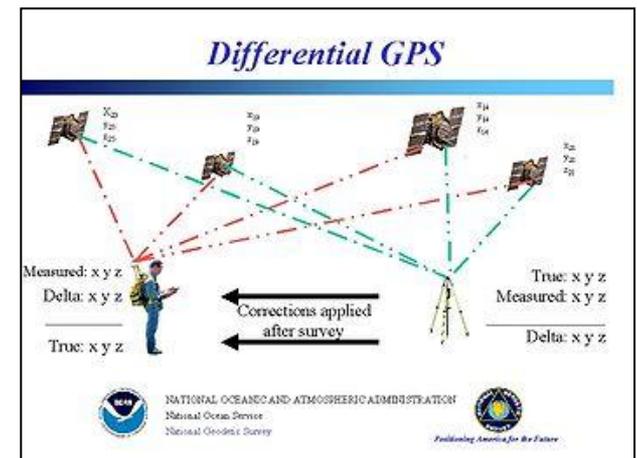
Figure : MNT à une résolution de 0,03m sur la station 1 de Dieppe sémaphore le 08/02/2011 33

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.3. Suivi topographique (station totale & D-GPS)

→ Vitesse d'évolution

- Appareil de positionnement par satellites
- Calage en planimétrie et en altimétrie à un point géodésique de l'IGN (marge d'erreur du point levé inférieure à + ou - 5 cm)
- Levé de points tous les 10 à 15 m (à 3 m du bord du haut de falaise)



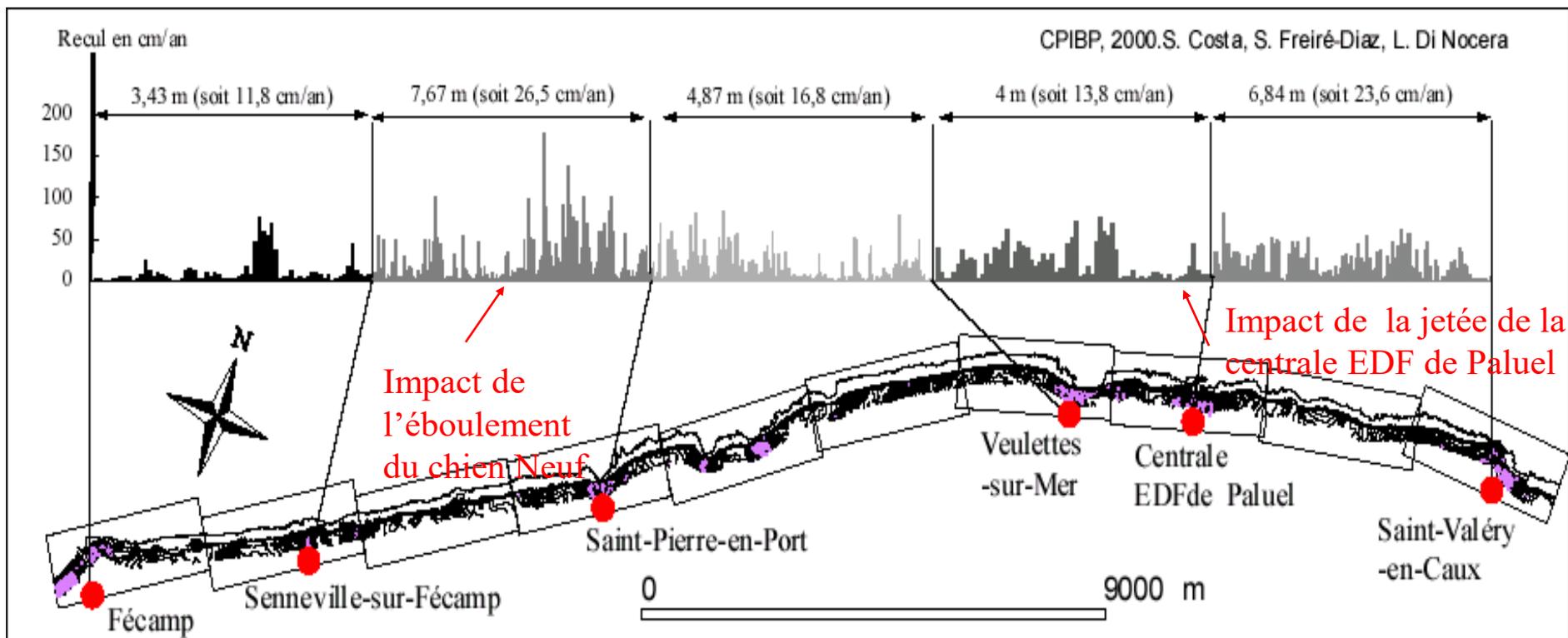
Limites :

- difficulté d'accès en haut de falaise (habitations, centrale nucléaire, espaces boisés...)
- difficulté de la prise de mesure (**danger**, marge d'erreur importante > 1m)

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.4. Synthèse : Falaises du Pays de Caux

- variabilité spatiale tous les 50 m
- influence des ouvrages transversaux et des éboulements majeurs



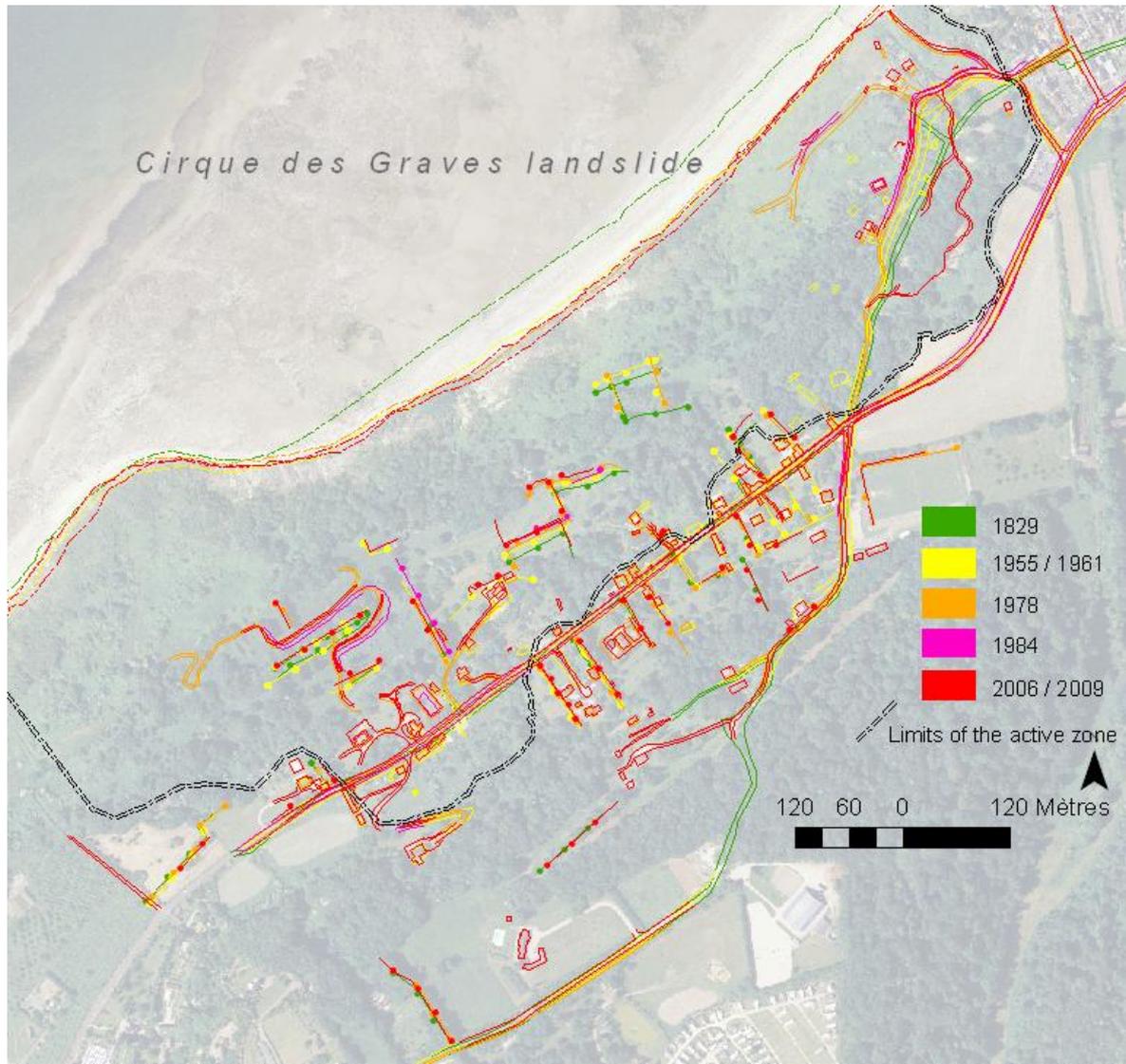
2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.4. Synthèse : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)

Comparaison de différents documents (cadastres, photos aériennes, plans, ...)

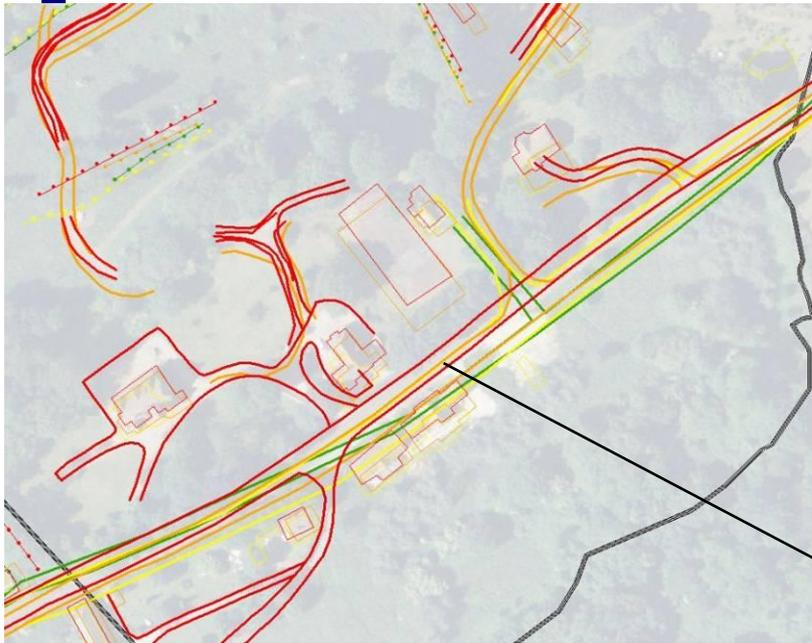
A partir du repérage de points notables (routes, constructions, limites parcelles, ...)

Évolution du trait de côte (pied du versant) + évaluation des déplacements 'historiques' et compartimentage de la zone en 'glissement'

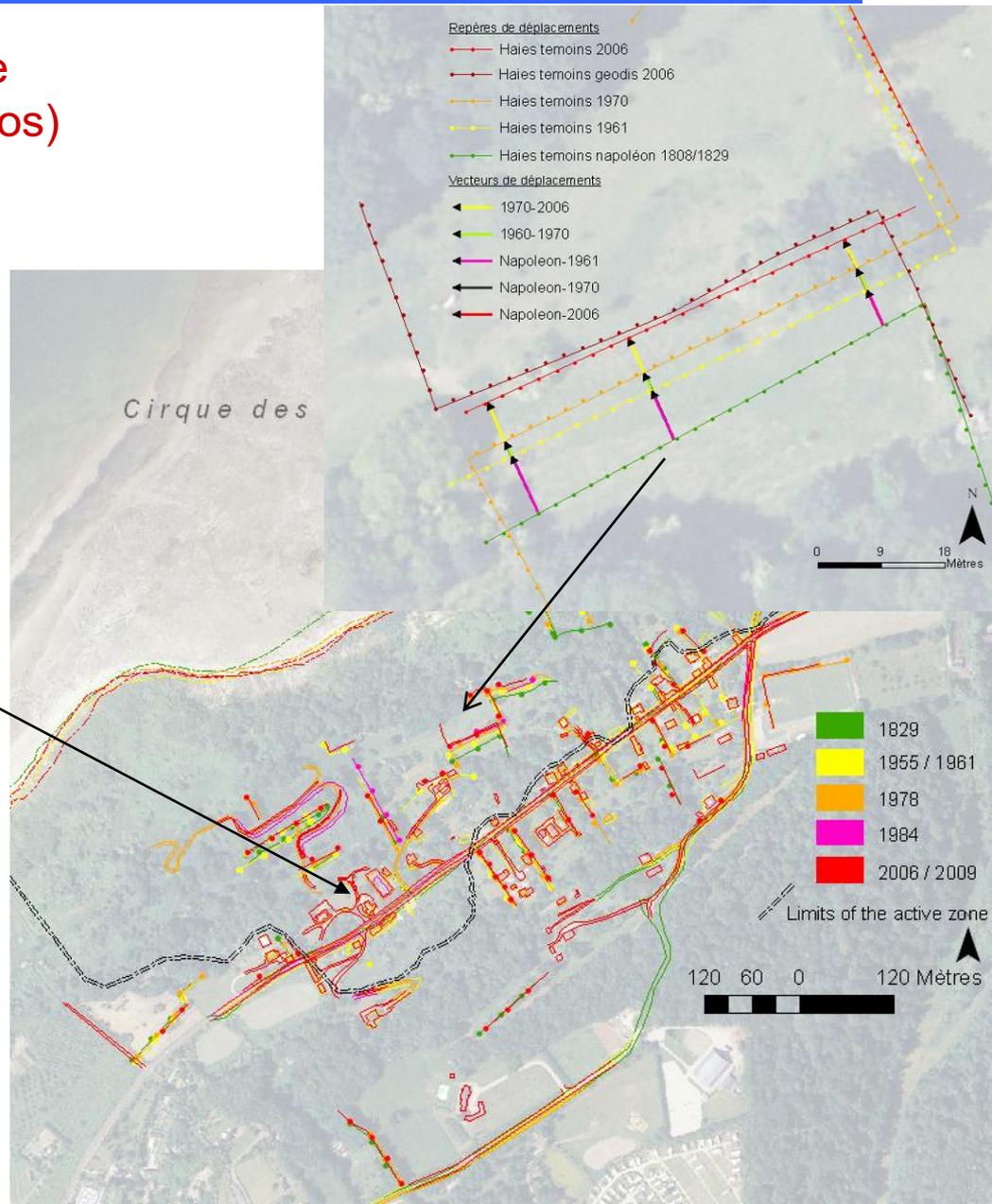


2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.4. Synthèse : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)



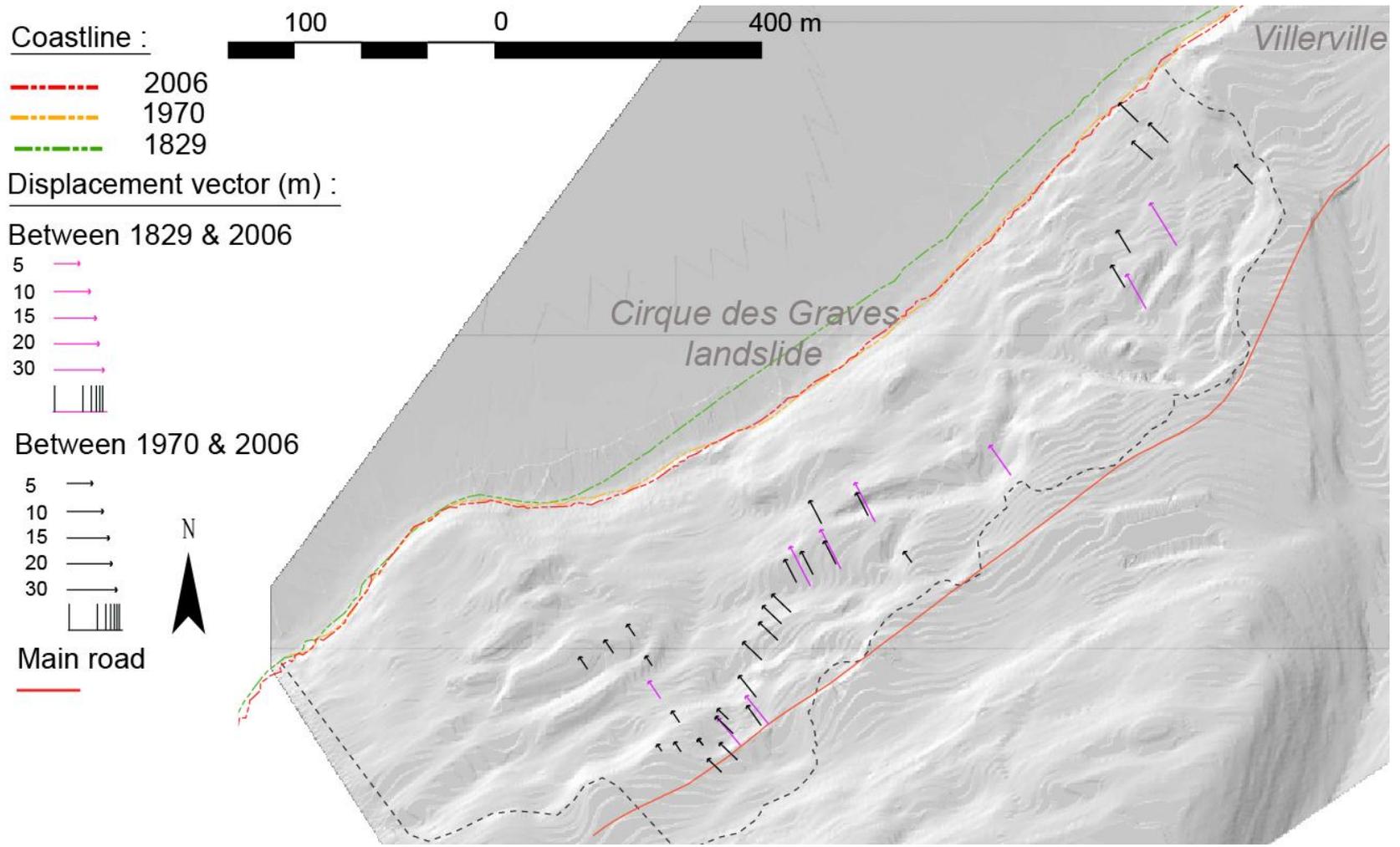
Comparaison de la position entre deux dates



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.4. Synthèse : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)

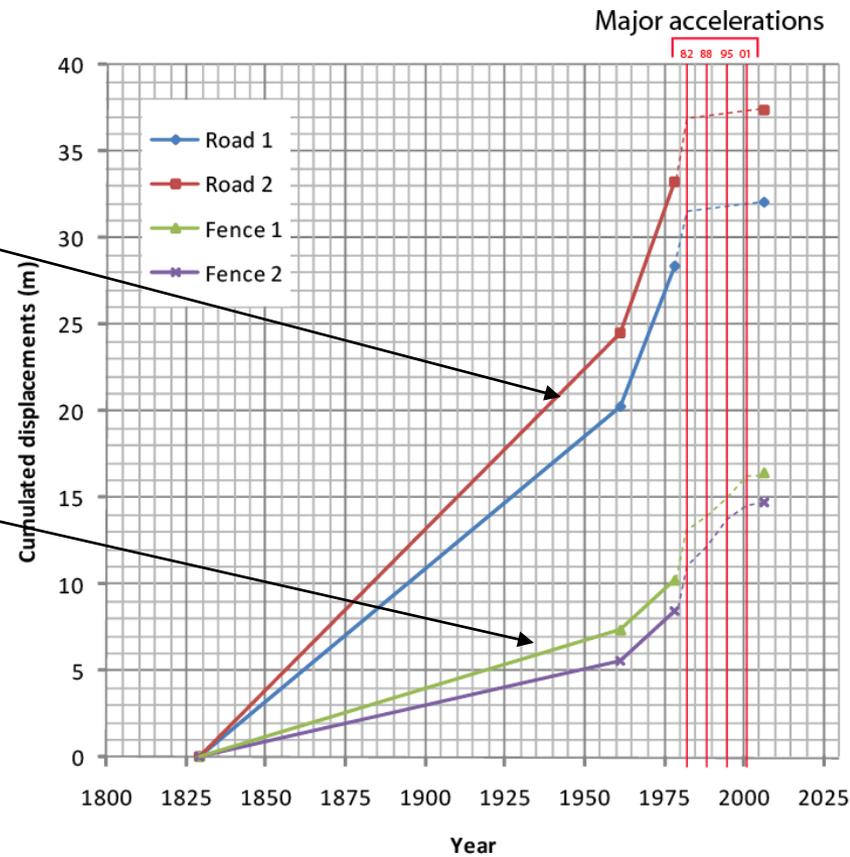
➔ Vecteurs déplacements



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.4. Synthèse : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)

- Compartimentage de la zone en 'mouvement'
- Déplacements cumulés depuis 1829 compris entre 5 à 40 m (+/-2m)
- Valeurs de déplacements complétées par réseau de monitoring (cf. II)



2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.4. Synthèse

Résolution et précision très différentes selon la qualité des documents et les méthodes et outils d'analyse.

Les **méthodes communément utilisées** fournissent des valeurs dont la **marge d'erreur** est **plurimétrique à décimétrique** pour :

- photo-interprétation : qqes m à 50cm (orthophoto)
- comparaison des feuilles cadastrales : indéterminée ou dm
- D.GPS : env. 2 m (difficulté d'accès) à 10 cm (zone accessible, non boisée)
- Spot5 : Plurimétrique car impossibilité de lecture
- Laser scan : aéroporté (dm) ou terrestre (cm)

Plan

1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

2.3. Suivi topographique (station totale & GPS)

2.4. Synthèse

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance

3.2. Résultats :

- Vers une hiérarchisation des processus responsables
- Vers une définition des seuils au-delà desquels il y a mouvements
- Vers un système d'alerte

4. Conclusion

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

Objectif : couplage localisation/datation des mouvements/effondrements avec l'évolution des agents et processus responsables (ou '*facteurs déclenchants*')
→ température, précipitation, niveau de nappe, agitation marine ...)

De l'intérêt d'un **suivi fiable**, homogène, sur des **pas de temps** et des **espaces représentatifs** des dynamiques et des facteurs météo-marins

→ Investigations et Observations

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : 'effondrement' falaise du Pays de Caux (12 km)

Recensement des effondrements par l'association ESTRAN :

Figure : Fiche de l'éboulement 62 du Service Littoral (ESTRAN, 2006)

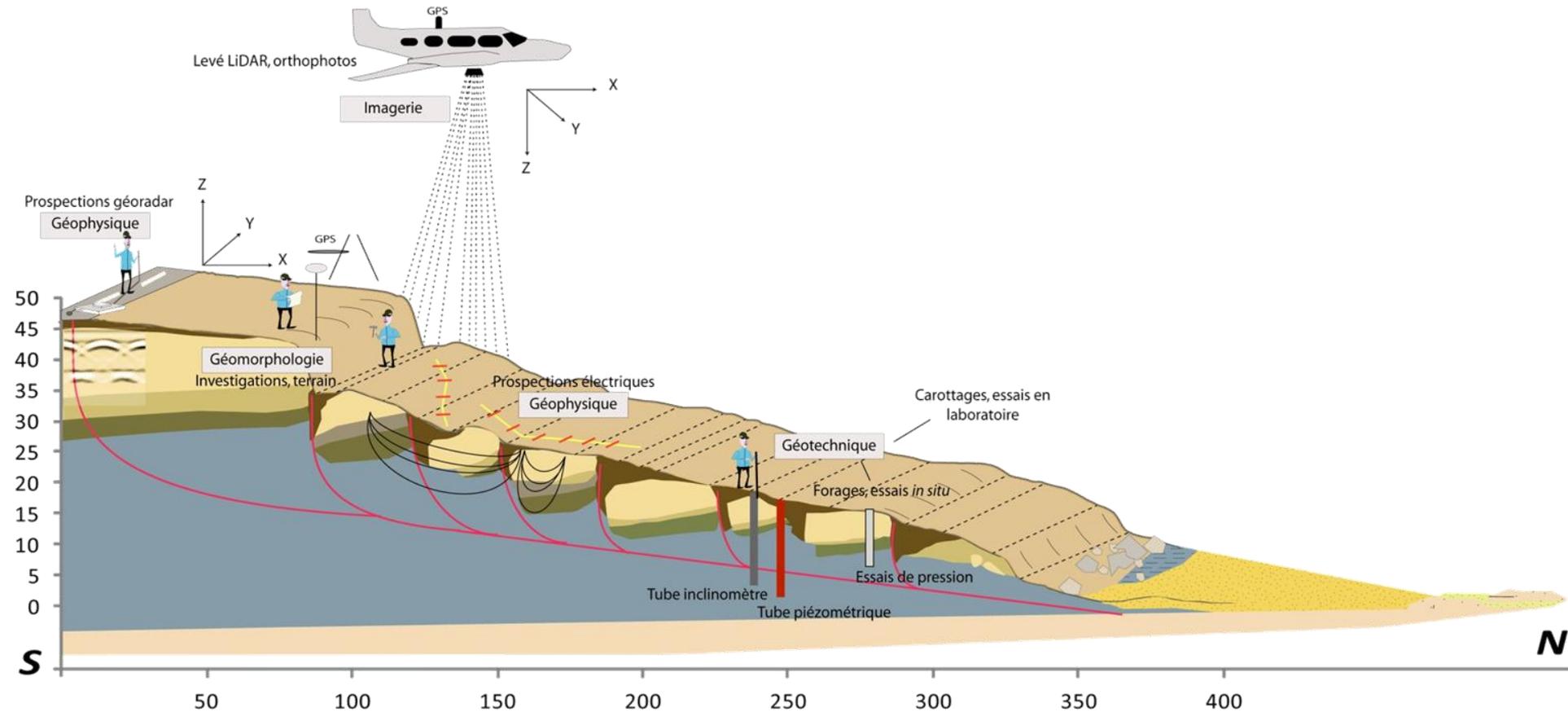


Intérêts de la méthode :

- Forte fréquence d'observation (hebdomadaire)
- Précision des données (datation, localisation, estimation volumétrique)
- Période d'observation : 7 ans (2002-2009)

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

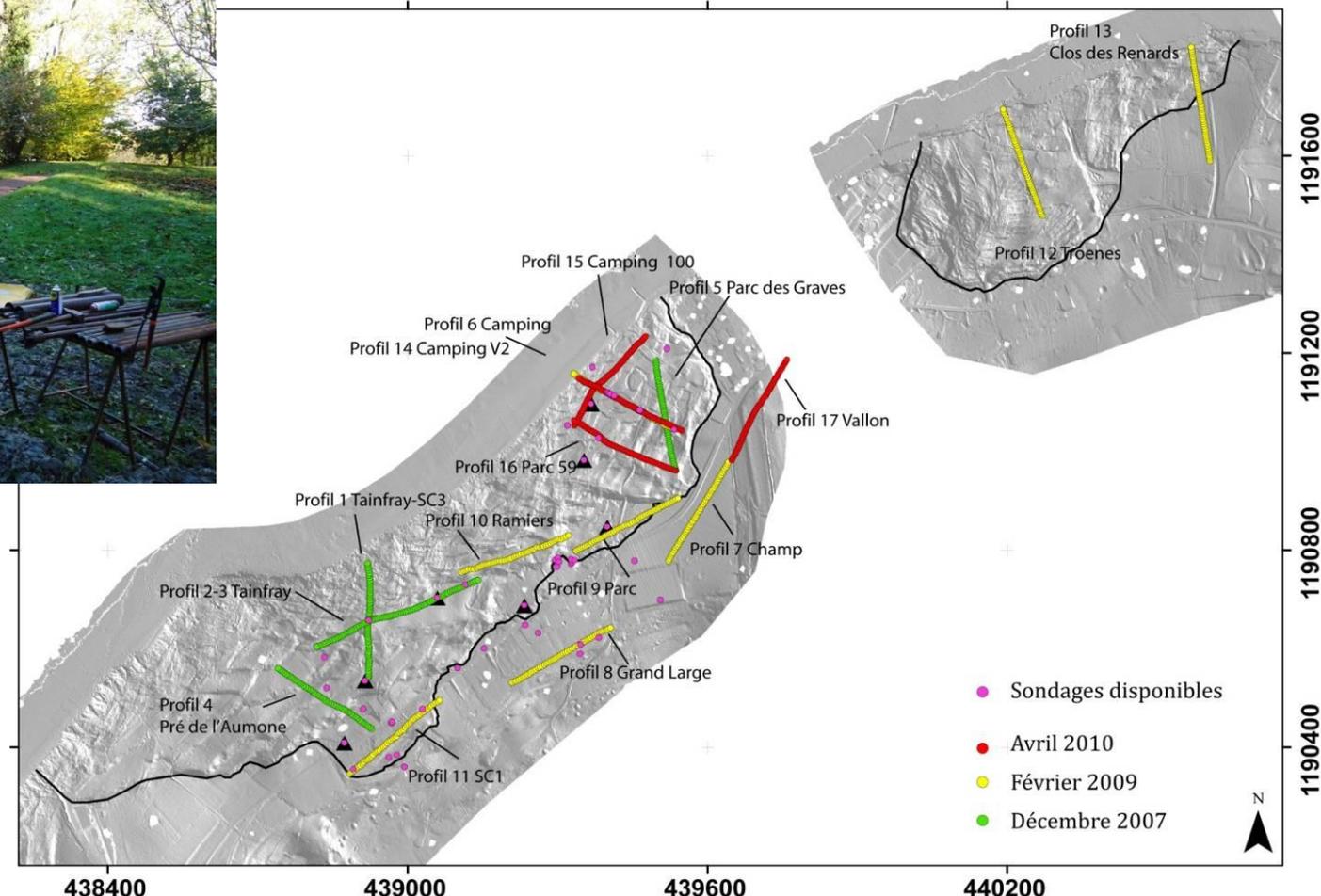
3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)



3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)

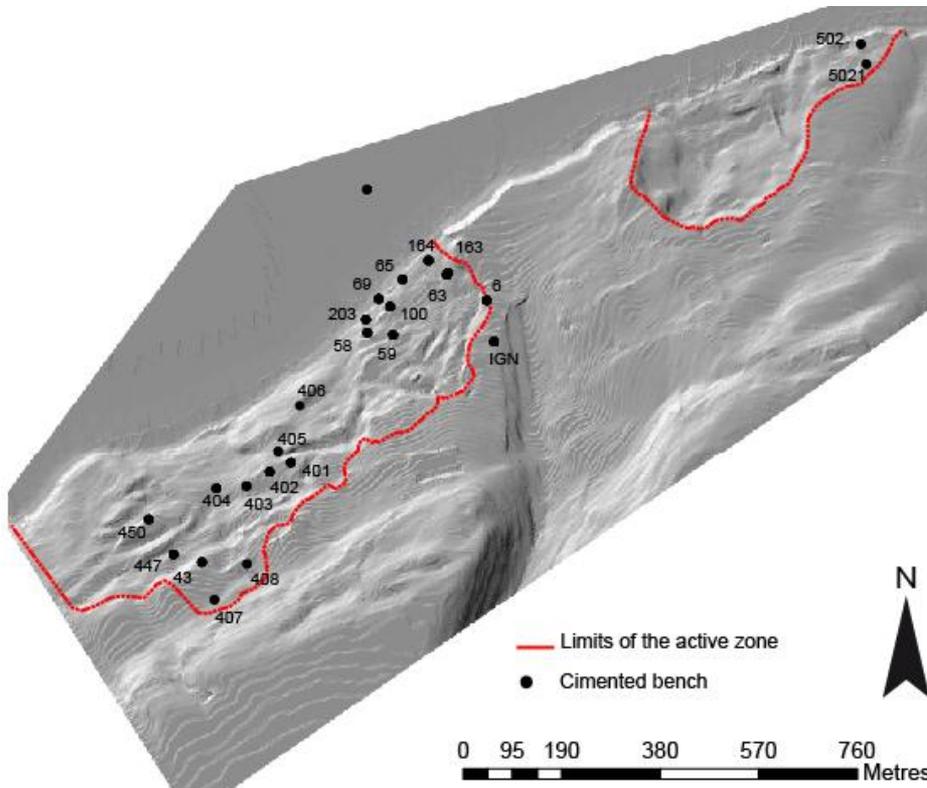
- **Investigations géotechnique** (forages & instrumentation) & **géophysique** de subsurface par Tomographie de Résistivité Electrique (ERT)



3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : **versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)**

- **Surveillance des déplacements de surface** (23 repères) & de profondeur (5 tubes inclinométriques) → acquisition mensuelle



3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : **versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)**

- **Surveillance des déplacements de surface** (3 DGPS permanent) → acquisition en continu



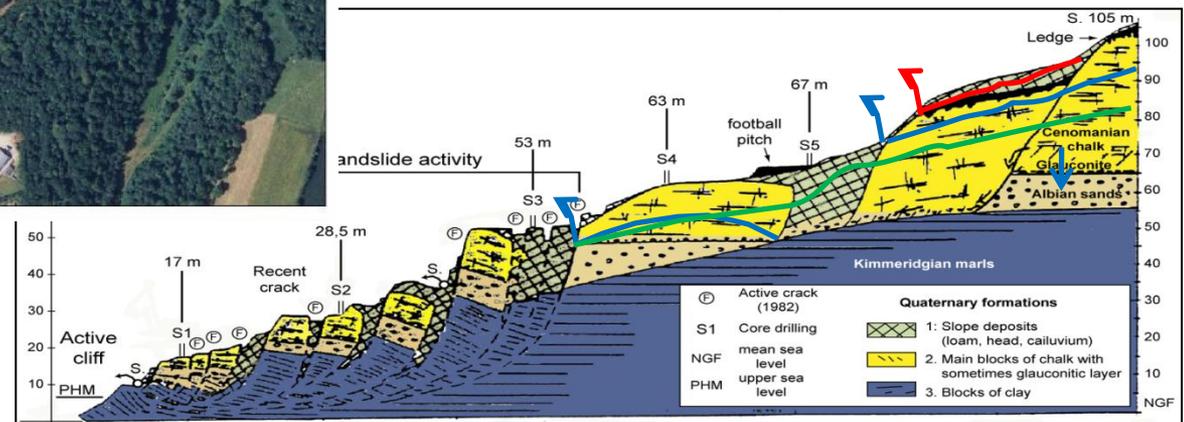
- Deux antennes 'mobiles' implantées dans la zone 'instable'
- Précision XY Infra-centimétrique
- Possibilité d'enregistrer des déplacements saisonniers 'faibles'
- Transfert de données par ADSL



3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)

- Surveillance des variations de nappes phréatiques (20 piézomètres) & des débits des sources et chimie → acquisition bi-mestrielle à semestrielle et en continu (6 limnigraphes)



Proposition a priori des systèmes aquifères possibles dans le versant

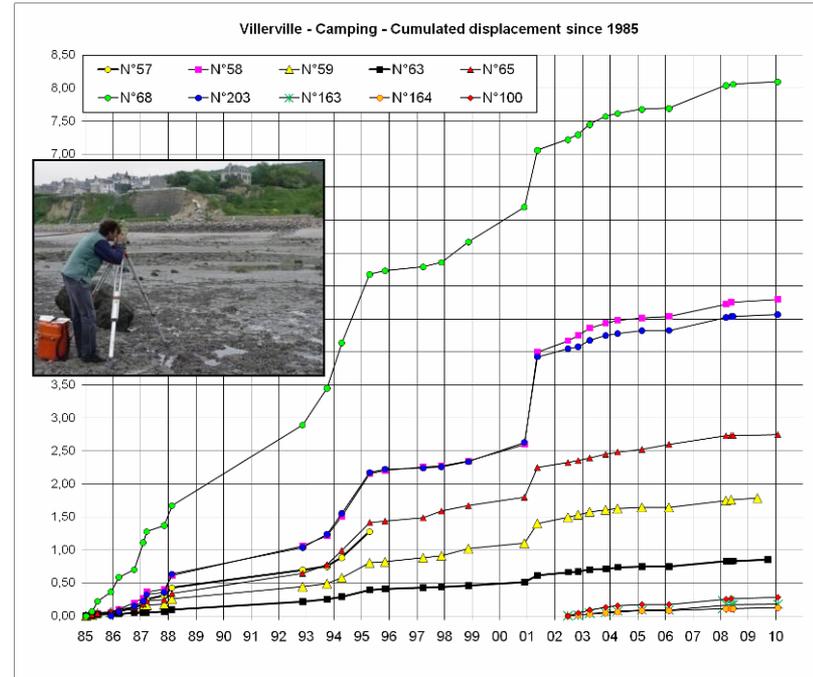
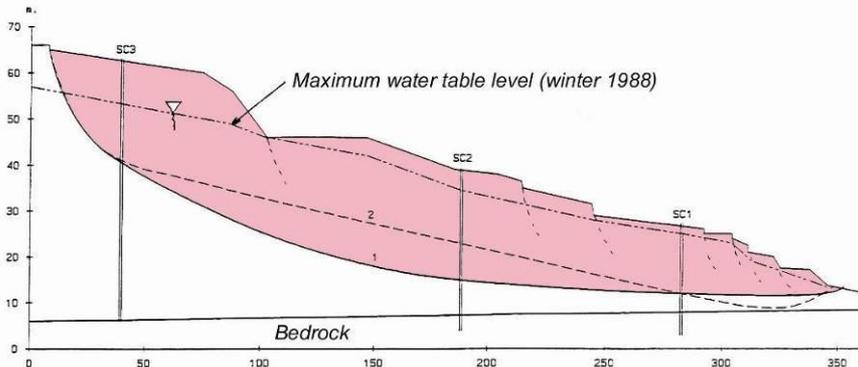
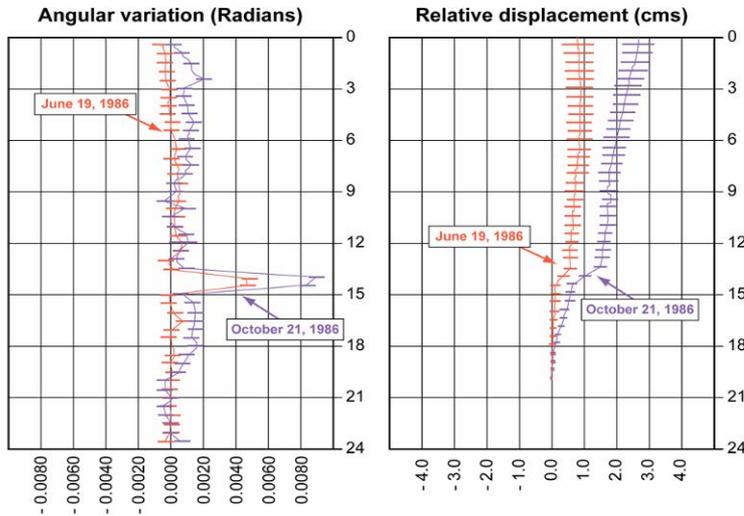
3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance : versant 'littoral' de Villerville – Cricqueboeuf (Calvados)

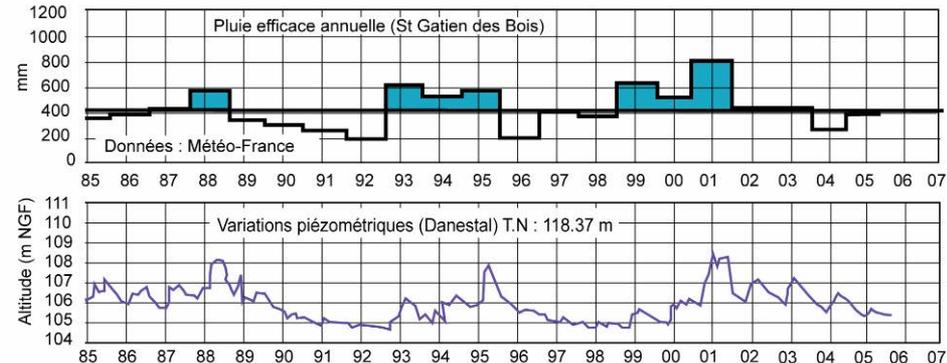
- Déplacement en profondeur (inclinomètre)

- Déplacements de surface (tachéomètre, GPS)

VILLERVILLE LANDSLIDE: Inclinometric measurements (Upstream Tube)



- Climat et piézométrie



3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats

- Vers la hiérarchisation des processus responsables
- Vers la définition des seuils au-delà desquels il y a mouvements
- Vers un système d'alerte

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Quels sont les processus responsables du déclenchement des effondrements ?

Y-a-t-il un processus déclenchant dominant ?

Si oui, lequel ?

Est-ce une **combinaison de facteurs** ?

Si oui, laquelle ?

Les processus responsables du déclenchement des effondrements ont-ils une **répartition spatiale** et **temporelle spécifique** ?

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Quelle est la production de débris ?

Quels sont les taux d'ablation ?

→ Ruissellement de haut de falaise 'morte'

- Traitements des données : toute particule de plus de 3 cm qui a bougé sera normalement vue lors du différentiel.

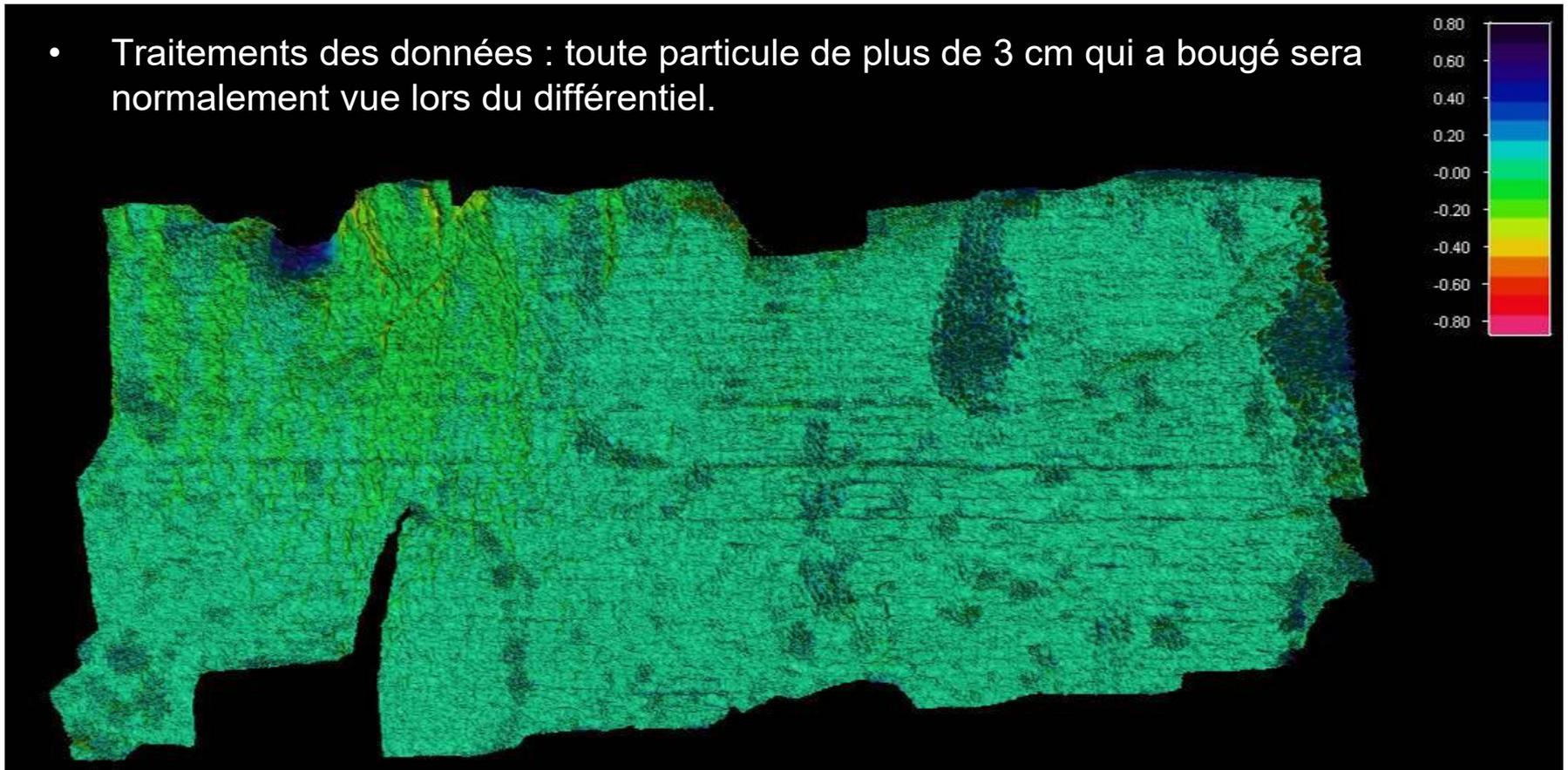


Figure : Différentiel issu des deux MNT (résolution de 0,03m) sur la station 1 de Dieppe sémaphore entre le 23/02/2011 et le 06/07/11

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Répartition spatiale des effondrements

Entre 2002-2009 :
332 effondrements
recensés
(d'1 m³ à 236 000 m³)

Quelle est la
répartition spatiale et
temporelle des
effondrements ?

Où ?

Quand ?

Avec quelle fréquence ?

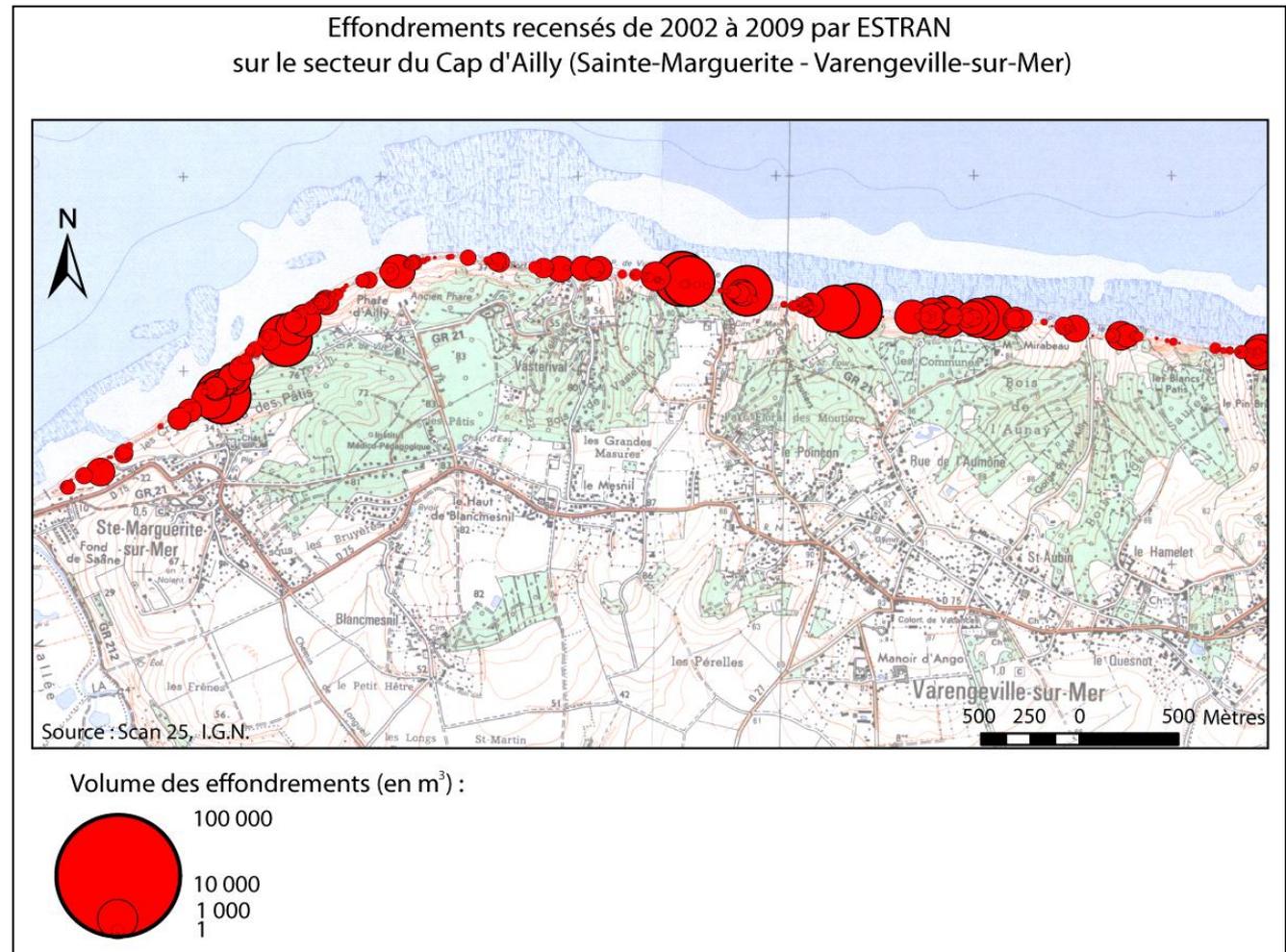


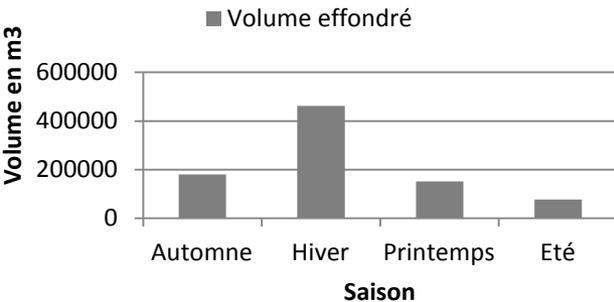
Figure : Effondrements recensés de 2002 à 2009 par ESTRAN
sur le secteur du Cap d'Ailly (Sainte-Marguerite-sur-Mer et Varengeville-sur-Mer)

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

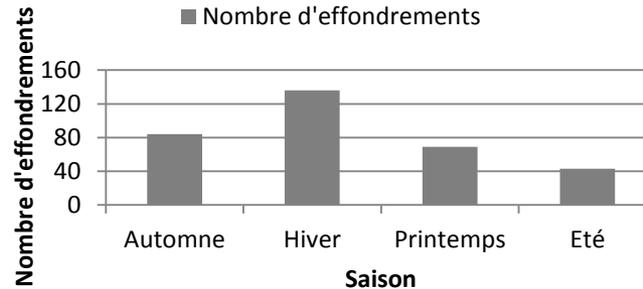
3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Répartition temporelle des effondrements

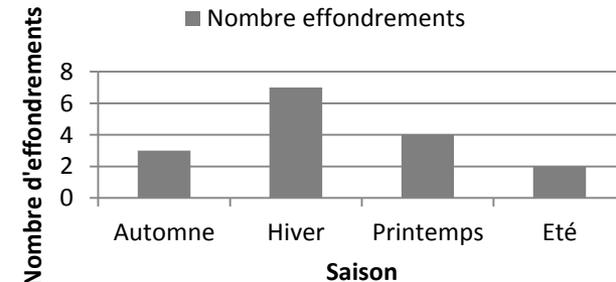
Volume effondré cumulé de 2002 à 2009 de Saint-Valéry-en-Caux au Tréport



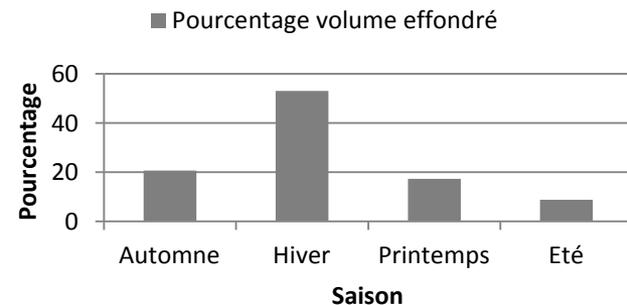
Nombre d'effondrements cumulé de 2002 à 2009 de Saint-Valéry-en-Caux au Tréport



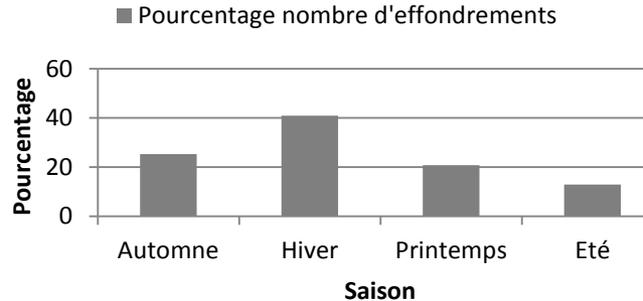
Nombre et volume cumulés (effondrements > 10 000 m³) de 2002 à 2009



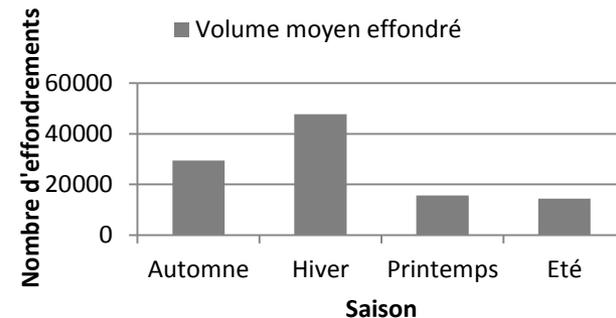
Volume effondré cumulé (en%) de 2002 à 2009 de Saint-Valéry-en-Caux au Tréport



Nombre d'effondrements cumulé (en%) de 2002 à 2009 de Saint-Valéry-en-Caux au Tréport



Nombre et volume cumulés (effondrements > 10 000 m³) de 2002 à 2009



Volumes effondrés et nombre d'effondrements associés de 2002 à 2009 de Saint-Valéry-en-Caux au Tréport

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

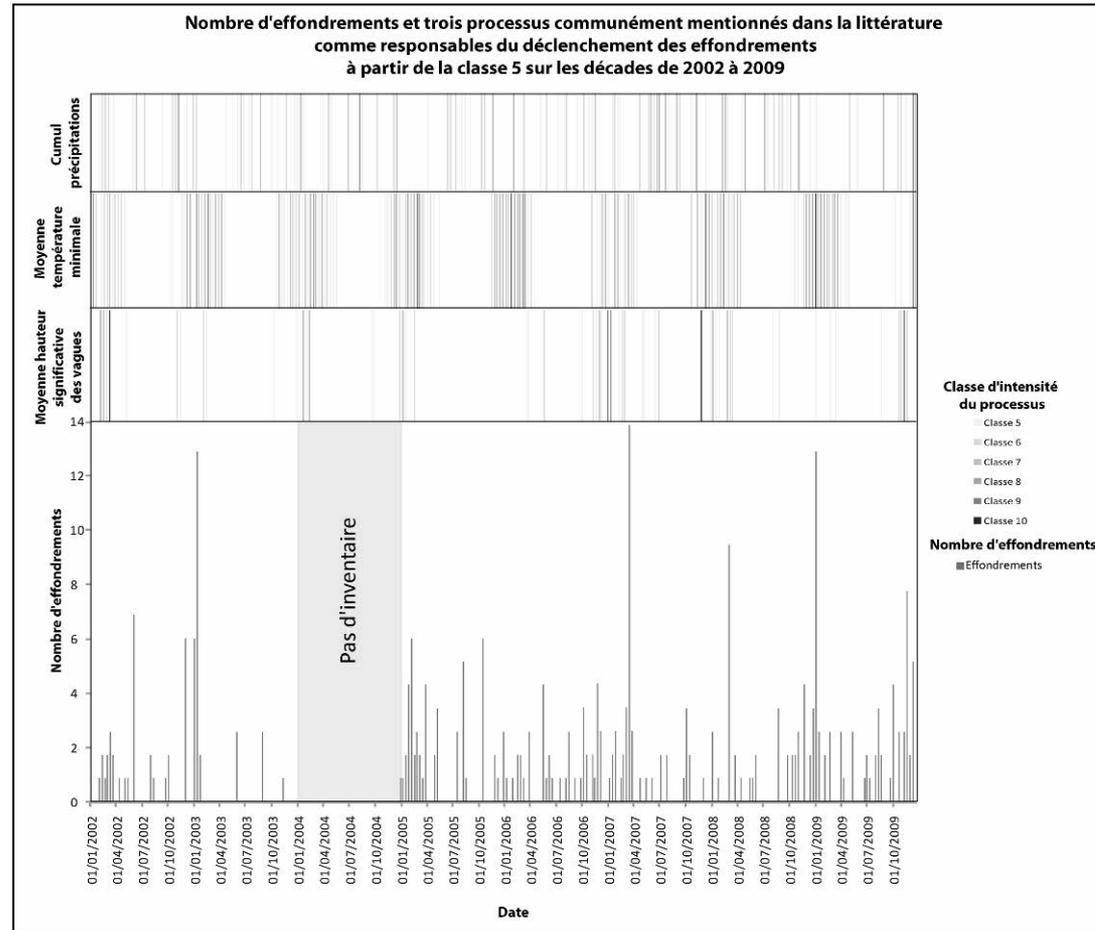
3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Répartition temporelle des effondrements

Cumul
précipitations

Moyenne
température
minimale

Moyenne hauteur
significative
des vagues

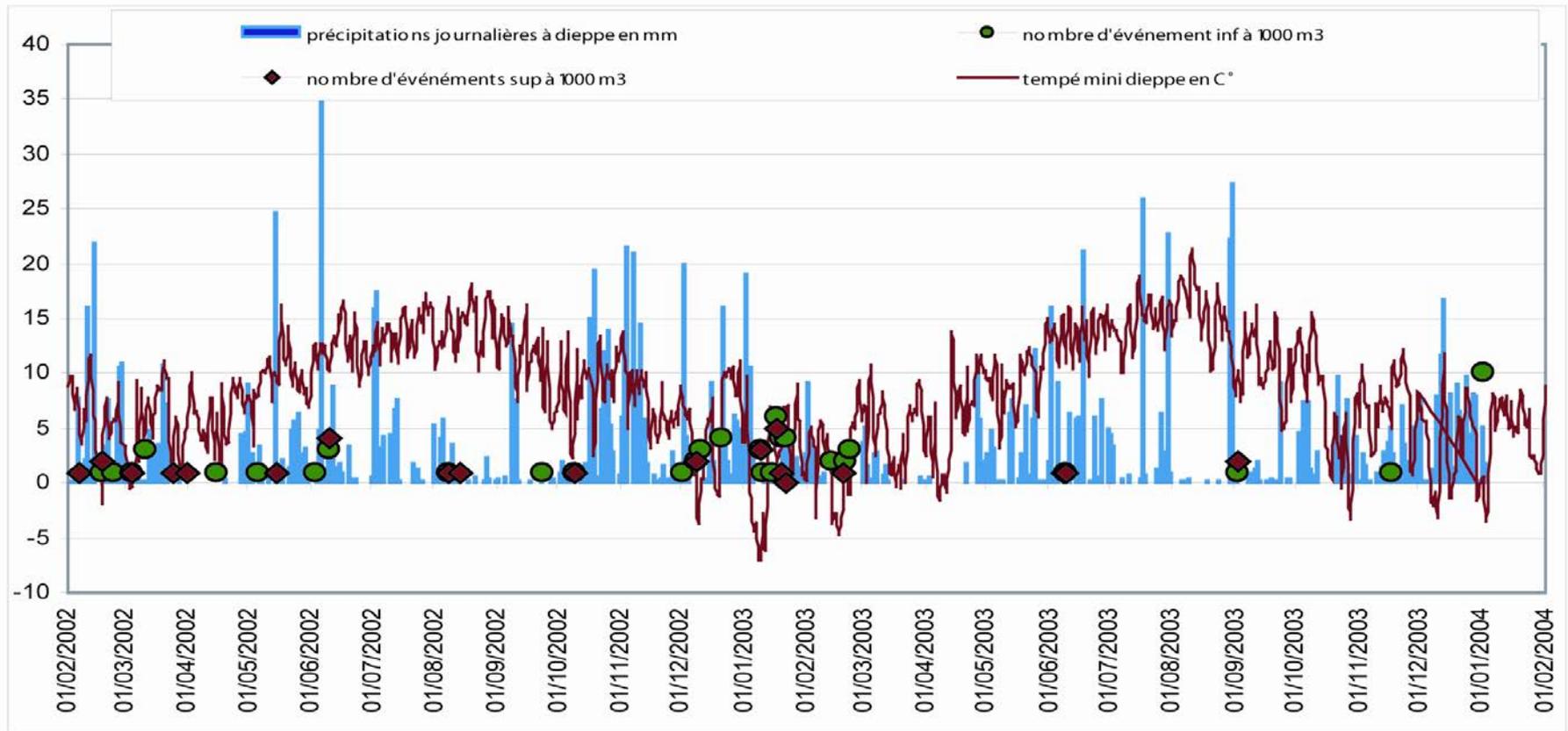


Nombre d'effondrements et trois processus communément mentionnés dans la littérature comme responsables du déclenchement des effondrements à partir de la classe 5 sur les décades de 2002 à 2009

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Corrélation à divers paramètres induisant des processus communément définis comme responsables

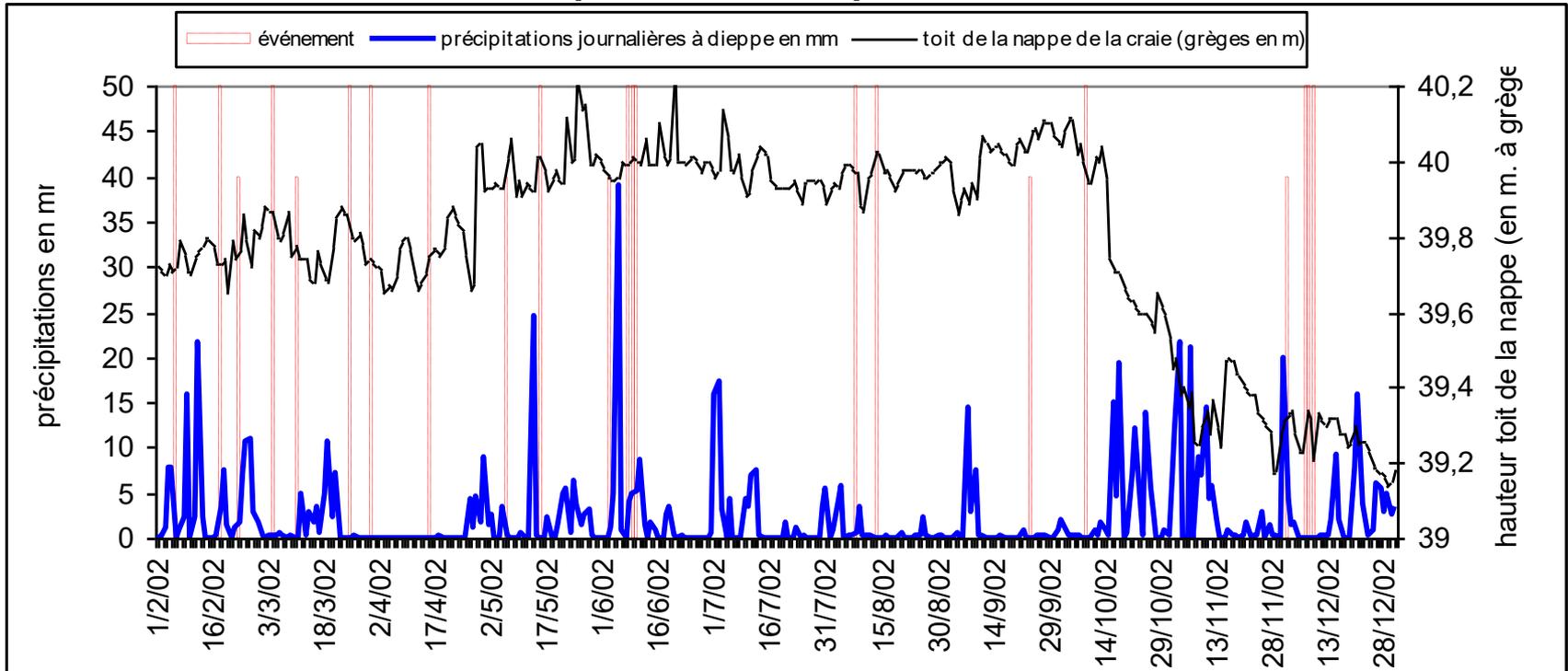


Sans surprise les **précipitations** (instantanées ou cumulées) et les **périodes d'alternance gel/dégel** expliquent la quasi-totalité des cas observés

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

L'influence du battement du toit de la nappe de la craie : un facteur déclenchant fréquemment évoqué



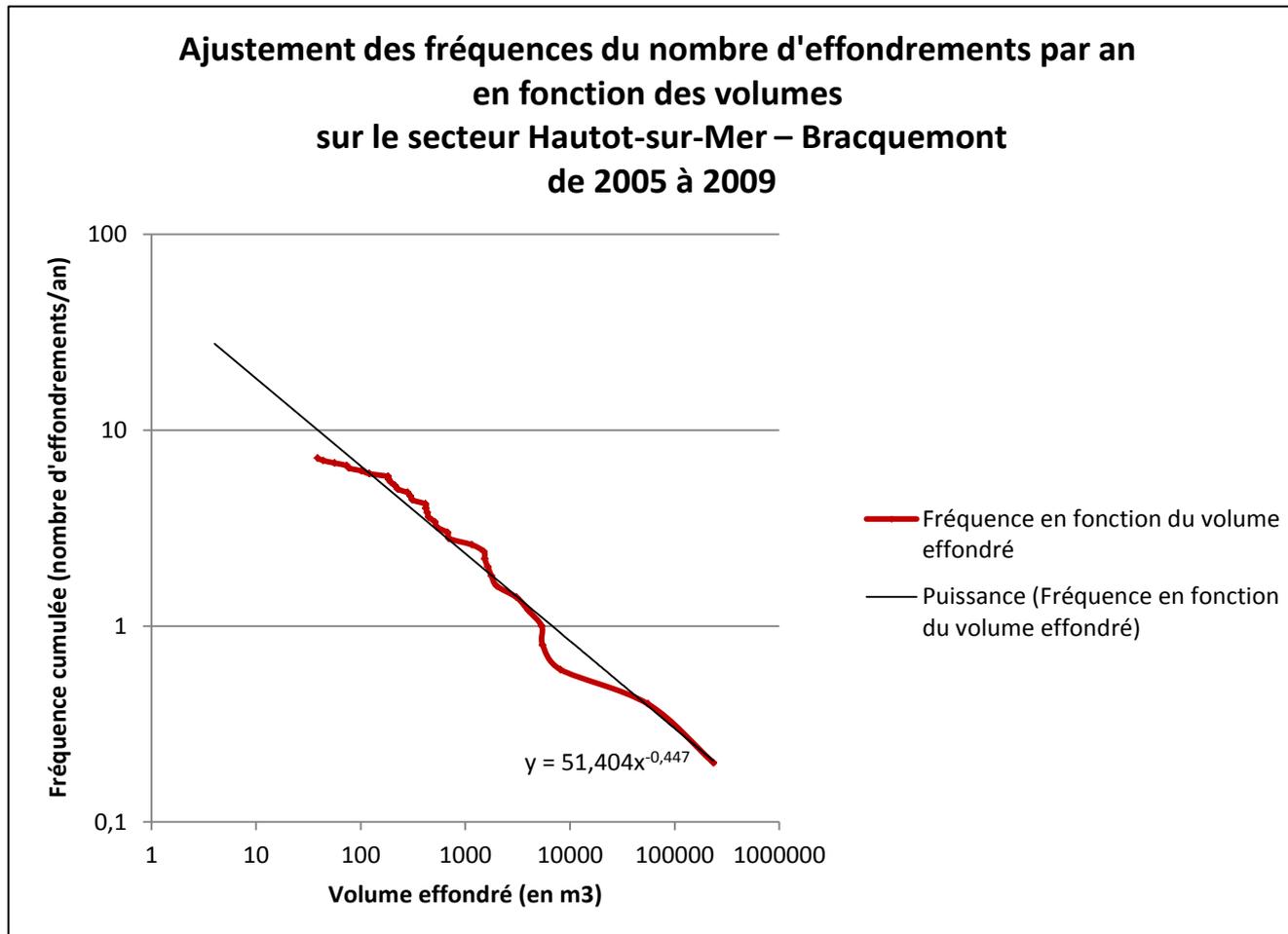
Relations entre les précipitations, le battement du toit de la nappe de la craie, et le déclenchement de tous les événements observés en 2002.

- **Une corrélation pas toujours évidente** : l'influence d'autres facteurs, un problème de datation, ou de localisation du piézomètre ?
- Des effondrements qui s'effectuent plutôt au moment de la recharge (donc après de fortes précipitations !)
- Plus que la hauteur de la nappe, c'est l'intensité de la recharge qui semble déterminante

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Quelle est la fréquence d'occurrence d'un effondrement en fonction de son volume ?



Ajustement des fréquences du nombre d'effondrements par an en fonction des volumes sur le secteur Hautot-sur-Mer - Bracquemont de 2005 à 2009

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Fréquence d'occurrence et période de retour d'un effondrement

Méthodologie	Site	Nb effondrements /échantillon	Période (années)	Équation (graphique)	n_{100}	Période de retour n_{100} (année)	Période de retour n_{100} (jour)	Longueur de falaise (km)	n_{100}/km
Observation points fixes	Saint-Valéry-en-Caux - Le Tréport	65	2	$f=407,93V^{-0,535}$	34,72	0,04	11	37,5	0,9
Marche pied de falaise	Sainte-Marguerite-sur-Mer - Varengeville	203	5	$f=379,86V^{-0,527}$	33,54	0,04	11	6	5,5
Observation points fixes	Hautot-sur-Mer - Bracquemont	51	6	$f=51,404V^{-0,447}$	6,56	0,16	56	6	1,1

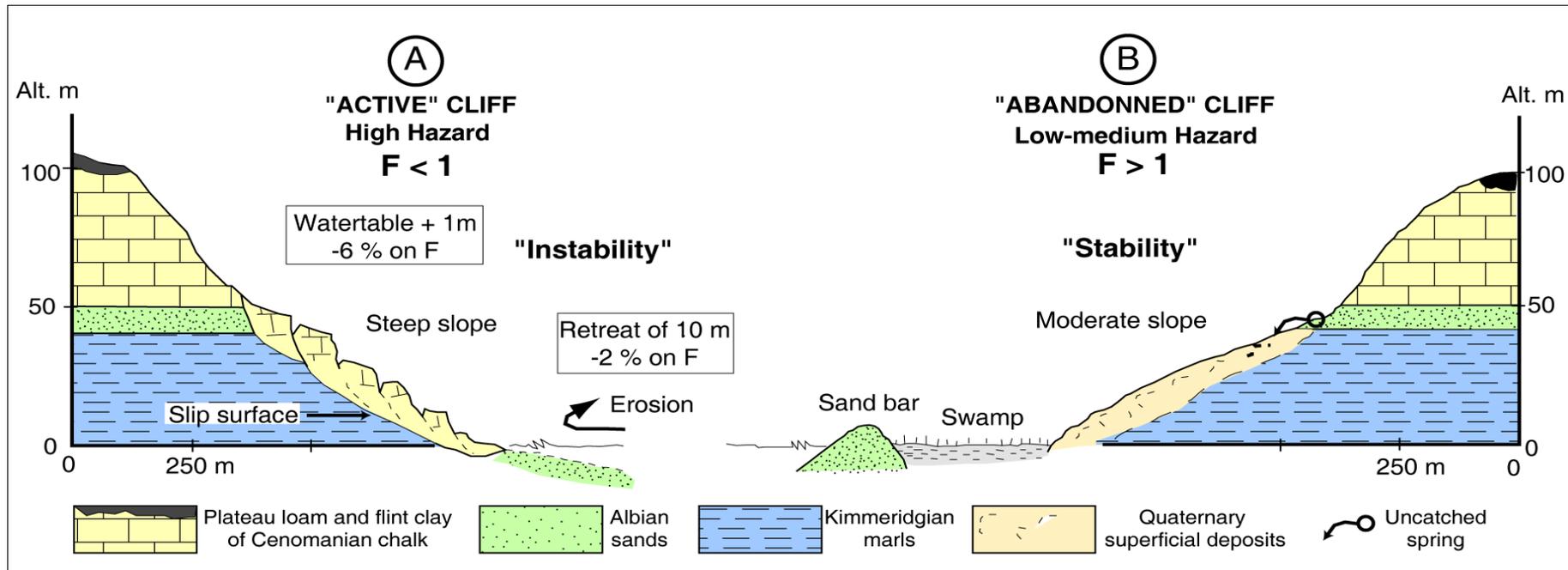
Tableau : Caractéristiques de l'ajustement à la loi puissance pour les 3 échantillons

→ Un minimum de 5 effondrements de plus de 100 m³ attendu par an par km linéaire entre Sainte-Marguerite-sur-Mer et Varengeville.

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la hiérarchisation des processus responsables

Exemple des versants littoraux

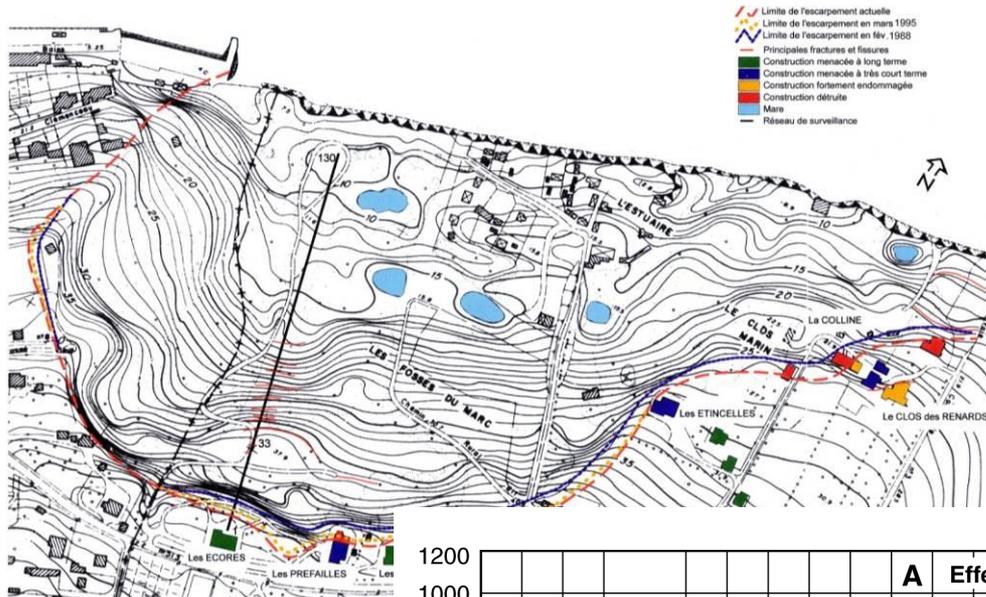


- Analyse de stabilité des pentes (calcul d'un facteur de sécurité)
- Influence majeure de:
 - variations nappe phréatique
 - érosion marine en pied du versant (butée)

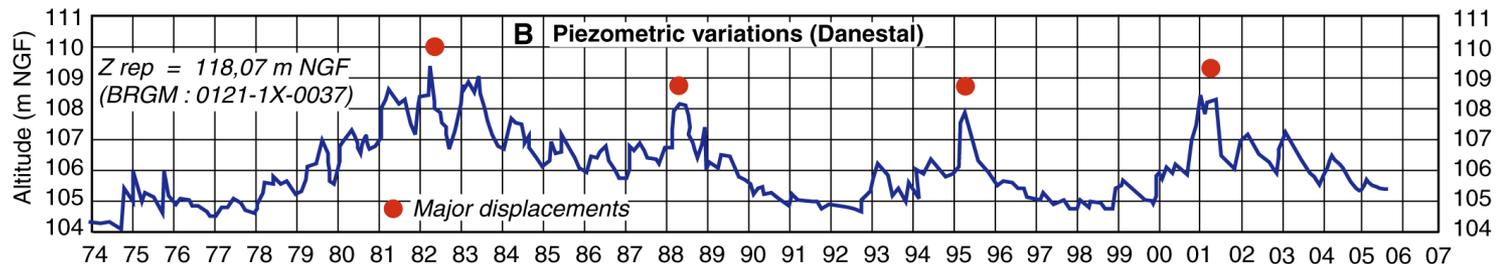
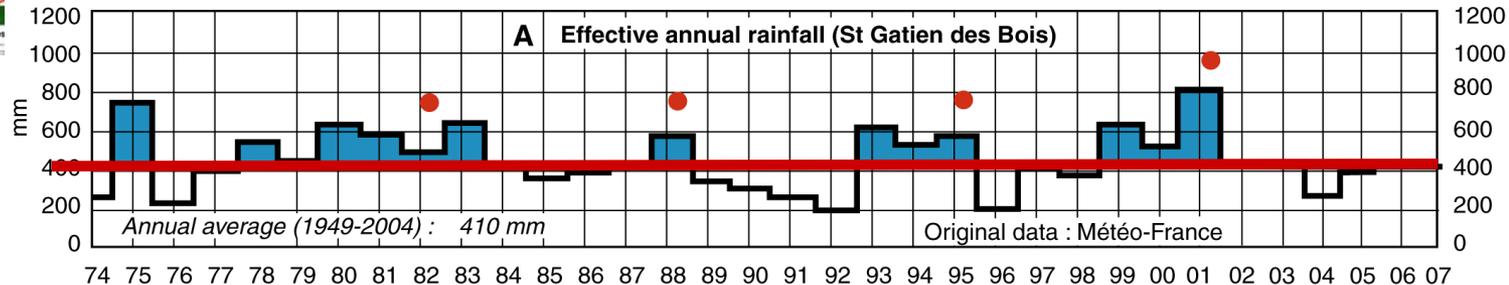
3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers la définition des seuils au-delà desquels il y a mouvements

■ Exemple des versants littoraux (glissement de Villerville-Cricqueboeuf)

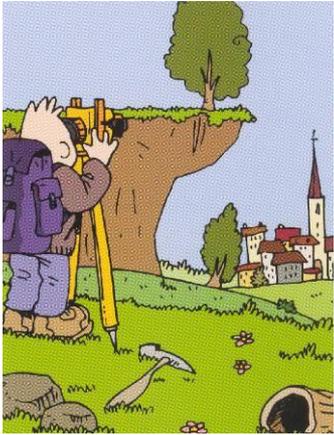


- 1^{ère} crise : 1982
- Réactivation: 1988, 1995, 2001
- Accélération provoquée par la nappe au dessus d'un **certain seuil**

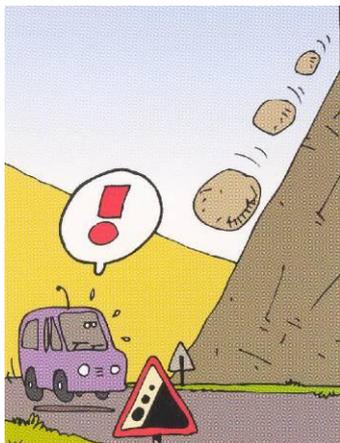


3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers un système d'alerte



Surveillance



Alerte

SISCA : Système Intégré de Surveillance de Crises de glissements de terrain argileux (accélération, fluidification)

Amélioration de la connaissance des facteurs de déclenchement contrôlant les ruptures de versant et les crises de mouvements de terrain

- développement d'un système de surveillance permettant une détection précoce des crises.

➔ Système pouvant servir à générer des alertes pour les autorités locales en charge de la protection des personnes et des biens.

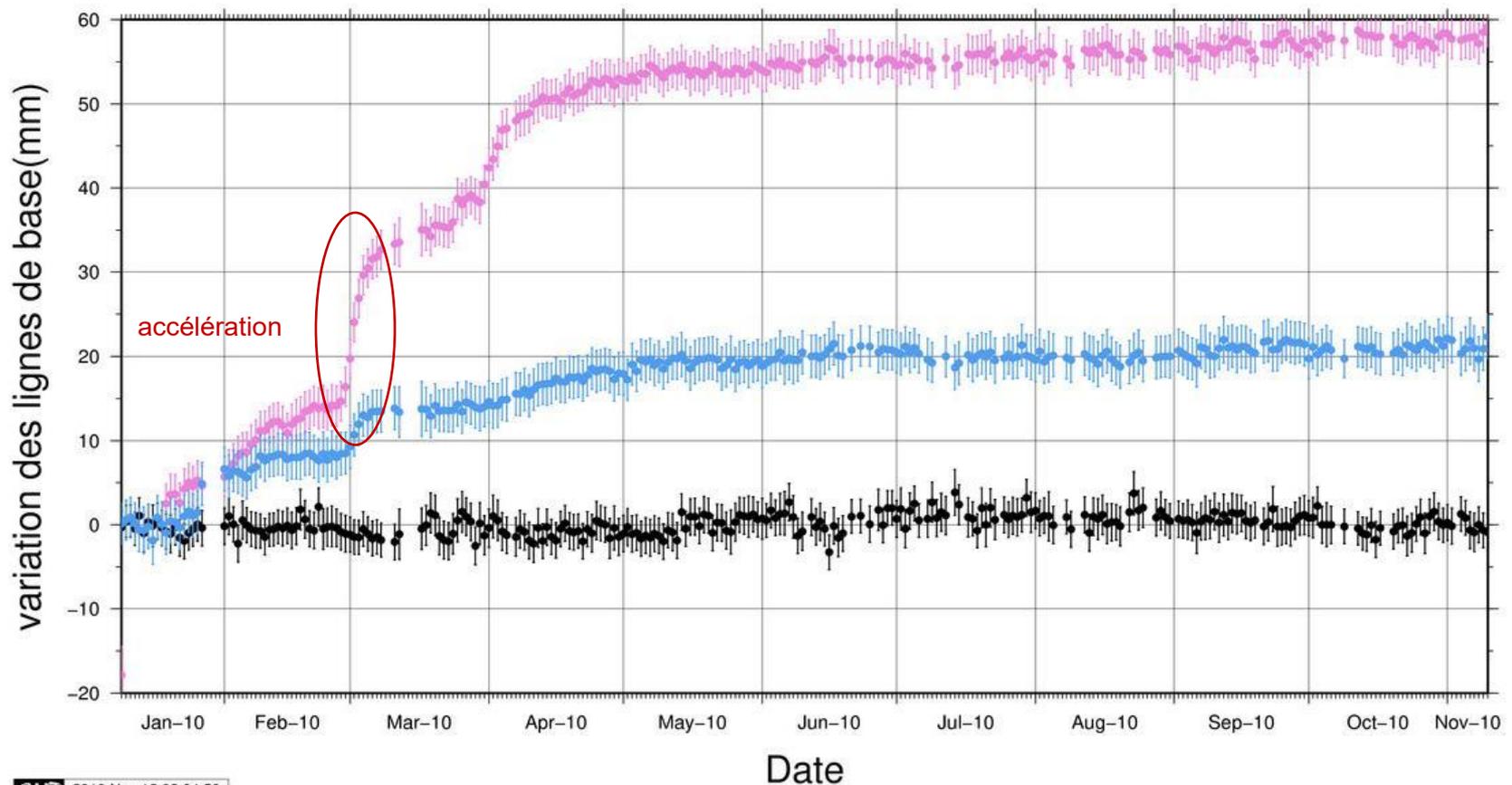
3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers un système d'alerte

Traitement de données GPS en temps quasi réel (J+1)

Exemple d'évolution des lignes de bases VLRV – GPS « mobiles »
Période Janvier 2010 – Novembre 2010

VLRV-VLRB
VLRV-VLRH
CAEN-VLRV



3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.2. Résultats : Vers un système d'alerte

Modélisation couplée déplacement de surface GPS avec variations des nappes phréatiques (**facteur 'déclenchant principal' + seuils**)

→ Calcul 'automatisé' de stabilité (type modèle de pente infinie) avec calcul en routine du coefficient de sécurité

En développement (pour 2013)

Plan

1. Côte à 'falaises' Normande : une grande diversité

2. Analyse des vitesses et rythmes d'évolution

2.1. Les cartes anciennes (cadastres) ...

2.2. Imagerie : aériennes (IGN), Satellitaire, Laser scan

2.3. Suivi topographique (station totale & GPS)

2.4. Synthèse

3. Analyse des processus responsables des dynamiques régressives

3.1. Réseau d'investigation et de surveillance

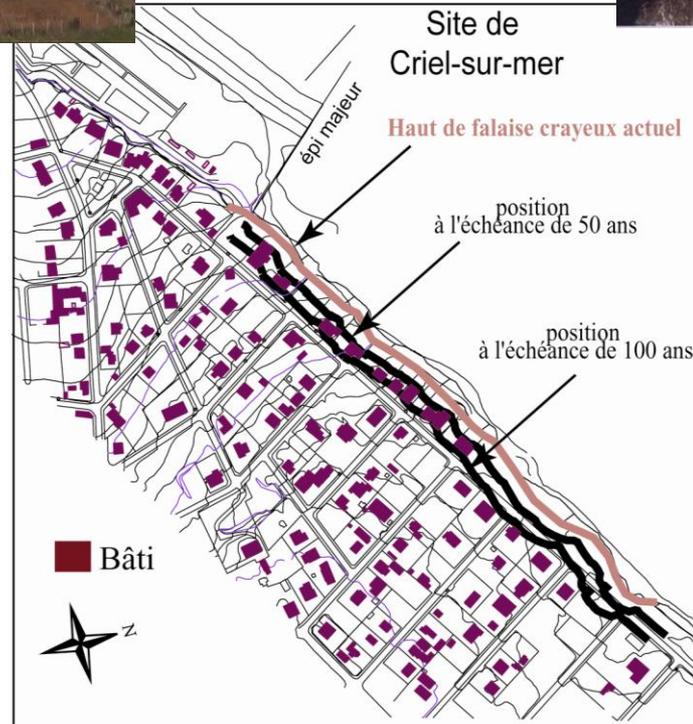
3.2. Résultats :

- Vers une hiérarchisation des processus responsables
- Vers une définition des seuils au-delà desquels il y a mouvements
- Vers un système d'alerte

4. Conclusion

4. Conclusion

- Les données acquises peuvent servir à la cartographie des risques



4. Conclusion

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

Aller vers **l'évaluation quantitative des risques** (QRA)

→ Mieux comprendre les processus à l'échelle 'locale'

- Mise en place d'observatoires haute résolution temporelle sur sites sélectionnés;
- **Effondrements** : étudier les dommages progressifs dans la falaise en relation avec l'altération mécanique, physico-chimique et variations de contraintes à la base de la falaise induites par l'action des vagues, ...;
- **Glissements** : surveillance par inclinométrie continue, GPS en continue, identification des circulations des eaux par techniques géophysiques, ...

→ Mieux comprendre la distribution des processus à l'échelle 'régionale'

- Suivi multi-dates Lidar & hyperspectral
- Utilisation des images satellites très haute résolution (quantification du retrait, quantification des déplacements de surface par corrélation d'images)
- Analyse probabiliste de la susceptibilité
- Effets du changement global (et variation des mers) sur l'aléa littoral

An aerial photograph showing a coastal cliff with a beach and green water. The cliff face is composed of layered rock, with a prominent white and grey section in the center. The beach is dark and pebbly, with a small patch of light-colored sand. The water is a vibrant green color. In the background, there are green fields, a line of trees, and several wind turbines under a clear blue sky.

Merci pour votre attention