



Samedi 4 juillet 2026 à 14h00
Cinéma du casino de Villers-sur-Mer

Olivier MAQUAIRE, Stéphane COSTA, Yannick THIERY, Yoann COPARD

Thomas ROULLAND, Mohamed KOUAH, Bastien SANDBERG, Alissia RIEUX

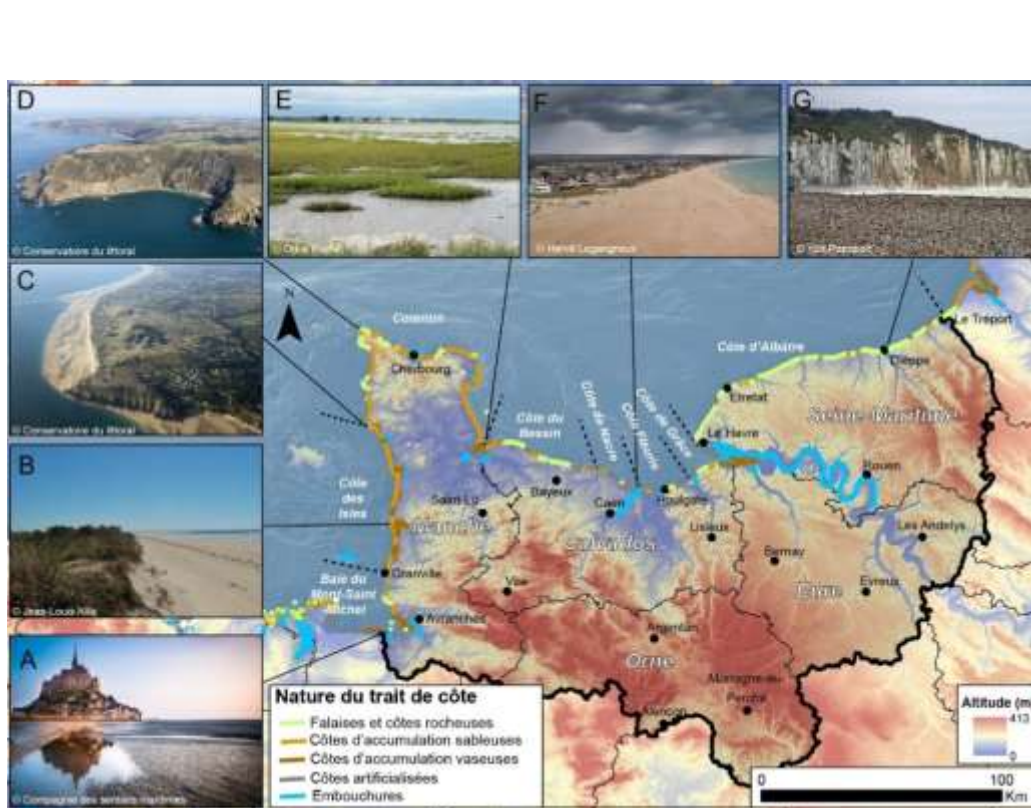
Cyrille FAUCHARD, Raphaël ANTOINE, François NICOT, Antoine WAUTIER, Mathieu FRESSARD, Olivier CANTAT

Robert DAVIDSON, Mohand MEDJKANE, Kristell MICHEL

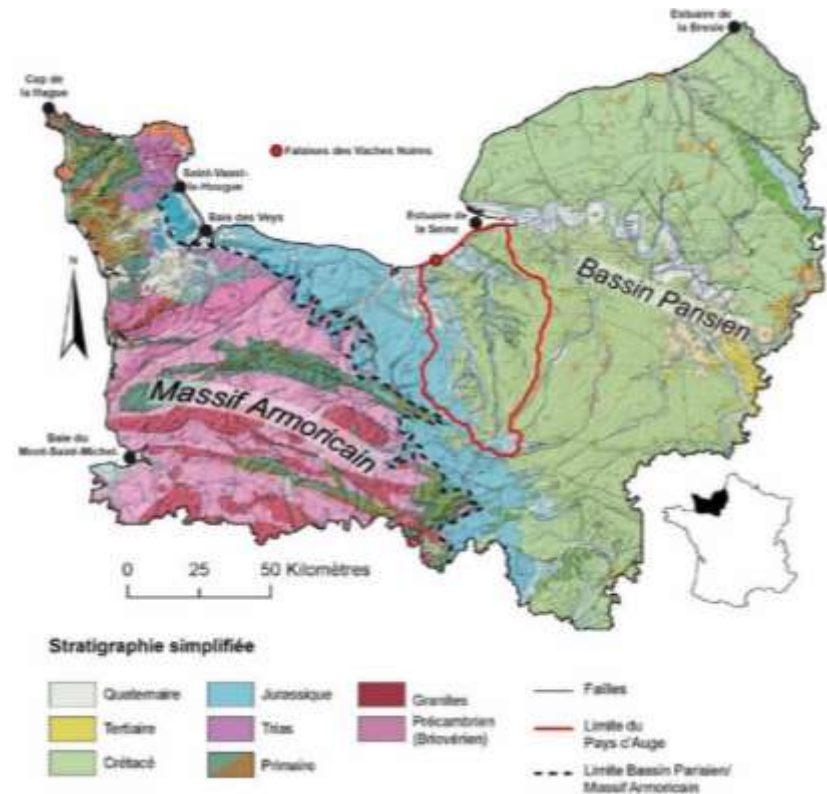


❑ La Normandie : une région côtière d'une grande diversité

- ✓ Environ 640 km de côte regroupant quasiment tous les types de relief littoraux de France ;
- ✓ Deux provinces géologiques contrastées : Massif Armoricain et Bassin Parisien ;



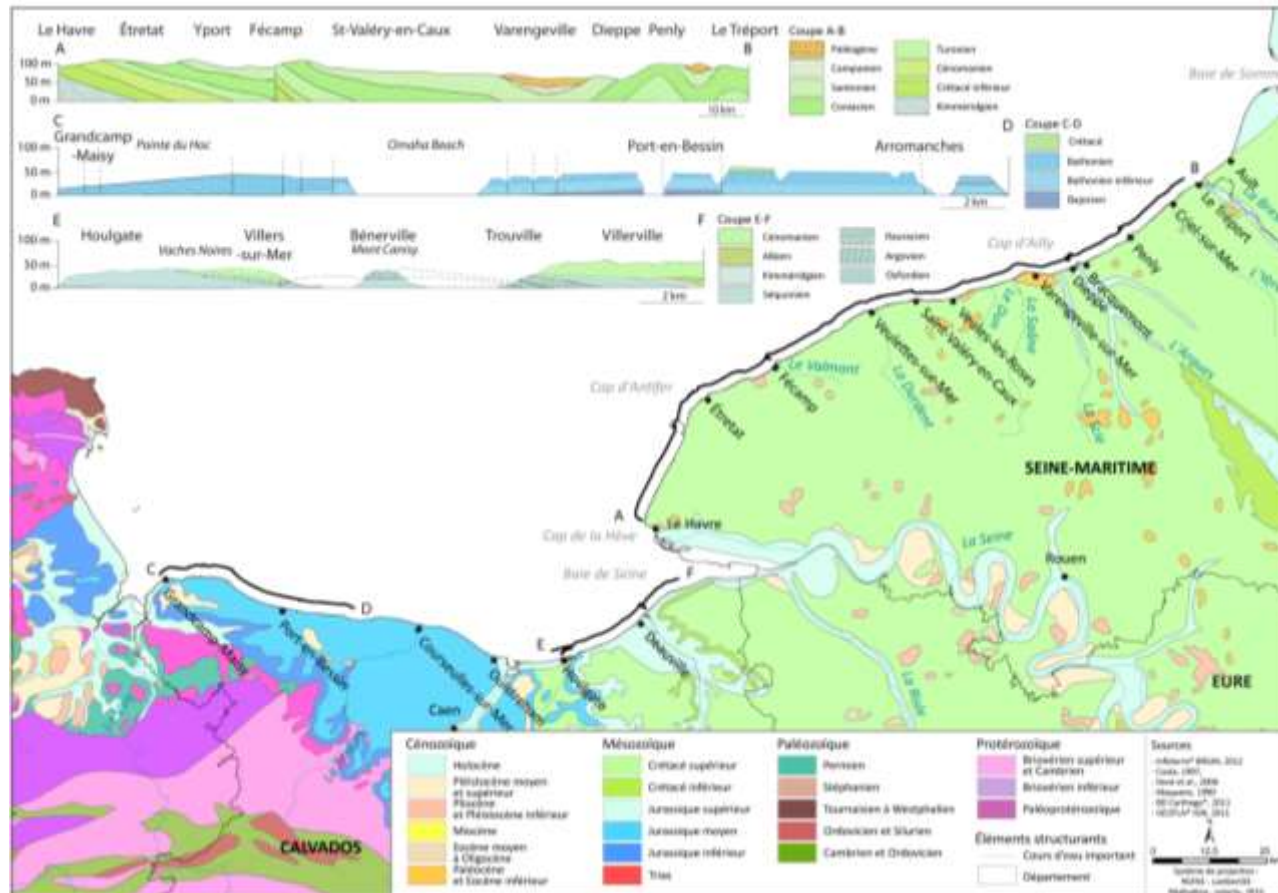
Cartographie et illustration de diverses côtes normandes



Carte géologique de Normandie (d'après la carte géologique de la France au 1/1 000 000 du BRGM – modifiée de Fressard, 2013)

❑ La Normandie : une région côtière d'une grande diversité

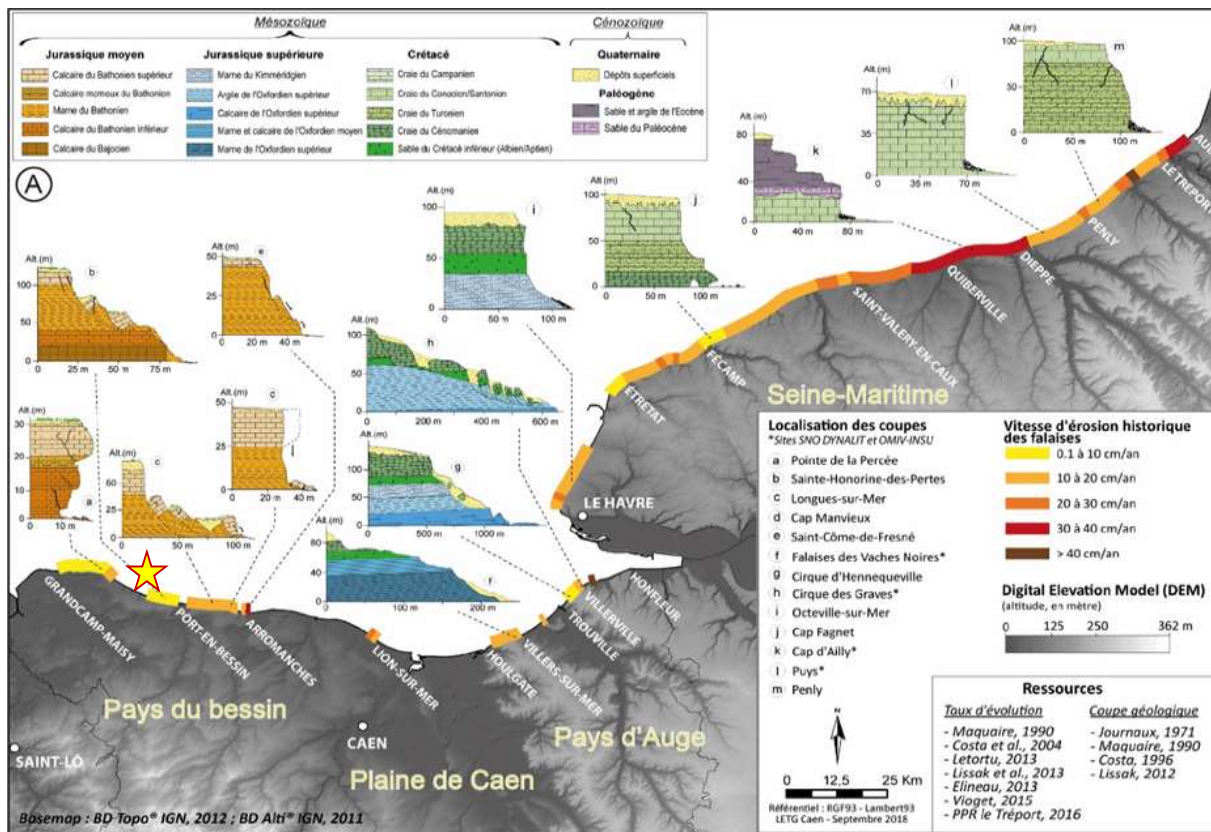
- ✓ Environ 640 km de côte regroupant quasiment tous les types de relief littoraux de France ;
- ✓ Deux provinces géologiques contrastées : Massif Armoricain et Bassin Parisien ;



Carte géologique de Normandie (d'après la carte géologique de la France au 1/1 000 000 du BRGM – modifiée de Letortu, 2013)

❑ La Normandie : une région côtière d'une grande diversité

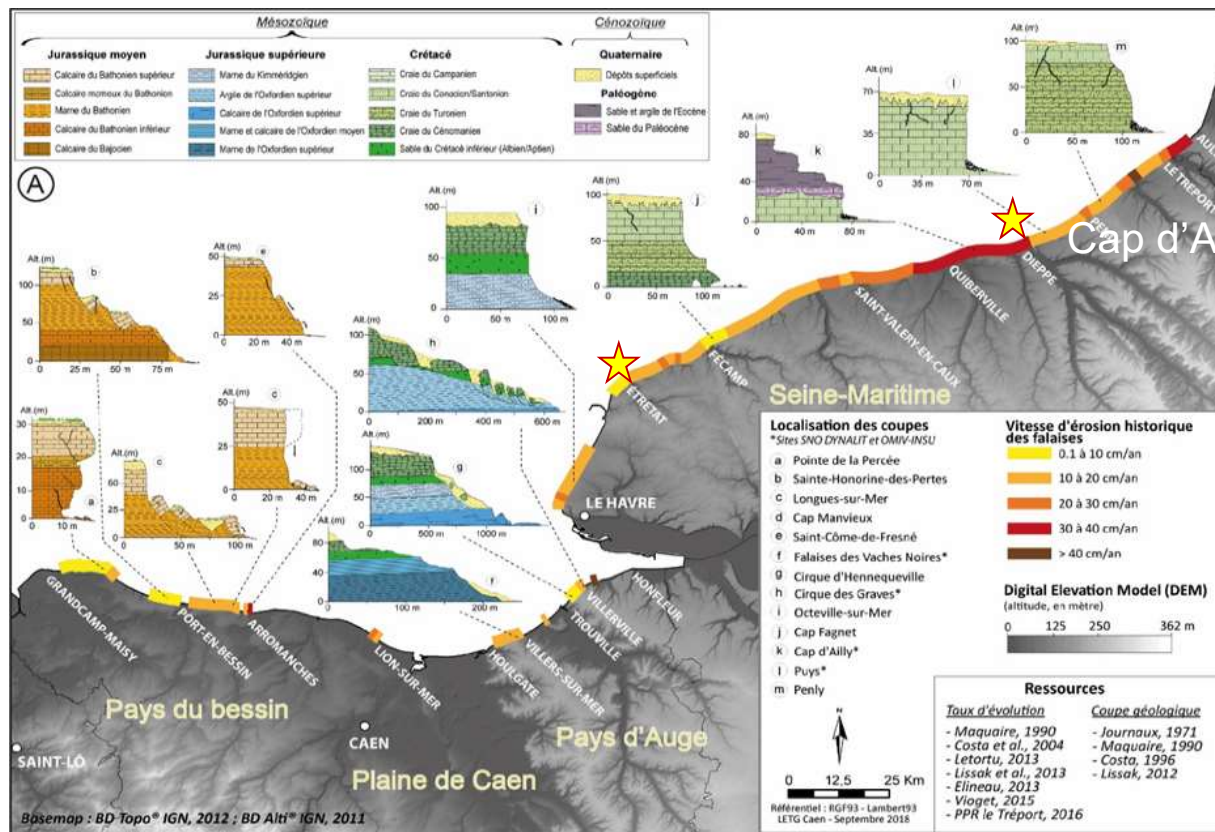
- ✓ Environ 640 km de côte regroupant quasiment tous les types de relief littoraux de France ;
- ✓ Deux provinces géologiques contrastées : Massif Armoricain et Bassin Parisien ;
- ✓ Des terrains sédimentaires taillés en **falaises à recul « rapide »** évoluant par mouvements hydrogravitaires brusques et soudains et érosion particulière.



Localisation et typologie des falaises sédimentaires en Normandie (Costa et al., 2019)

❑ La Normandie : une région côtière d'une grande diversité

- ✓ Environ 640 km de côte regroupant quasiment tous les types de relief littoraux de France ;
- ✓ Deux provinces géologiques contrastées : Massif Armoricain et Bassin Parisien ;
- ✓ Des terrains sédimentaires taillés en **falaises à recul « rapide »** évoluant par mouvements hydrogravitaires brusques et soudains et érosion particulière.

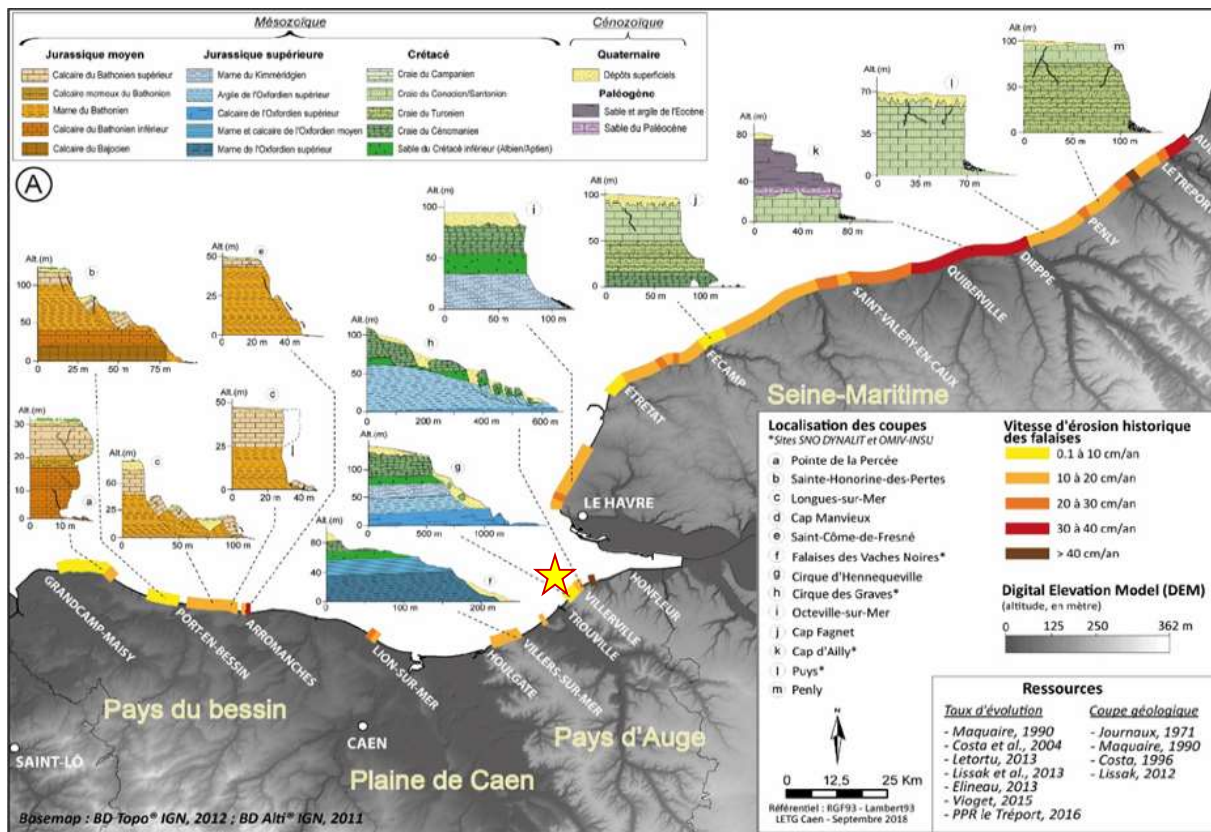


Localisation et typologie des falaises sédimentaires en Normandie (Costa et al., 2019)



❑ La Normandie : une région côtière d'une grande diversité

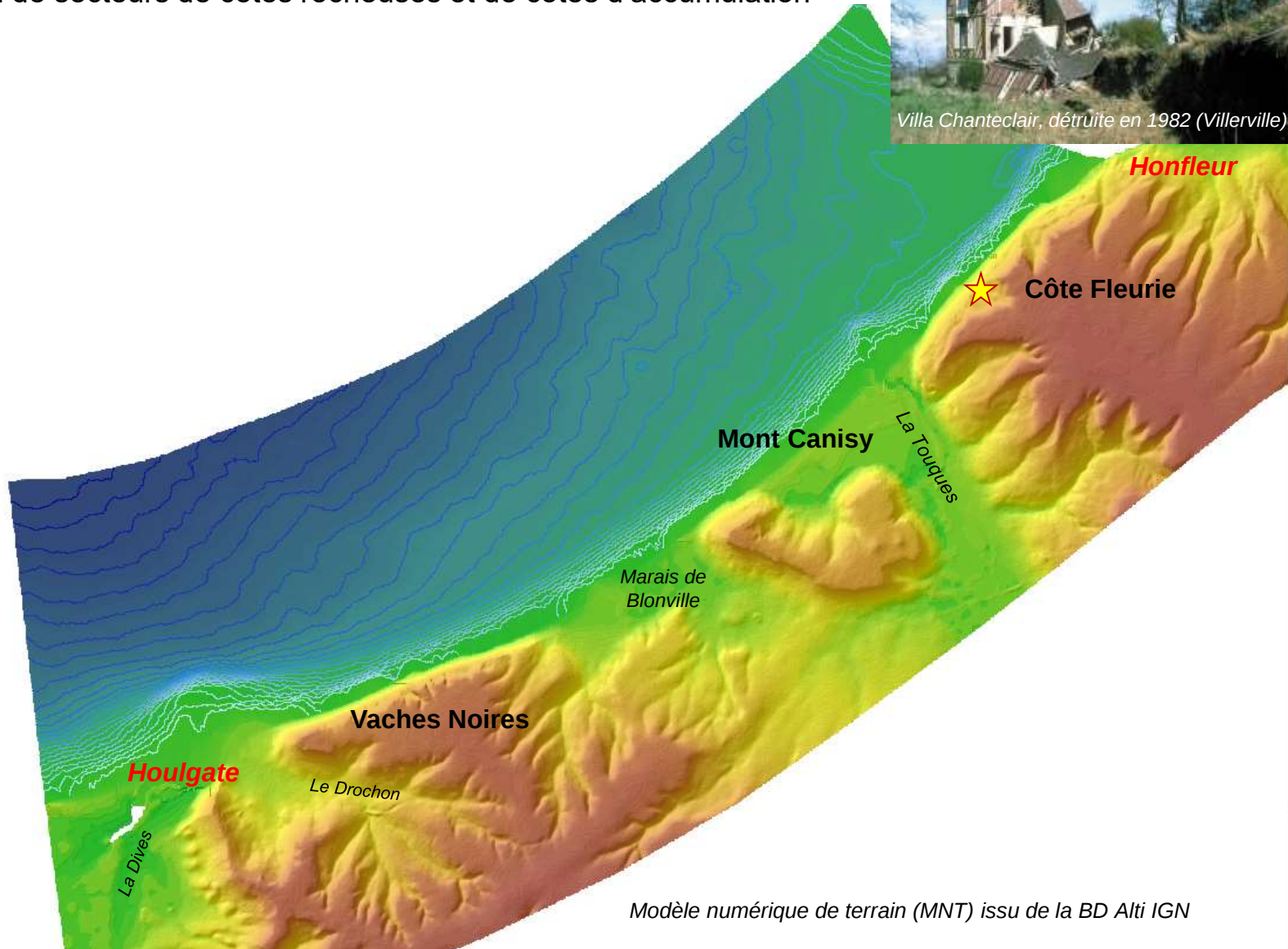
- ✓ Environ 640 km de côte regroupant quasiment tous les types de relief littoraux de France ;
- ✓ Deux provinces géologiques contrastées : Massif Armoricain et Bassin Parisien ;
- ✓ Des terrains sédimentaires taillés en **falaises à recul « rapide »** évoluant par mouvements hydrogravitaires brusques et soudains et érosion particulière.



Localisation et typologie des falaises sédimentaires en Normandie (Costa et al., 2019)

❑ Le Pays d'Auge : un littoral assez original ...

- Succession de secteurs de côtes rocheuses et de côtes d'accumulation



❑ Le Pays d'Auge : un littoral assez original ...

4 crises majeures ... :

- 1) 10/11 janvier 1982
- 2) 12/13 février 1988
- 3) Février 1995
- 4) 23/24 mars 2001



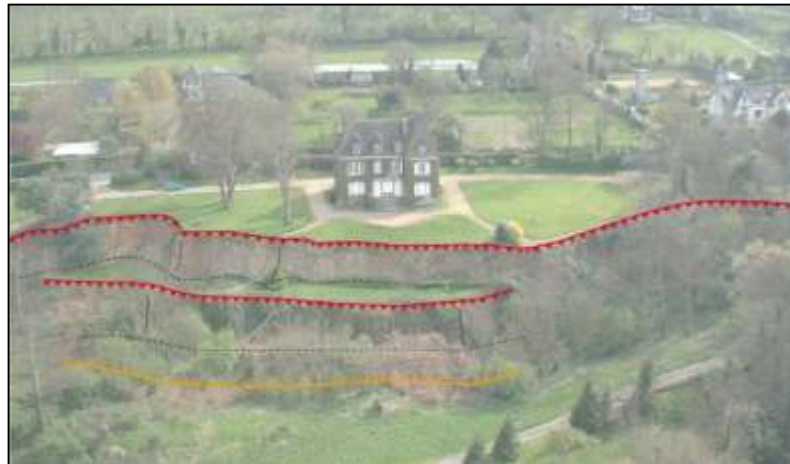
*Villa Chanteclair, détruite en 1982 (Villerville)
(cliché : O. Maquaire, 1988)*



*Tennis endommagés (Villerville)
(cliché : Diren, 2001 & O. Maquaire, 2001)*



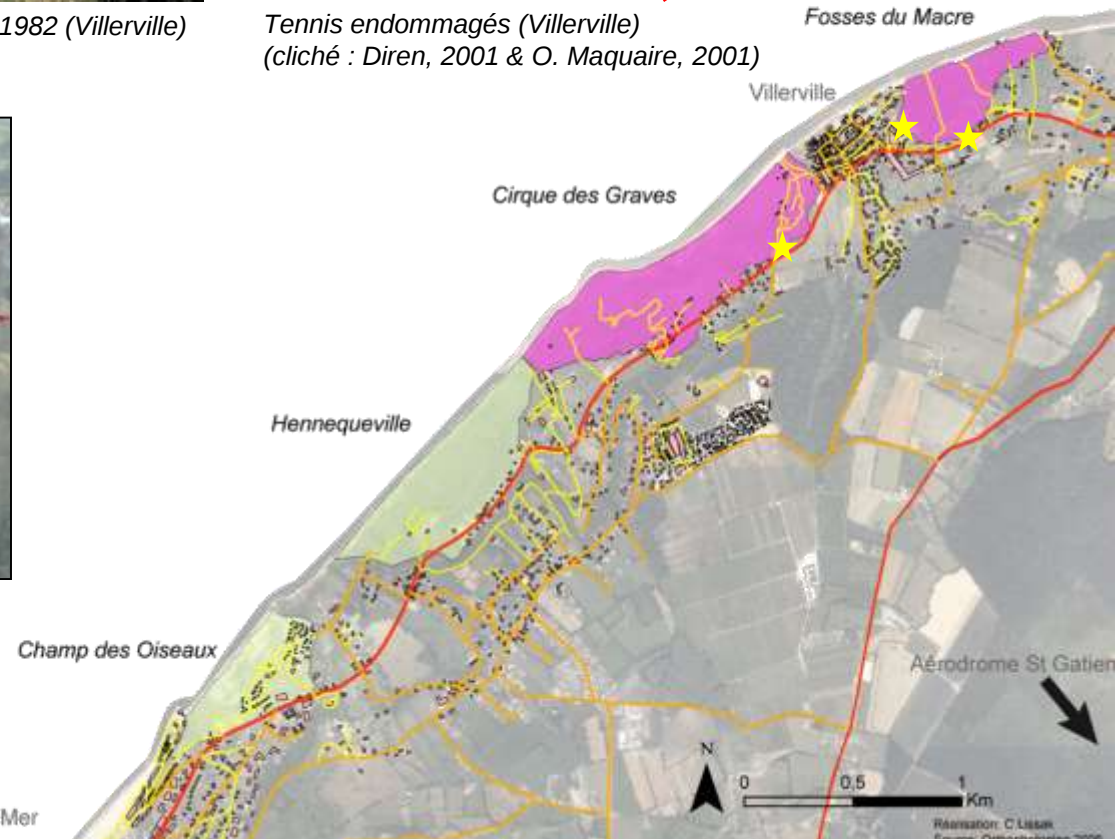
Fosses du Macre



*Recul de l'escarpement principal (Villa Les Écores) en 1988
et en 2001 aux Fosses du Macre (Cricqueboeuf) (cliché :
Diren, 2001)*

*Localisation des quatre principaux glissements
littoraux entre Trouville-sur-Mer et Honfleur
(Lissak, 2014)*

↙ Trouville-s-Mer



❑ Le Pays d'Auge : un littoral assez original ...

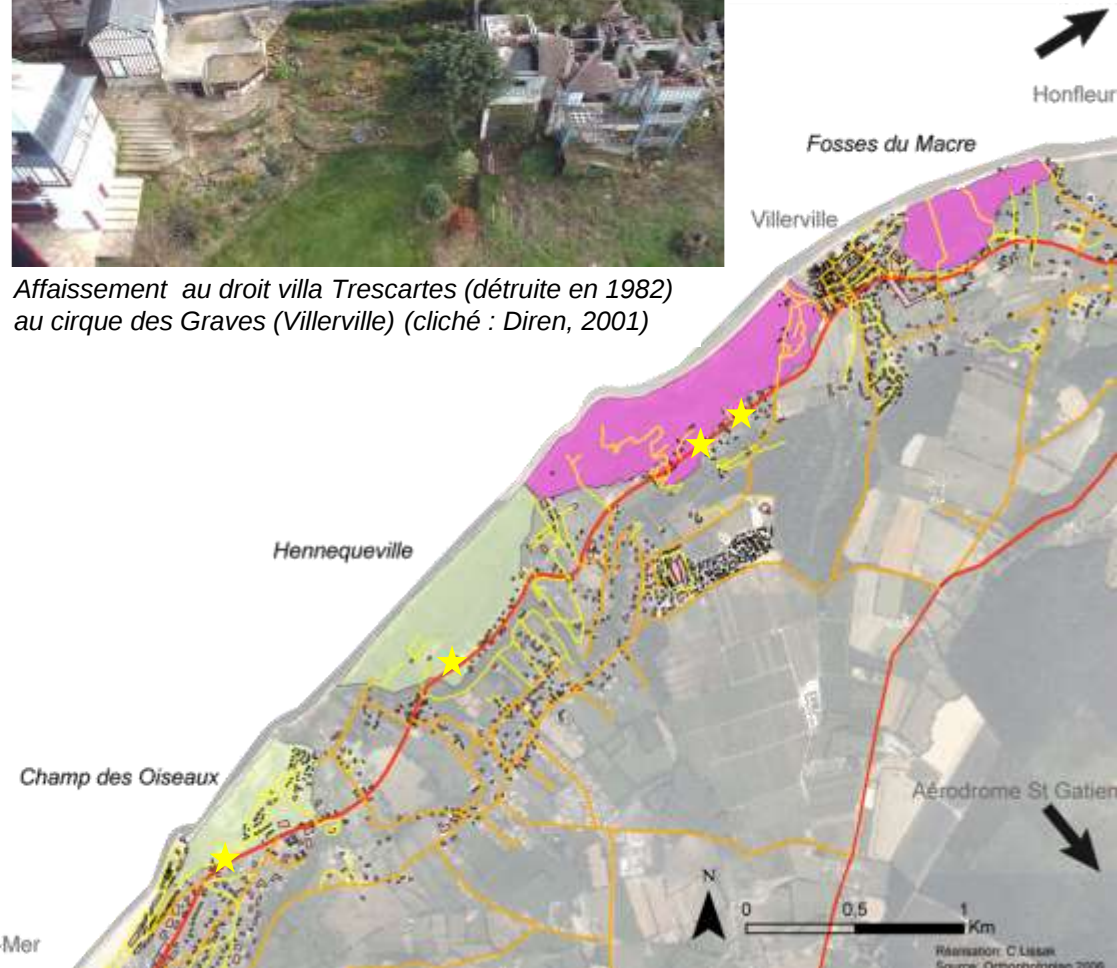
4 crises majeures suivies par des périodes de « faibles activités » avec affaissements de la route ...



Affaissement au droit villa Mirella (détruite en 1982) au cirque des Graves (Villerville) (cliché : Maquaire, 2008)



Affaissement au droit villa Trescartes (détruite en 1982) au cirque des Graves (Villerville) (cliché : Diren, 2001)



Localisation des quatre principaux glissements littoraux entre Trouville-sur-Mer et Honfleur (Lissak, 2014)

↙ Trouville-s-Mer

↗ Honfleur

❑ Le Pays d'Auge : un littoral assez original ...

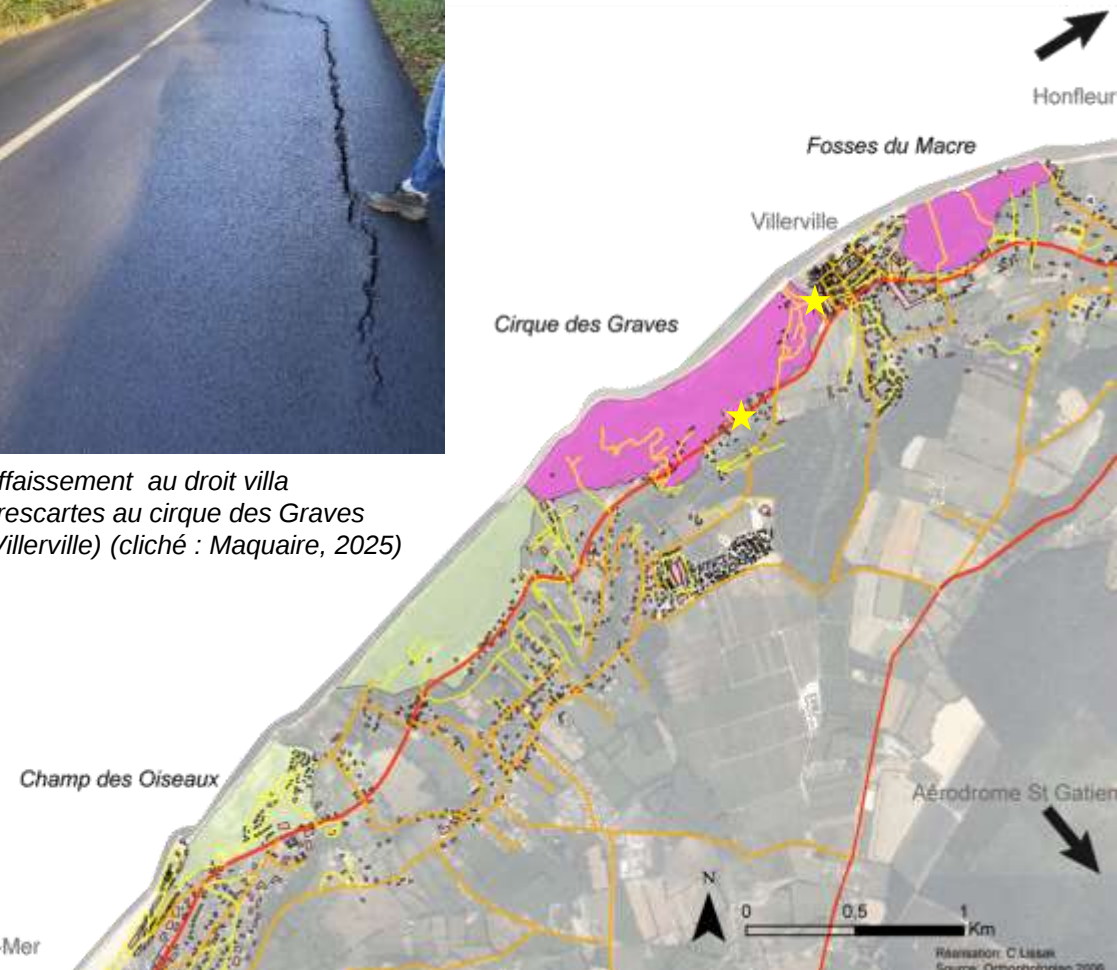
... avec un hiver 2024-2025 ayant connu une recrudescence d'événements ...



Glissement le long du chemin d'accès au cirque des Graves (Villerville) (cliché : Maquaire, 2025)



Affaissement au droit villa
Trescartes au cirque des Graves
(Villerville) (cliché : Maquaire, 2025)

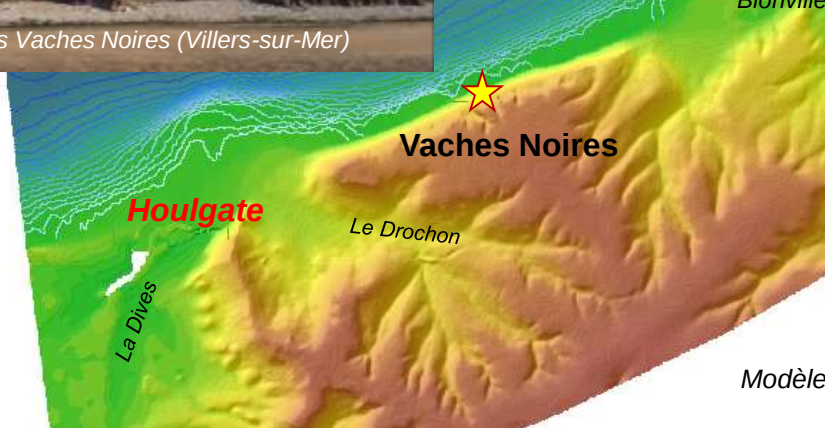
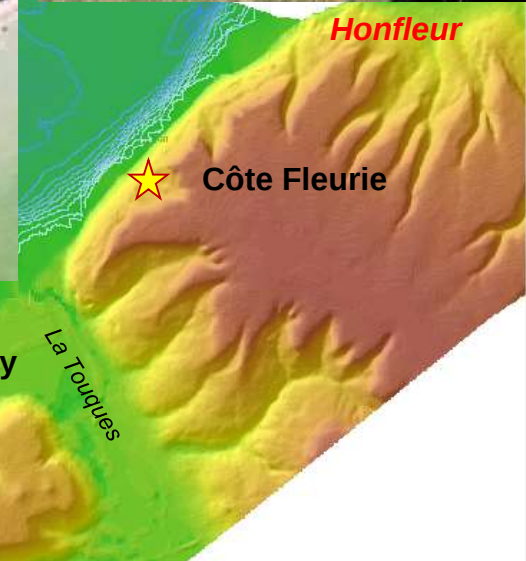


Localisation des quatre principaux glissements
littoraux entre Trouville-sur-Mer et Honfleur
(Lissak, 2014)

↙ Trouville-s-Mer

❑ Le Pays d'Auge : un littoral assez original ...

- Succession de secteurs de côtes rocheuses et de côtes d'accumulation

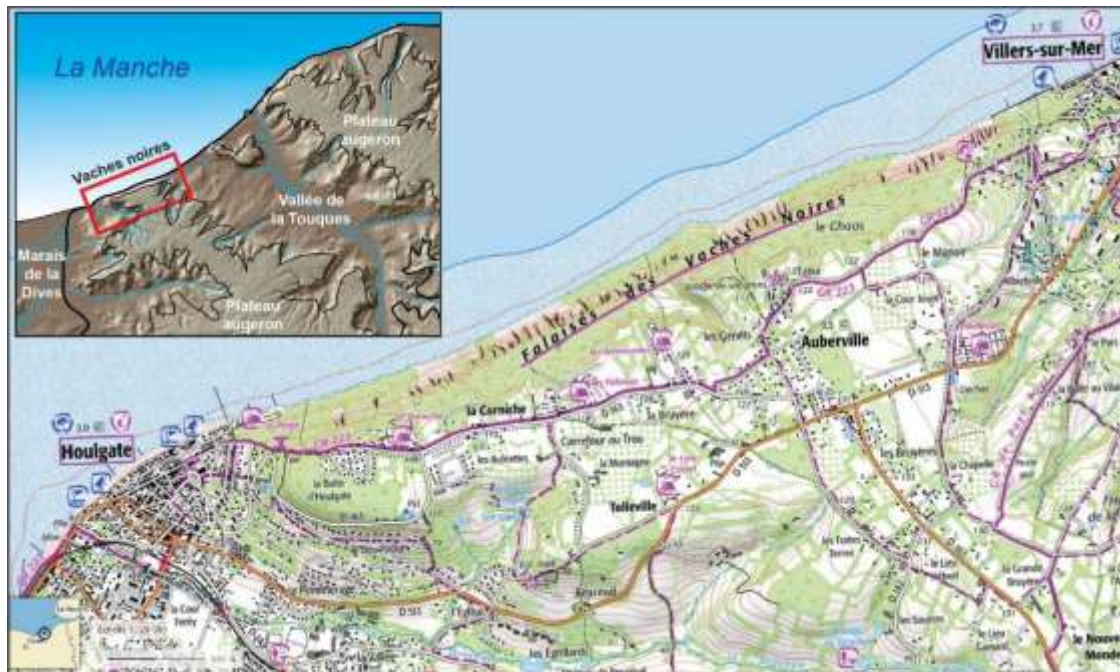


Modèle numérique de terrain (MNT) issu de la BD Alti IGN

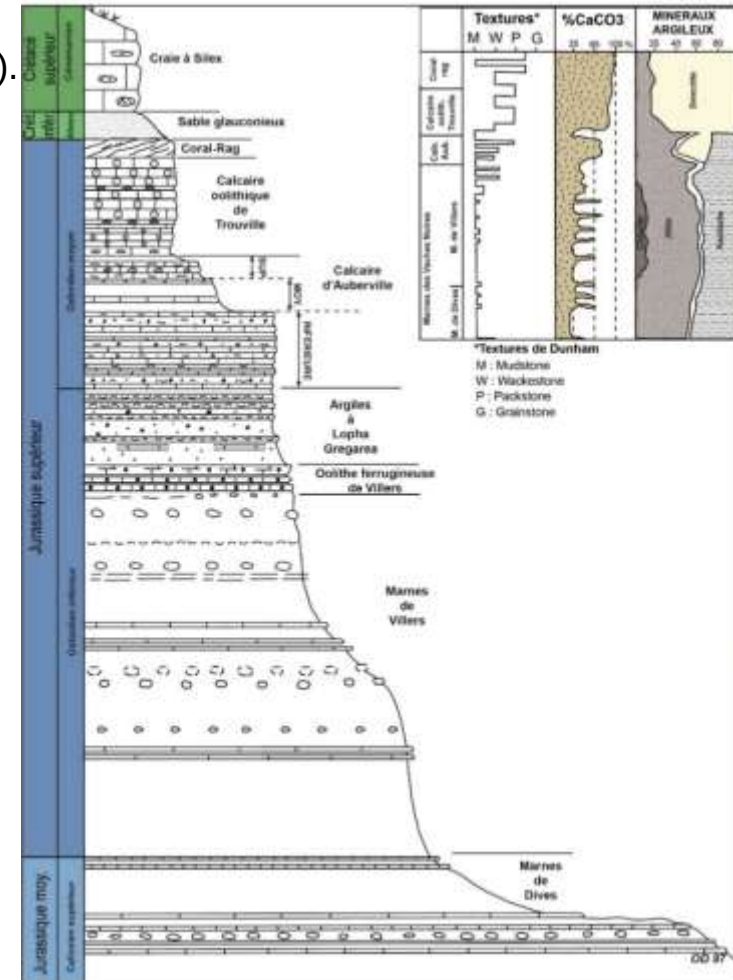
❑ Les falaises des Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

Entre Houlgate et Villers-sur-Mer sur 4,5 km (altitude max: 120 m)

- ✓ **Formations argilo-marneuses avec lits et bancs calcaires** (Callovo-Oxfordien, Jurassique moyen et supérieur) ;
- ✓ **Série sablo-craeuse** (Albien-Cénomanien, Crétacé supérieur).



Localisation des falaises des Vaches Noires dans le Pays d'Auge septentrional et carte topographique associée (carte 1/25 000, IGN)



Coupe synthétique de référence des Vaches Noires (modifiée de Dugué, 1989)

❑ Les falaises des Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

Entre Houlgate et Villers-sur-Mer sur 4,5 km (altitude max: 120 m)

- ✓ **Formations argilo-marneuses avec lits et bancs calcaires** (Callovo-Oxfordien, Jurassique moyen et supérieur) ;
- ✓ **Série sablo-crayeuse** (Albien-Cénomanién, Crétacé supérieur).
- ✓ Affectées par de **multiples instabilités hydrogravitaires...**



Les mouvements de terrain présentent un enchaînement dans l'espace et dans le temps

❑ Les falaises des Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

Entre Houlgate et Villers-sur-Mer sur 4,5 km (altitude max: 120 m)

- ✓ **Formations argilo-marneuses avec lits et bancs calcaires** (Callovo-Oxfordien, Jurassique moyen et supérieur) ;
- ✓ **Série sablo-crayeuse** (Albien-Cénomanién, Crétacé supérieur).
- ✓ Affectées par de **multiples instabilités hydrogravitaires**...
- ✓ Ayant **peu fait l'objet d'études** approfondies concernant la quantification des dynamiques d'évolution

Études géomorphologiques récentes :

- Décennies 1960-1970 : description des formes et processus associés ;
- Décennie 1990 : quelques travaux sur les dynamiques ;
- > 2004 : encadrement de lycéens (prépa) et d'étudiants de L3 et M1 ;
- Septembre 2014 : début des suivis puis intégration au Service National d'Observation (SNO) DYNALIT ;
- Nombreux projets de recherche et trois thèses de doctorat,



DYNALIT : Service National d'Observation (SNO) axé sur l'étude de la dynamique du littoral et du trait de côte est l'un des services labellisés fédérés par l'Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière IR ILICO.

<https://dynamit.fr/> <https://www.ir-ilico.fr/>

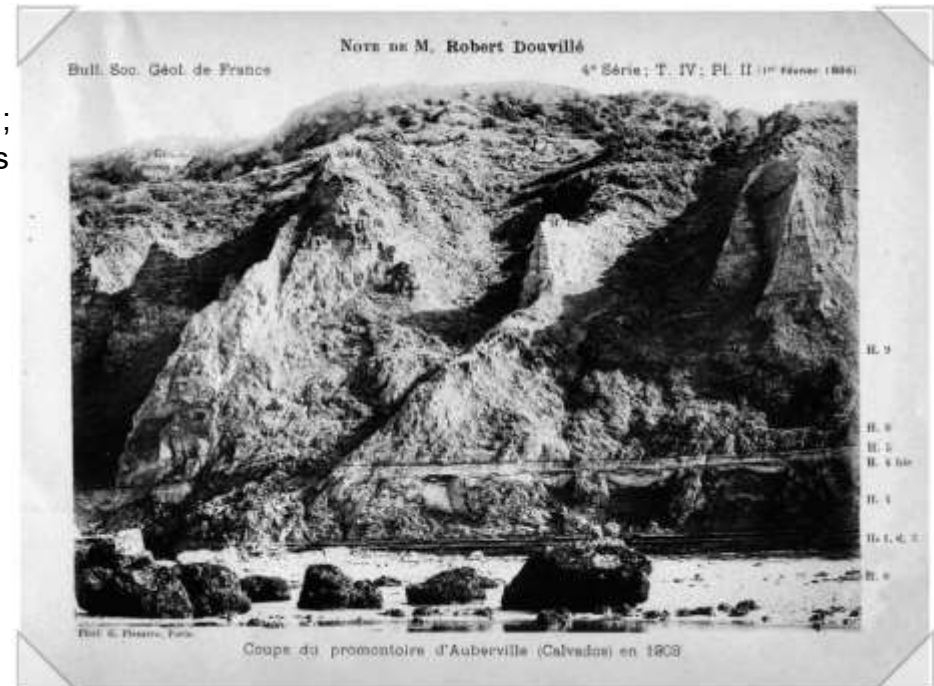
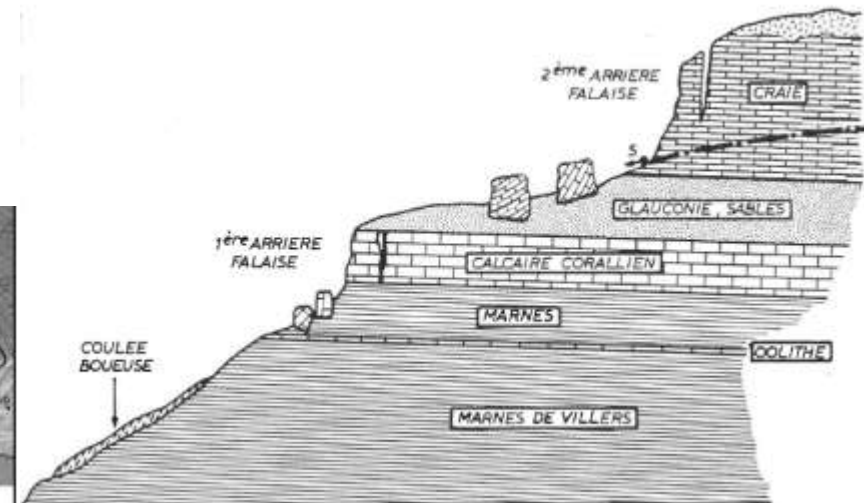
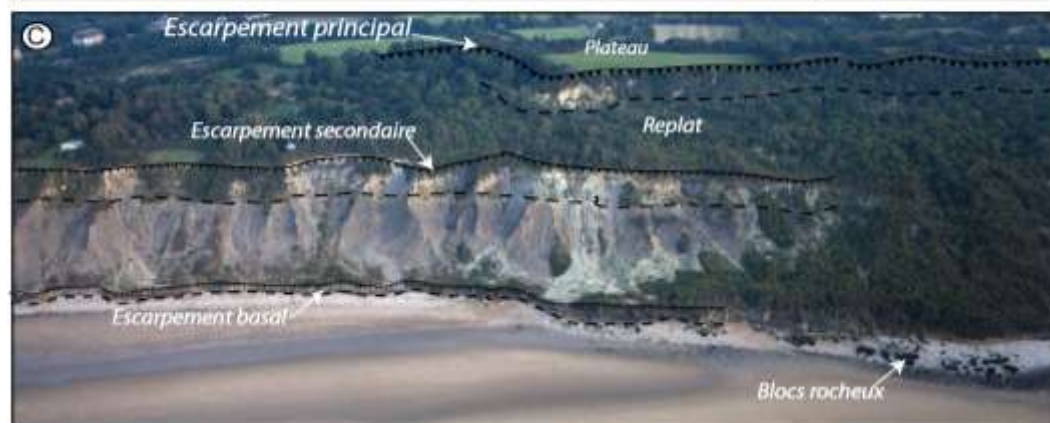
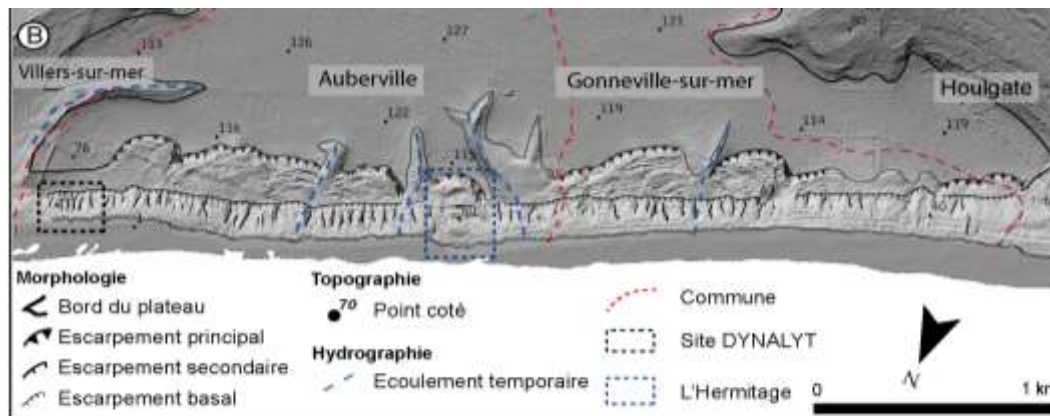


Illustration d'une coupe du Jurassique de la plage de Villers-sur-Mer révisée par Robert Douvillé en 1904

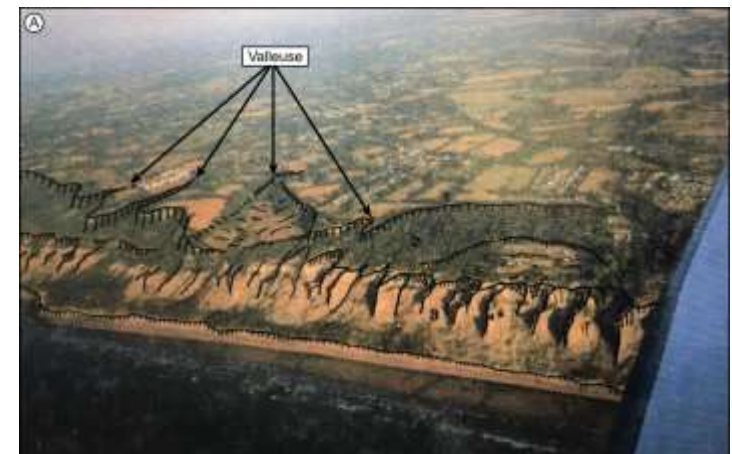
❑ Les falaises des Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

Une morphologie bien caractéristique ...

- ✓ Trois escarpements aux tracés très différents avec valleuses



Coupe type des falaises des Vaches Noires (rapport de présentation du PPR des falaises des Vaches Noires, 1993).



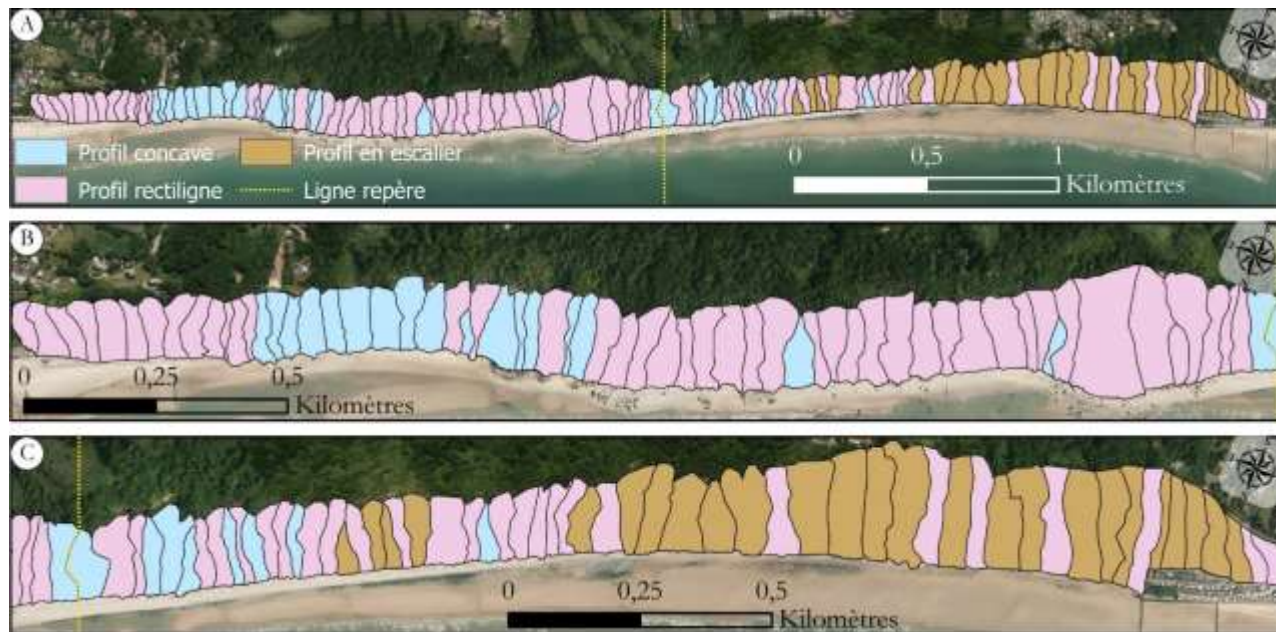
Illustrations de la morphologie (plateau, escarpements, valleuses, replat chahuté, bandlands) des falaises des Vaches Noires

❑ Les falaises des Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

Une morphologie bien caractéristique ...

- ✓ **Trois escarpements** aux tracés très différents avec **valleuses**
- ✓ **121 bassins versants juxtaposés** limités par les crêtes, l'escarpement secondaire et l'escarpement basal (trait de côte) **selon trois types de profils** (concave, rectiligne ou en escalier) ...
- ✓ ... évoluant indépendamment les uns des autres

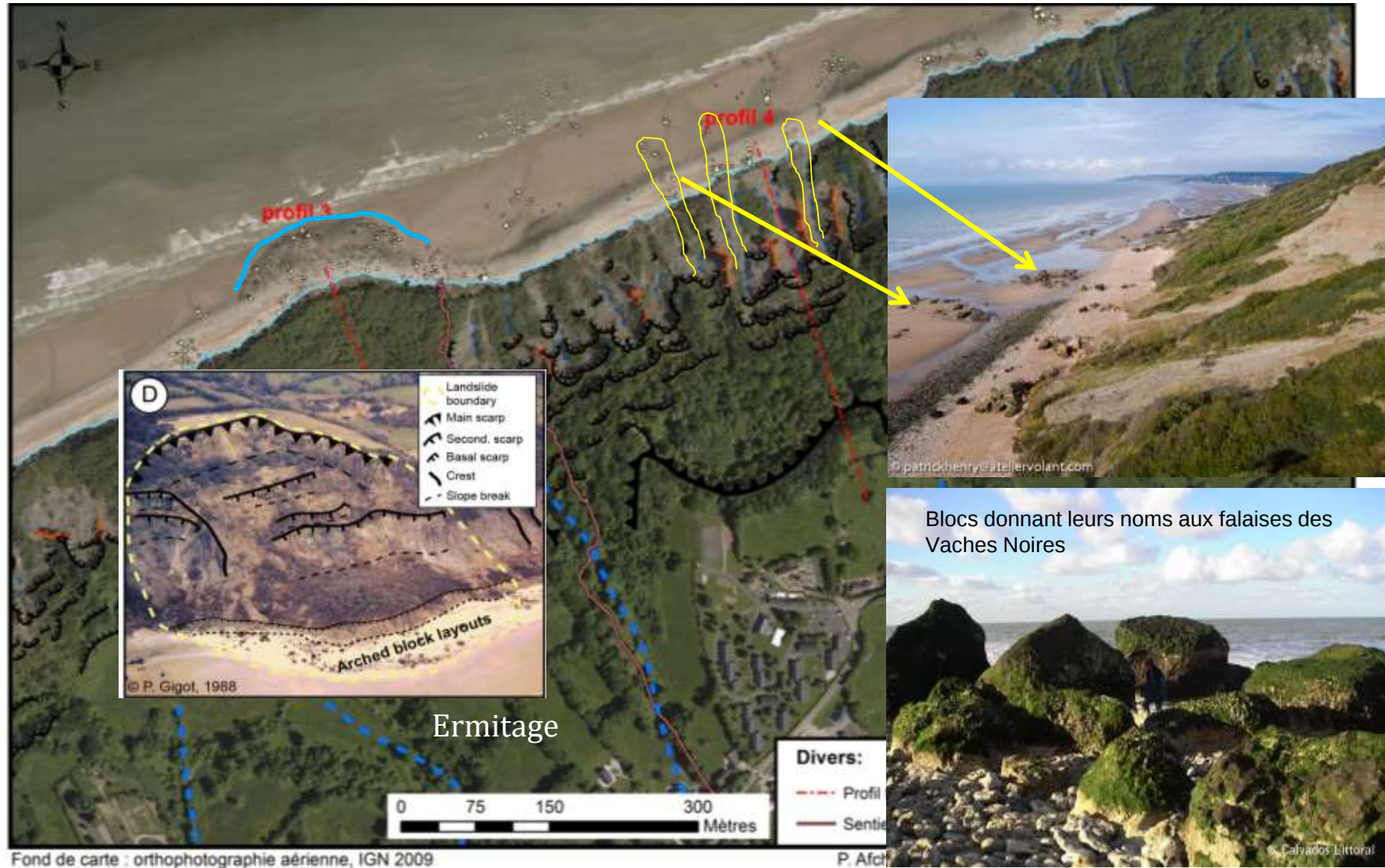
Morphologie des badlands des falaises des Vaches Noires avec des crêtes bien marquées, des crêtes fortement érodées et des étages morphologiques avoisinants (24 juillet 2024) in thèse de doctorat B. Sandberg, 2025.



Cartographie des trois types de profils en long des ravines des falaises des Vaches Noires. A) Sur l'ensemble des falaises ; B) Zoom sur la moitié est ; C) Zoom sur la moitié ouest. in thèse de doctorat B. Sandberg, 2025.

❑ Les falaises de Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

Une morphologie bien caractéristique ...



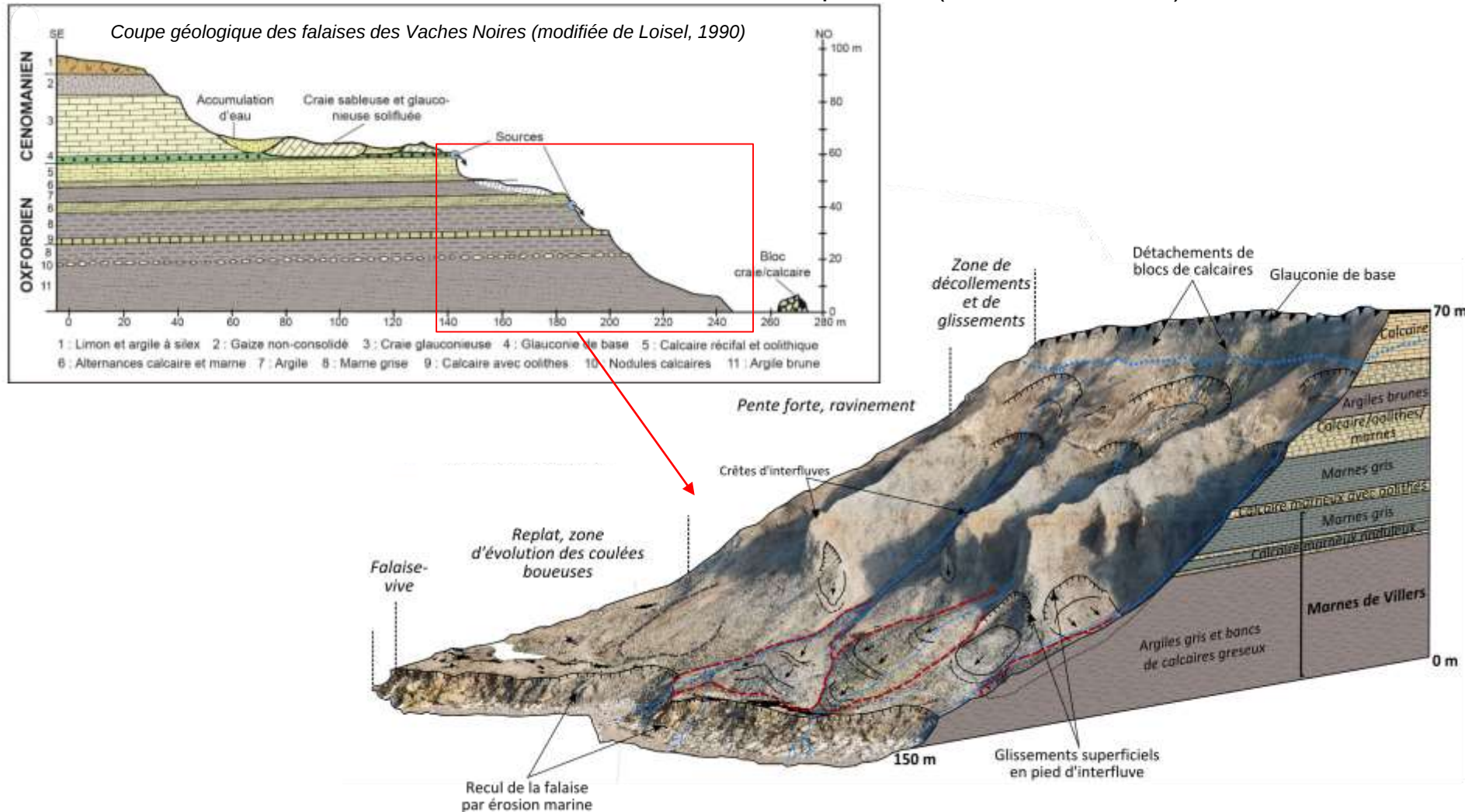
❑ Les falaises des Vaches Noires : un cas rare de badlands côtiers

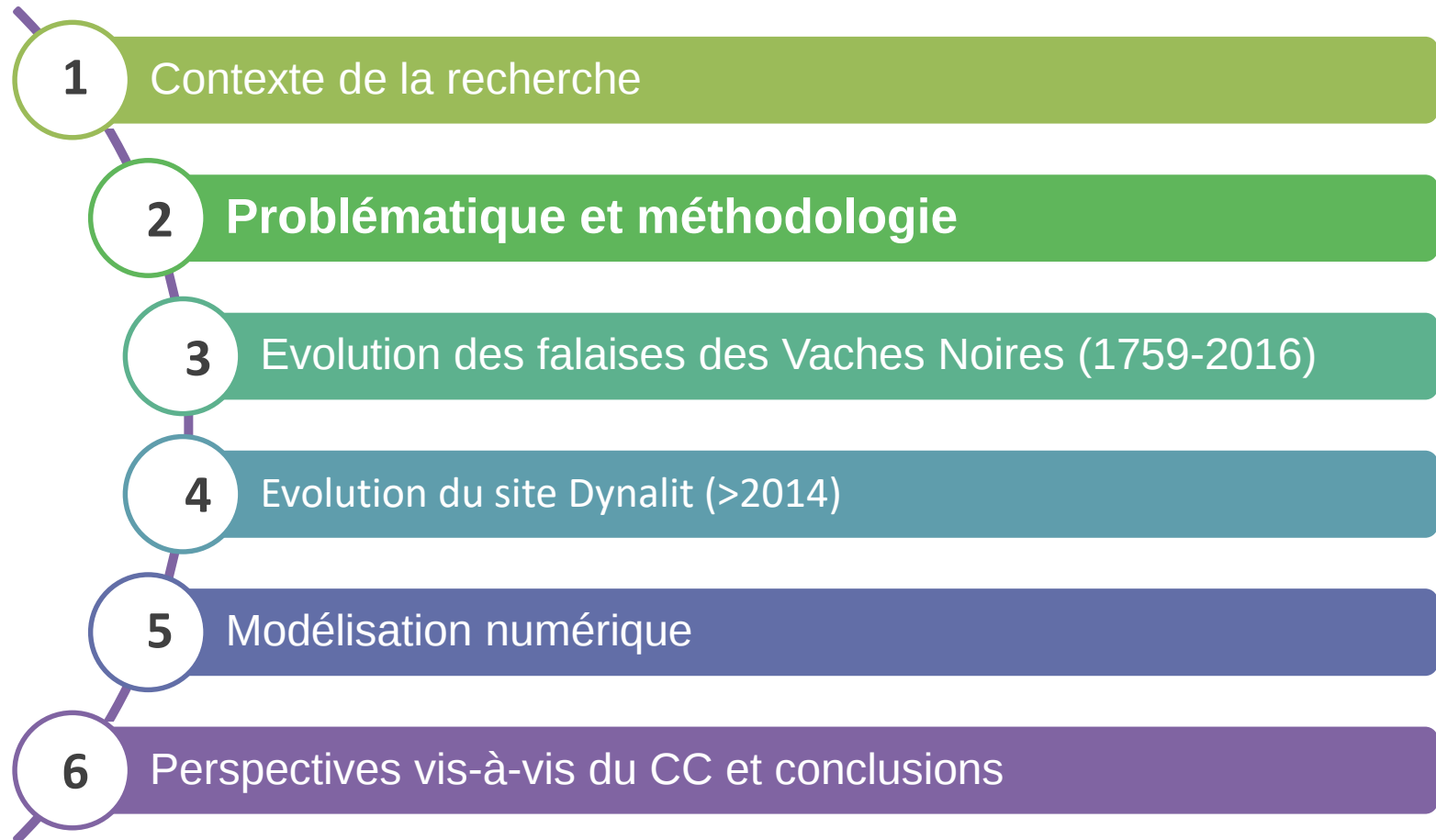
Pour résumé, les principaux processus hydrogravitaires sont situés sur :

Escarpement principal : glissements rotationnels, basculements, ...

Escarpement secondaire : glissements rotationnels, écroulements rocheux

Partie inférieure des falaises : coulées boueuses entre des pinacles (crêtes d'interfluve)





❑ Problématique principale et questions associés

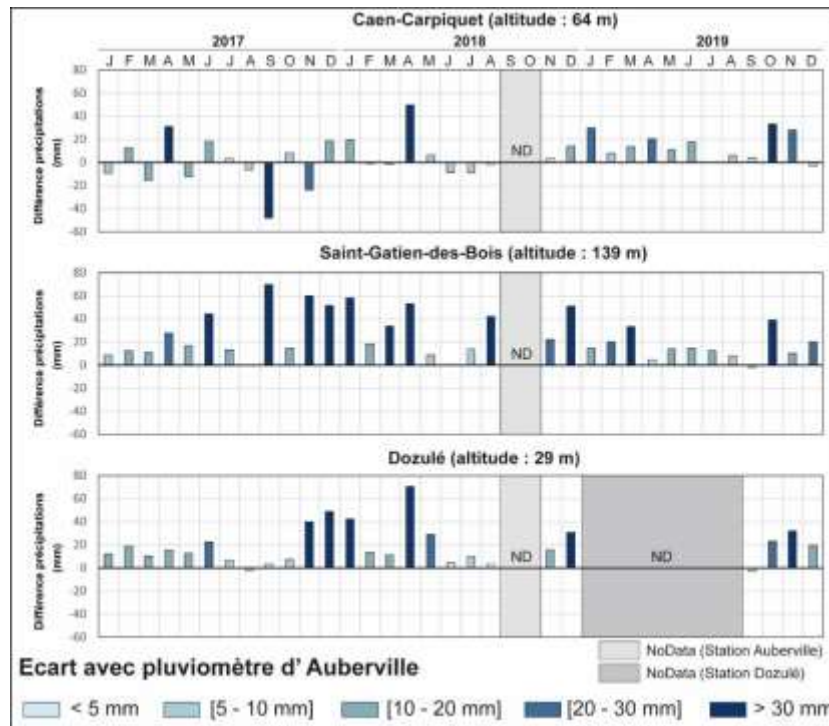
Quels facteurs influencent l'état de stabilité des falaises des Vaches Noires et quelles sont les tendances d'évolution passée, actuelle et attendue dans les prochaines décennies ?

- Quelles sont les modalités et vitesses/rythmes d'évolution ? les relais de processus...
- Quelles sont les causes ? Les facteurs responsables (ou les forçages)

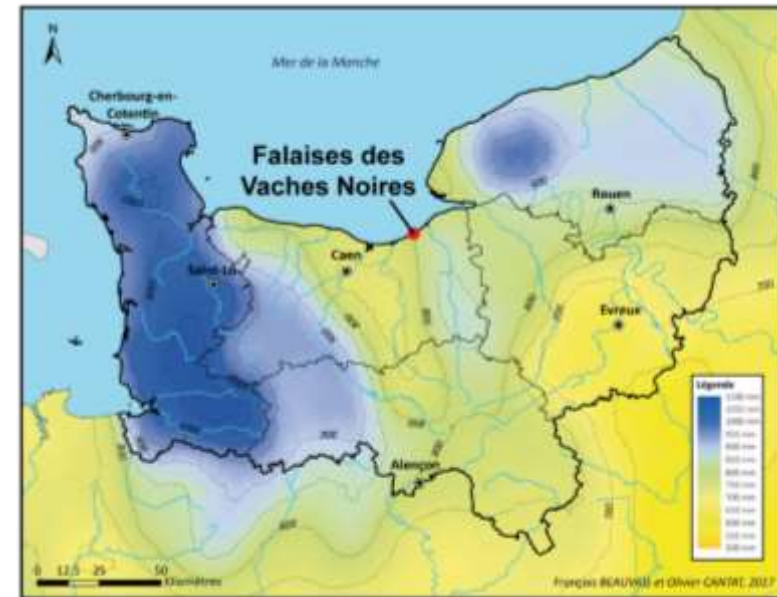
❑ De nombreux facteurs responsables

✓ Les précipitations

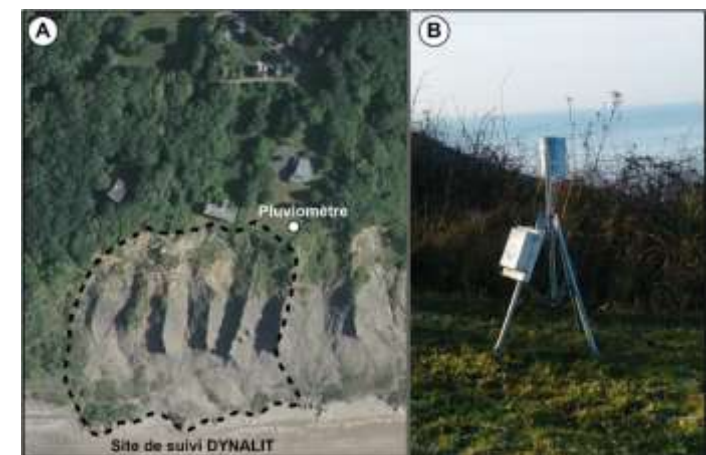
- Cumul annuel (700-800 mm), 120-130 jours de pluie, forte variabilité interannuelle ;
- Pluviomètre local (janvier 2017) ;
- Station de référence: Caen-Carpiquet.



Graphique de comparaison des valeurs mensuelles obtenues à Auberville et des stations climatiques de Caen-Carpiquet, Saint-Gatien-des-Bois et Dozulé



Répartition du cumul annuel moyen (période de référence 1976 – 2005, Beauvais et Cantat, 2020)



Localisation et illustration de la station pluviométrique implantée aux falaises de Vaches Noires

❑ De nombreux facteurs responsables

✓ Les précipitations

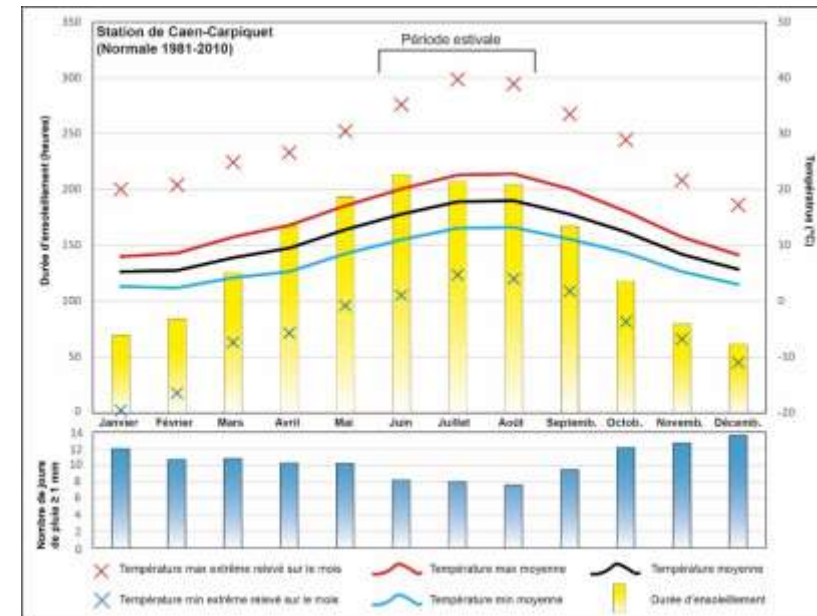
- Cumul annuel (700-800 mm), 120-130 jours de pluie, forte variabilité interannuelle ;
- Pluviomètre local (janvier 2017) ;
- Station de référence: Caen-Carpique.

✓ Les températures

- Changement d'état hydrique (sol) : humectation/dessiccation, gélifraction, ...



Illustration de la dessiccation des marnes et argiles durant la période estivale



Durée d'ensoleillement, température et nombre de jour de pluie ≥ 1 mm mensuel évalué à partir de la normale climatique 1981 – 2010 (Caen-Carpique)

Importants phénomènes de dessiccation en été :

- Température (moy. 15 à 18°C)
- Jour d'ensoleillement (204 et 213 h)
- 7 à 8 jours de pluie
- Faible albédo (concentration de la chaleur)

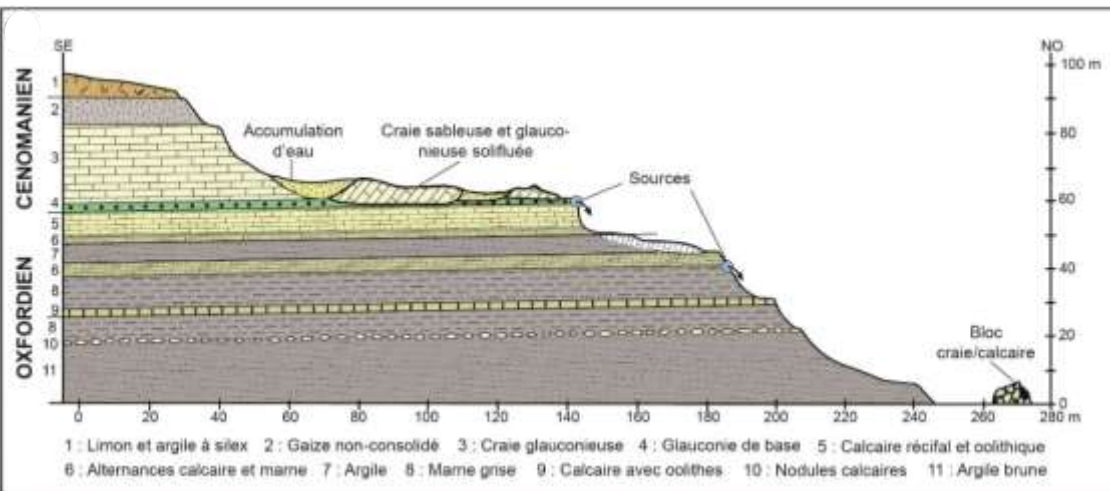


Préparation à l'humectation des matériaux en automne

❑ De nombreux facteurs responsables

✓ Nappes phréatiques

- De la craie du Cénomanien et du calcaire de l'Oxfordien
- Des formations superficielles de bas de versant



Coupe géologique des falaises des Vaches Noires (modifiée de Loisel, 1990)

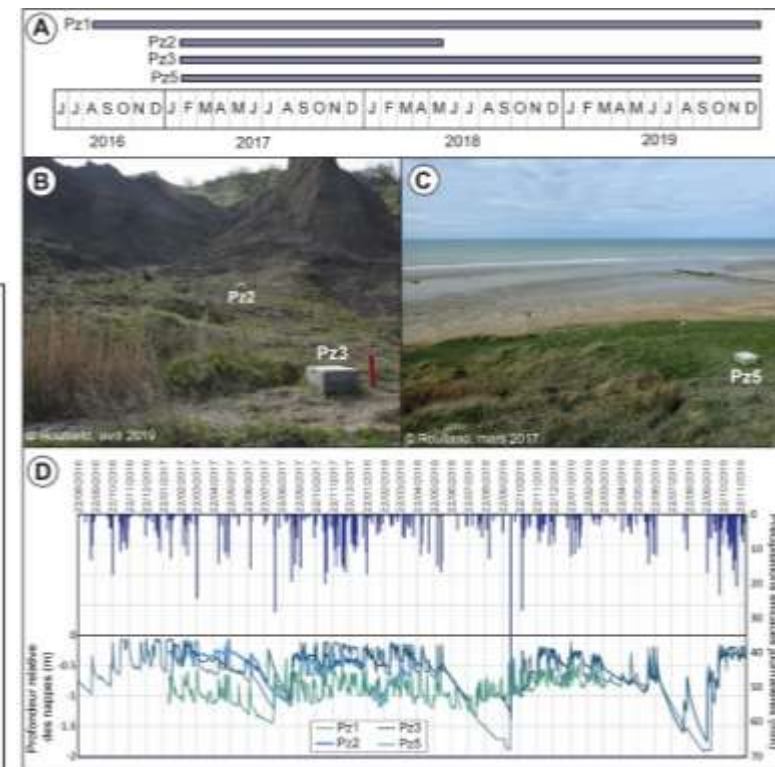


Illustration et chronique des mesures piézométriques relevées dans les formations superficielles de bas de versant

❑ De nombreux facteurs responsables

✓ Nappes phréatiques

- De la craie du Cénomanien et du calcaire de l'Oxfordien
- Des formations superficielles de bas de versant

✓ Réseau hydrographique de surface dense et complexe

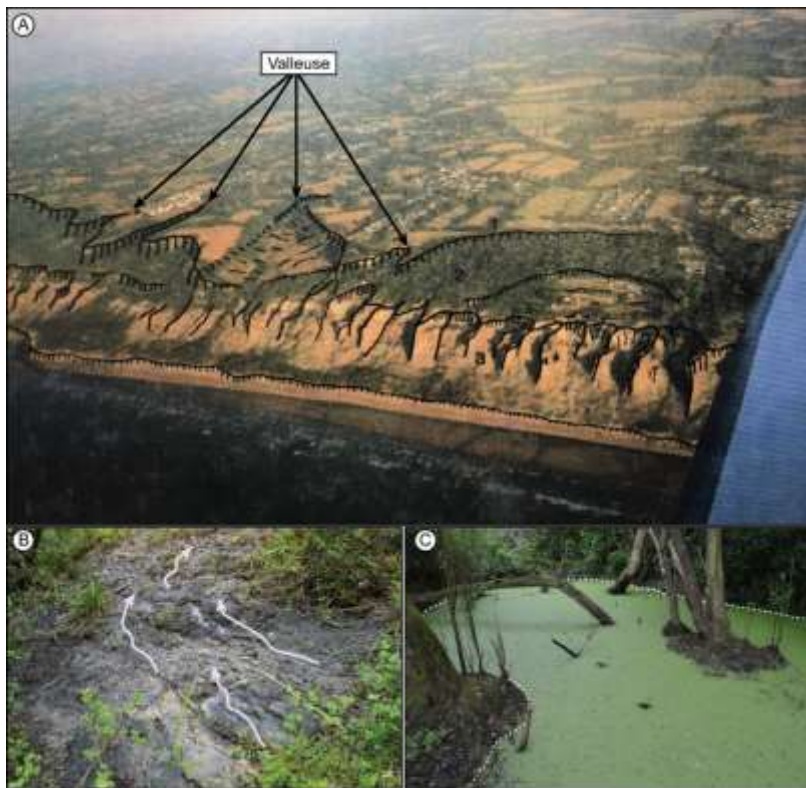
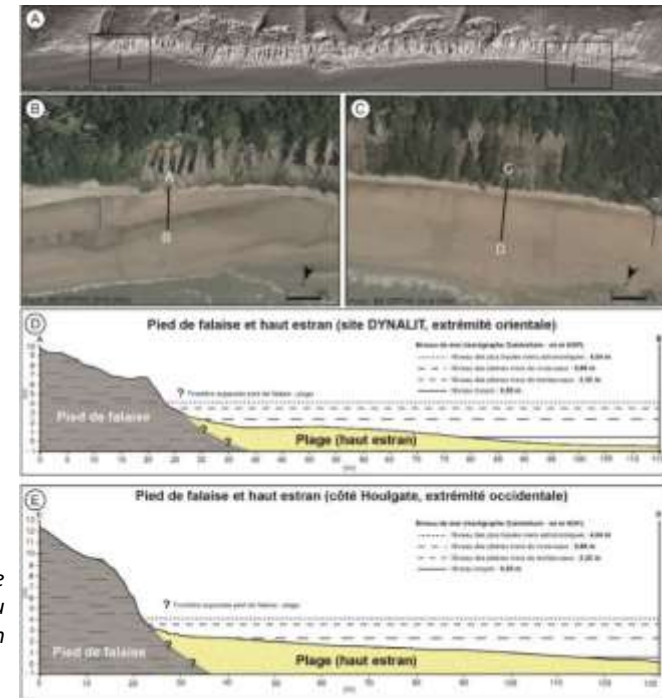


Illustration des différents formes d'hydrologie de surface observables dans les badlands des falaises des Vaches Noires

Illustration de l'hydrologie de surface en partie sommitale (plateau, valleuses, replat chahuté) des falaises des Vaches Noires

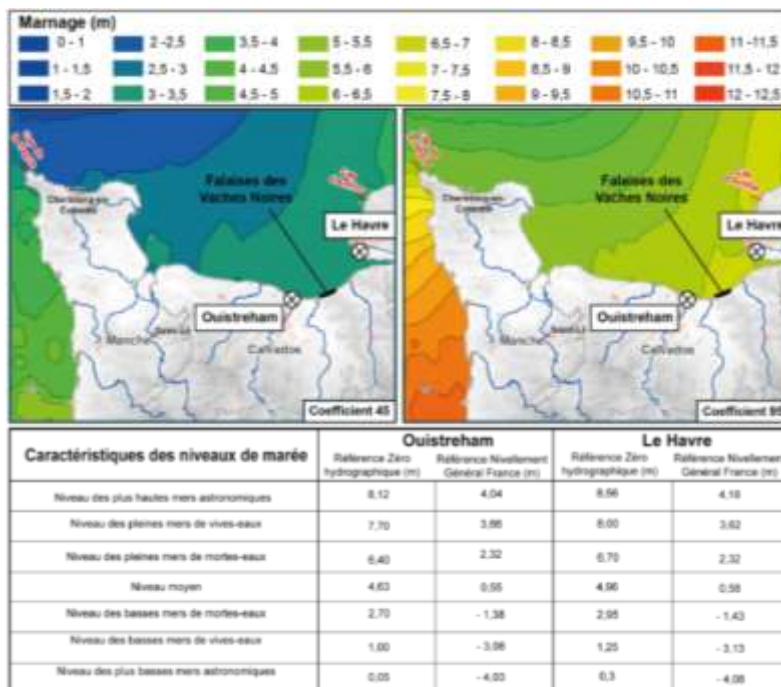
❑ De nombreux facteurs responsables

- ✓ **Agents marins ayant pour double effet :**
 - Érosion pied falaise + transport des débris
- ✓ **Marée et niveaux d'eau**
 - Marée macro à méga-tidal (semi-diurne)
 - Pleine mer de vive-eau : contact avec pied de falaise



Profils topographiques du pied de falaise avec les niveaux de mer observés au marégraphe de Ouistreham

Attaque du pied de falaise par la mer (5 octobre 2017, coefficient 95, vent d'ouest, 38 km/h, 1019 hPa)

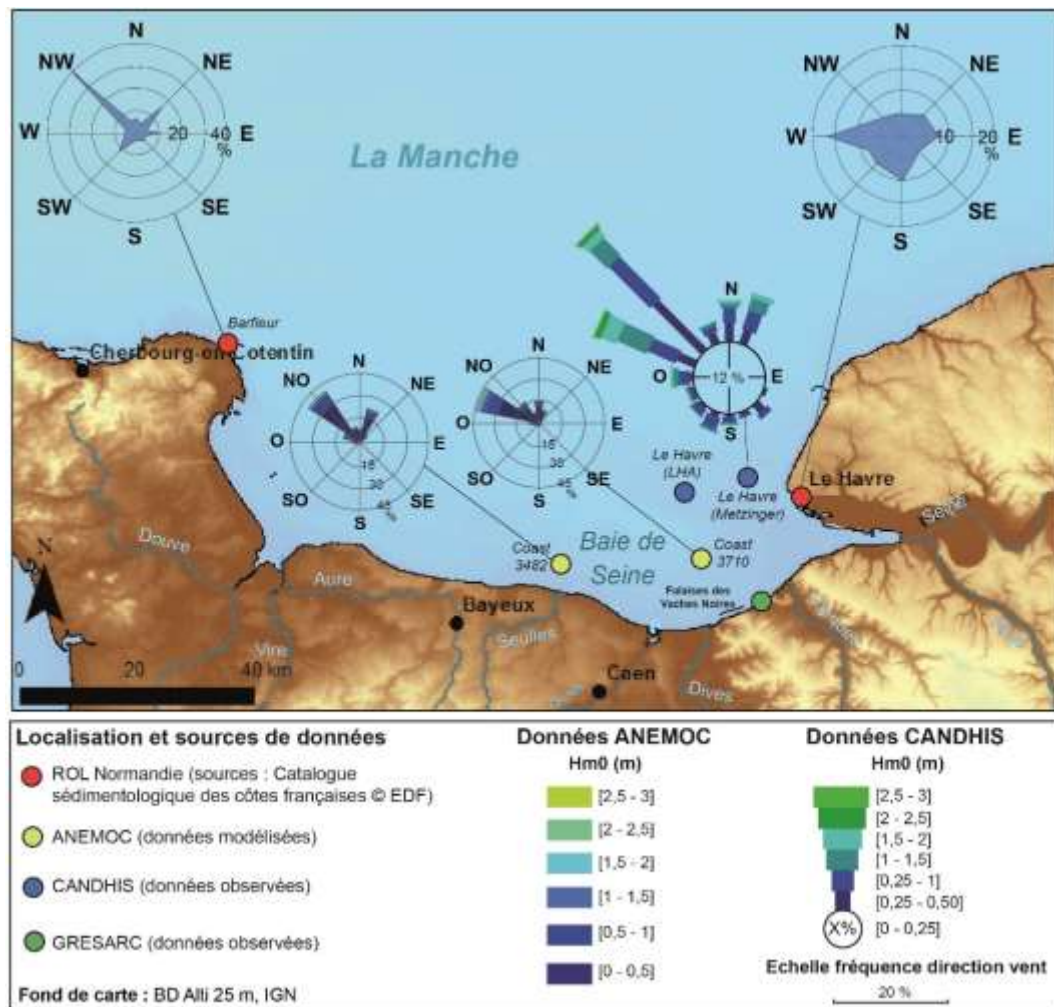


Cartographie des amplitudes de marée en coefficient de morte-eau (45) et de vive-eau (95) accompagnée des valeurs de marée pour deux marégraphes proches des falaises des Vaches Noires (sources: SHOM, RAM, 2019)

❑ De nombreux facteurs responsables

✓ Houles :

- Forte concentration des houles de provenance nord-ouest
- Hauteur moyenne : 1 à 1,20 m, Période : de 5 à 7 s
- Des houles significatives plus fréquentes et plus intenses d'octobre à mars (intensification des vents)

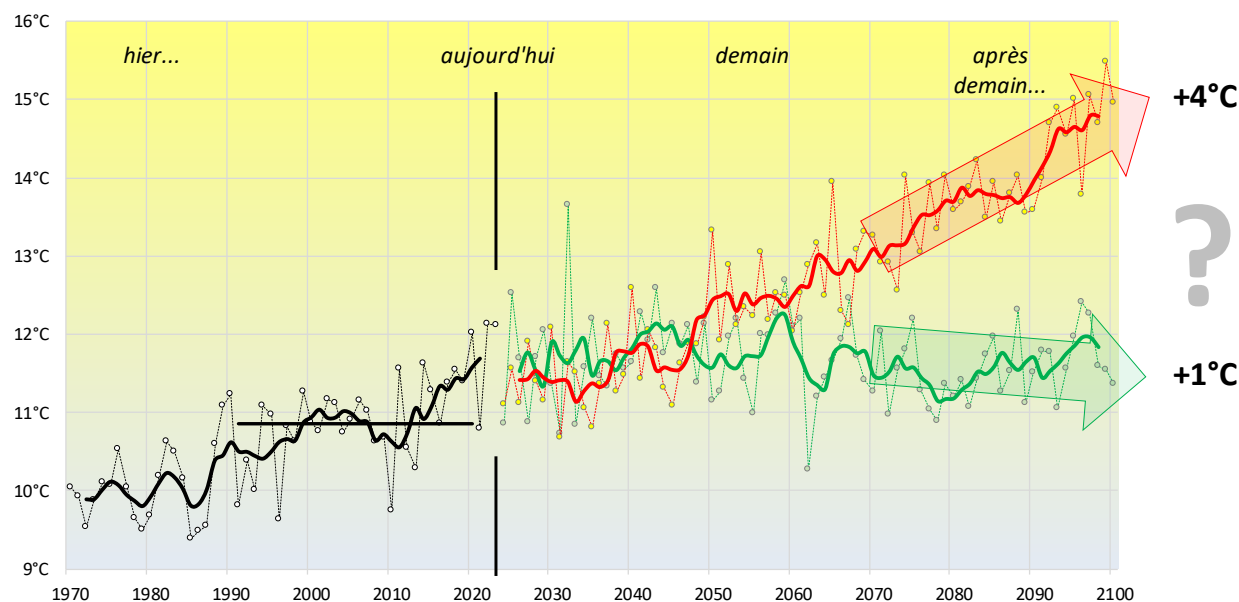


Carte synoptique des directions et forces de houle basée sur les modèles ANEMOC et les observations directes CANDHIS en baie de Seine

❑ Problématique principale et questions associés

Quels facteurs influencent l'état de stabilité des falaises des Vaches Noires et quelles sont les tendances d'évolution passée, actuelle et attendue dans les prochaines décennies ?

- Quelles sont les modalités et vitesses/rythmes d'évolution ? les relais de processus...
- Quelles sont les causes ? Les facteurs responsables (ou les forçages), ...
- Quels sont les seuils de déclenchement et de réactivation ?
- Quel peut être le rôle du changement climatique sur l'évolution des falaises ? Tendances à CT et LT



Evolution des températures observées et simulées selon deux scénarios (RCP 2.6 et RCP 8,5 de changement climatique entre 1970 et 2100 (d'après Giec Normand)

❑ Méthodologie générale

✓ **Approche systémique** : analyse par emboîtement d'échelle spatiale et temporelle (vision synoptique)

Échelles spatiales :

- Ensemble du linéaire côtier (4,5 km)
- Échelle du site (bande de 200 m – SNO DYNALIT)



Présentation de diverses échelles spatiales mobilisées dans l'étude des dynamiques des falaises des Vaches Noires

❑ Méthodologie générale

✓ **Approche systémique** : analyse par emboîtement d'échelle spatiale et temporelle (vision synoptique)

Échelles spatiales :

- Ensemble du linéaire côtier (4,5 km)
- Échelle du site (bande de 200 m – SNO DYNALIT)

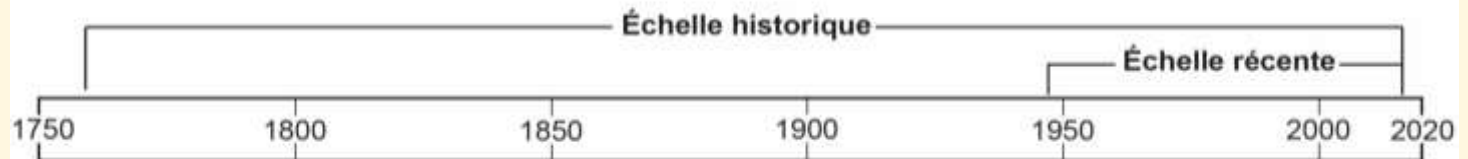
Échelles temporelles :

- Échelle historique (fin 18^e au début du 21^e siècle)
- Échelle récente (1947-1955 à aujourd'hui)
- Pluriannuelle et saisonnière (> sept. 2014)
- Journalière (durant hiver-printemps 2017-2019)



Présentation de diverses échelles spatiales mobilisées dans l'étude des dynamiques des falaises des Vaches Noires

Ensemble
du linéaire
côtier



Échelle du
site SNO
DYNALIT



Frise chronologique des échelles temporelles mobilisées dans l'étude des dynamiques des falaises des Vaches Noires

❑ Méthodologie générale

✓ **Approche systémique** : analyse par emboîtement d'échelle spatiale et temporelle (vision synoptique)

Échelles spatiales :

- Ensemble du linéaire côtier (4,5 km)
- Échelle du site (bande de 200 m – SNO DYNALIT)

Échelles temporelles :

- Échelle historique (fin 18^e au début du 21^e siècle)
- Échelle récente (1947-1955 à aujourd'hui)
- Pluriannuelle et saisonnière (> sept. 2014)
- Journalière (durant hiver-printemps 2017-2019)

✓ **Une démarche pluridisciplinaire :**

Compétences : géomorphologie, géologie, géophysique, géotechnique, phytosociologie, ...

Approche « naturaliste » basée sur :

- Des recherches et analyses de documents historiques (archives, plans, photos, ...)
- Des observations, des suivis de terrain, des analyses et essais en laboratoire et de la modélisation conceptuelle et numérique.



Tachéomètre



DGPS



Carottage pour prélèvement d'échantillons et implantation d'un piézomètre



Sonde piézométrique Paratronic



Presse triaxiale

Investigations et surveillance (à partir de sept. 2014)



Sondages carottés réalisés sur le plateau calcaire



Drones (caméra visible et infra-rouge)

Photogrammétrie SfM
(images prises au sol
ou par drones)

Levés Lidar par TLS ou par drone



Tomographie électrique



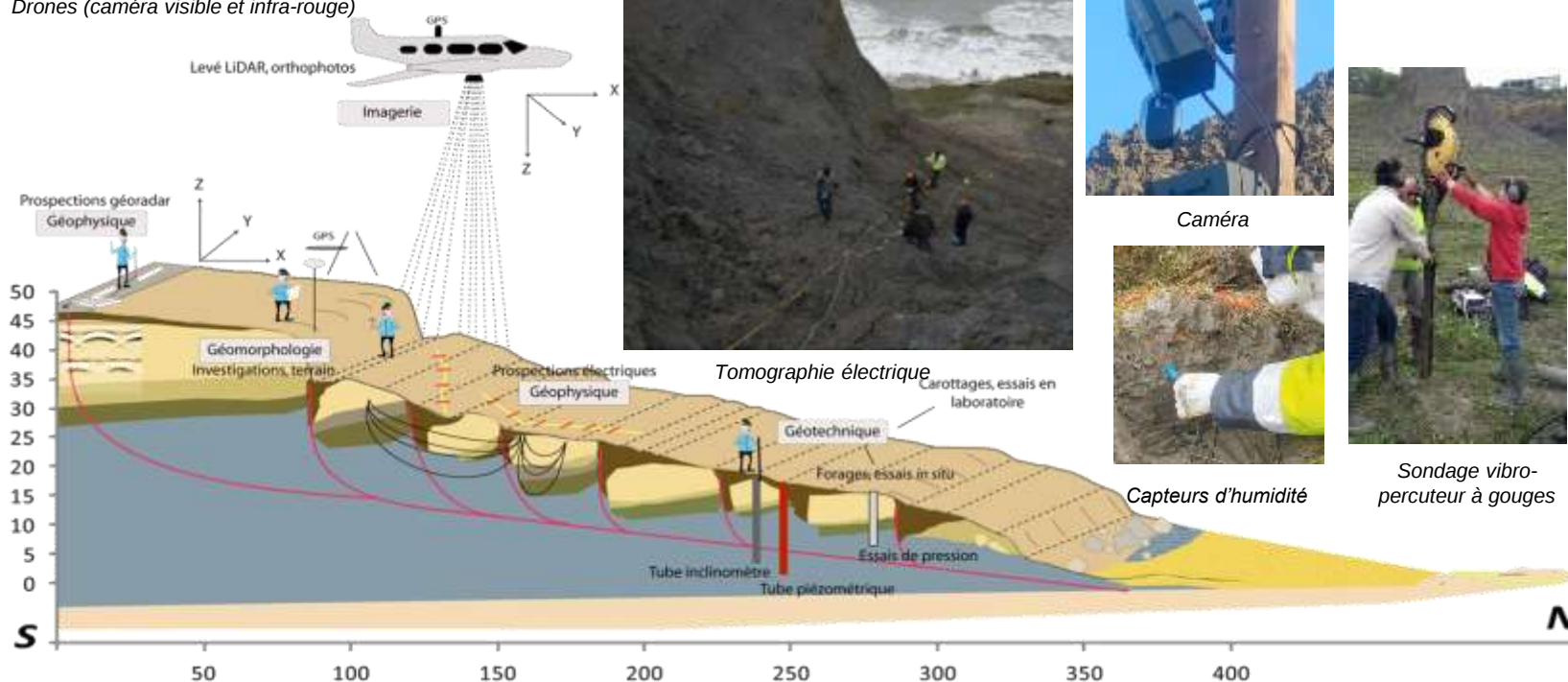
Caméra

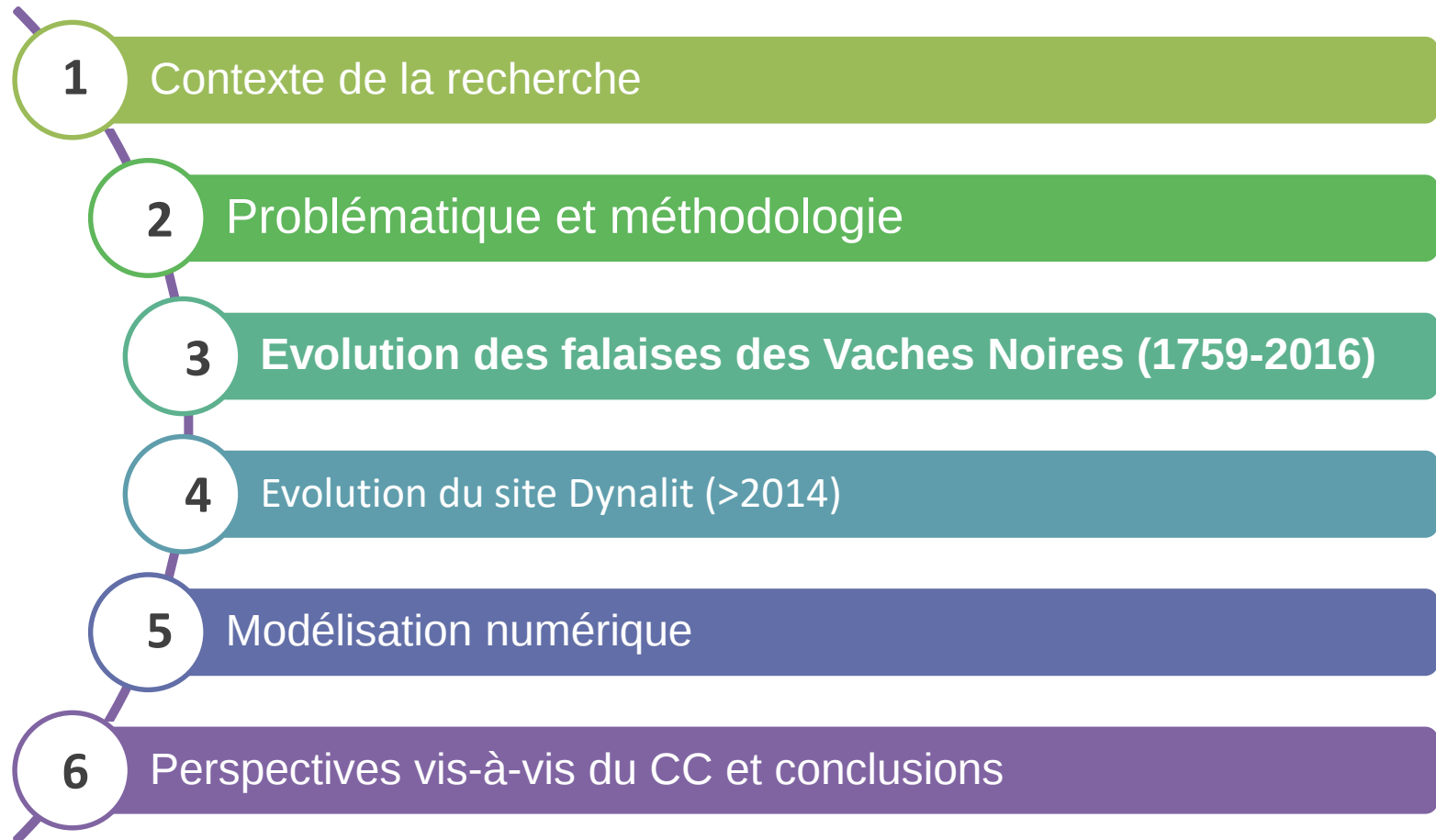


Sondage vibro-percuteur à gouges



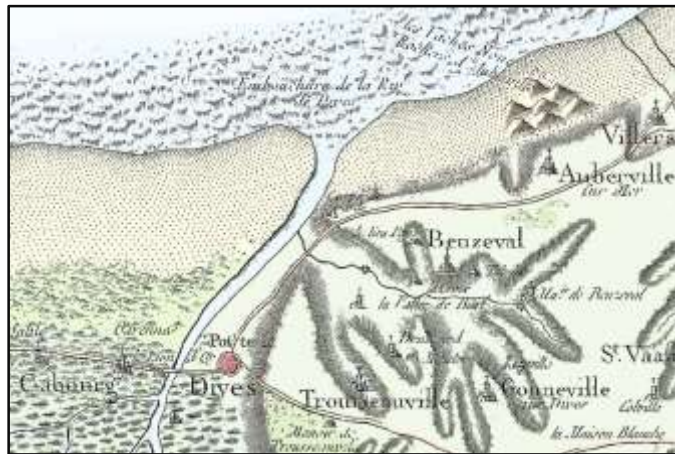
Sondage pénétrométrique





3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

*Échelle séculaire (1759 – 2016) et pluri-décennale (1947 – 2016)
à l'aide de documents multi-sources*



Thèse financée par Région Normandie :
Thomas ROULLAND, juin 2022



Plan terrier de la seigneurie d'auberville (1759)



Original Paper

M. Medjkane · O. Maquaire · S. Costa · Th. Roulland · P. Letortu · C. Fauchard · R. Antoine · R. Davidson

High-resolution monitoring of complex coastal morphology changes: cross-efficiency of SfM and TLS-based survey (Vaches-Noires cliffs, Normandy, France)

Dynamique des falaises des Vaches Noires : analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France)

Dynamics of the "Vaches Noires" cliffs: historical and recent diachronic analysis using multi-source documents (Normandy, France)

Thomas Roulland*, Olivier Maquaire, Stéphane Costa, Vincent Compain, Robert Davidson, Mohand Medjkane
Université de Caen Normandie, CNRS, LIETG UMR 6554, Esplanade de la Paix, 14032 Caen cedex, France

Landslides
DOI 10.1007/s10346-017-0942-4
Received: 13 June 2017
Accepted: 28 December 2017
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

*Échelle séculaire (1759 – 2016) et pluri-décennale (1947 – 2016)
à l'aide de documents multi-sources*

*Avec des photographies confiées par des particuliers rencontrés sur le terrain lors de nos levés terrain :
Clichés stéréoscopiques pris par Charles Koechlin entre 1891 et 1932.*



*Clichés stéréoscopiques pris par Charles Koechlin entre 1891 et 1932, transmis par les petits-enfants sous forme de fichiers numériques en format TIFF établis à partir **des plaques stéréoscopiques en verre** (positifs noir et blanc).*

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

*Échelle séculaire (1759 – 2016) et pluri-décennale (1947 – 2016)
à l'aide de documents multi-sources*

*Avec des photographies confiées par des particuliers rencontrés sur le terrain lors de nos levés terrain :
Panoramique pris par **Jean-Michel FOVEAU** dans les années 1980s à marée basse.*



Extrait de deux clichés du panoramique de Mr JM Foveau (années 1980s).

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

✓ **Objectif** : Estimer les vitesses d'évolution sur différentes temporalités de **trois marqueurs morphologiques** comprenant :

- **Escarpement principal sommital** ;
- **Escarpement secondaire** ;
- **Escarpement basal**, considéré comme falaise vive.

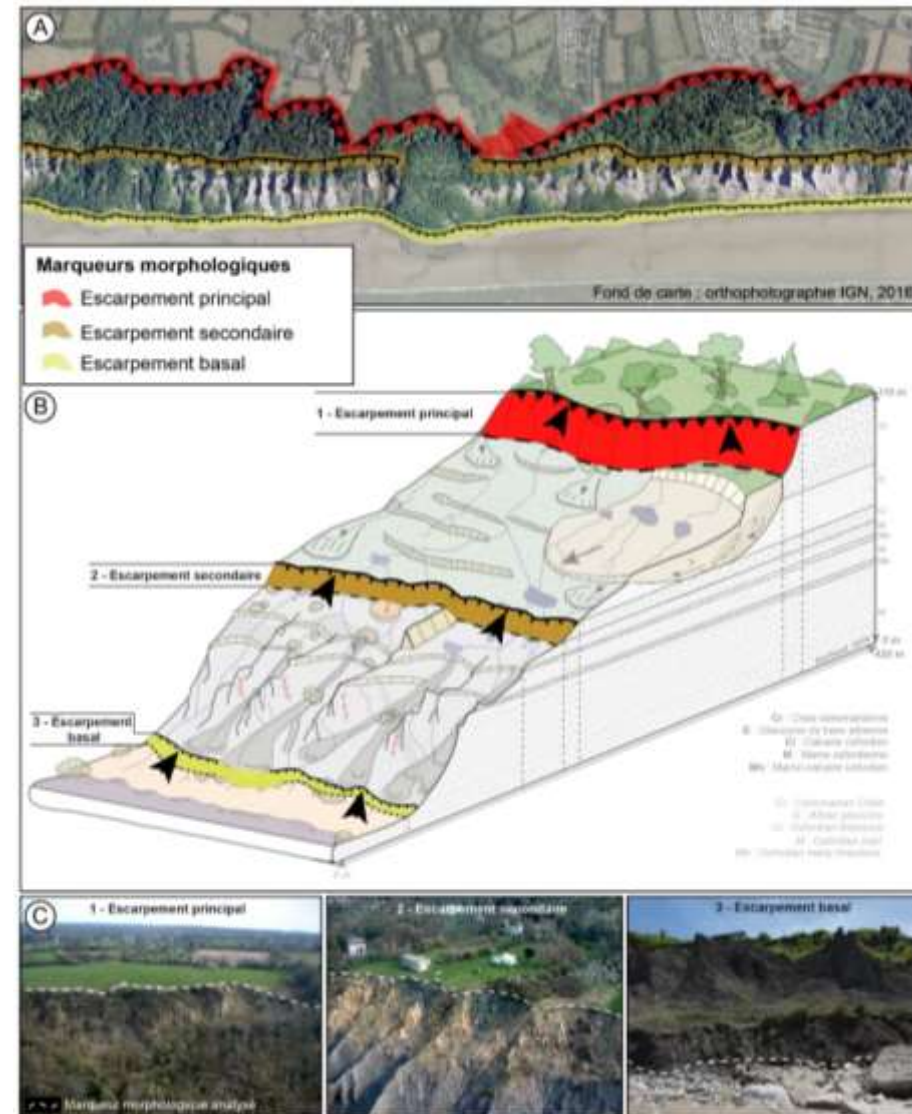


Illustration des marqueurs (trait de côte)
analysés dans l'étude historique et récente

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

- ✓ **Objectif** : Estimer les vitesses d'évolution sur différentes temporalités de **trois marqueurs morphologiques** comprenant :
 - **Escarpement principal sommital** ;
 - **Escarpement secondaire** ;
 - **Escarpement basal**, considéré comme falaise vive.
- ✓ **Méthodologie** : Analyse diachronique (évolution des trois marqueurs morphologiques) par comparaison de documents géo-spatiaux de diverses résolutions :
 - **Analyse quantitative** : vitesses d'évolution (module DSAS « *Digital Shoreline Analysis System* »)
 - **Analyse qualitative** : Comparaison visuelle du site DYNALIT entre 1947/1955 - 2016 (complément analyse quantitative)

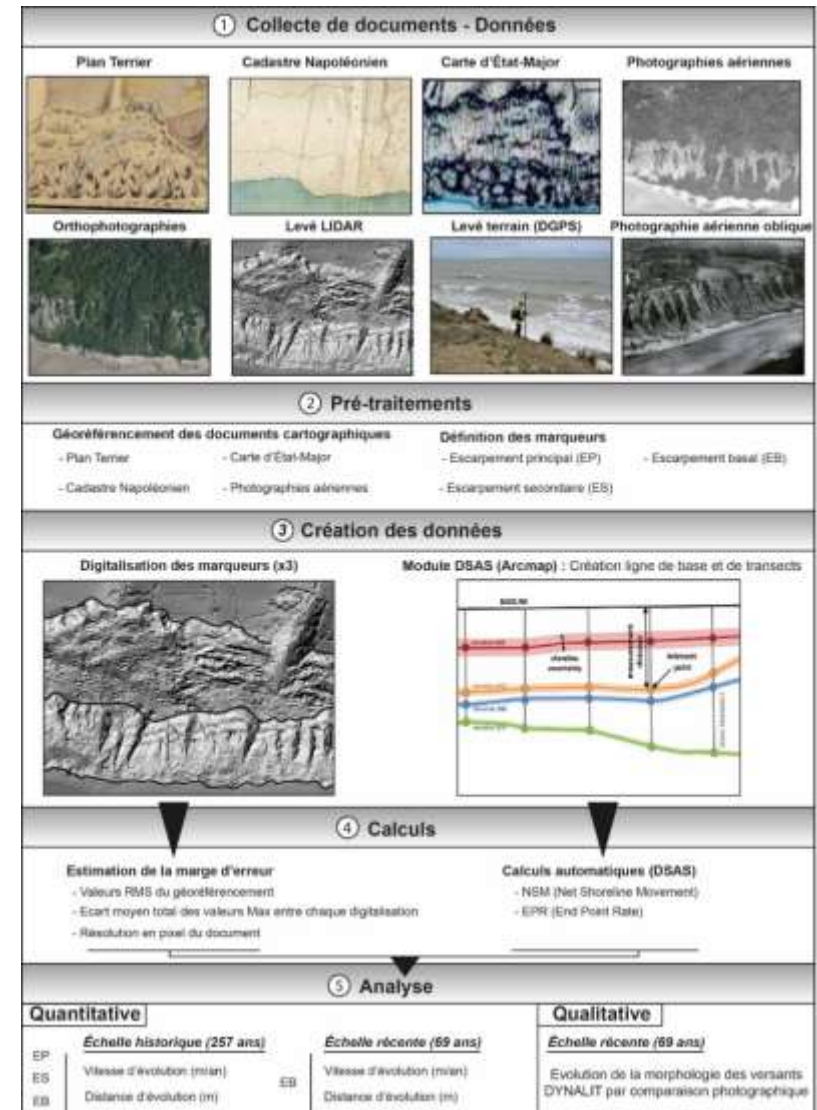


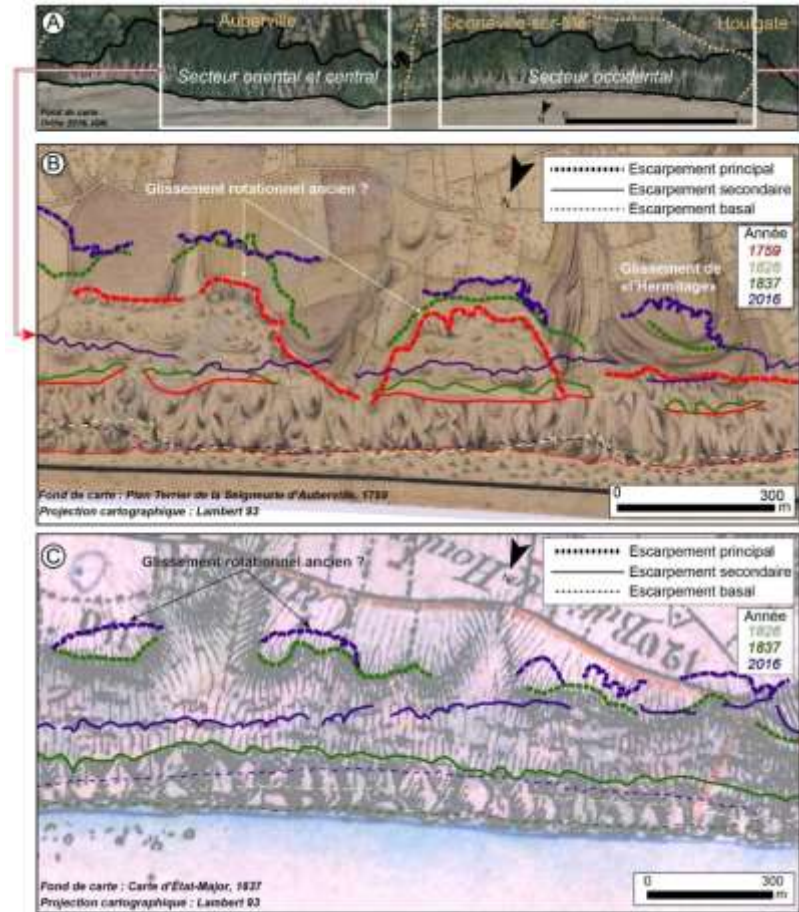
Diagramme synoptique de la méthodologie utilisée pour l'estimation de la mobilité des marqueurs morphologiques

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

- ✓ Un important recul de l'escarpement principal et de l'escarpement secondaire

D Vitesses de recul (m/an)				
Marqueur morphologique	Date et secteur	1759 - 2016		1837 - 2016
		Secteur oriental	Secteur central	Secteur occidental
Escarpement principal	min	- 0,23	- 0,16	- 0,06
	max	- 0,83	- 0,60	- 0,80
	moy	- 0,46	- 0,45	- 0,58
Escarpement secondaire	min	- 0,06	- 0,14	- 0,31
	max	- 0,45	- 0,31	- 0,97
	moy	- 0,20	- 0,23	- 0,53

Vitesses de recul de l'escarpement principal et de l'escarpement secondaire à échelle historique



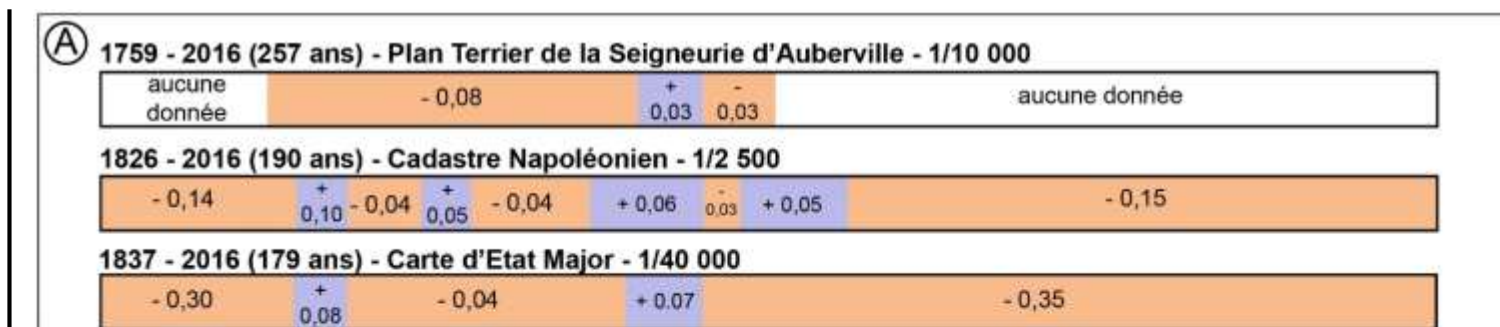
A. Localisation des secteurs analysés et comparaison des linéaires de 1759 (plan terrier), 1826 (cadastre Napoléonien), 1837 (carte d'Etat-Major) et 2016 (orthophotographie). B. fond de carte : plan Terrier de la Seigneurie d'Auberville. C. Fond de carte (carte d'Etat-Major (modifiée de Roulland et al., 2019))

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

- ✓ Un important recul de l'escarpement principal et de l'escarpement secondaire
- ✓ Un escarpement basal à faible mobilité

→ **Échelle historique** : tendance au recul avec secteurs en progradation (glissement de l'Hermitage)

Échelle historique

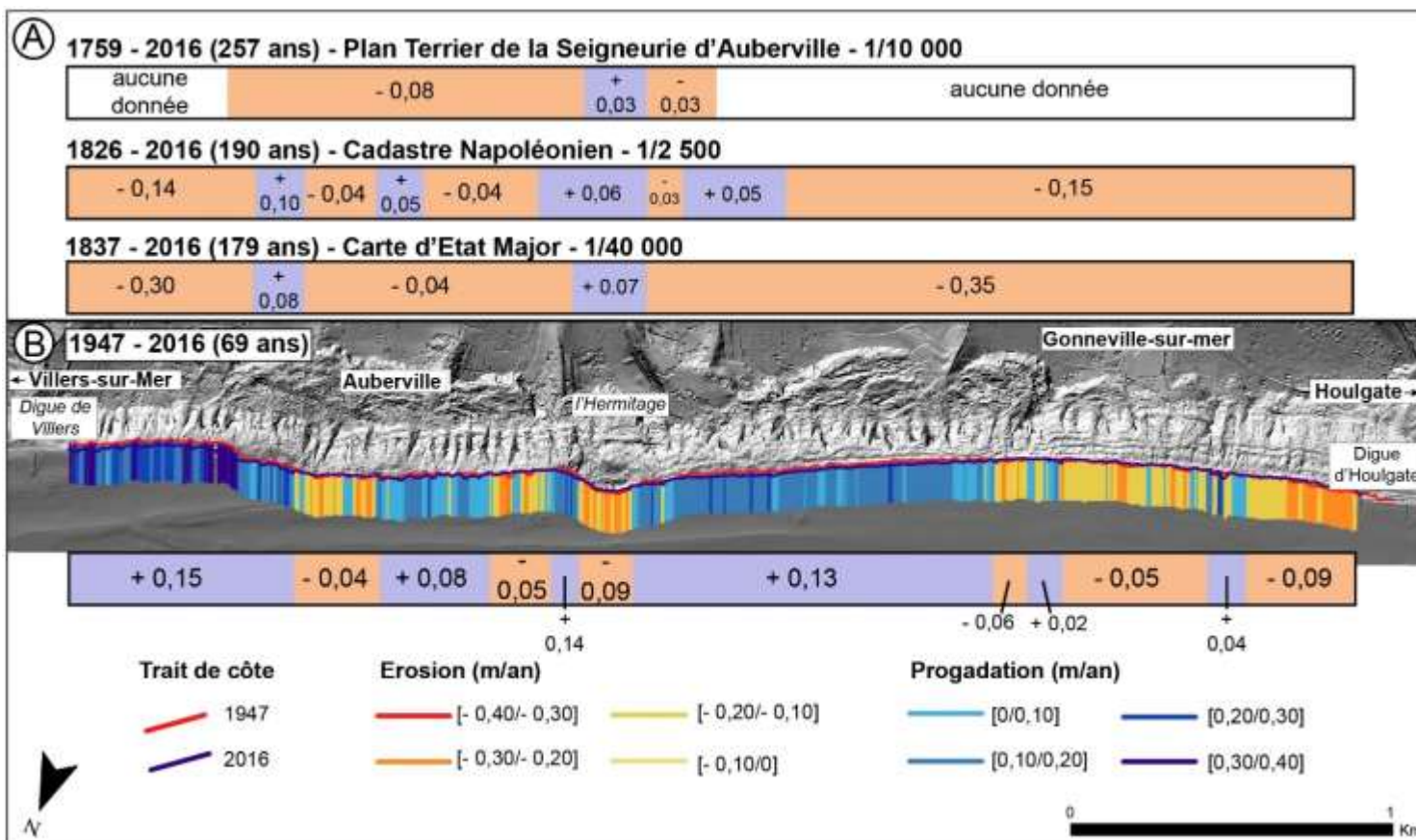


Vitesses moyennes annuelles (en m/an) de la mobilité de l'escarpement basal pour différentes périodes d'analyses (Roulland et al., 2019)

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

- ✓ Un important recul de l'escarpement principal et de l'escarpement secondaire
 - **Échelle historique** : tendance au recul avec secteurs en progradation (glissement de l'Hermitage)
- ✓ Un escarpement basal à faible mobilité
 - **Échelle récente** : dynamique inverse avec secteurs en progradation (61 %) et secteurs en érosion (39 %)

Échelle historique



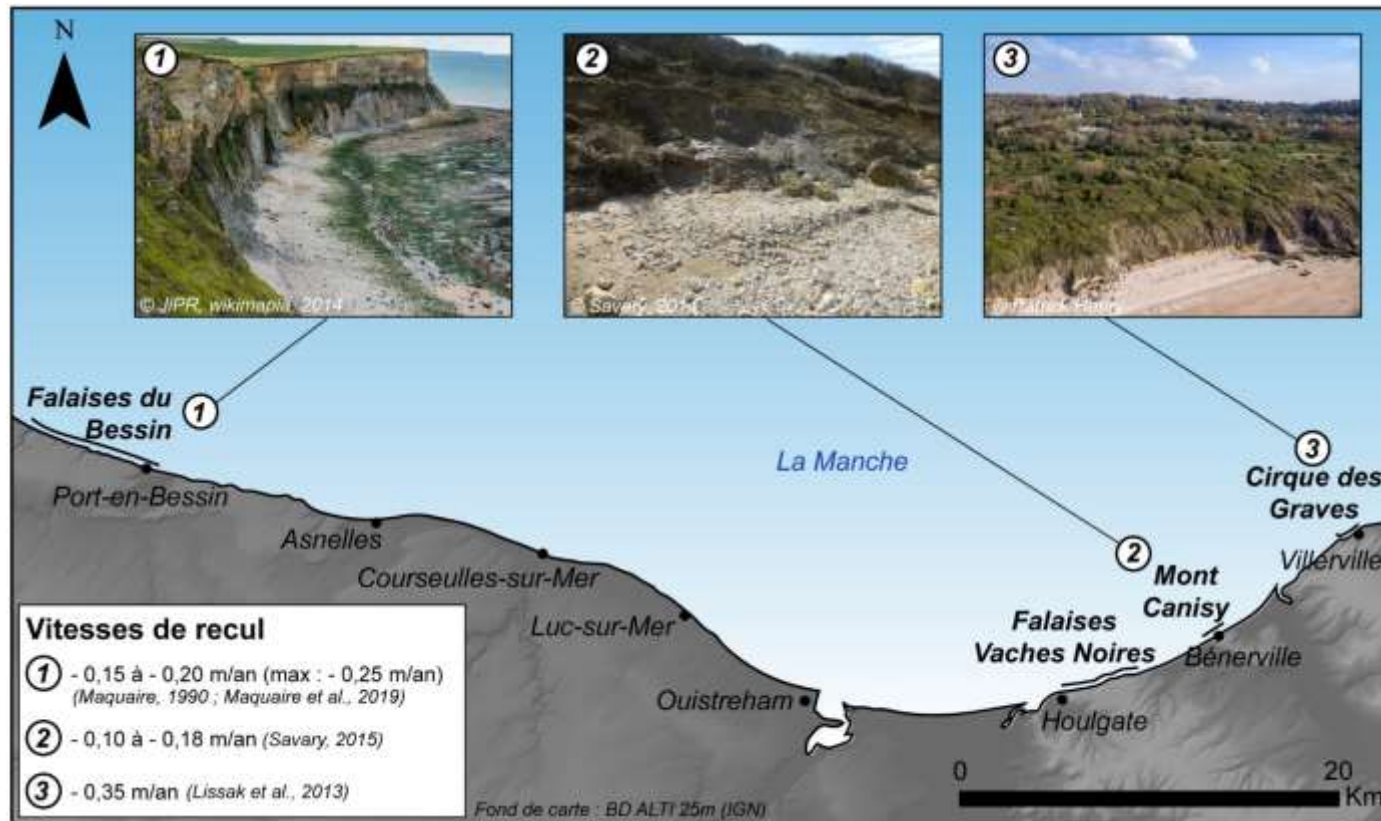
Échelle récente

Vitesses moyennes annuelles (en m/an) de la mobilité de l'escarpement basal pour différentes périodes d'analyses (Roulland et al., 2019)

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

✓ Un escarpement basal à faible mobilité

Par comparaison aux autres secteurs de falaises en Normandie ...



3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

✓ Un escarpement basal à faible mobilité

Confirmé par les bases de données existantes...

Portail géolittoral : **Indicateur national d'érosion côtière (INEC)** : Tendances d'évolution pluriannuelles entre 1947 à 2012 par le CEREMA à la demande du ministère de l'écologie (Echelle du 1/100 000^{ème}).

www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

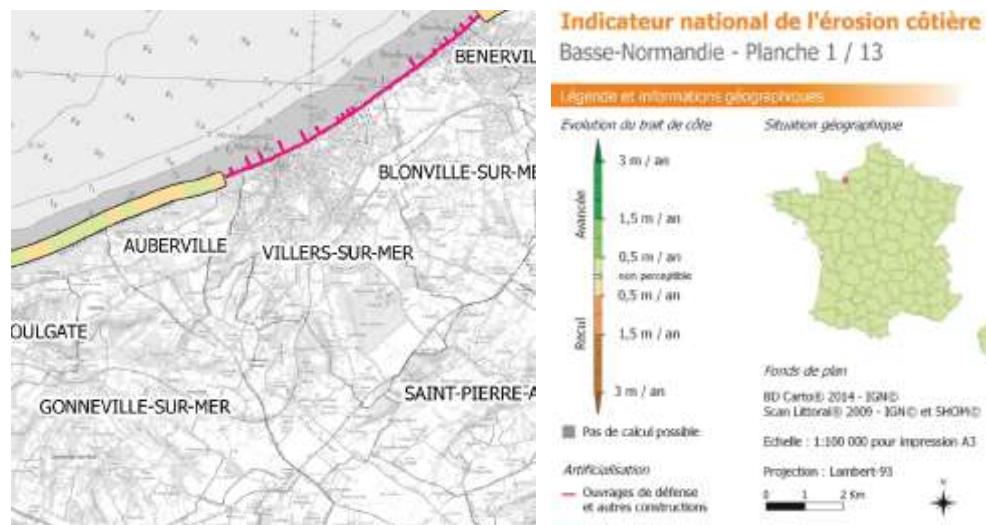
www.cerema.fr

GéoLittoral
Le littoral de ma commune

Villers-sur-Mer (14640)

Région : **Normandie**
Département : **Calvados**
EPCI : **Communauté de communes Cœur Côte Fleurie**
Population : **2 437 habitants**
Commune inscrite au décret liste érosion¹ : **Non**
Classement selon la loi Littoral² : **Mer**

¹commune engagée dans la réalisation d'une carte locale d'exposition au recul du trait de côte
²pour les communes classées "Estuaire" ou "Étang", les données et informations disponibles sont moins nombreuses



Indicateur national de l'érosion côtière à Auberville et Villers-sur-Mer
(extrait des planches A3 du CEREMA)

« Le littoral de ma commune » : une application pour comprendre l'évolution du trait de côte

Lancée le 18 juin 2026, la nouvelle application permet aux collectivités et aux citoyens d'accéder à une information fiable, lisible et territorialisée sur le littoral français. C'est à la fois un outil de sensibilisation et d'aide à la décision.

<https://geolittoral-data.cerema.fr/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=bc2f0a98364e41d3ac1ac5216f4c8813>

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

✓ Un escarpement basal à faible mobilité

Confirmé par les bases de données existantes...

➔ **Indicateur d'érosion côtière Normandie - Hauts-de-France V2 (1947 - 2020) mis à jour en 2023 du ROLNHDF**

<https://maps.rolnhdf.fr/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=f4963bbb7c6d492489084eb5821a5d42&page=Sections---MapJournal>



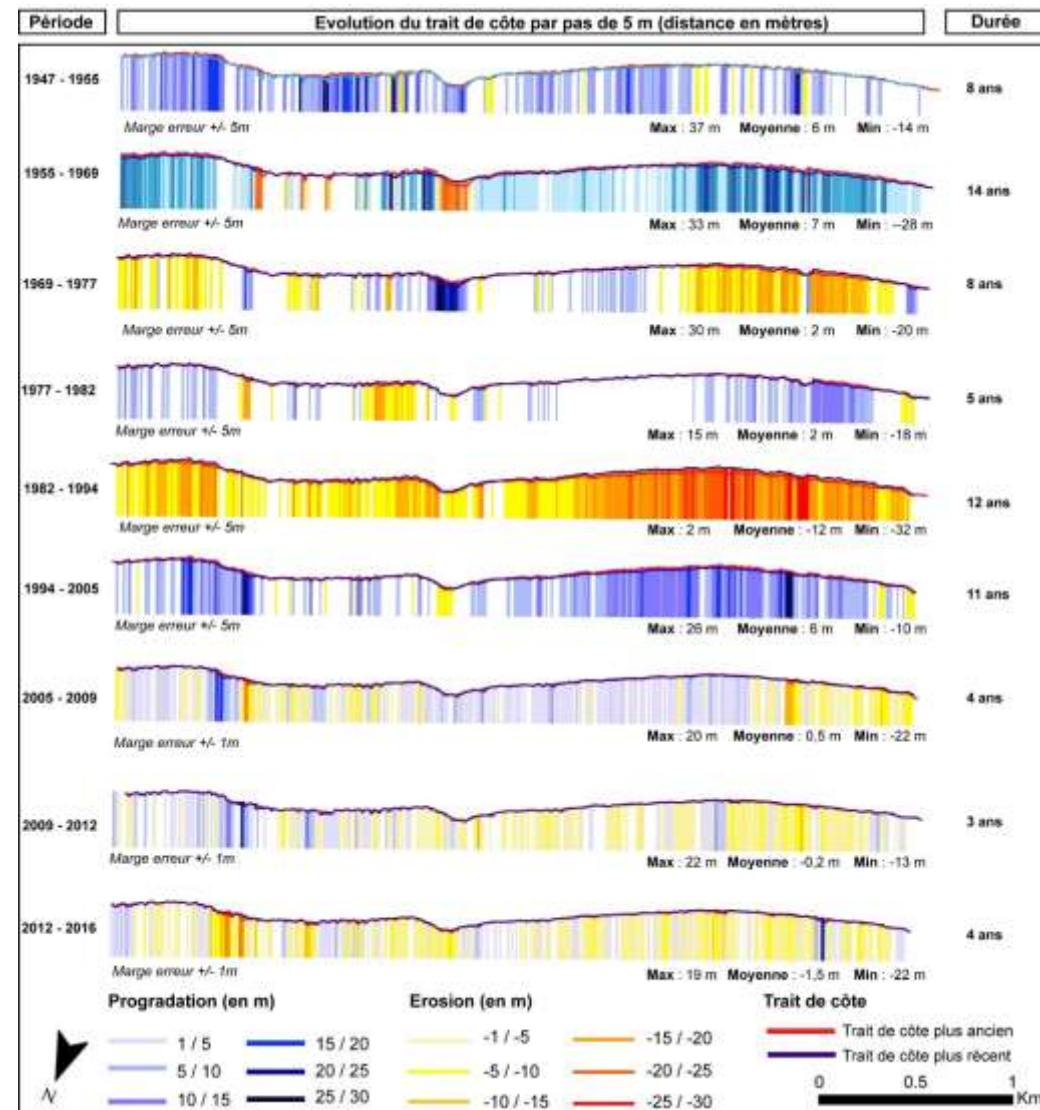
Indicateur d'érosion côtière Normandie - Hauts-de-France à Auberville et Villers-sur-Mer (extrait du site internet)

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

✓ Une dynamique à contre-courant des dynamiques de recul habituellement observées

Par comparaison de photographies aériennes de l'IGN entre 1947 et 2016

- Un linéaire marqué par d'importantes périodes de **progradation** (1947-1955, 1955-1969, 1977-1982, 2005-2009) et **d'érosion** (1969-1977, 1982-1994, 2009-2012, 2012-2016)
- Entre 1947 et 2016 : un secteur oriental en progradation (+ 0,15 m/an) ...



Évolution de l'escarpement basal pour différentes dates comprises entre 1947 et 2016 (distance NSM - en m – évalué par des transects séparés de 5 m (Roulland et al., 2019))

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

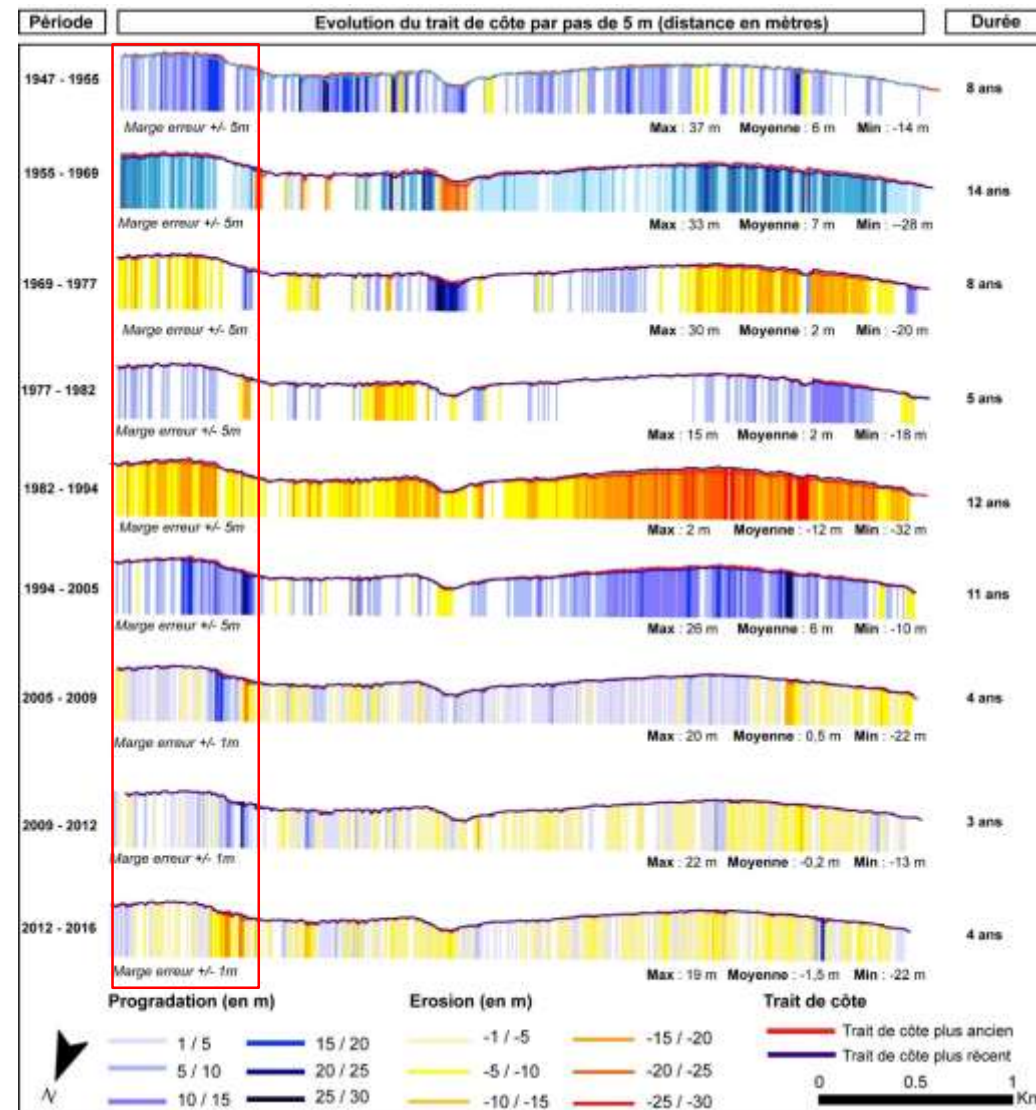
- ✓ Une dynamique à contre-courant des dynamiques de recul habituellement observées

Par comparaison de photographies aériennes de l'IGN entre 1947 et 2016

- Un linéaire marqué par d'importantes périodes de **progradation** (1947-1955, 1955-1969, 1977-1982, 2005-2009) et **d'érosion** (1969-1977, 1982-1994, 2009-2012, 2012-2016)
- Entre 1947 et 2016 : un secteur oriental en progradation (+ 0,15 m/an) ...
- ... S'étant produite de **façon discontinue** dans le temps.



**Dynamique de recul/progradation :
périodicité comprise entre 5 et 15 ans**



Évolution de l'escarpement basal pour différentes dates comprises entre 1947 et 2016 (distance NSM - en m – évalué par des transects séparés de 5 m (Roulland et al., 2019))

3.1. Vitesses d'évolution à échelle historique (257 ans) et récente (69 ans)

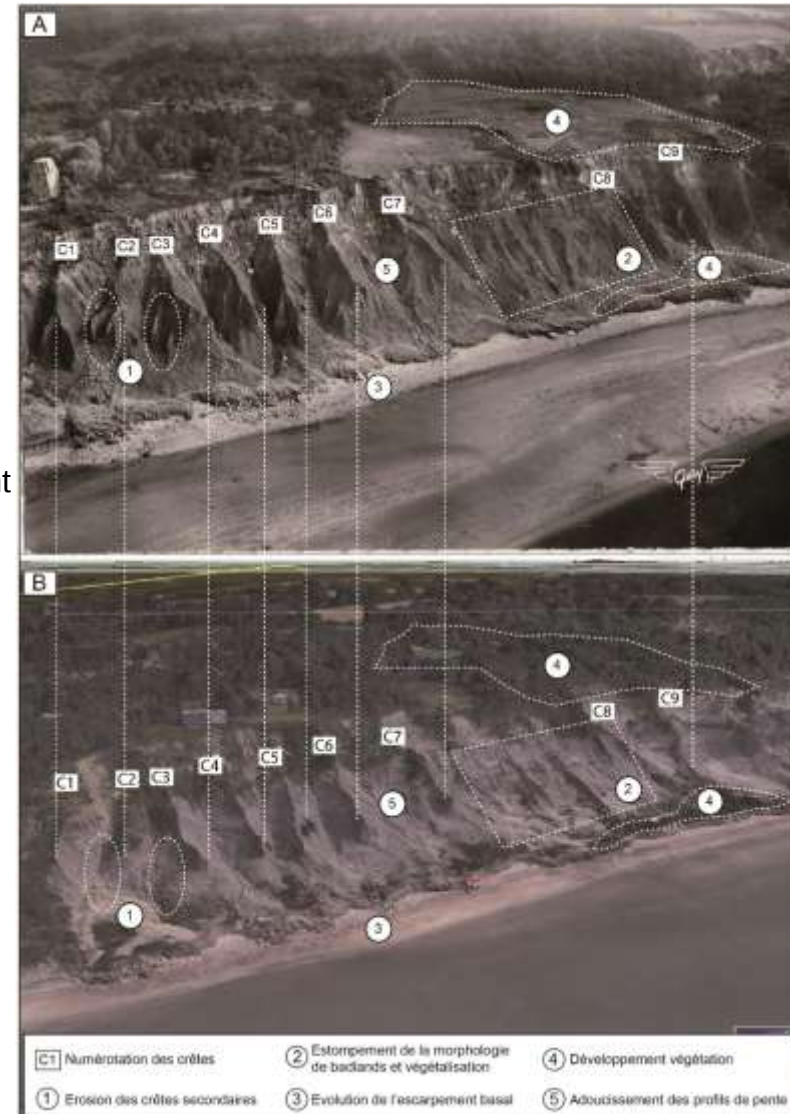
✓ Illustration de la faible mobilité de l'escarpement basal :

Par comparaison photographie aérienne oblique (1947/1955) et image satellite aérienne (Google Earth) de 2016 :

- Un escarpement basal au tracé quasi-similaire (3) mais un recul de l'escarpement secondaire ;
- Érosion constante des terrains nus des versants de badlands avec une érosion des crêtes secondaires (1) ;
- Estompement de la morphologie de badlands (2) et développement de la végétation (4) ;
- Adoucissement des profils de pente des ravines (5) et un espacement d'entre-deux crêtes plus important aujourd'hui.



**Jeu constant entre apport de matériaux
et érosion marine**



Observation qualitative de l'évolution des versants orientaux entre 1947/1955 (A) et 2016 (B) – (Roulland et al., 2019)

3.2. État d'activité et trajectoire d'évolution des versants à échelle récente

✓ Objectifs :

- Déterminer si l'activité du site s'oriente vers une diminution, une « stabilité » ou une accentuation des fréquences d'apparition des phénomènes hydrogravitaires ;
- Détecter, spatialiser et hiérarchiser les secteurs présentant une plus ou moins fortes susceptibilités à l'activité hydrogravitaire.

✓ Méthodologie :

Réalisation de **cartes morphodynamiques** (1/5 000) par analyse diachronique de clichés aériens et de récoltes de données d'archives en **trois étapes** :

- Inventaire des mouvements de terrain (où et quand ?) ;
- Cartographie de l'évolution de la végétation ;
- Elaboration de cartes morphologiques.

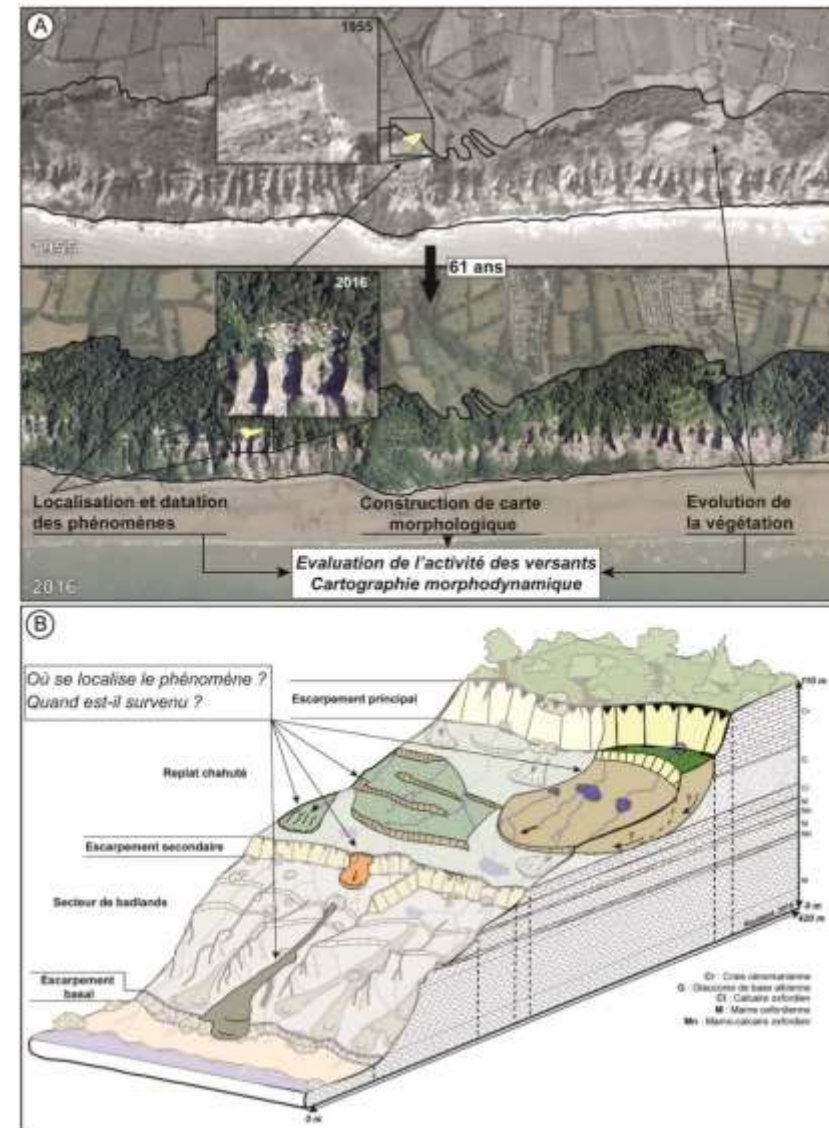
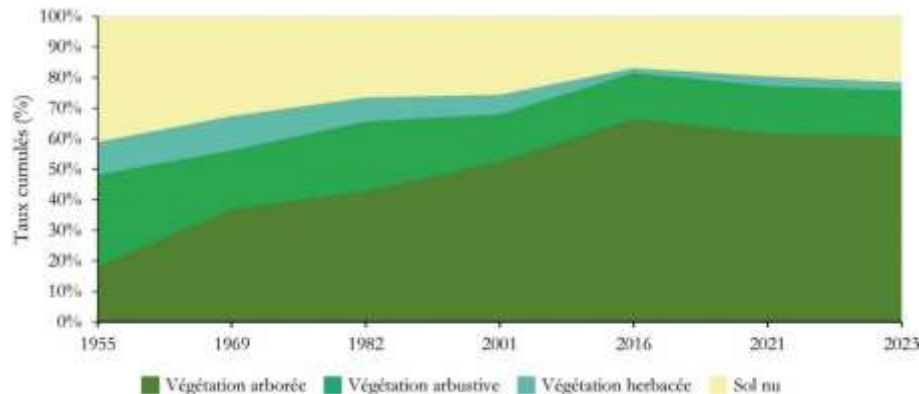


Illustration des objectifs de l'analyse à échelle récente (1955 – 2016)

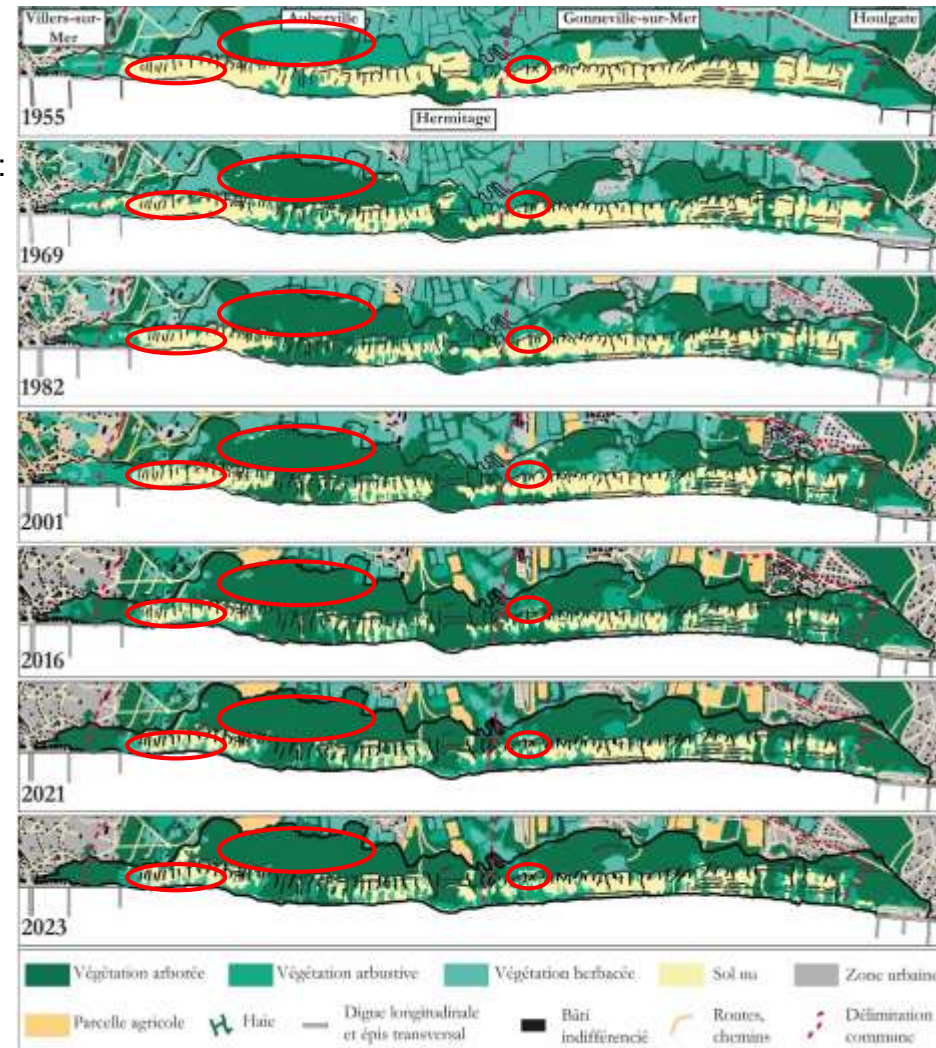
3.2. État d'activité et trajectoire d'évolution des versants à échelle récente

Dynamiques spatio-temporelles de la végétation : évolution à long terme

- ❑ Une évolution différenciée selon les secteurs :
 - ✓ **Replat supérieur** (plateau) et l'escarpement principal :
 - Zones **stables** : expansion durable de la strate arborée.
 - ✓ **Replat secondaire** et pentes modérées :
 - Colonisation fragmentée ;
 - **Alternance de strates** herbacées, arbustives et arborées.
 - ✓ **Badlands** & fortes pentes :
 - Persistance du **sol nu** : versant actif ;
 - Colonisation végétale inégale : strate herbacée.
- ❑ **Tendance générale** à la recolonisation végétale sur 70 ans.
 - ✓ 1955 à 2016 : expansion rapide et régulière.
 - ✓ 2016 à 2023 : stabilisation ou régression partielle.



Évolution de l'occupation des strates de 1955 à 2023.



Cartes de l'occupation du sol des falaises des Vaches Noires de l'escarpement principal au pied de falaise entre 1955 et 2023 (modifié de Roulland, 2022).

➔ **Potentielles réductions du déclenchement hydrogravitaire sur l'ensemble du site** (évapotranspiration, protection des sols, ...)

Thèse Bastien Sandberg, décembre 2025

3.2. État d'activité et trajectoire d'évolution des versants à échelle récente

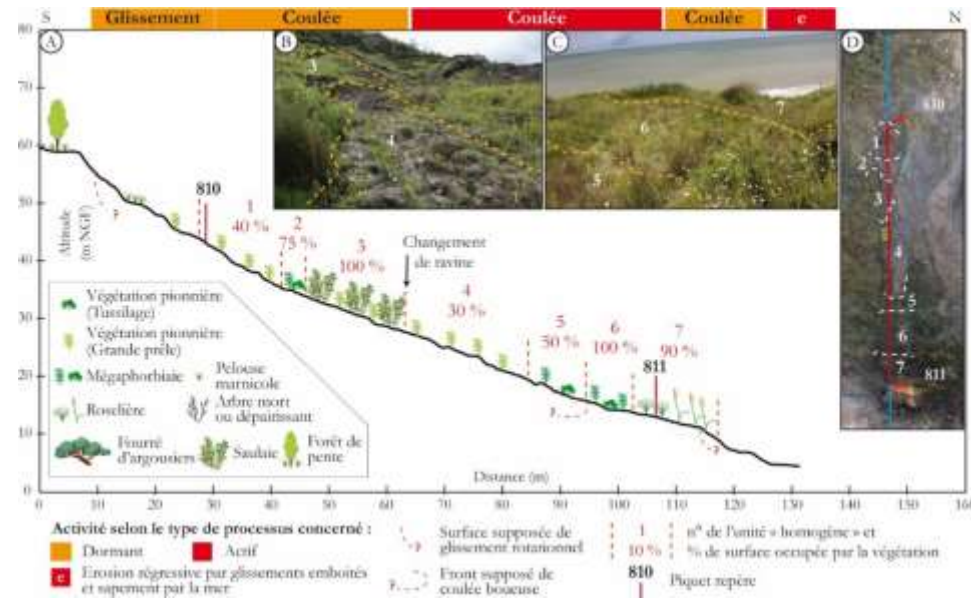
Dynamiques spatio-temporelles de la végétation : état de référence (oct. 2021 et mai 2025)

Relevés le long de 19 transects en octobre 2021 et en mai 2025 :

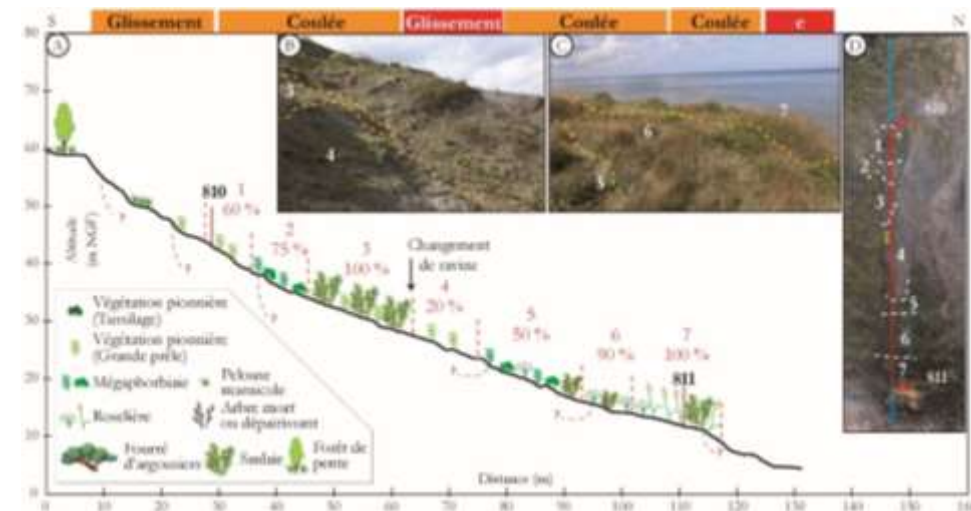
- ✓ Des **cortèges** de végétation ;
- ✓ Du taux de **recouvrement** ;
- ✓ Des **indices de surface** (fissures, bossellements, escarpements, zone humides, ...).

Production de **profils éco-géomorphologiques** :

- ✓ Chaque transect ;
- ✓ **Unité homogène** ;
- ✓ **Degré d'activité** (actif, dormant, ...).



Profil éco-géomorphologique 810 en octobre 2021.

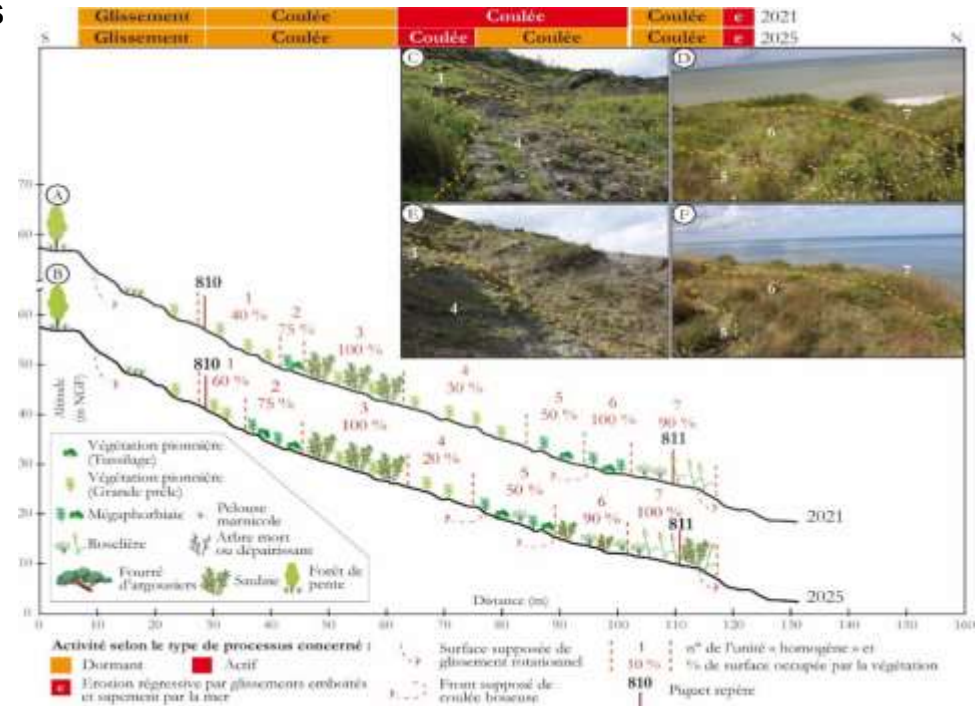


Profil éco-géomorphologique 810 en mai 2025.



Dynamiques spatio-temporelles de la végétation : évolution entre oct. 2021 et mai 2025

- ❑ Réalisation de **profils éco-morphodynamiques** en superposant les deux états (mai 2021 et octobre 2025).
- ❑ Analyse de la trajectoire et définition de plusieurs classes selon :
 - ✓ **L'axe** selon les ravines ;
 - ✓ **L'activité** ;
 - ✓ **Les cortèges** :
 - Type ;
 - Recouvrement ;
 - État de santé / dépérissement.
 - ✓ **Forme du talweg** (en escalier, concave ou rectiligne) ;
 - ✓ **La micromorphologie**.



Evolution éco-morphodynamique du profil 810.

3.2. État d'activité et trajectoire d'évolution des versants à échelle récente

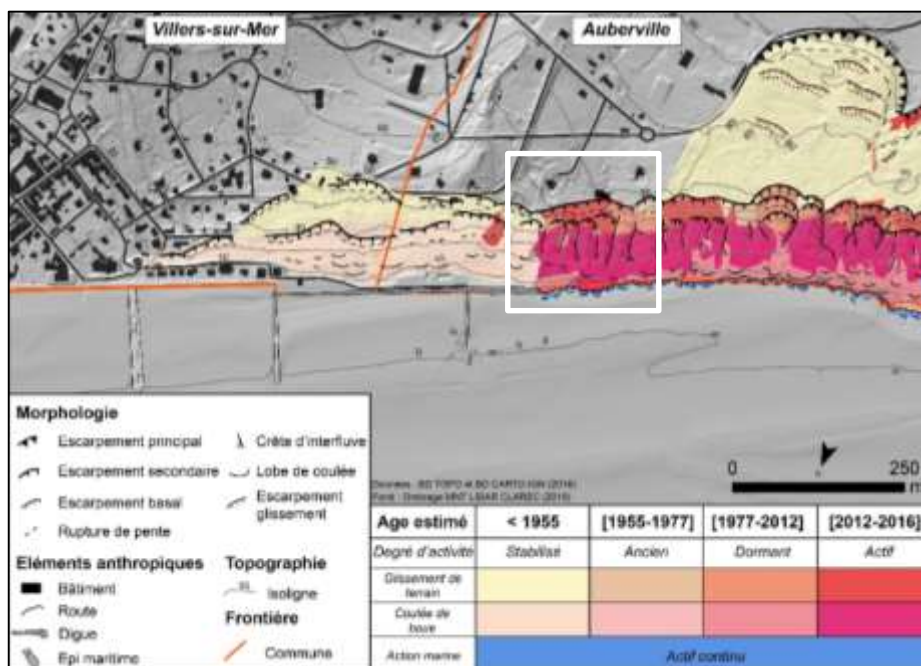
✓ Synthèse de l'activité des versants par la réalisation de cartes morphodynamiques au 1/5 000

- Vue synoptique sur l'état d'activité des versants
- Identification des secteurs nécessitant une vigilance à l'approche de conditions hydrométéorologiques particulières

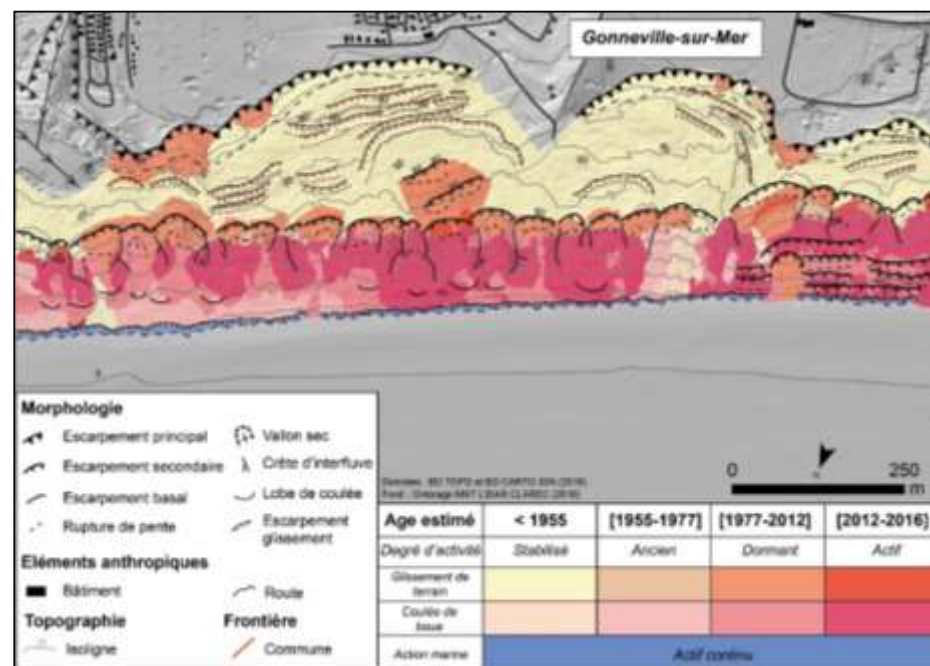
Escarpement principal et replat chahuté sous-jacent : stable, ancien et dormant

Escarpement secondaire : dormant et actif

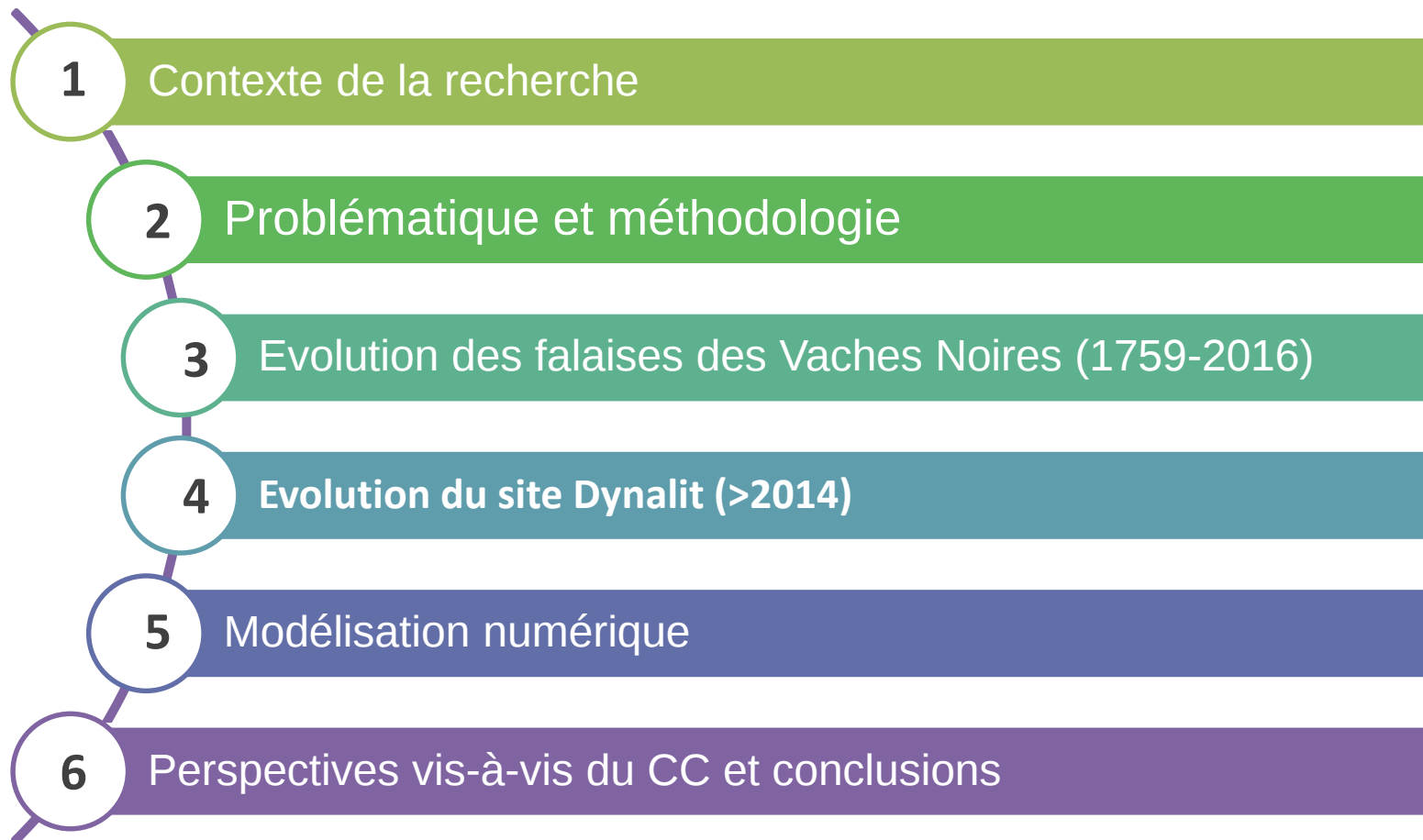
Badlands : principalement dormant et actif, ancien dans les secteurs végétalisés, stabilisé à l'arrière des digues



Carte morphodynamique au 1/5 000 du secteur de Villers-sur-Mer et Auberville (extrémité orientale des falaises des Vaches Noires)



Carte morphodynamique au 1/5 000 du secteur de Gonneville-sur-Mer



Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

Échelle pluriannuelle et saisonnière (>2014)



Localisation du SNO DYNALIT à proximité de Villers-sur-Mer



Illustration du site SNO DYNALIT (photo : Peuziat, 2021)

Ont également été analysées à l'échelle :

- *Intra-saisonnière (automne-hiver)*, les dynamiques hydrogravitaires par la photogrammétrie « SfM » terrestre et drone (UAV).
- *Journalière (hiver-printemps)*, les cinématiques de versant par suivi continu GNSS

Pour en savoir plus : thèse Thomas Roulland (2022)



Seasonal activity quantification of coast badlands by TLS monitoring over five years at the "Vaches Noires" cliffs (Normandy, France)

Thomas Roulland ^{1,*}, Olivier Maquaire ², Stéphane Costa ³, Mohand Medjkane ⁴, Robert Davidson ⁵, Cyrille Fauchard ⁶, Raphaël Antoine ⁶

¹ Normandie Univ., UNICAEN, CNRS, UFR, 14000 Caen, France

² Centre Equipement PEGSIS - Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement - Equipe projet EROSIS



Landslides

DOI 10.1007/s10346-022-02006-2
Received: 24 January 2022

Accepted: 28 November 2022

© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2023

Technical Note

Cyrille Fauchard ⁶ · Vincent Guilbert · Raphael Antoine · Cyril Ledun · Bruno Beaucamp · Olivier Maquaire · Stéphane Costa · Mohand Medjkane · Thomas Roulland

Diachronic UAV study of coastal badlands supported by geophysical imaging in the context of accelerated erosion processes

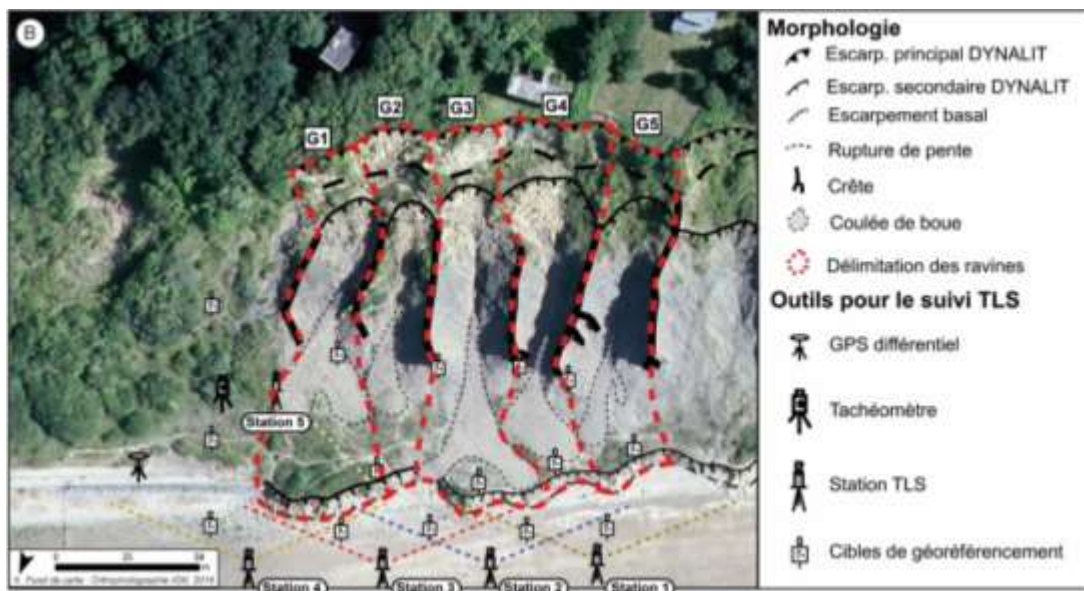
❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Objectifs :

- Déterminer les modalités du fonctionnement saisonnier des badlands ;
- Identifier d'éventuels rythmes d'activité et leurs possibles relations avec les forçages météorologiques et marins.

✓ Méthodologie : Suivi par scanner laser terrestre (TLS)

- Suivi de trois ravines connexes (G2, G3 et G4)



TLS sur le site
DYNALIT



Cible de
géoréférencement

Stratégie d'acquisition
TLS sur le site
DYNALIT

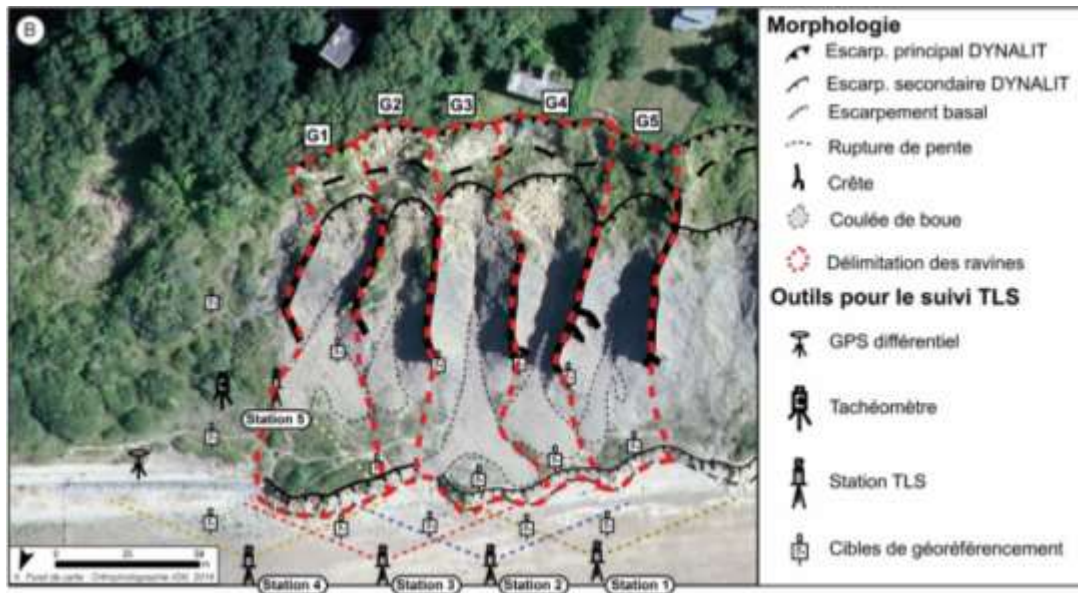
❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Objectifs :

- Déterminer les modalités du fonctionnement saisonnier des badlands ;
- Identifier d'éventuels rythmes d'activité et leurs possibles relations avec les forçages météorologiques et marins.

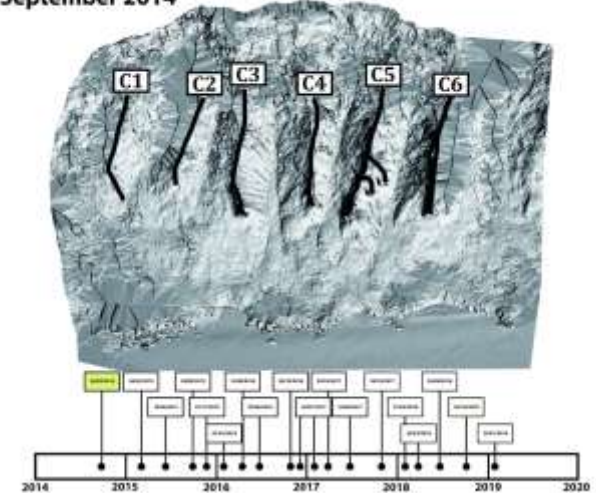
✓ Méthodologie : Suivi par scanner laser terrestre (TLS)

- Suivi de trois ravines connexes (G2, G3 et G4)
- Comparaison de modèle numérique de terrain (MNT)
- Spatialisation et quantification des zones d'érosion/dépôt (DoD)



TLS 1

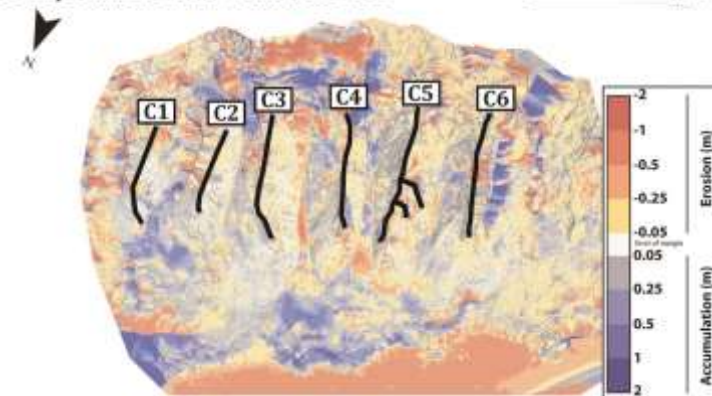
26 September 2014



Modèle TLS ombragé

Differential model 1

26 September 2014 > 4 March 2015

Stratégie d'acquisition
TLS sur le site
DYNALITRaster de différence
altitudinale (DoD)

❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Méthodologie : Suivi photogrammétrique (SfM) par drone (Equipe Endsum, Cerema)

- Modèle numérique de terrain (MNT)



Animation MNT par levé drone sur le site DYNALIT en janvier 2019 par Cerema

Technical Note

Landslides
DOI 10.1007/s10346-022-02006-2
Received: 24 January 2022
Accepted: 28 November 2022
© Springer-Verlag GmbH Germany,
part of Springer Nature 2023

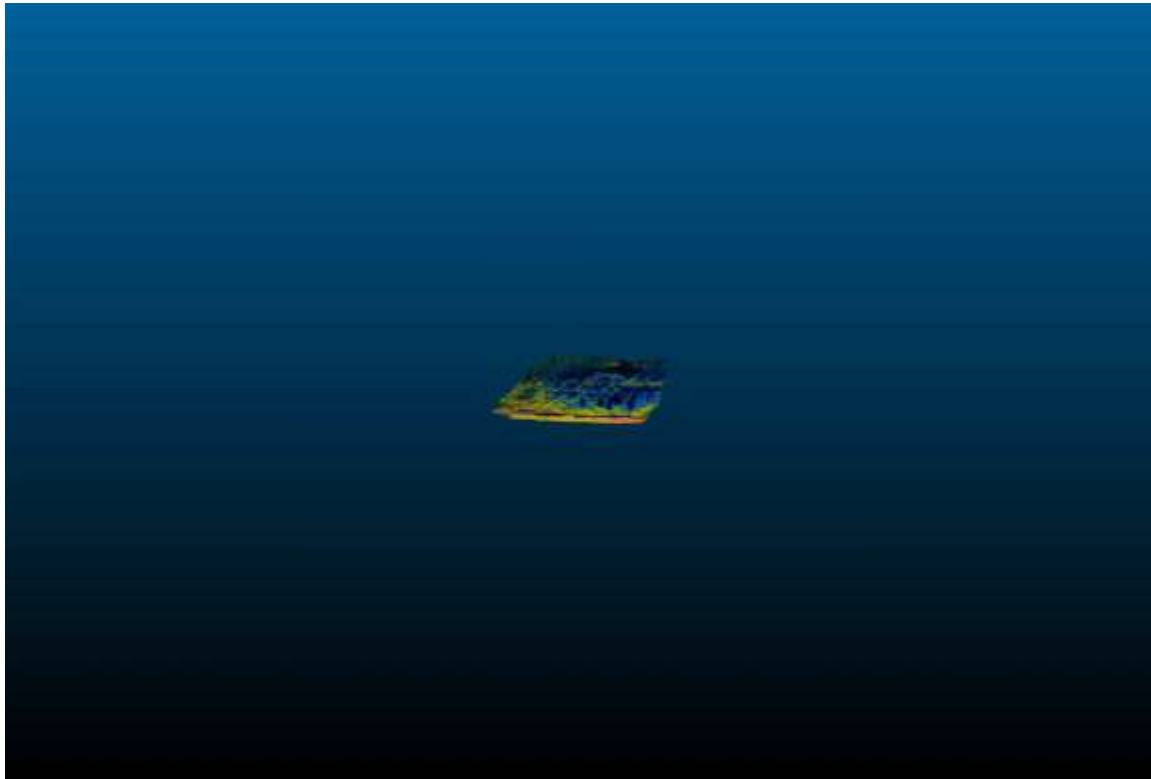
Cyrille Fauchard · Vincent Guilbert · Raphael Antoine · Cyril Ledun ·
Bruno Beaucamp · Olivier Maquaire · Stéphane Costa · Mohand Medjkane ·
Thomas Roulland

**Diachronic UAV study of coastal badlands
supported by geophysical imaging
in the context of accelerated erosion processes**

❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Méthodologie : Suivi photogrammétrique (SfM) par drone (Equipe Endsum, Cerema)

- Modèle numérique de terrain (MNT) fusionné avec **infrarouge**



FUSION OF THERMAL AND VISIBLE POINT CLOUDS : APPLICATION TO THE VACHES NOIRES LANDSLIDE, NORMANDY, FRANCE

V.Guilbert¹, R.Antoine¹, C.Heinkels^{2,*}, O.Maquaire³, S.Costa³, C. Gout⁴, R.Davidson³, J.-L.Sorin⁵, B.Beaucamp¹, C.Fauchard¹

Animation MNT fusionné avec infrarouge par levé drone sur le site DYNALIT en janvier 2019 par Cerema

¹Cerema, ENDSUM Research Team, Le-Grand-Quevilly, France

²Cerema, ENDSUM Research Team, Strasbourg, France - christophe.heinkels@cerema.fr

³LETG-GEOPHEN CAEN, UMR6554, Université de Caen Normandie, Caen, France

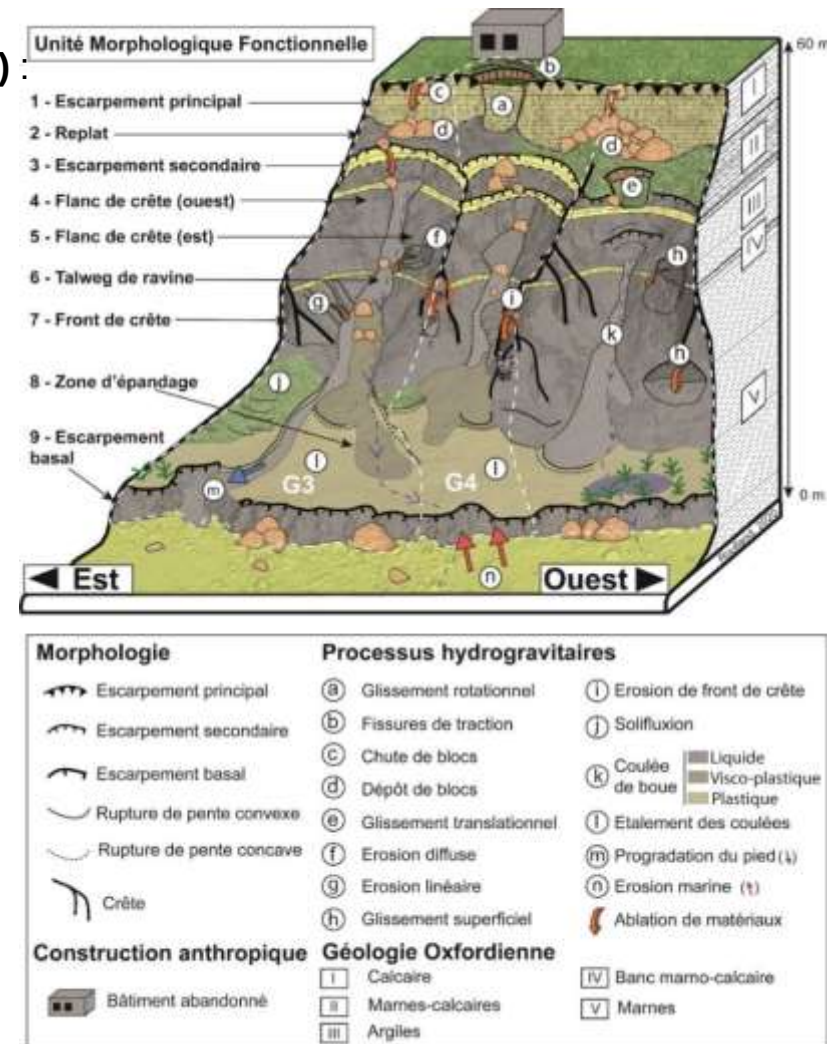
⁴INSA Rouen-Normandie Université, LMI EA 3226, Rouen, France

⁵IFSTTAR, Site de Nantes, Bouguenais, France

❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Découpage en **Unité Morphologique Fonctionnelle (UMF)** :

- de délimiter et spatialiser les processus hydrogravitaires de chaque UMF pour chaque ravine ;
- de détailler les relais de processus d'amont en aval des versants (ablation > transport > dépôt).



Représentation schématique du découpage UMF et des processus hydrogravitaires observables dans les badlands (Roulland et al., 2022)

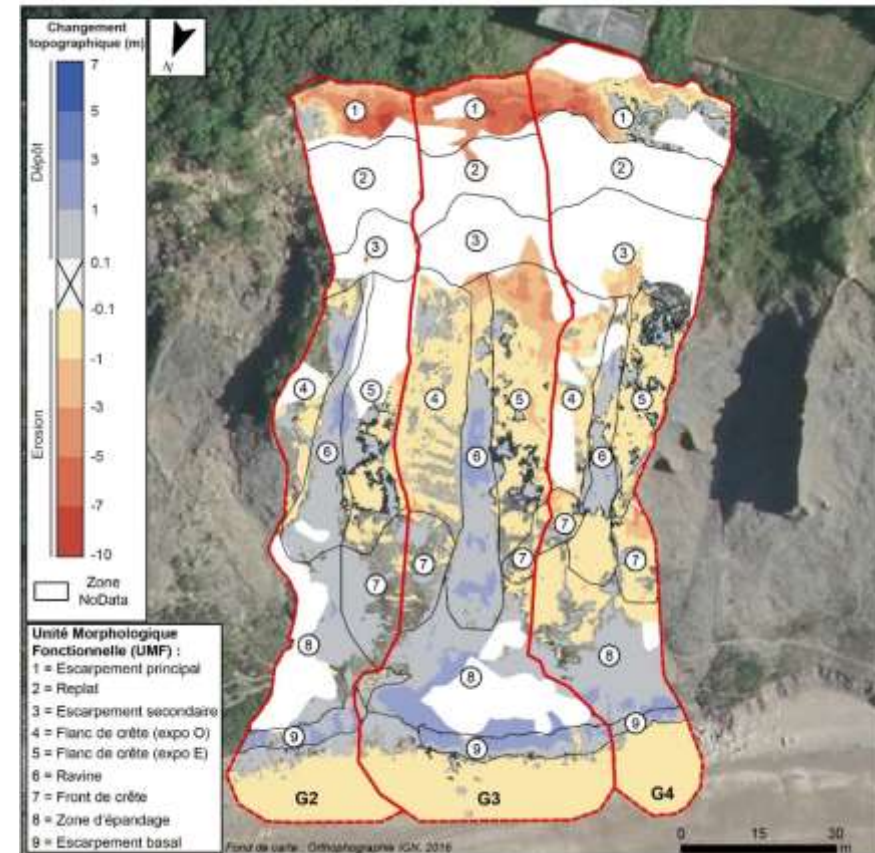
❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Découpage en **Unité Morphologique Fonctionnelle (UMF)** :

- de délimiter et spatialiser les processus hydrogravitaires de chaque UMF pour chaque ravine ;
- de détailler les relais de processus d'amont en aval des versants (ablation > transport > dépôt).

✓ **Bilan confirmant les dynamiques observées** à échelle récente (1947/1955-2016) :

- Partie sommitale en forte érosion : - 5 à - 10 m ;
- Érosion (de l'ordre du mètre) des flancs de crête ;
- Zones de dépôt d'ampleurs variables :
 - 1 m (talweg de ravine) ;
 - 1 à 3 m (zone d'épandage) ;
 - 1 à 3 m (escarpement basal).



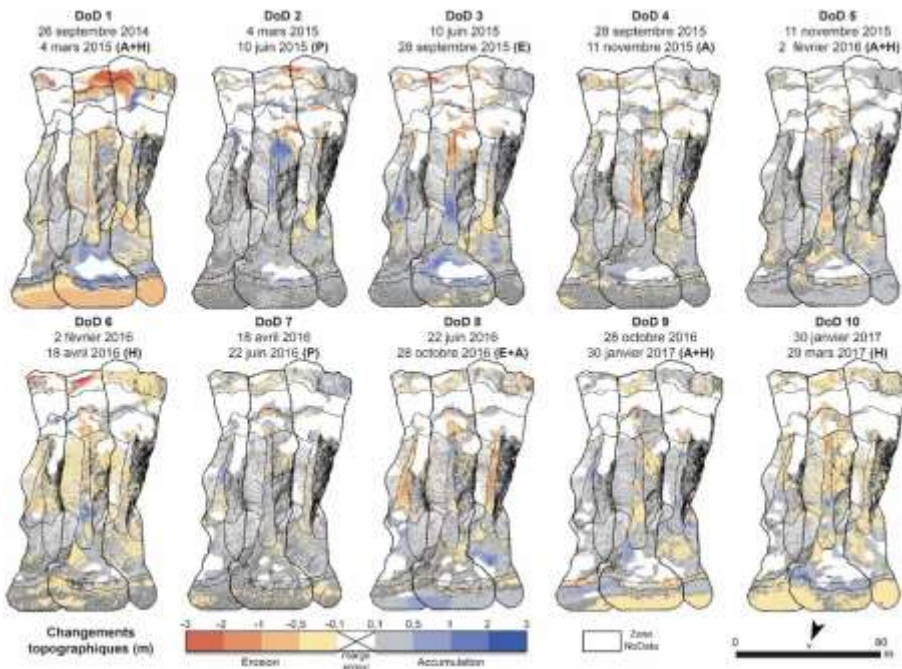
Spatialisation des secteurs en érosion et en dépôt du site DYNALIT entre le 26 septembre 2014 et le 19 novembre 2019 (Roulland et al., 2022)

Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

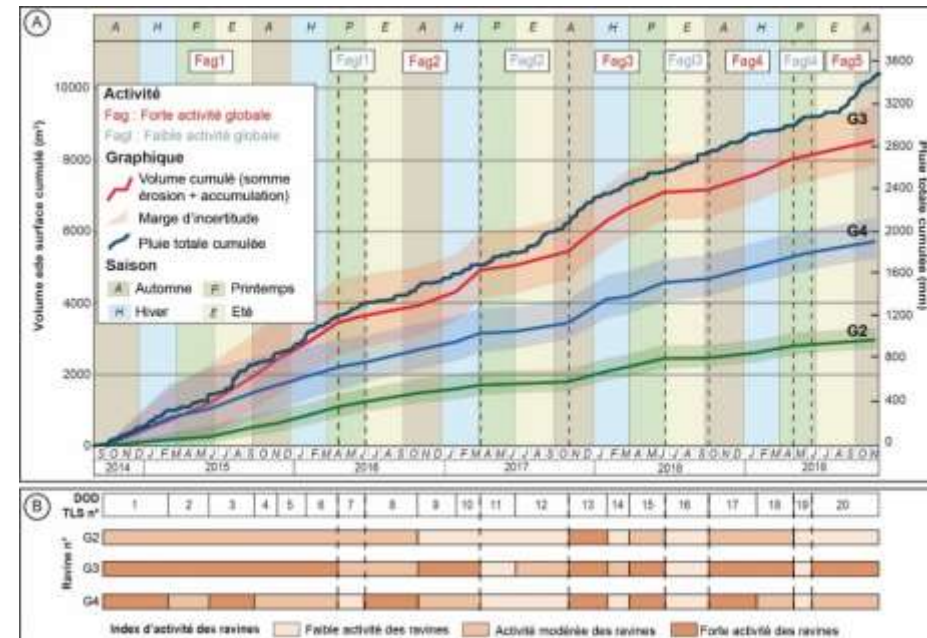
✓ Mise en relation des volumes de surface et des conditions météo-marines :

- Bonne relation précipitation/volumes ;
- Des inégalités de fonctionnement entre ravine.

✓ Spatialisation saisonnière des processus hydrogravitaires



Spatialisation des surfaces d'érosion et de dépôt des matériaux pour les ravines G2 à G4 entre le 26 septembre 2014 et le 29 mars 2017 (modifiée de Roulland et al., 2022)



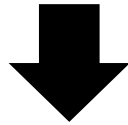
Rythme saisonnier des volumes de surface mobilisés entre le 26 septembre 2014 et le 19 novembre 2019 pour les ravines G2, G3 et G4 (Roulland et al., 2022)

Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Mise en relation des volumes de surface et des conditions météo-marines :

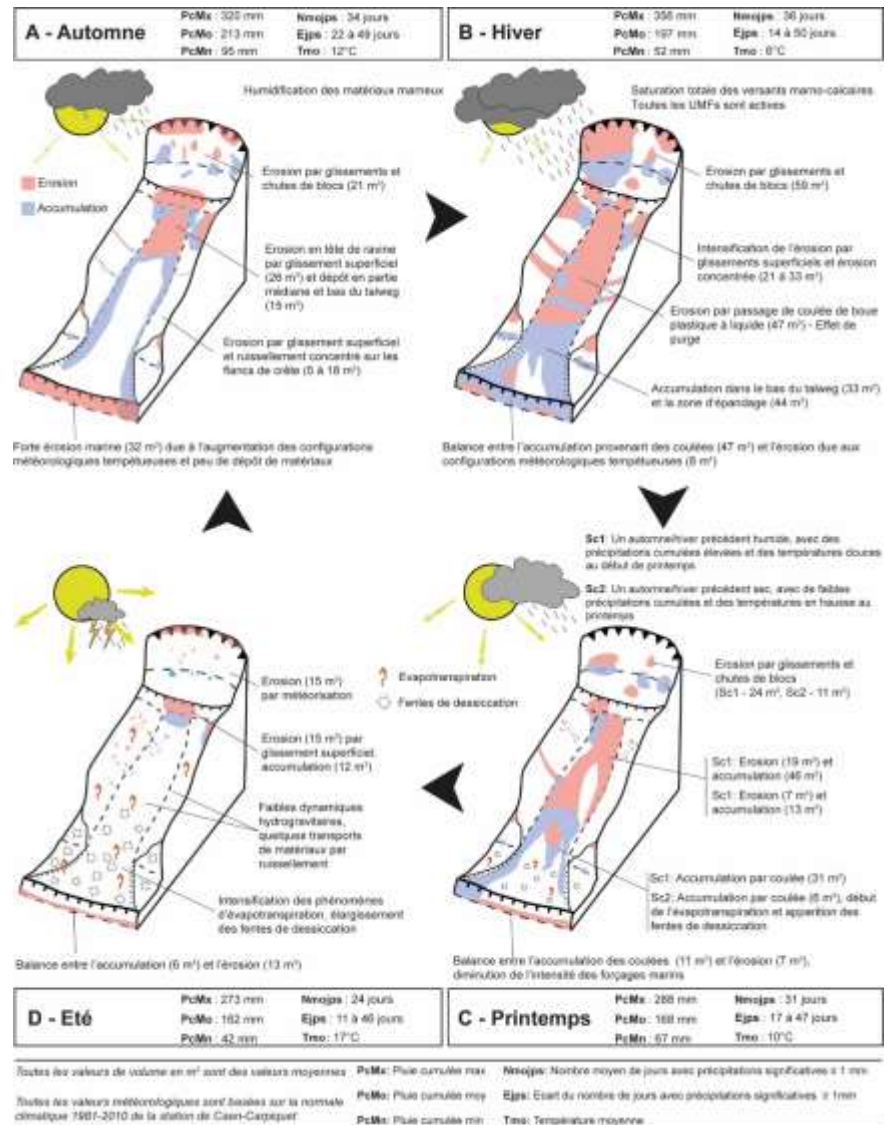
- Bonne relation précipitation/volumes ;
- Des inégalités de fonctionnement entre ravine.

✓ Spatialisation saisonnière des processus hydrogravitaires



Modèle conceptuel des dynamiques saisonnières

- Spatialisation des processus par UMF (**érosion** et **accumulation**) ;
- Volumes de surface ;
- Conditions hydro-météo-marines.



Modèle conceptuel de l'évolution saisonnière des ravines de badlands (Roulland et al., 2022)

Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

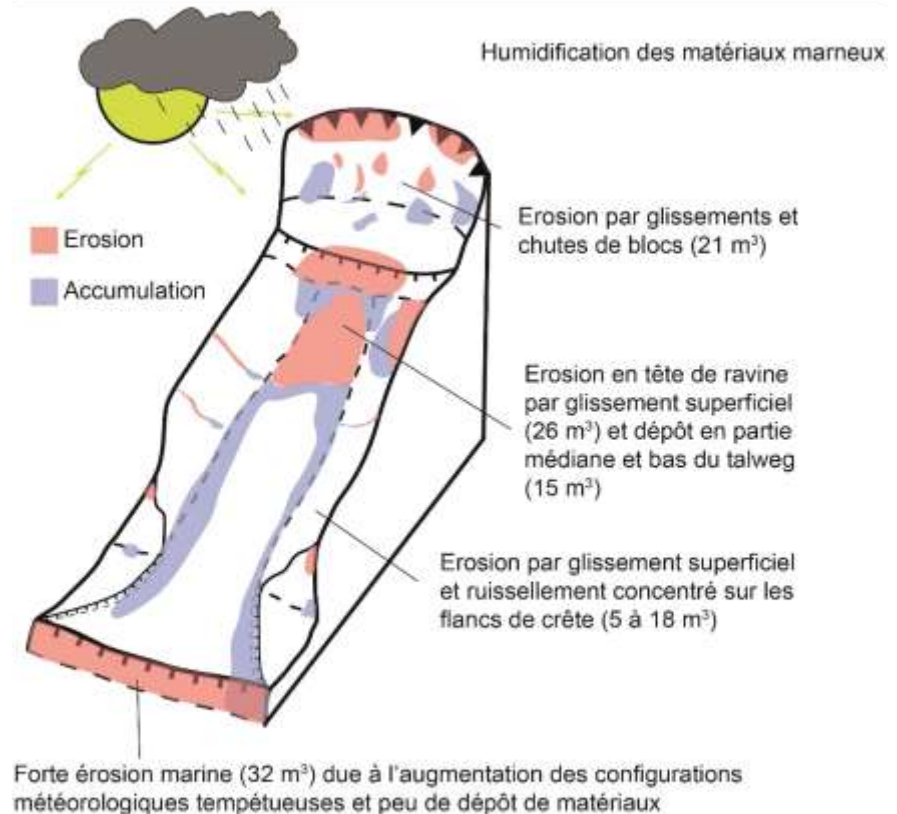
✓ Automne :

- Épisodes pluvieux longs (213 mm, 34 jours de pluie), Tmo (12°C)
 - Humidification progressive
 - Recharge de la nappe
- Reprise des événements tempétueux
 - Érosion avérée (escarpement basal)



Illustration de l'état de surface de la ravine G3 durant chaque saison

A - Automne	PcMx : 320 mm	Nmojps : 34 jours
	PcMo : 213 mm	Ejps : 22 à 49 jours
	PcMn : 95 mm	Tmo : 12°C



PcMx: Pluie cumulée max	Nmojps: Nombre moyen de jours avec précipitations significatives ≥ 1 mm
PcMo: Pluie cumulée moy	Ejps: Ecart du nombre de jours avec précipitations significatives ≥ 1 mm
PcMn: Pluie cumulée min	Tmo: Température moy
Toutes les valeurs de volume en m³ sont des valeurs moyennes.	
Toutes les valeurs météorologiques sont basées sur la normale climatique 1981-2010 de la station de Caen-Carpiquet	

Modèle conceptuel de l'évolution saisonnière des ravines de badlands (Roulland et al., 2022)

❑ Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Hiver :

- Épisodes pluvieux longs (197 mm, 36 jours de pluie), Tmo (6°C)
 - Saturation des versants
 - Progression de la recharge de la nappe
- Forte agitation hivernale marine + tempêtes
 - Apport constant de matériaux vers le pied de falaise
 - Érosion avérée (pied de falaise)

Activation de toutes les UMFs



Illustration de l'état de surface de la ravine G3 durant chaque saison

B - Hiver	PcMx : 356 mm	Nmojps : 36 jours
	PcMo : 197 mm	Ejps : 14 à 50 jours
	PcMn : 52 mm	Tmo : 6°C



PcMx: Pluie cumulée max

PcMo: Pluie cumulée moy

PcMn: Pluie cumulée min

Nmojps: Nombre moyen de jours avec précipitations significatives ≥ 1 mm

Ejps: Ecart du nombre de jours avec précipitations significatives ≥ 1 mm

Tmo: Température moy

Toutes les valeurs de volume en m³ sont des valeurs moyennes

Toutes les valeurs météorologiques sont basées sur la normale climatique 1981-2010 de la station de Caen-Carpiquet

Modèle conceptuel de l'évolution saisonnière des ravines de badlands (Roulland et al., 2022)

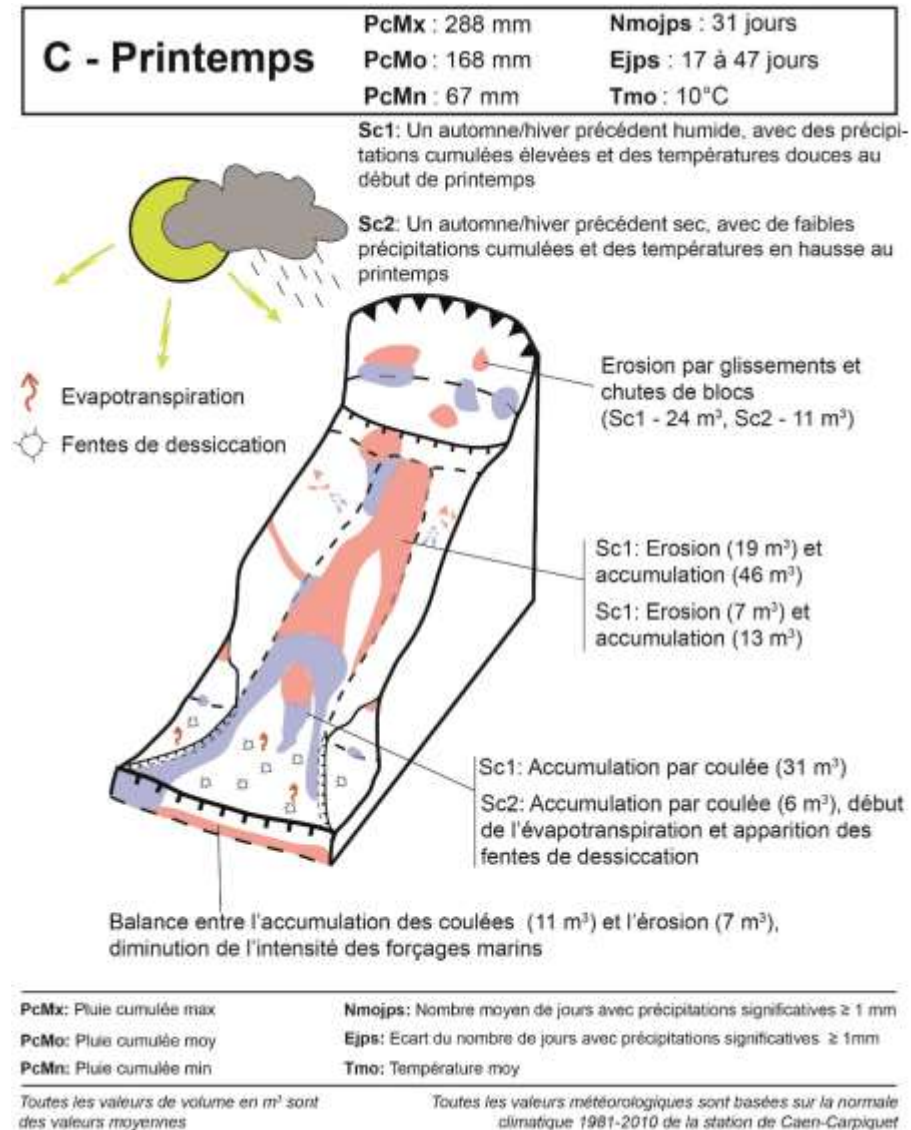
Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Printemps :

- Précipitations moins intenses (168 mm, 31 jours de pluie), Tmo (10°C)
 - Niveau de plus hautes eaux : décharge progressive
- Deux scénarios possibles :
 - Fortes précipitations (hiver/automne) + température douce (→ **Poursuite de l'activité hivernale**)
 - Faibles précipitations (hiver/automne) + élévation température (→ **Comportement pré-estival (assèchement des sols)**)
- Conditions météorologiques peu tempétueuses : faible mobilité de l'escarpement basal



Illustration de l'état de surface de la ravine G3 durant chaque saison



Modèle conceptuel de l'évolution saisonnière des ravines de badlands (Roulland et al., 2022)

Quantification des dynamiques hydrogravitaires saisonnières par suivi TLS

✓ Eté :

- Précipitations moins fréquentes (162 mm, 24 jours de pluie), Tmo (17°C)
 - Évapotranspiration
 - Assèchement des matériaux
 → Faible activité des ravines
- Dessiccation : fissures préparant infiltration eau d'automne
- Rares conditions météo-marines tempétueuses :
 - Érosion faible de l'escarpement basal

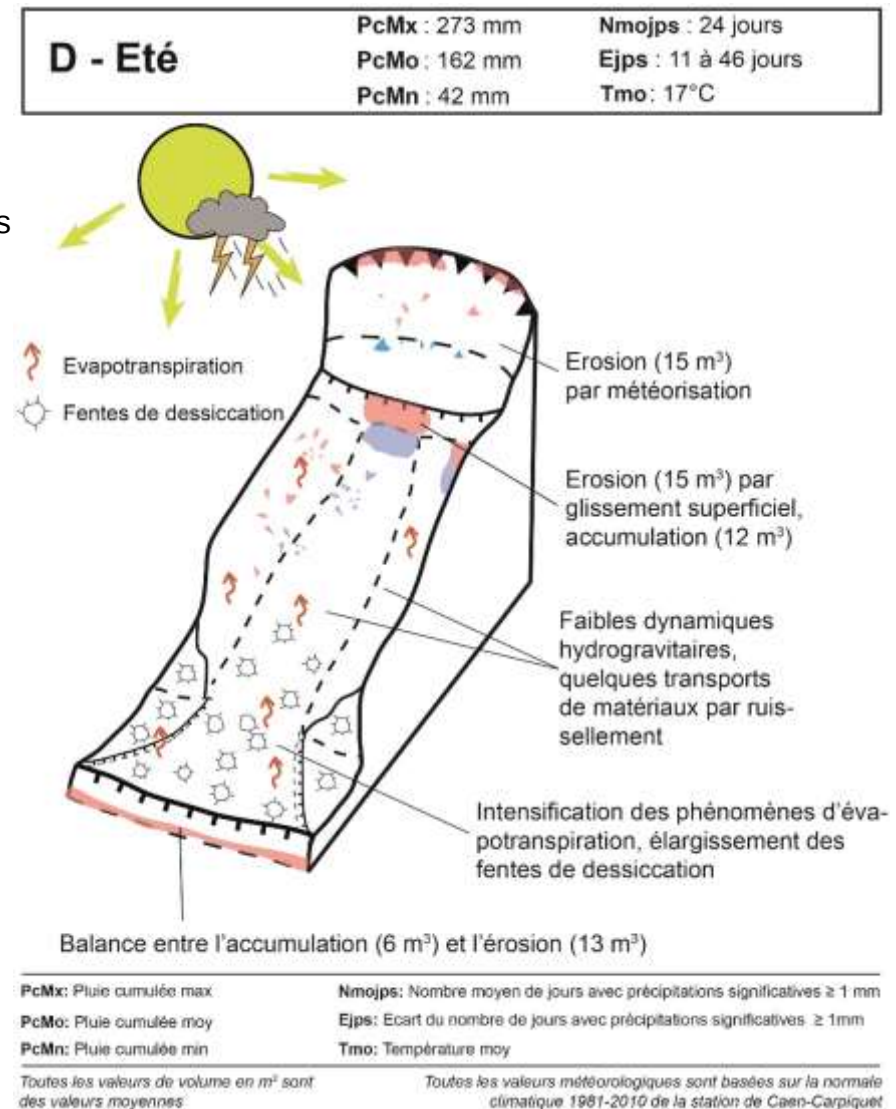
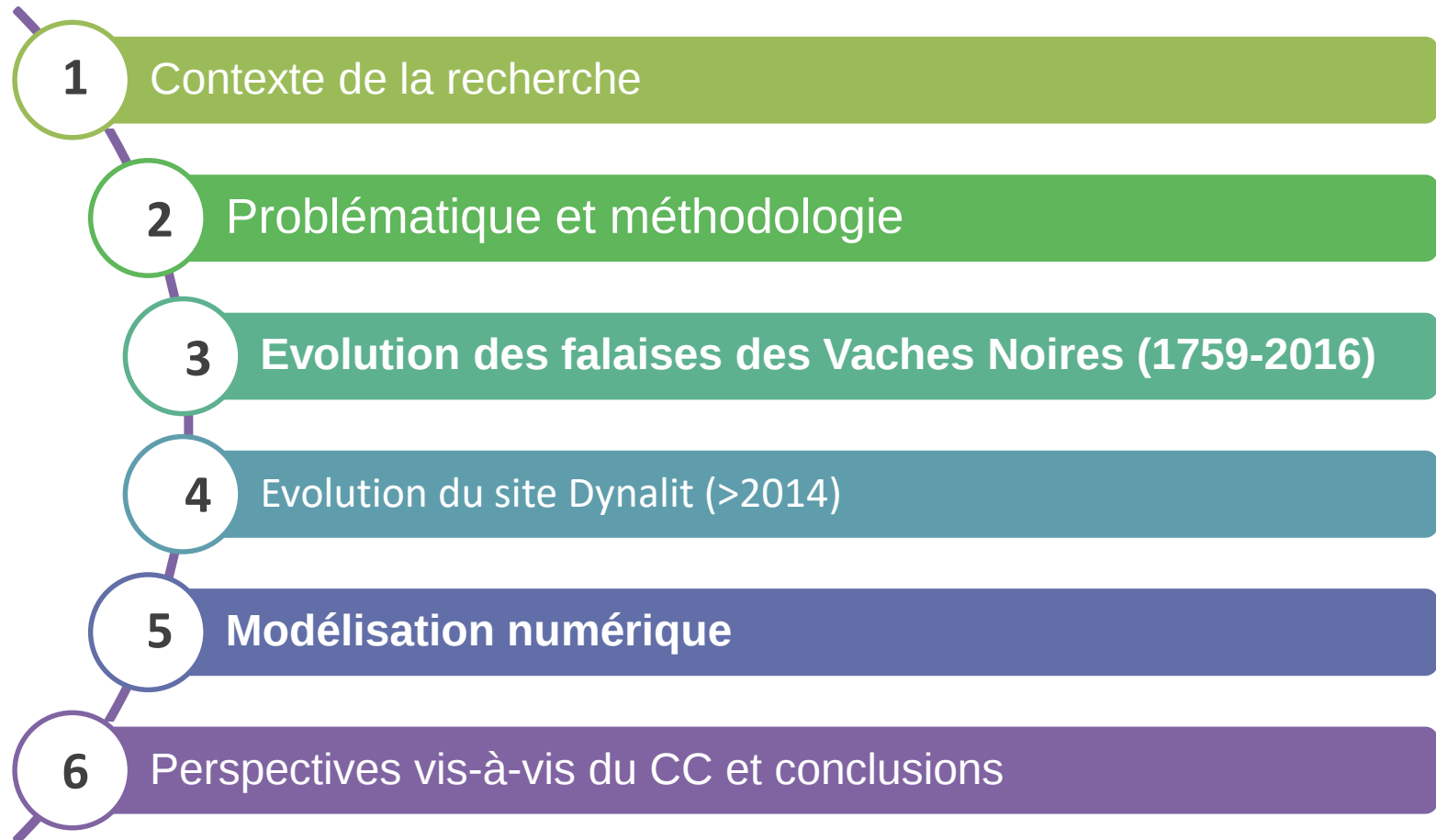


Illustration de l'état de surface de la ravine G3 durant chaque saison

Modèle conceptuel de l'évolution saisonnière des ravines de badlands (Roulland et al., 2022)



Modélisation

5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

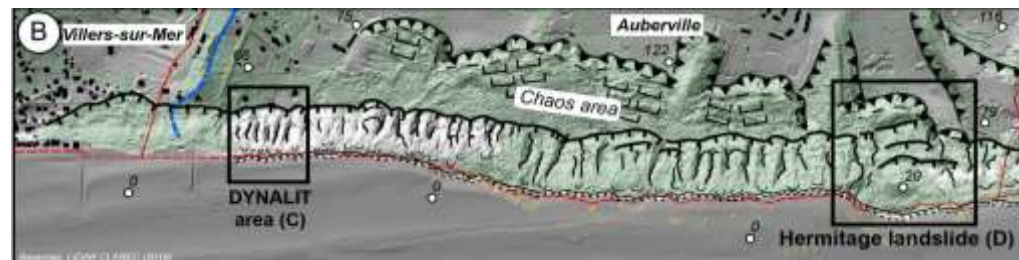
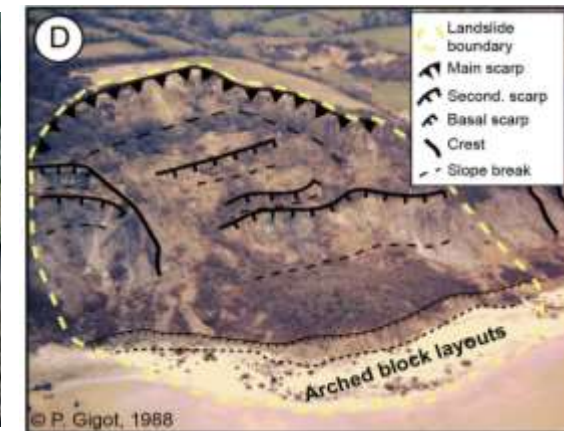


5.2 : Modélisation de l'initiation au déclenchement

5.2.1 : Calage des paramètres & approche semi-probabiliste



5.2.2 : Modélisation du grand glissement d'Hermitage



❑ Modélisation numérique



XIVth International Symposium on Landslides 2024

Development of a elasto-viscoplastic model to simulate the solid-fluid transition: application to mudflows on the Vaches Noires cliffs, Normandy, France

M. Kouah^{1,5}, H. Tran², F. Nicot³, A. Wautier⁴, Y. Thiery¹, O. Maquaire⁵

¹ Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Pessac, France

² Itasca Consultants, 29 Ave. Joannès Masset, 69009 Lyon, France

³ Université Savoie Mont-Blanc, Laboratoire ISTERRE - UMR CNRS 5275, Campus scientifique - Bat 8B, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France

⁴ INRAE, Université Aix-Marseille, UR RECOVER, 3275 Rte Cézanne, CS 40061, 13182, Aix-en-Provence Cedex 5, Marseille, France

⁵ NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France

Geomorphology 465 (2024) 109399



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Geomorphology

journal homepage: www.journals.elsevier.com/geomorphology



Reconstruction and verification of mechanism and triggering conditions of the Hermitage landslide at the Vaches Noires cliffs (Normandy)

Mohamed Kouah^{a,b,*}, Yannick Thiery^a, Olivier Maquaire^b, François Nicot^c, Antoine Wautier^d, Thomas Roulland^b, Guillaume Thirard^{b,e}, Mathieu Fressard^b, Stéphane Costat^b, Robert Davidson^b

^a Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

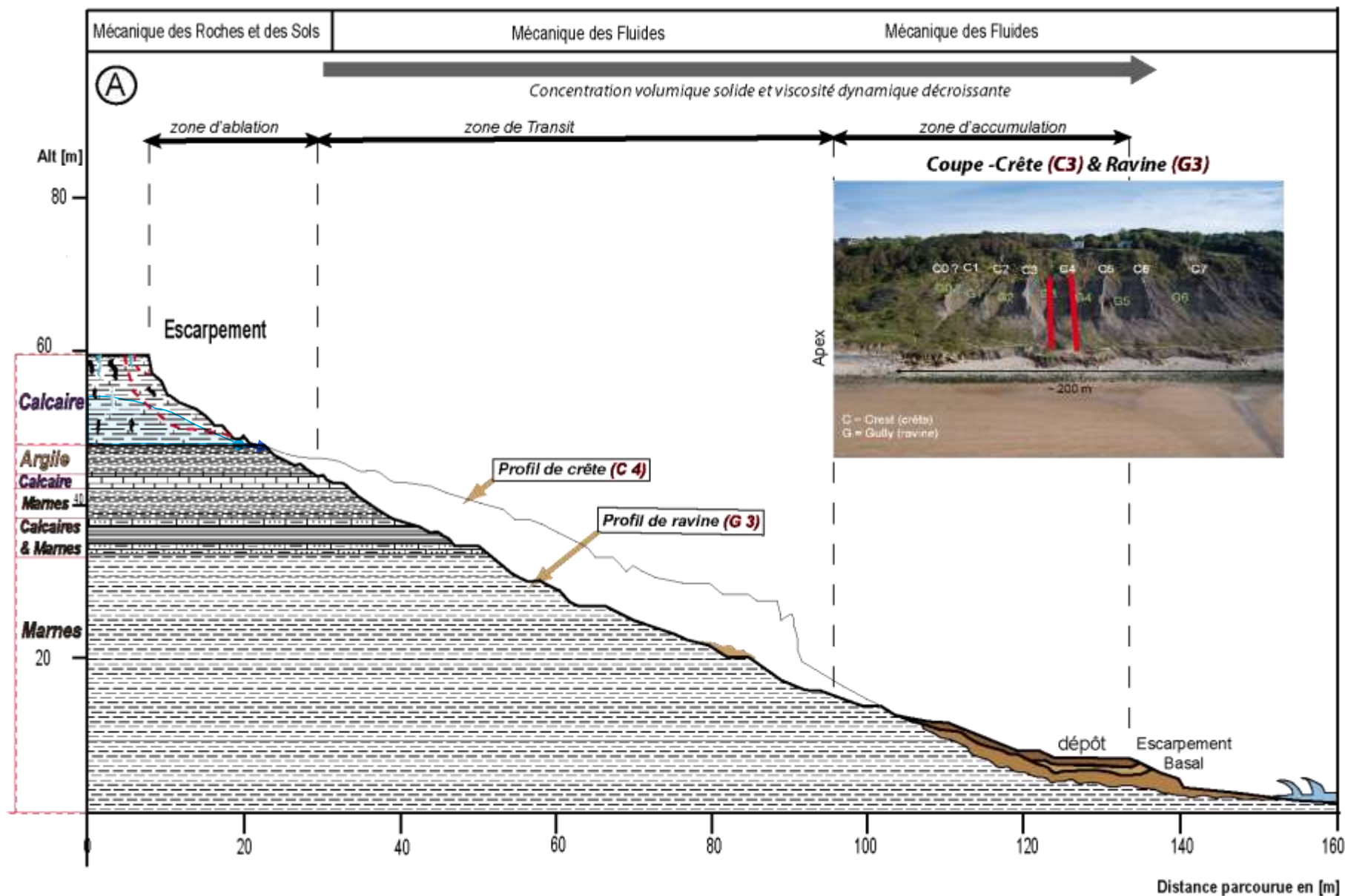
^b Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 CAEN, France

^c INRAE, Université Chambéry, Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire EDYTEM, UMR 5204, 5 bd. de la Mer Caspienne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France

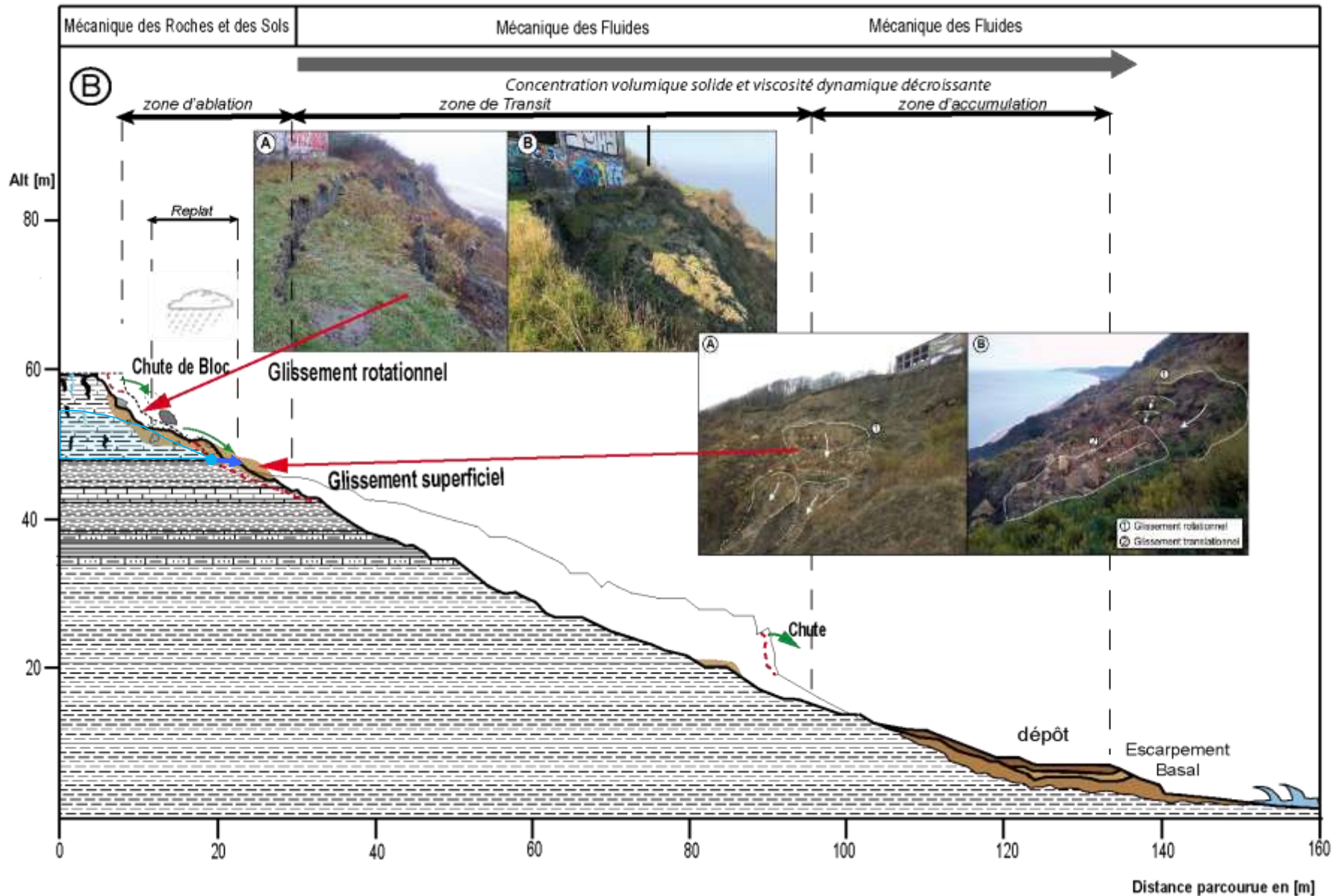
^d INRAE, Université Aix-Marseille, UR RECOVER, 3275 Rte Cézanne, CS 40061, 13182, Aix-en-Provence Cedex 5, Marseille, France

^e French National Forest Office, RTM Service - Southern Alps Agency, 04000 Digne-les-Bains, France

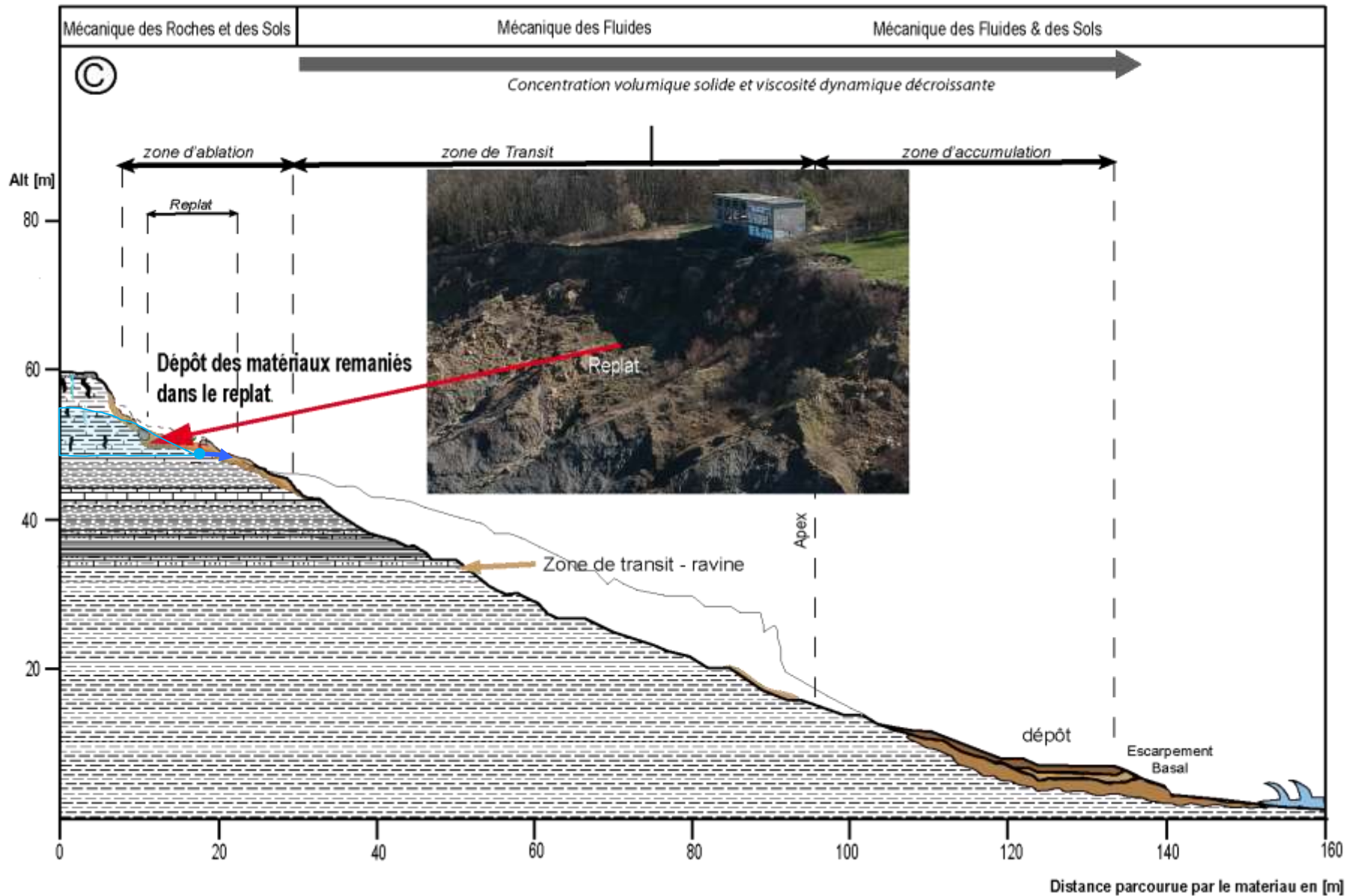
5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées



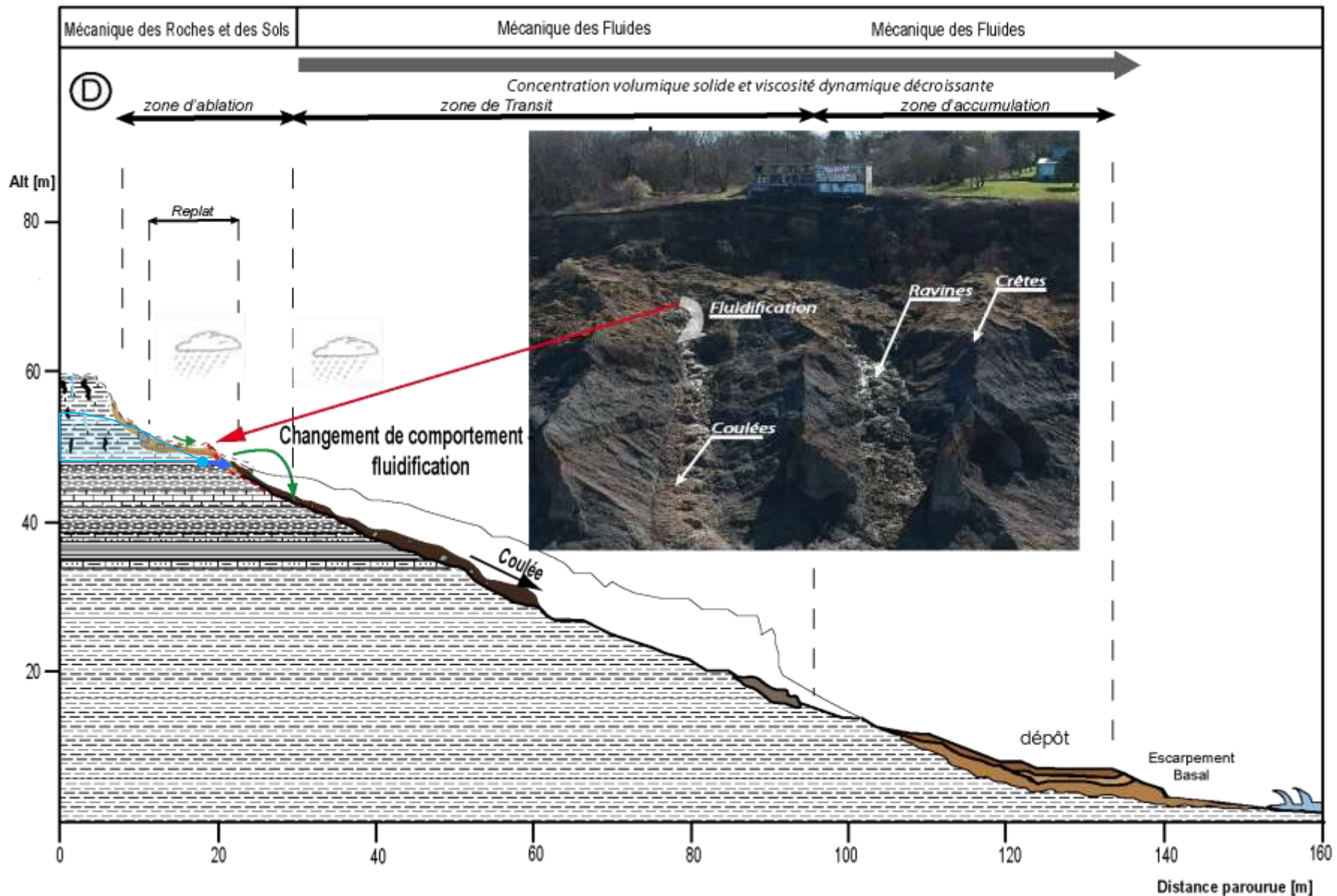
5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées



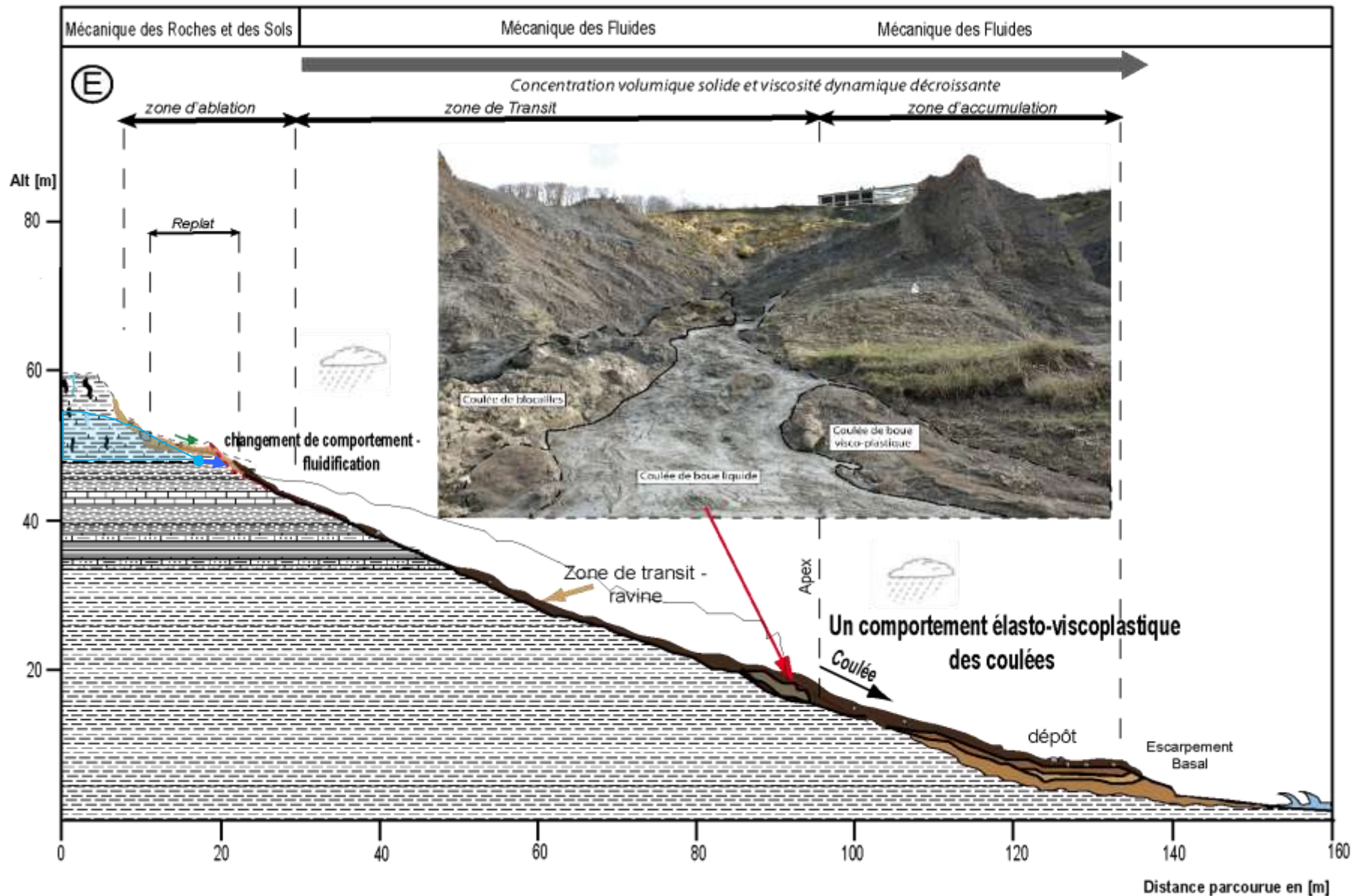
5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées



5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées



5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées



5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

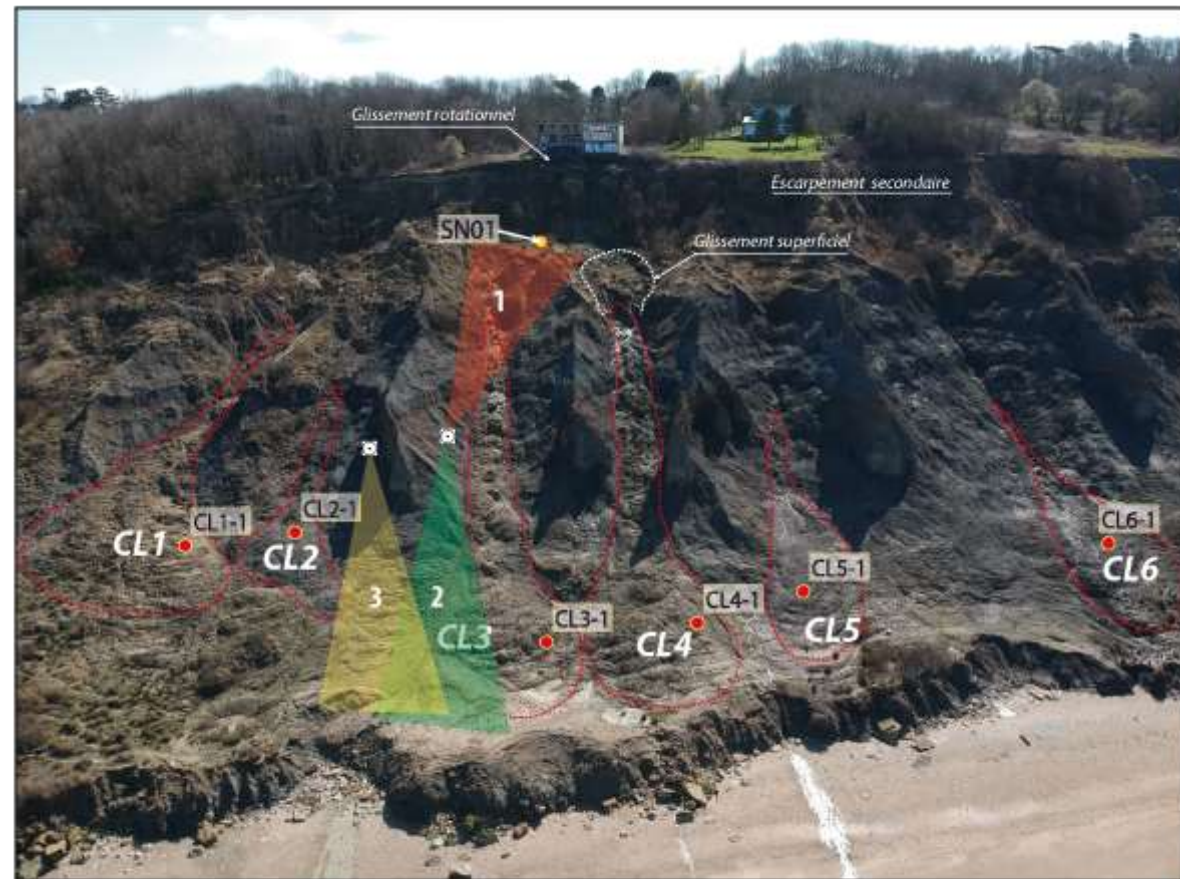
5.1.1. Choix et présentation de l'évènement

Coulée CL3 choisie :

- Plus de données disponibles ;
- Suivi par les caméras 1 et 2 ;
- Conditions limites bien maîtrisées.



Caméra (A) installée sur un poteau (B)



Caméra(1)_DI:12/02/2019 Caméra(2)_DI:08/04/2019 Caméra(3)_DI:14/02/2020

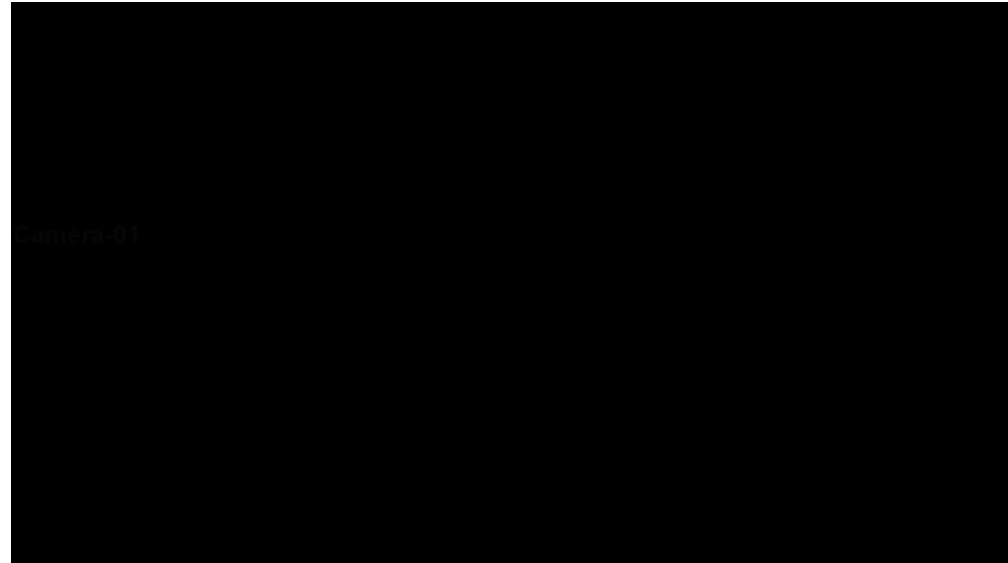
Illustration des positions des caméras et de leurs dates d'installation sur le site

5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.1. Choix et présentation de l'évènement

Résumé de la conceptualisation :

- Milieu continu ;
- Géomatériaux argileux ;
- Comportement : élasto-viscoplastique ;
- Vitesses de propagation environ : 0,5 à 10 m/jour.



Evolution de la coulée C3 à partir du 1^{er} mai 2021

Ces géomatériaux présentent **initialement un comportement solide (élastoplastique)** avant de changer de comportement pour devenir **fluide (viscoplastique)**

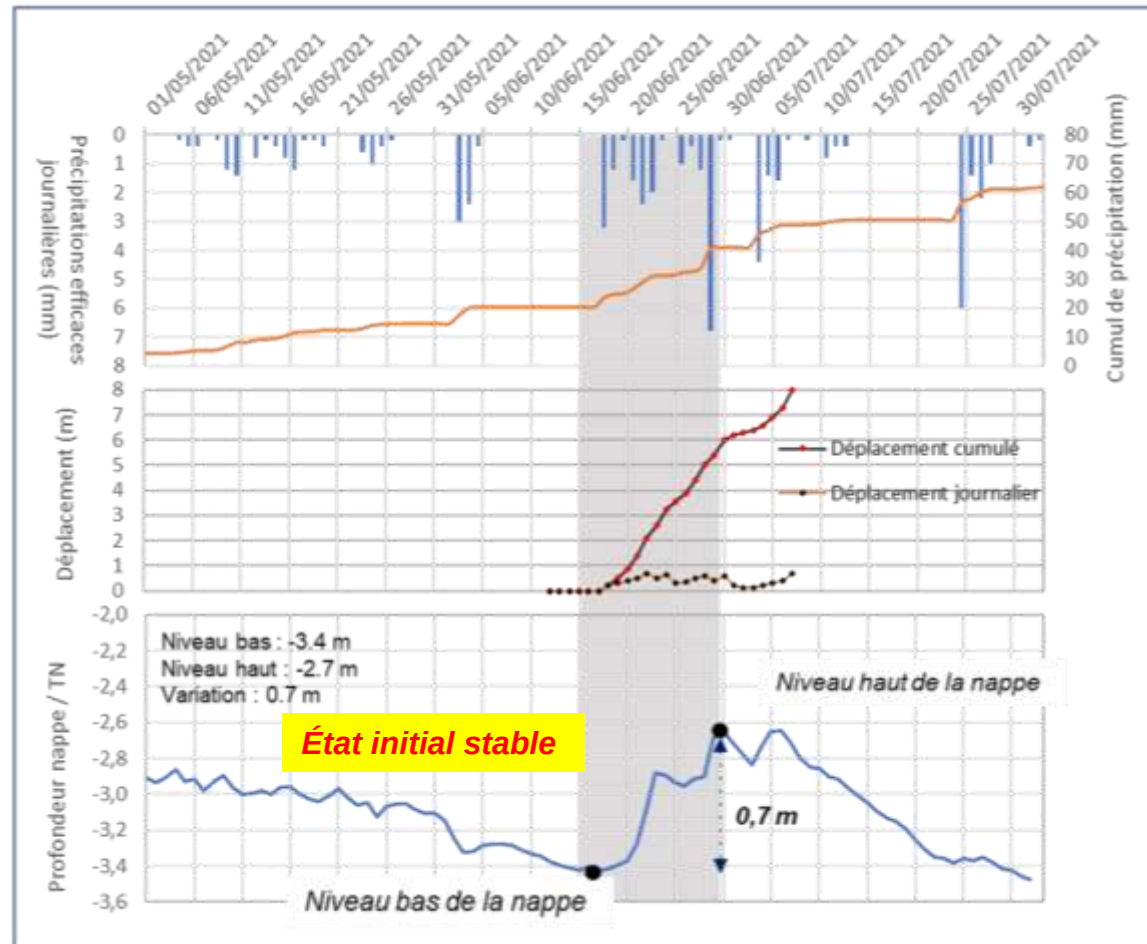
5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.1. Choix et présentation de l'évènement

Durée de l'évènement : 15 au 29 juin 2021 (14 jours)

- Plus de données disponibles ;
- Corrélation entre les déplacements de la coulée, les précipitations et la nappe phréatique ;
- Durée suffisamment longue et adaptée aux capacités de calcul.

La phase initiale (niveau bas de la nappe) → **état stable du versant**



Relations entre les précipitations efficaces journalières et cumulées, les déplacements journaliers et cumulés interprétatifs de la coulée n°3, ainsi que les variations du niveau de la nappe du piézomètre Pz6 durant la période choisie pour la modélisation du 15 juin 2021 au 29 juin 2021 (en gris : la période modélisée)

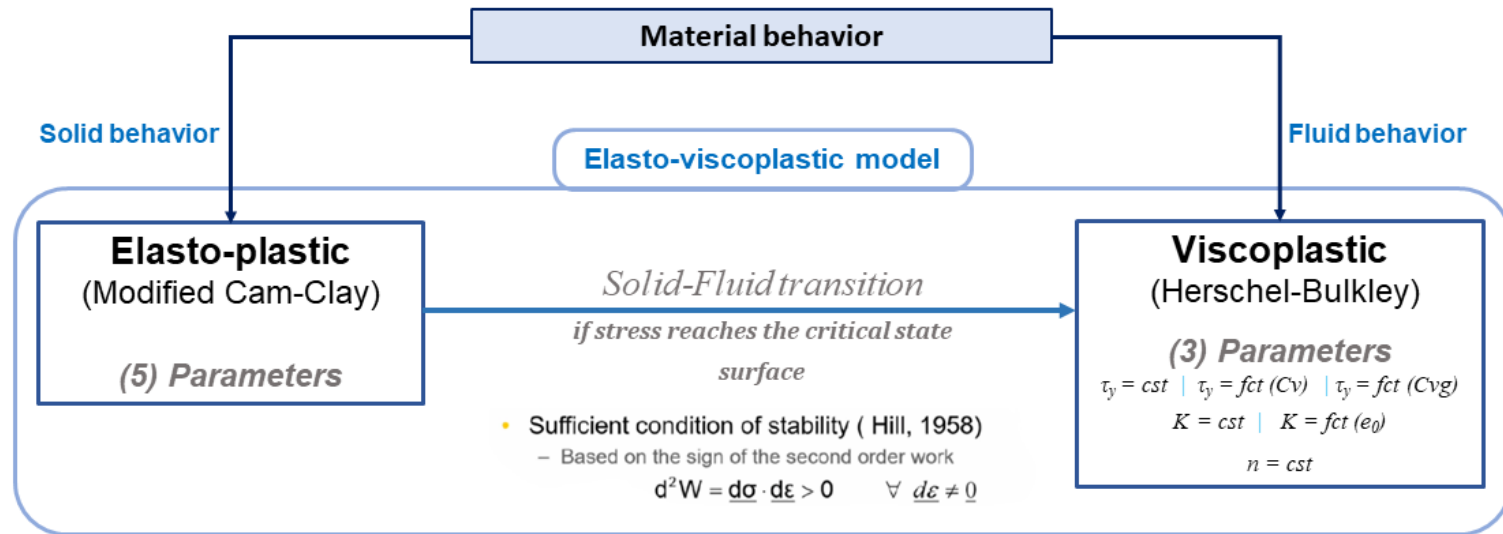
5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.2. Lois de comportement



➤ Nouveau modèle constitutif (IN FLAC2D)

Modèle constitutif : élasto-viscoplastique, nommé « *Cam-Clay-Herschel-Bulkley* »



MCC (Cam-Clay Modifié) :

- Modèle simple déjà implémenté dans *FLAC* ;
- Adapté au comportement des argiles remaniées ;
- Élasto-plasticité associée ($M = M^s$) $\rightarrow W_2$ coïncide avec les critères de plasticité limite.

HB (Hershell-Buckley):

- Le modèle le plus utilisé et le plus général pour la modélisation des coulées de boue.

➔ **Trois étapes de modélisation non abordées** (cf. détails dans articles et thèse M. Kouah, 2024)

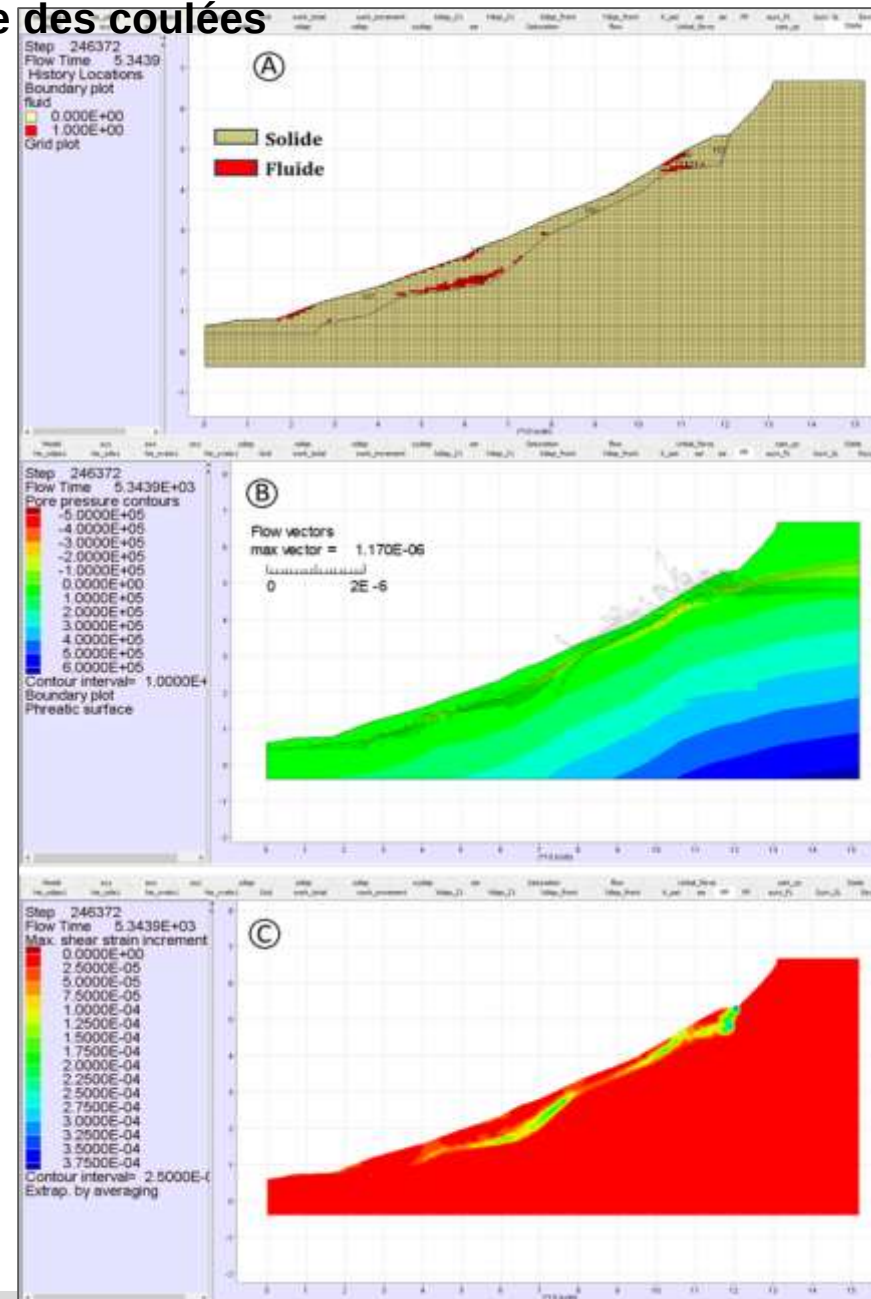
5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.4. Transition solide-fluide

Introduction des conditions hydrauliques :

- Zones de transition identifiées
 - Correspondent aux observations de terrain
- Transition solide-fluide
 - Augmentation des pressions inertielles (forces d'écoulement)

Transition solide-fluide avec l'introduction du niveau initial minimal de la nappe phréatique ; A) Transition solide-fluide dans la coulée ; B) Champ des pressions interstitielles et champ d'écoulement dans le versant ; C) Déformation de cisaillement maximale dans la coulée



5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.4. Transition solide-fluide

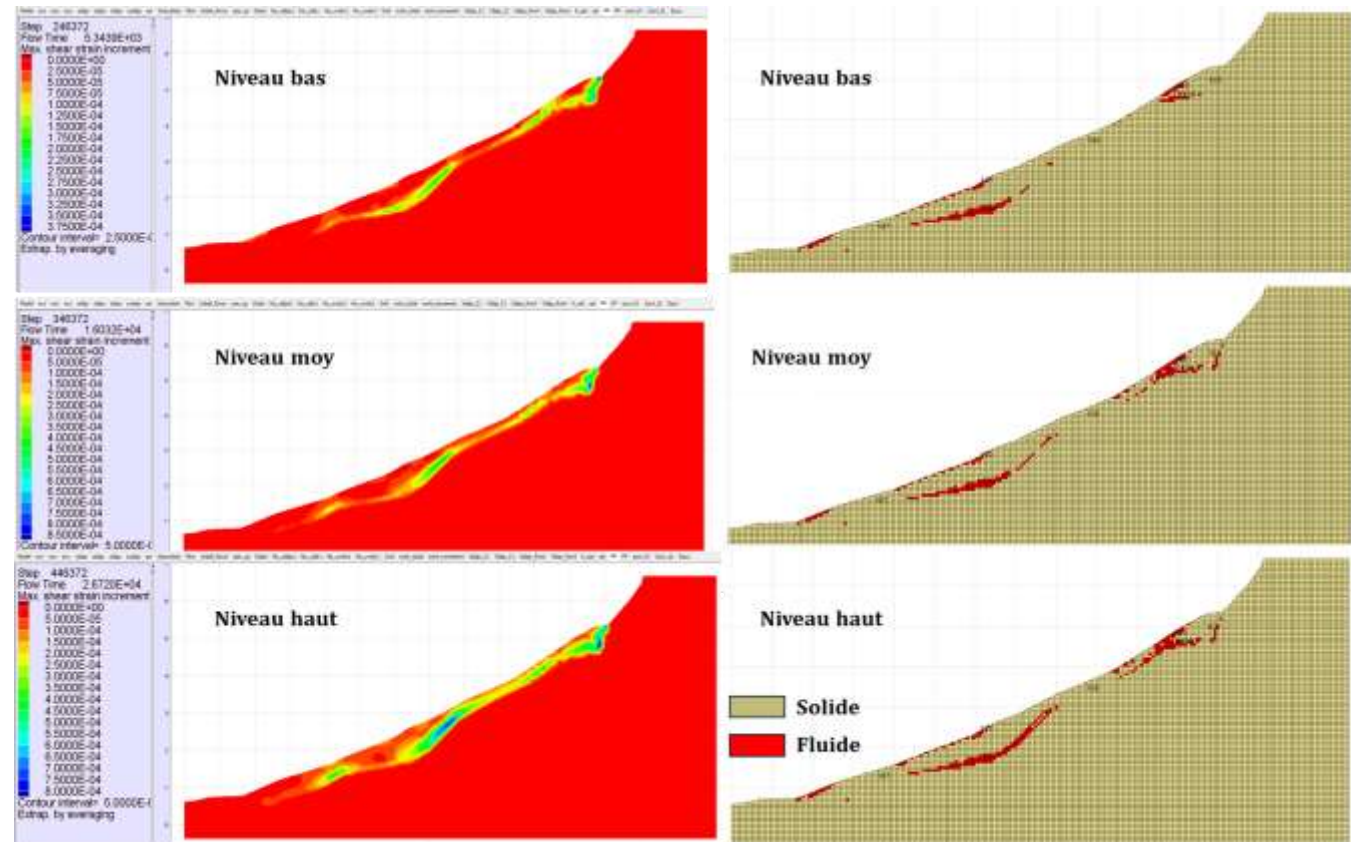


Illustration des progressions de la transition solide – fluide dans la coulée avec l'augmentation du niveau de la nappe phréatique et les déformations de cisaillement maximales

Augmentation progressive de la nappe :

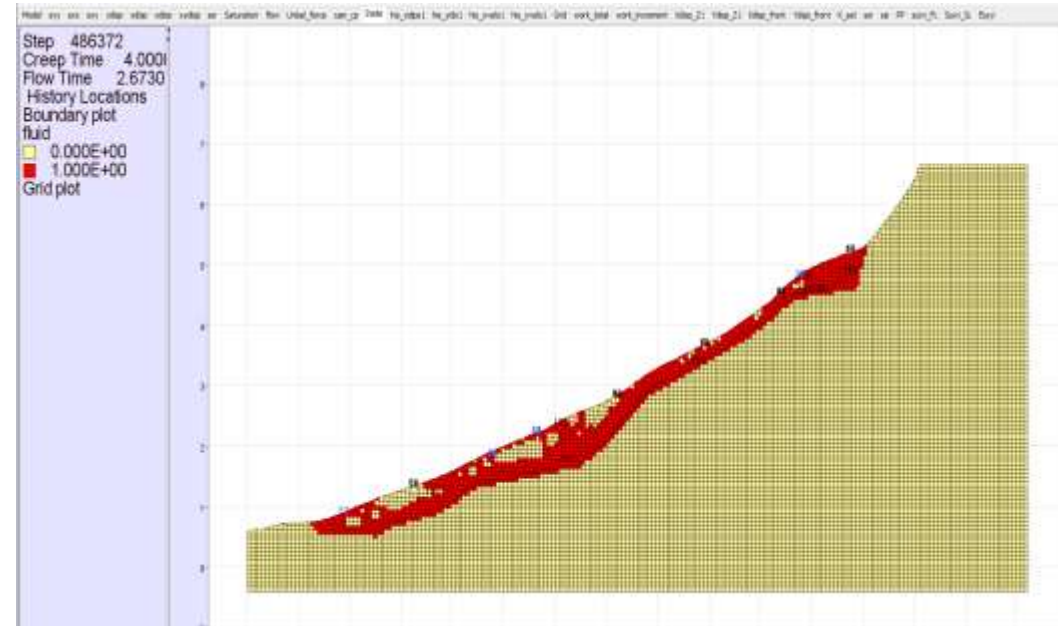
- Transitions solide-fluide deviennent plus prononcées à mesure que la nappe évolue au sein de la coulée ;
- Des transitions logiques en relation avec la variation des pressions interstitielles.

5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.4. Transition solide-fluide

Activation de l'option de fluage (HB) pour suivre l'évolution de la coulée

- Définition d'un pas de temps = fct (σ) ;
- Durée de calcul déterminée par la capacité du logiciel.



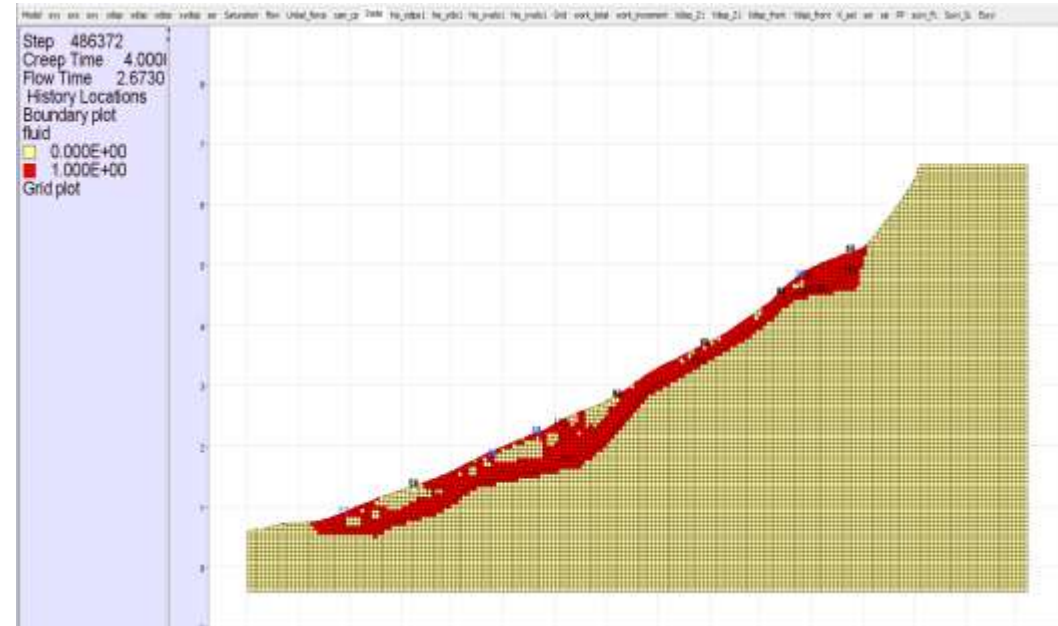
Transition solide-fluide dans la coulée après l'activation de l'option de fluage et le calcul avec la loi de HB

5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

5.1.4. Transition solide-fluide

Activation de l'option de fluage (HB) pour suivre l'évolution de la coulée

- Définition d'un pas de temps = fct (σ) ;
- Durée de calcul déterminée par la capacité du logiciel.



Transition solide-fluide dans la coulée après l'activation de l'option de fluage et le calcul avec la loi de HB

Limites de la modélisation :

- Difficulté à suivre l'évolution précise des déplacements (plusieurs zones passent à l'état fluide)
 - Déformations importantes (calculées selon la loi HB) subies par les zones déjà en état fluide
- Transition fluide-solide non gérée !
 - Le modèle de comportement ne dispose pas d'un critère pour gérer cette **transition inverse fluide-solide** !

Modélisation

5.1 : Modélisation de la transition Solide – Fluide des coulées

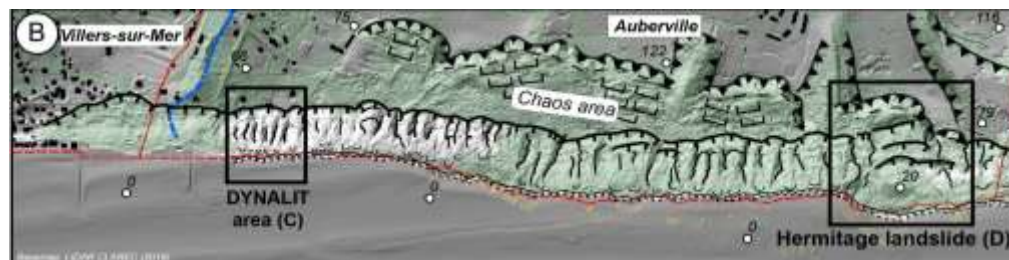
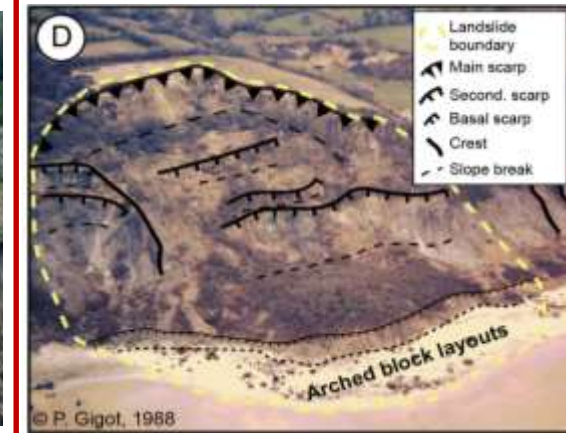


5.2 : Modélisation de l'initiation au déclenchement

5.2.1 : Calage des paramètres & approche semi-probabiliste



5.2.2 : Modélisation du grand glissement d'Hermitage



5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

Grand glissement, clairement identifiable par sa morphologie mais dont on ignore la date de déclenchement (aucun témoignage retrouvé dans les archives)

Objectifs : Reconstruire et vérifier les conditions d'initiation du déclenchement (après avoir fait le calage des paramètres par une approche semi-probabiliste)

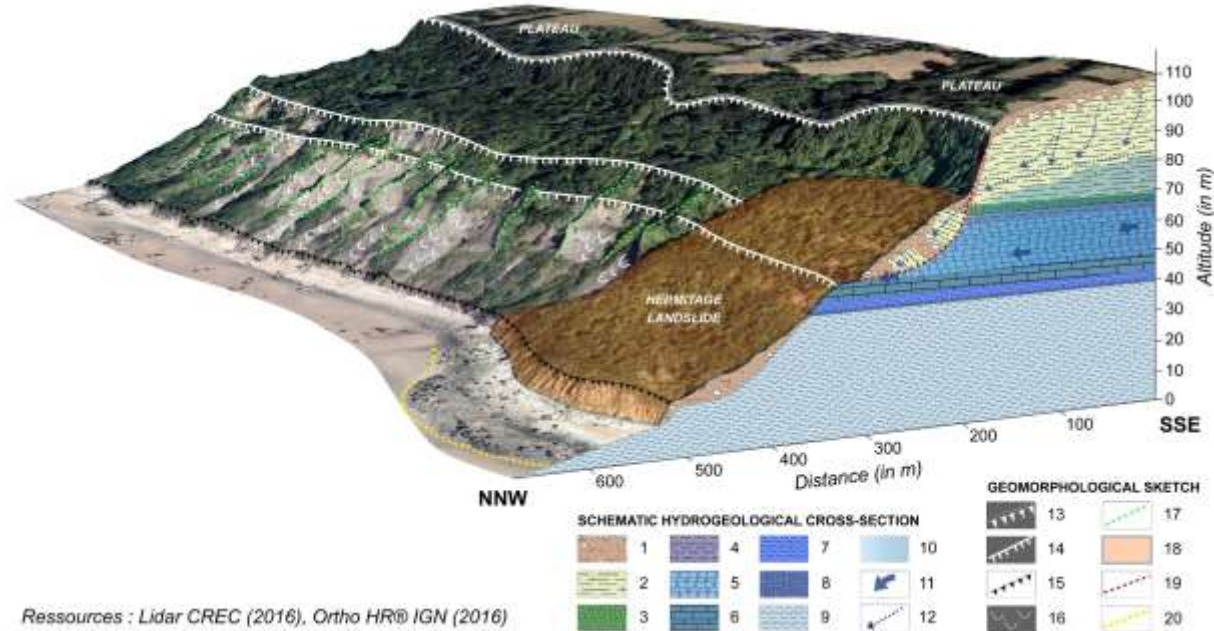


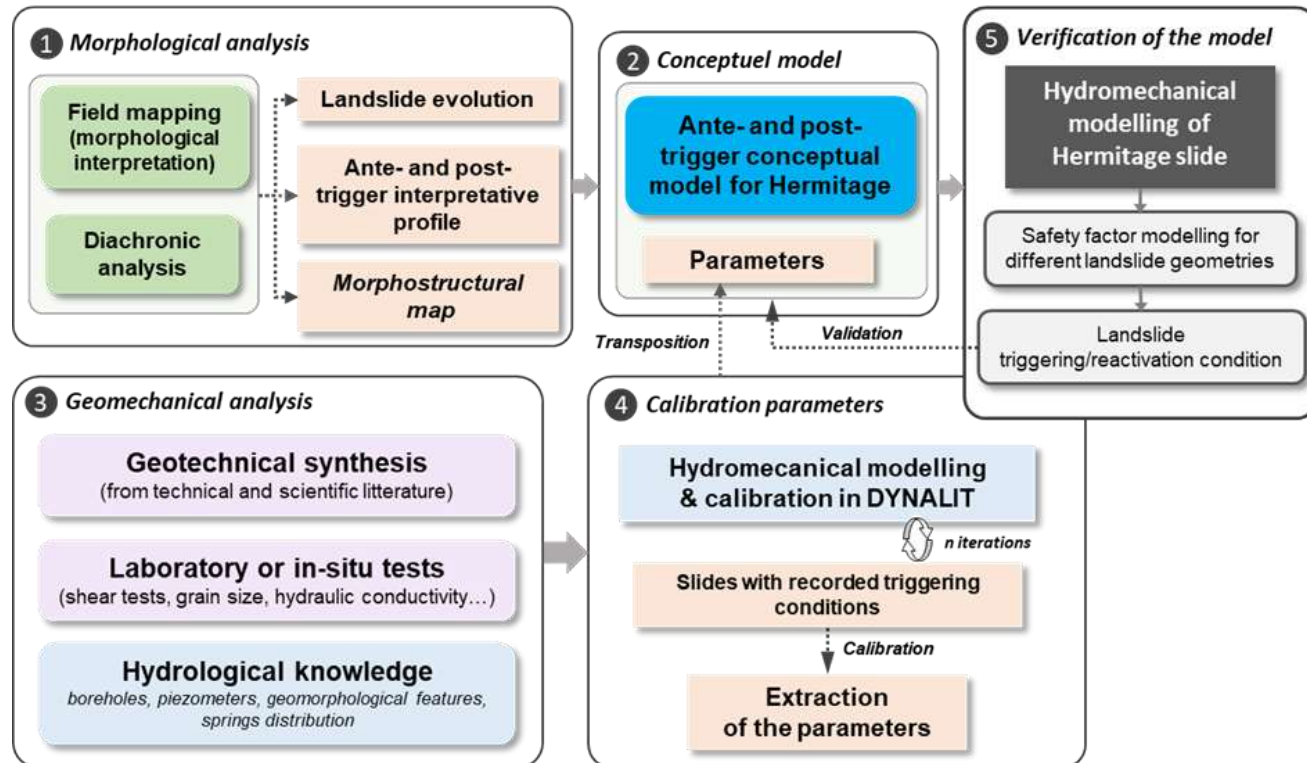
Schéma de fonctionnement géologique et morphologique du glissement de l'Hermitage. 1. Matériau altéré/remanié; 2. Craie Cénomanienne; 3. Sable glauconieux; 4. Alternance marno-calcaire; 5. Calcaire oolithique de Trouville; 6. Calcaire d'Auberville; 7. Argile à Lophagregaria; 8. Oolithe ferrugineuse; 9. Marne de Villers; 10. Nappe libre de la craie cénomanienne; 11. Ecoulement dans le calcaire oolithique; 12. Ecoulement de la nappe libre de la craie cénomanienne; 13. Escarpement principal (plateau d'Auge); 14. Escarpement secondaire; 15. Escarpement basal; 16. Coulée et solifluxion; 17. Crête d'interfluve; 18. Glissement initial; 19. Surface de glissement supposée; 20. Limite maximale supposée d'extension du glissement (in Kouah et al., 2024)

5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

5.2.1 Méthodologie de vérification des conditions de déclenchement

Cinq étapes clés :

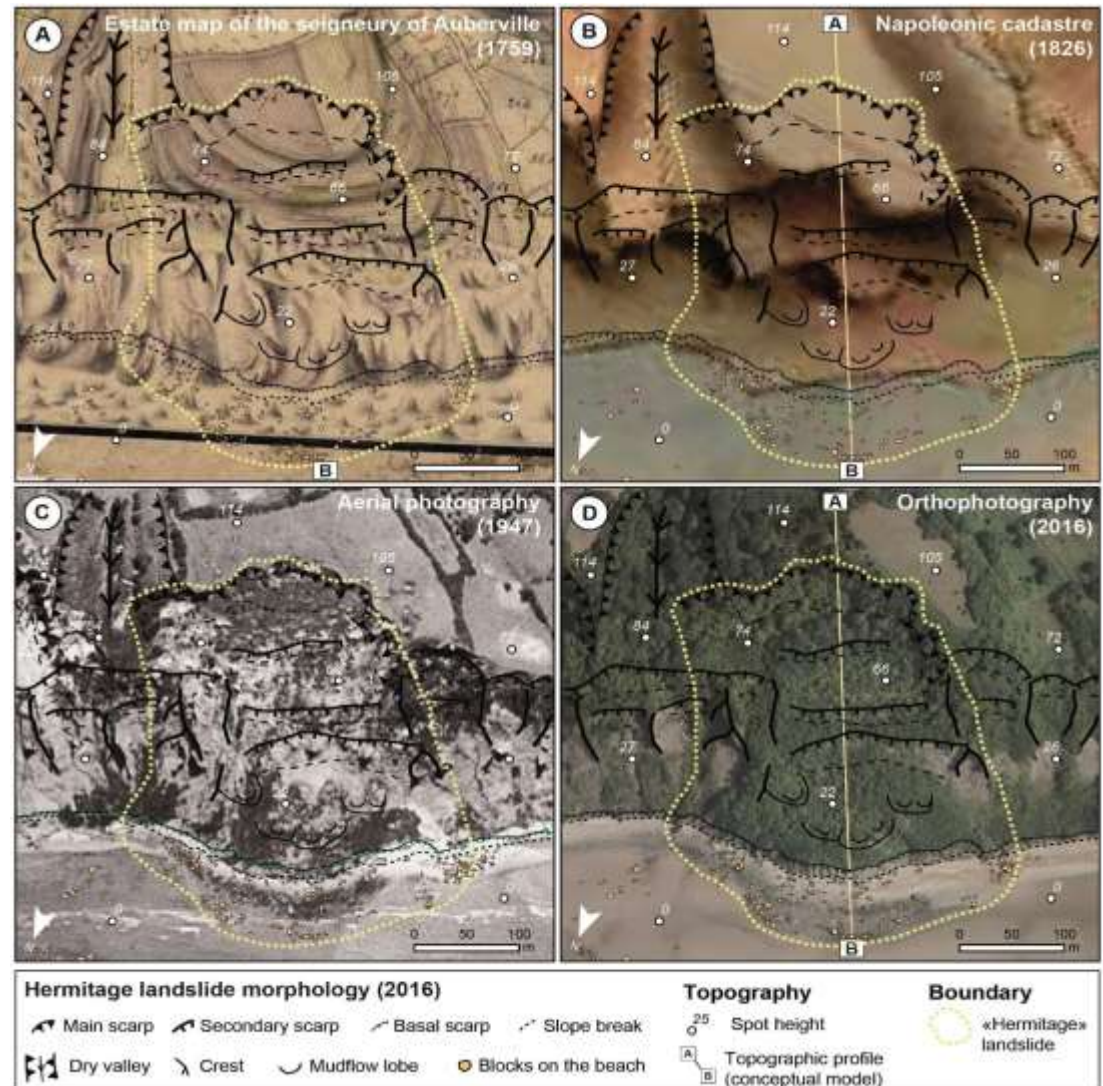
(1) **analyse morphologique** couplée à une **analyse diachronique de documents cartographiques et photographiques** permet d'identifier les principaux changements dans la morphologie du versant suite au déclenchement du glissement. Puis, l'étape (2) permet de proposer un **modèle conceptuel** avec un profil interprétatif du versant avant le glissement, etc (les étapes 3 et 4 ne sont pas détaillées).



Méthodologie de l'étude (in Kouah et al., 2024).

5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

5.2.2 Évolution du versant par une approche diachronique



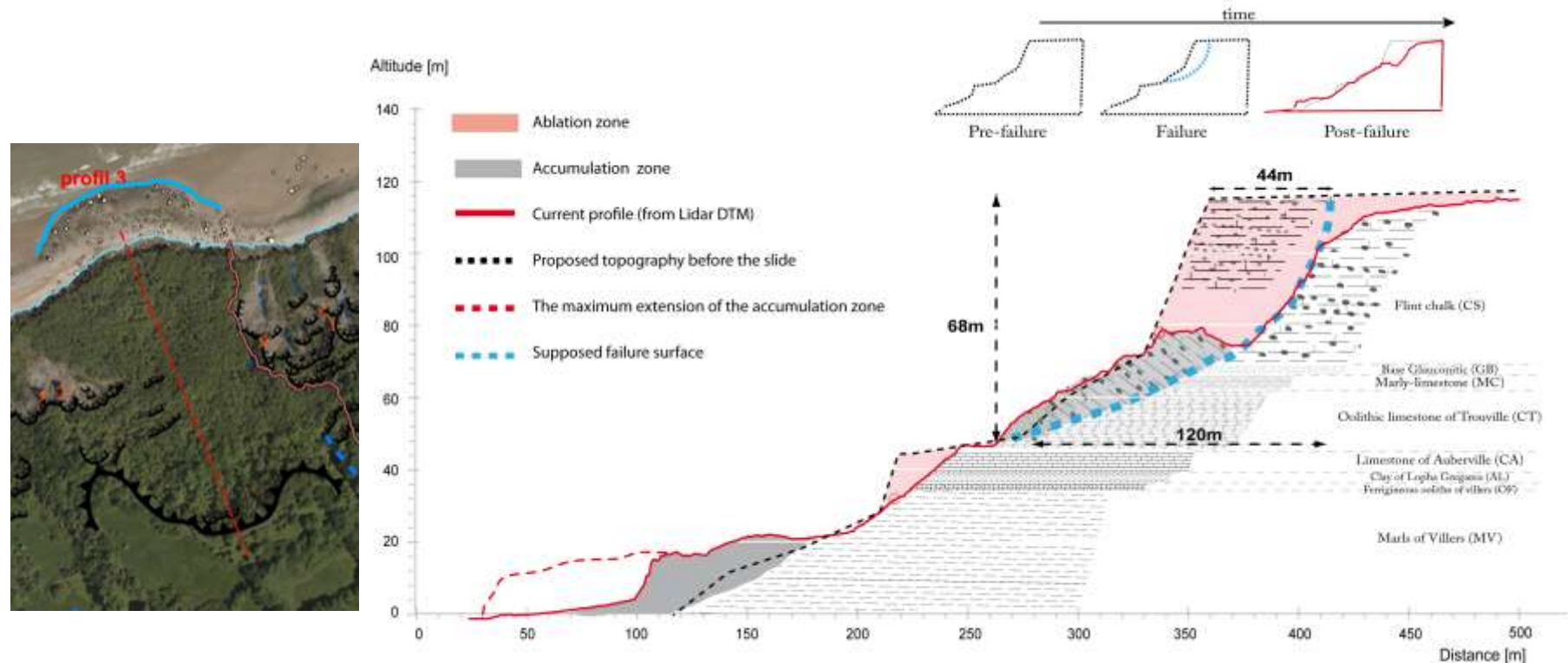
Analyse diachronique de l'évolution du glissement de l'Hermitage entre 1759 et 2016 (in Kouah et al., 2024).

5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

5.2.3 Proposition d'un modèle conceptuel d'évolution

Volume estimé à 400 000 m³ de matériaux libérés lors de ce glissement.

Masse de matériaux s'est étendue sur **une distance d'environ 60 mètres du pied de la falaise**, formant une courbe délimitée par une enveloppe de forme convexe, comme en témoignent la présence de **blocs plurimétriques** sur l'estran.



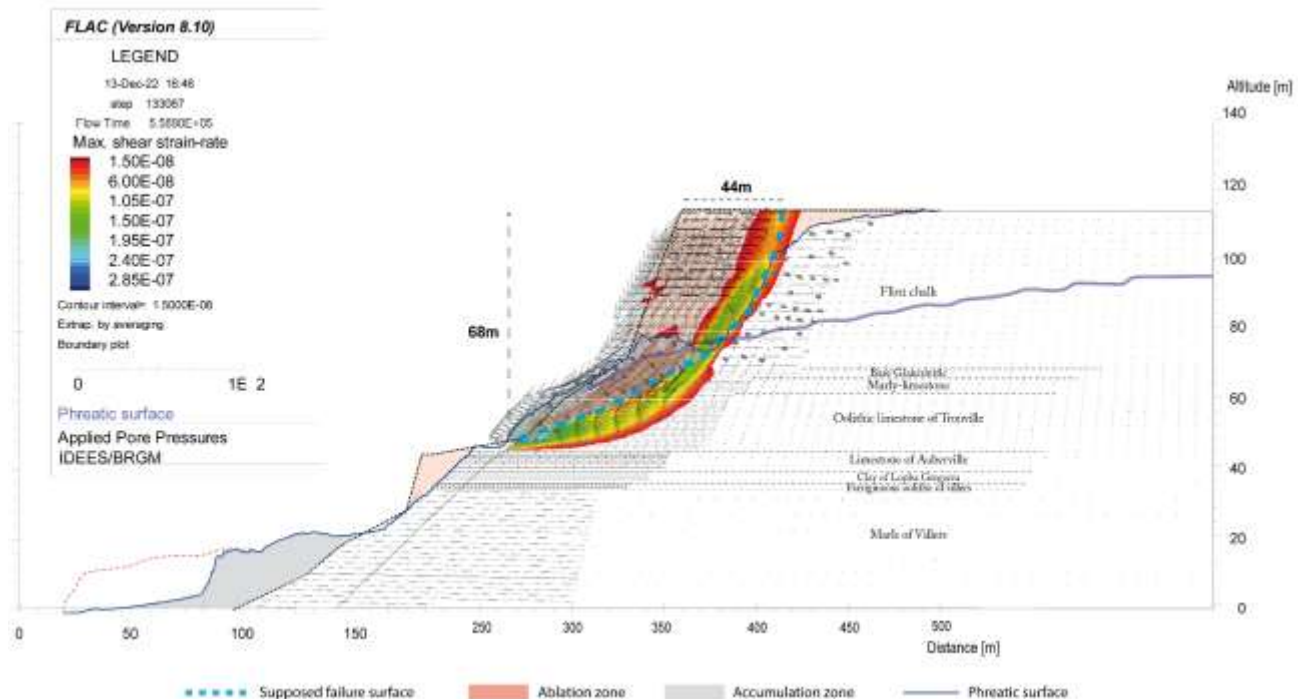
Modèle conceptuel ante et post déclenchement du glissement de l'Hermitage (in Kouah et al., 2024).

5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

5.2.4 Vérification du mécanisme de rupture

Modélisation numérique a été réalisée **sous Flac2d®** dans des conditions maximales critiques estimées du **niveau de la nappe phréatique (-19 m/TN)** pour les paramètres mécaniques préalablement calibrés :

- un état critique instable avec un **coefficient de sécurité égal à 1,03** ;
- Reproduction de manière assez proche le mécanisme de rupture proposé, où les **contraintes de cisaillement maximales** sont circonscrites **dans une bande circulaire** ;
- Enveloppe de cisaillement confirme que la **couche de calcaire d'Auberville** constitue la limite inférieure du glissement de terrain de par sa forte résistance mécanique.



Résultats du modèle FLAC 2D montrant le taux de déformation de cisaillement maximal comparé au mécanisme de rupture proposé dans le modèle conceptuel (in Kouah et al., 2024).

5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

5.2.4 Conditions de déclenchement et d'évolution du glissement de l'Hermitage

Proposition d'hypothèses réalistes mais restant affectées de nombreuses incertitudes :

➤ **Trois périodes d'excès en eau** qui pourraient expliquer un haut rechargement de la nappe et un déclenchement **dans l'une des trois périodes** : 1880-1884, 1910-1920, 1929-1944 ;

- Durant la période 1929-1944 n'apparaît pas réaliste : la photo de 1947 montre que les matériaux accumulés jusqu'à une distance de 60 m du pied (volume de 150 000 à 220 000 m³), ont déjà été évacués en dehors des plus gros blocs ;
- Durant la période 1826 et 1865 est toujours possible, mais moins probable car le glissement apparaît sur la photo aérienne de 1947 avec des secteurs les plus pentus dénudés ou recouverts par une végétation « seulement » arbustive
- Durant l'une des deux périodes 1880-1884 ou 1910-1920, cette hypothèse apparaît très réaliste.

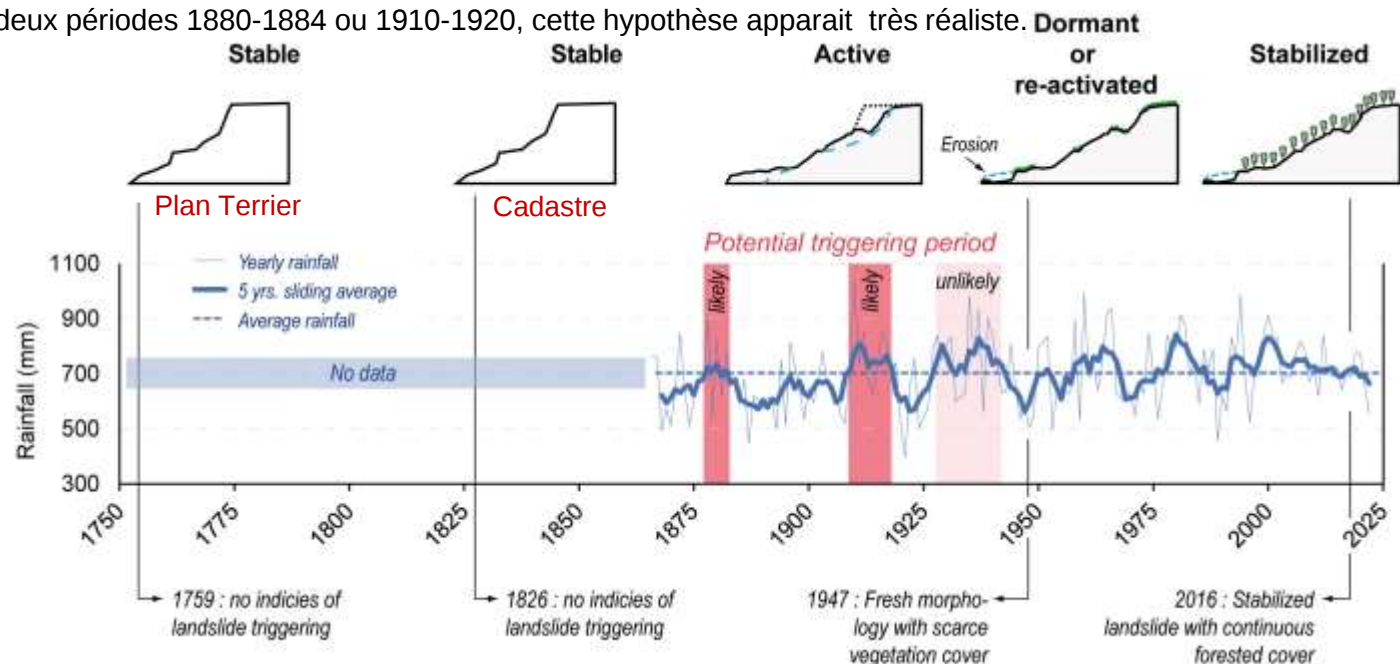


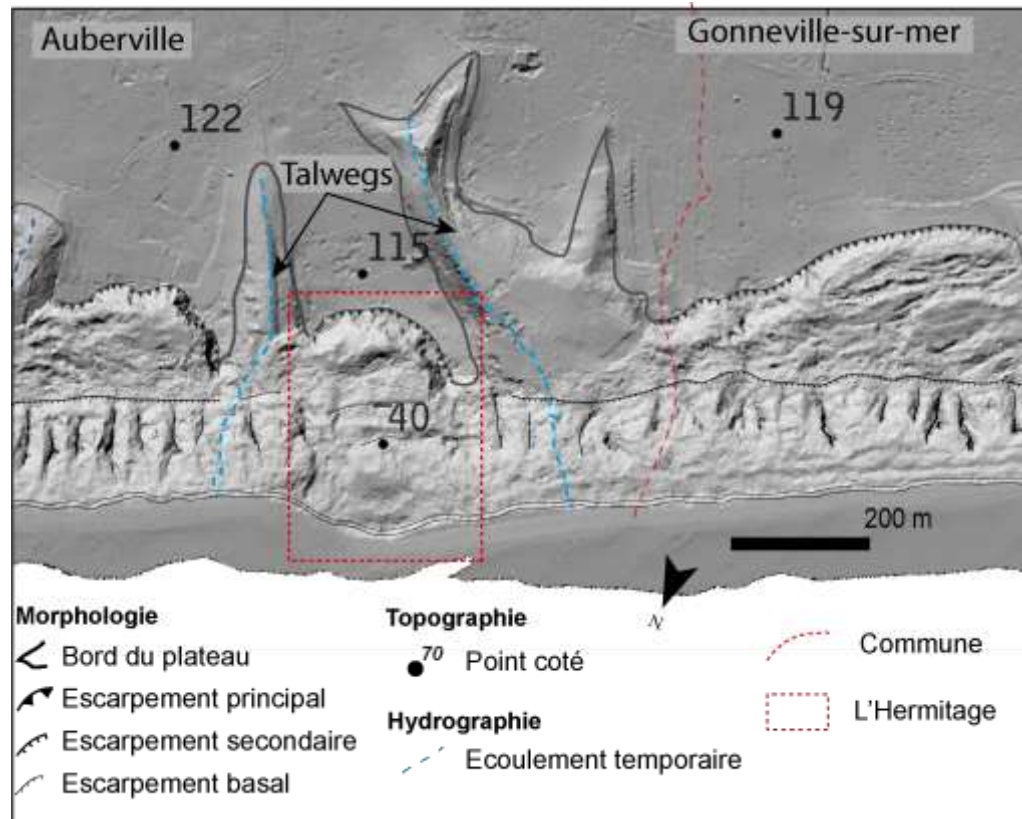
Schéma illustrant l'évolution probable du glissement de terrain entre 1759 et 2016, mettant en évidence les états successifs de l'activité du glissement de terrain et les périodes de déclenchement potentielles en corrélation avec les relevés pluviométriques annuels (in Kouah et al., 2024).

5.2 : Modélisation du déclenchement du grand glissement d'Hermitage

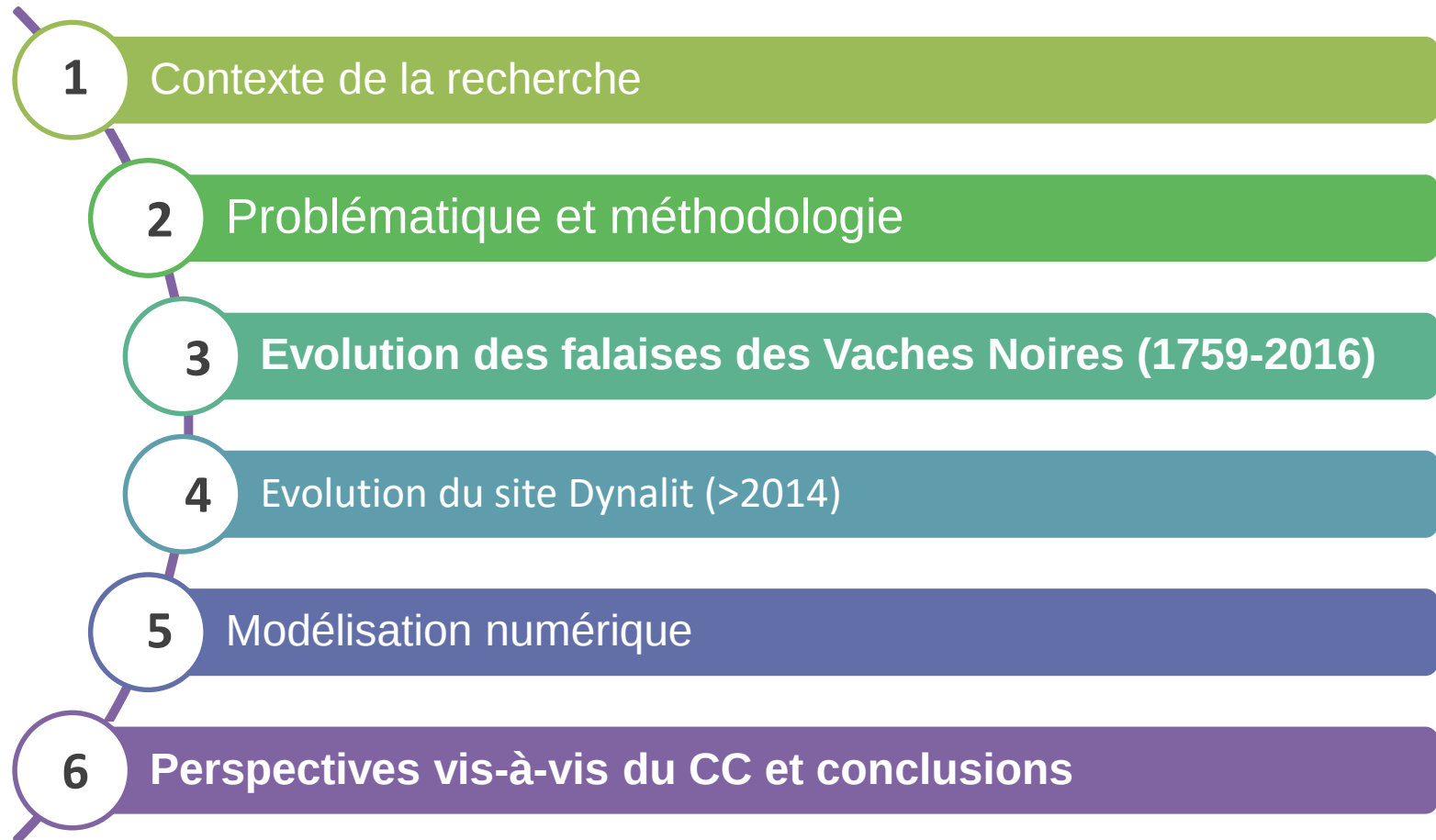
5.2.5 Analyse de la localisation spécifique du glissement de l'Hermitage

Glissement est localisé sur un **interfluve assez étroit** encadré par **deux talwegs assez profonds**.

- Les cours d'eau auraient donc pu s'encaisser, plus facilement, au droit d'une zone fracturée (non reconnue !).
- Ces deux talwegs présentent des pentes assez fortes pouvant entraîner un **phénomène de décompression** et **d'ouverture de fractures préexistantes** et **réduire les caractéristiques intrinsèques** du substratum.



Zoom sur la topographie du secteur de l'Hermitage avec localisation du glissement entre deux talwegs profonds. (in Kouah, 2024).

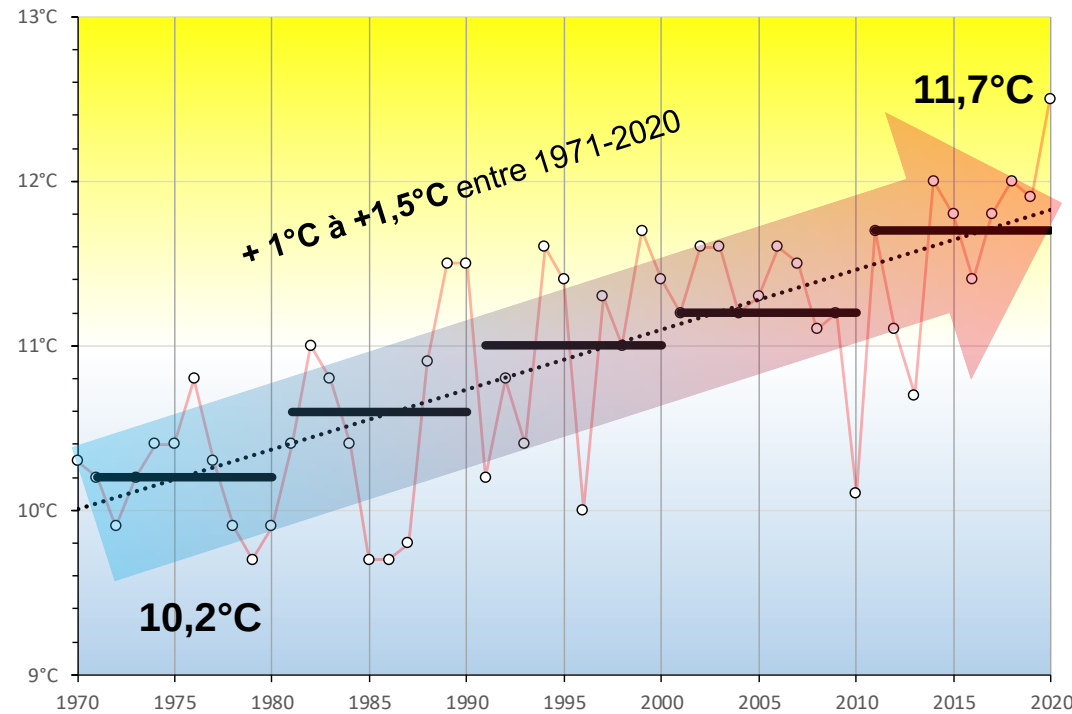


6.1. Les conséquences du changement climatique (CC) en Normandie à l'horizon 2100

- **GIEC Normand** : <https://www.normandie.fr/giec-normand>
- **Profil environnemental de la Dreal Normandie** : <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/le-changement-climatique-en-normandie-prospective-a4975.html>

Le changement climatique contemporain en Normandie : un réchauffement marqué depuis 50 ans

Chronique des températures moyennes en Normandie depuis 1970



Une forte variabilité interannuelle
doublée d'une tendance nette au réchauffement...

Moyenne de 8 stations

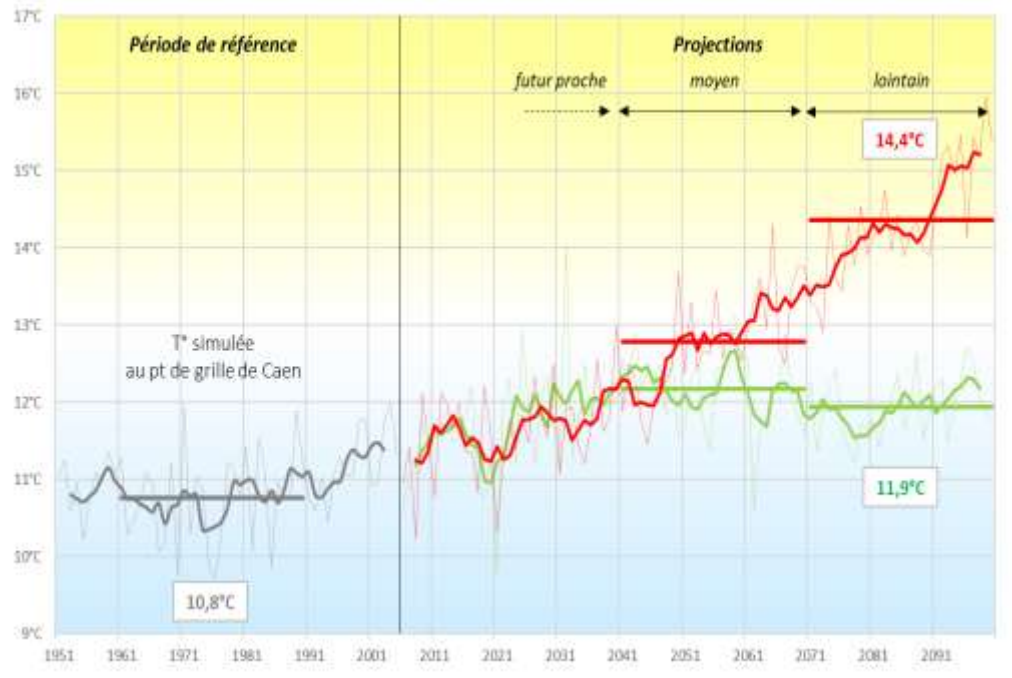


Données Météo-France, traitements et réalisation O. Cantat, 2021

6.1. Les conséquences du changement climatique (CC) en Normandie à l'horizon 2100

Elévation de la température moyenne de l'air :

- Environ **+1,1°C** dans le cas du **scénario optimiste** (RCP 2.6) à **+3,6°C** avec le **scénario pessimiste** (RCP 8.5) sur les moyennes trentennales
- **Nota :** le scénario optimiste RCP 2.6 a été abandonné à l'automne 2025 car officiellement plus atteignable...
- Augmentation importante de la fréquence des jours de chaleur (>25°C), de forte chaleur (>30°C) et de très forte chaleur (>35°C)
- Augmentation importante de la fréquence des « nuits tropicales » (> 20°C la nuit)
- Les grands froids (minimum inférieur à -5°C) deviendraient très rares



Évolution de la température moyenne annuelle de l'air en Normandie entre 1970 et 2100.
Sources : données ALADIN-CLIMAT, DRIAS 2020 ; réalisation Cantat, 2023

+ 3,6°C
**Sans politique
climatique
(RCP 8.5)**

+ 1,1°C
**Avec politique
climatique
immédiate
(RCP 2.6)**

RCP 8.5 « pessimiste »
Scénario le plus probable car il
correspond à la prolongation des
émissions actuelles



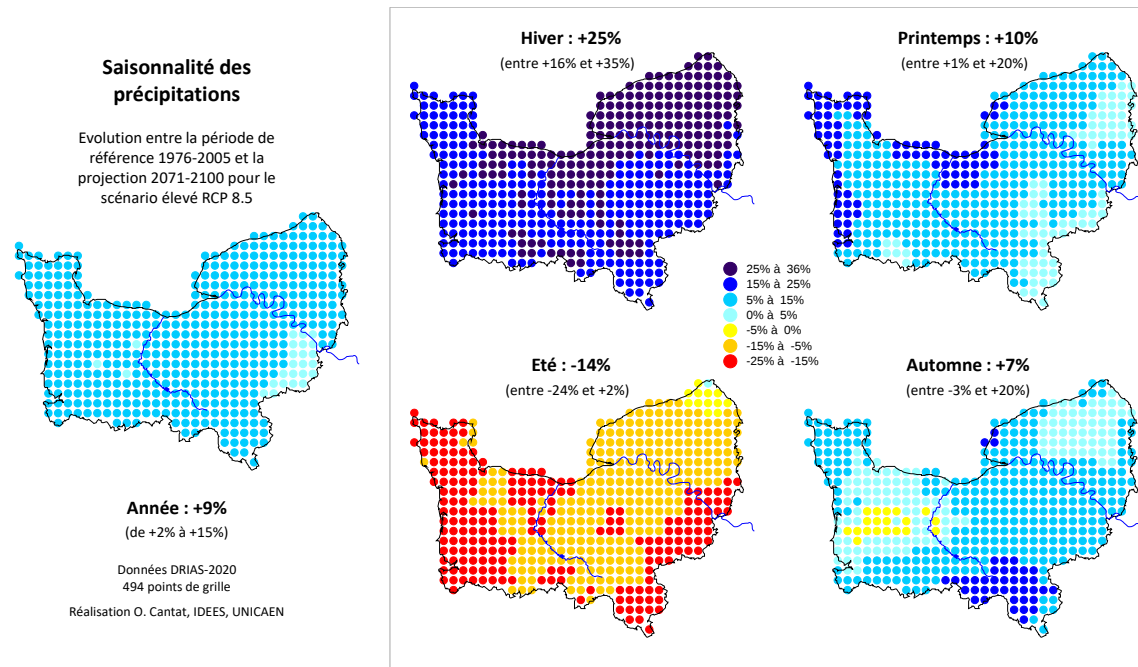
multiples et fortes conséquences :

- littoral (submersions, recul du trait de côte)
- ressource en eau (déficits/excédents saisonniers, progression du biseau salé dans les nappes)
- biodiversité (espèces qui ne toléreraient pas le nouveau climat et apparition de nouvelles)
- agriculture (perturbation des cycles)
- santé (très fortes chaleurs et « nuits tropicales » plus fréquentes, renforcement par l'ICU...)
- système économique (volatilité des prix, coût de l'adaptation, assurances, ...)

6.1. Les conséquences du changement climatique (CC) en Normandie à l'horizon 2100

Evolution des précipitations en tenant compte des fortes incertitudes :

- **Augmentation des cumuls annuels** dans le cas du scénario pessimiste (+9 %) et vers **une certaine stabilité** dans le cas du scénario optimiste ;
- **Opposition très nette** apparaîtrait entre **un hiver avec beaucoup de pluie** (+25 %), particulièrement dans le nord-est, et **un été nettement plus sec** (-14 %), entre des franges méridionales et occidentales (inf. à -30% localement) ;
- Pour **l'automne et le printemps**, le **signal est moins net** avec une augmentation de +7 % et +10 %, avec une accentuation des cumuls sur les littoraux au printemps ;
- Le **nombre de jours de très fortes précipitations** (cumul dépassant 20 mm par jour) augmenterait de +2,9 jours (RCP 8.5) ou de +0,9 jour (RCP 2.6). Dans les deux cas, des différences régionales seraient conservées.

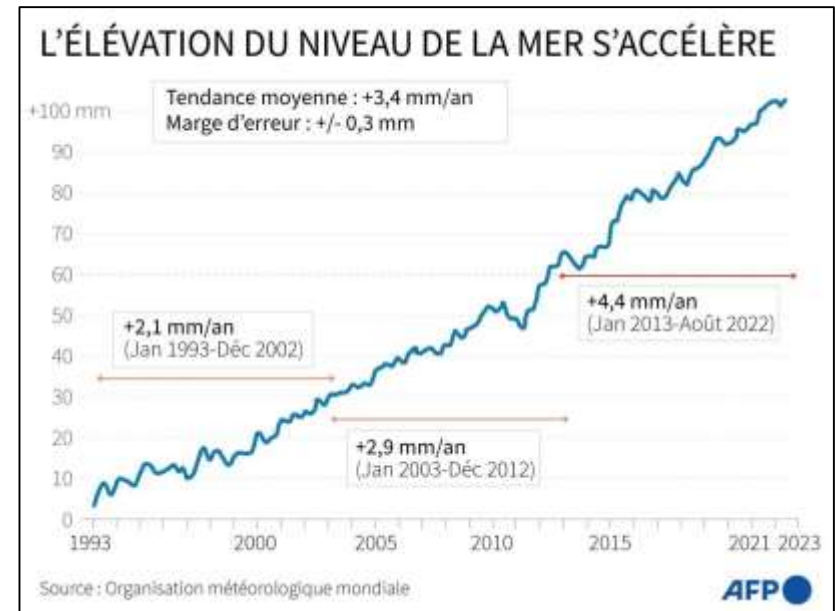
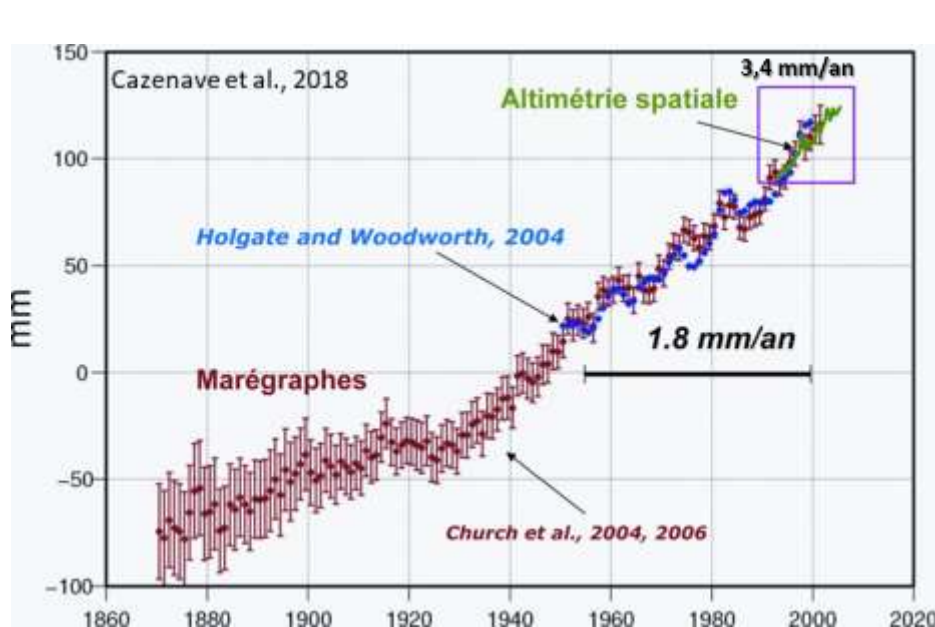


Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 (en %) de la pluviométrie en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). (d'après O. Cantat, Giec Normand)

6.1. Les conséquences du changement climatique (CC) en Normandie à l'horizon 2100

Elévation du niveau marin :

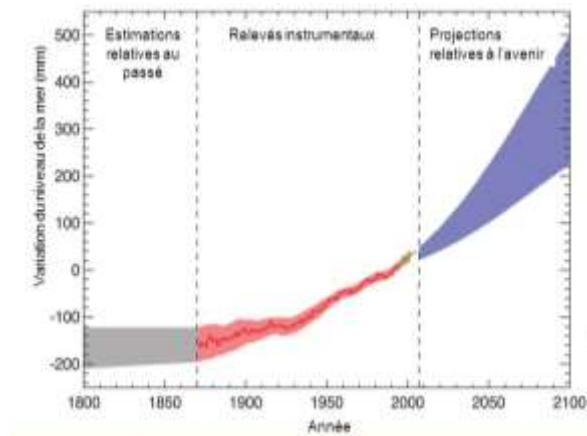
- **Observations** : Depuis 100 ans **+ 20 cm** en France et en Normandie. Avec **une accélération** au XXe siècle et à l'échelle mondiale : **1,8 mm/an** (1900-2009), **3,4 mm/an** (1993-2018) et **4,5 mm/an** (2011-2024) !! (pour la Manche ~ **3 mm/an**)



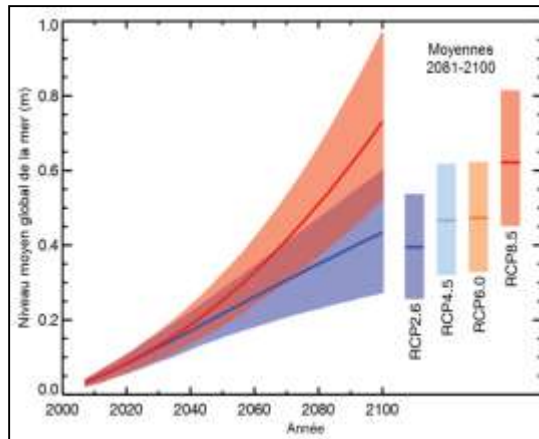
6.1. Les conséquences du changement climatique (CC) en Normandie à l'horizon 2100

Élévation du niveau marin :

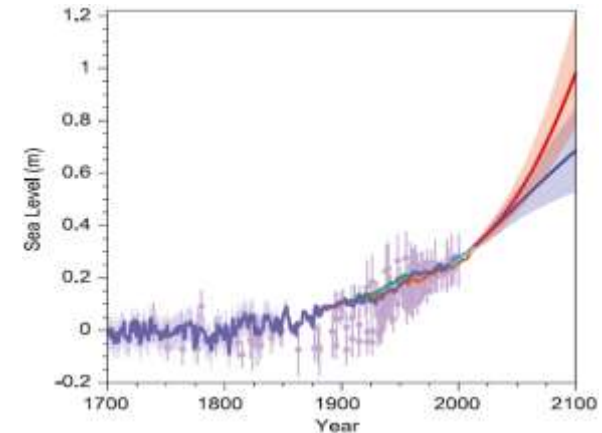
- **Observations** : Depuis 100 ans + 20 cm en France et en Normandie. Avec une **accélération** au XXe siècle et à l'échelle mondiale : 1,8 mm/an (1900-2009), 3,4 mm/an (1993-2018) et 4,5 mm/an (2011-2024) !! (pour la Manche ~ 3 mm/an)
- **Projections** : **selon notre capacité à réduire les émissions de GES**, une élévation du niveau de la mer de :
 - + 0,52 m si réchauffement de + 1,5 °C
 - + 0,86 m si réchauffement de + 2 °C
 - + 1,80 m avec un réchauffement sans restriction (+ 3° ou 4 °C = PNACC 2025)



GIEC 2007 : + 40 cm (2100)



GIEC 2013 : + 60 cm (2100)



GIEC 2021 : + 98 cm (2100)

Scénarios climatiques successifs d'élévation du niveau marin en lien avec une élévation du niveau marin entre 2007 et 2021 (IPCC).

Ces dernières années : Températures tendent à s'aligner sur le scénario pessimiste du GIEC 2021 !!!

Les tempêtes

Aucune conclusion évidente ne peut être dressée concernant les tempêtes. Selon le modèle Aladin, il semblerait qu'à l'horizon 2100, **la fréquence des tempêtes diminue très légèrement sur le littoral normand** après avoir **légèrement augmenté** vers 2040-2070 (source : Giec Normand).

6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

- Glissements peu profonds (escarpements) ou profonds (comme l'Hermitage)



Evolution entre le 22 décembre 2017 et le 19 janvier 2018 d'un glissement de terrain rotationnel affectant l'escarpement secondaire des falaises des Vaches Noires à Auberville.

6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

➤ Glissements peu profonds (escarpements) ou profonds (comme l'Hermitage)



Fermeture de l'aire d'envol de parapente en 2018



Arrêté municipal du 6 février 2018



Vue Est

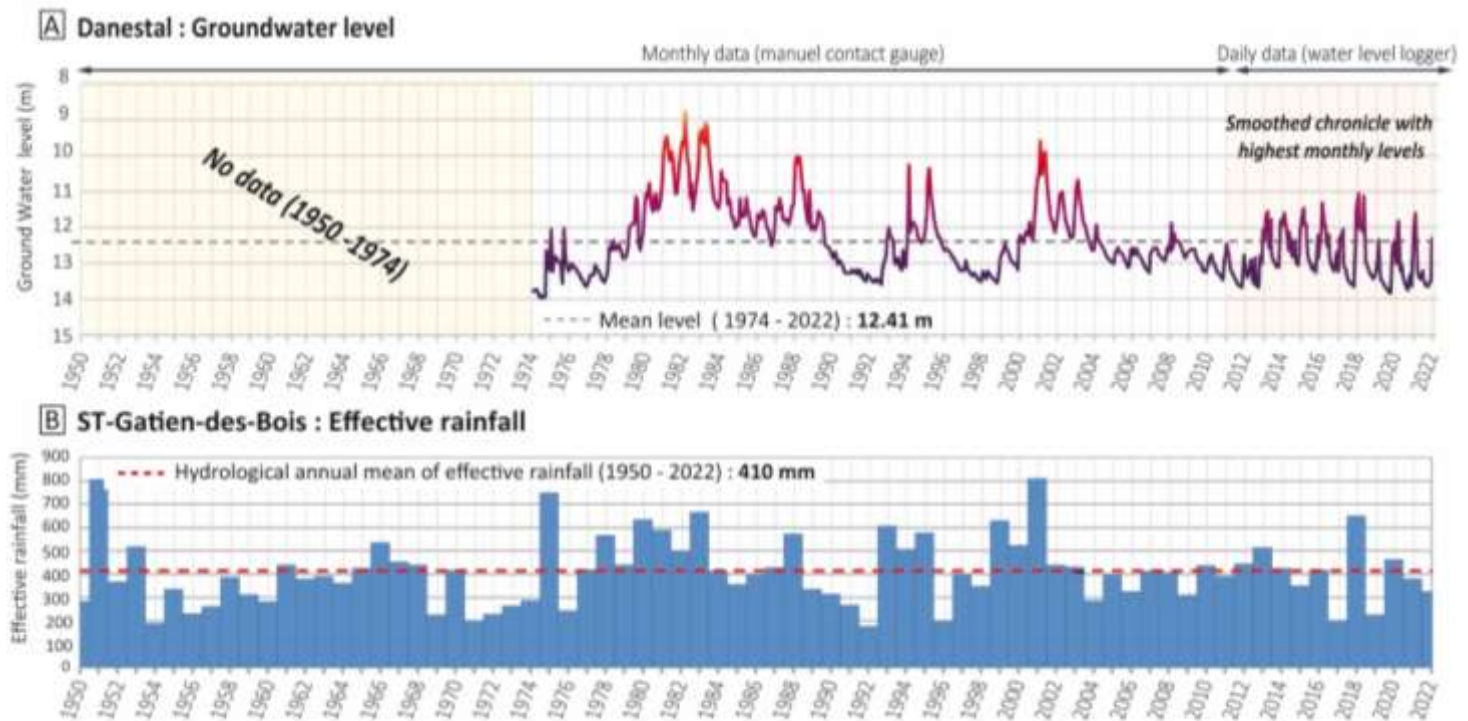


Vue Ouest

Evolution entre janvier et juillet 2018 d'un glissement de terrain rotationnel affectant l'escarpement secondaire des falaises des Vaches Noires à Auberville avec fermeture de l'aire d'envol de parapente,

6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

- Glissements peu profonds (escarpements) ou profonds (comme l'Hermitage)
 - **Commande hydrologique** des phénomènes (pluviométrie → niveaux de nappe)

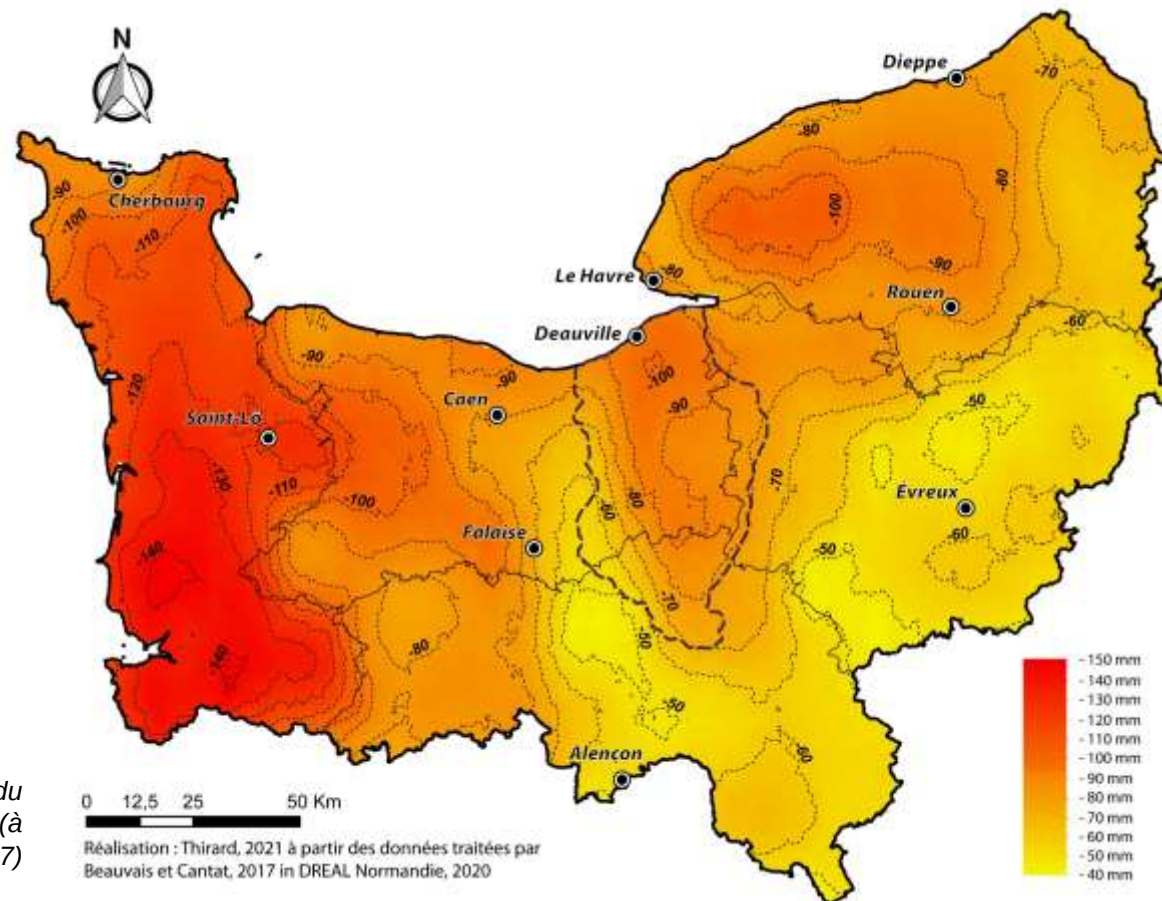


Comparaison entre des chroniques de données piézométriques et pluviométriques entre 1950 et 2022 de la nappe de Danestal ; A) variations piézométriques du toit de la nappe par rapport au TN de la craie cénomaniennne enregistrées à Danestal entre 1974 et 2022 ; B) Chronique des précipitations efficaces annuelles de la station de Saint-Gatien-des-Bois de 1950 à 2022 (updated from Lissak, 2012 and Costa et al., 2019) (in Kouah et al., 2024)

6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

➤ Glissements peu profonds (escarpements) ou profonds (comme l'Hermitage)

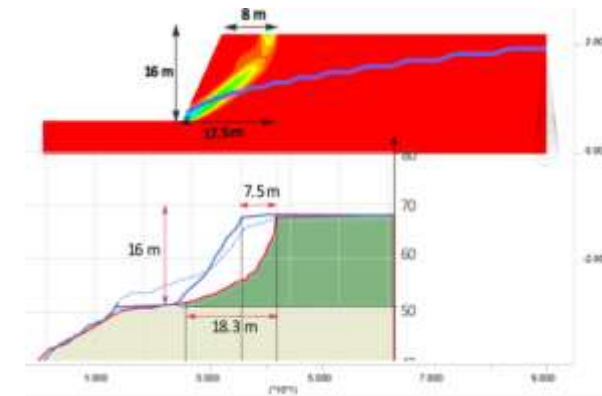
- **Commande hydrologique** des phénomènes (pluviométrie → niveaux de nappe)
- **Baisse des précipitations efficaces** attendue pour 2100



6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

➤ Glissements peu profonds (escarpements) ou profonds (comme l'Hermitage)

- **Commande hydrologique** des phénomènes (pluviométrie → niveaux de nappe)
- **Baisse des précipitations efficaces** attendue pour 2100
- **Rabattement jusqu'à 8 m** de la nappe de la craie (Stollsteiner, 2012)

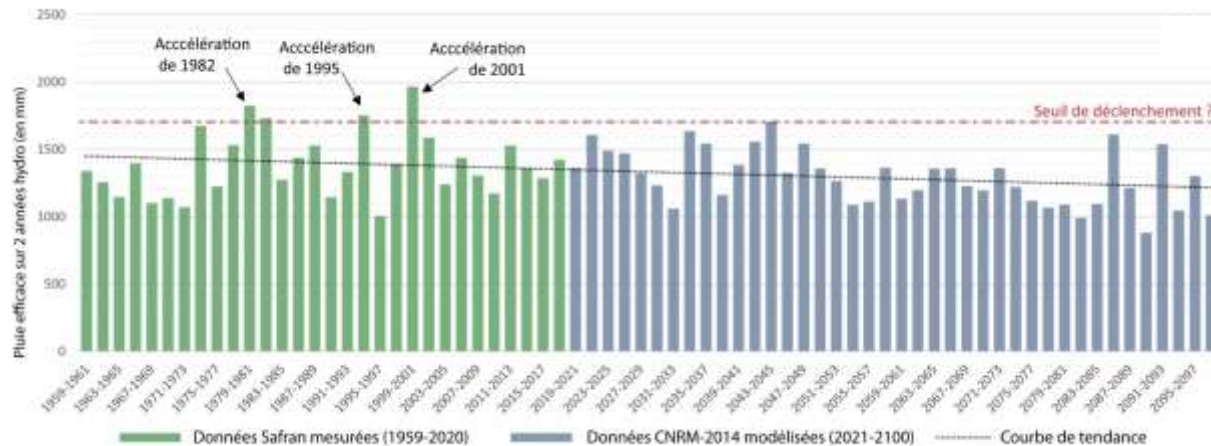


Reproduction du mécanisme de déclenchement du glissement de terrain observé par la modélisation hydromécanique dans FLAC2D

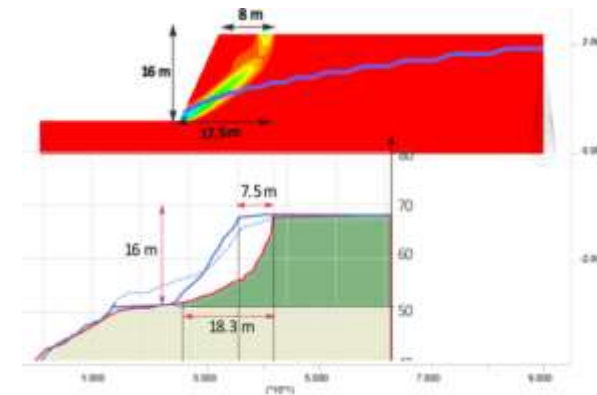
6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

➤ Glissements peu profonds (escarpements) ou profonds (comme l'Hermitage)

- **Commande hydrologique** des phénomènes (pluviométrie → niveaux de nappe)
- **Baisse des précipitations efficaces** attendue pour 2100
- **Rabattement jusqu'à 8 m** de la nappe de la craie (Stollsteiner, 2012)
- Tendance du **cumul interannuel à la baisse**



Cumul de précipitations sur une période de deux années hydrologiques consécutives et liens avec les grandes accélérations connues dans le Pays d'Auge (Sources : données Safran et CNRM-2014)



Reproduction du mécanisme de déclenchement du glissement de terrain observé par la modélisation hydromécanique dans FLAC2D



Baisse de la susceptibilité au déclenchement de glissements

6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

➤ Coulées boueuses

- **Coulées moins « nourries »** à l'amont par les matériaux issus de glissements peu fréquents
- **Commande pluviométrique** (imbibition, saturation progressive, pressions interstitielles, ...)
- **Selon scénario retenu, hiver avec beaucoup de pluie (+25 %)** favorable à la fluidisation des matériaux et à la propagation coulées en fin d'hiver et début de printemps
- **Les forts abats d'eau** n'auront que peu de conséquence car ruissellement de surface avec peu ou pas d'infiltration dans les sols



Activité maintenue et/ou renforcée ? Mais encore beaucoup d'incertitudes

6.2. Evolution des falaises des Vaches Noires en considérant le changement climatique

➤ Escarpement basal (pied de falaise)

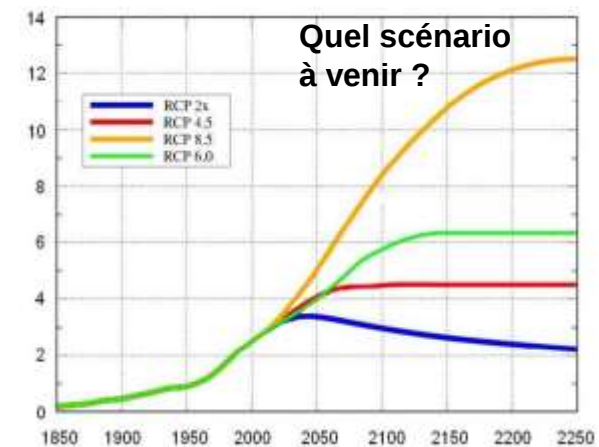
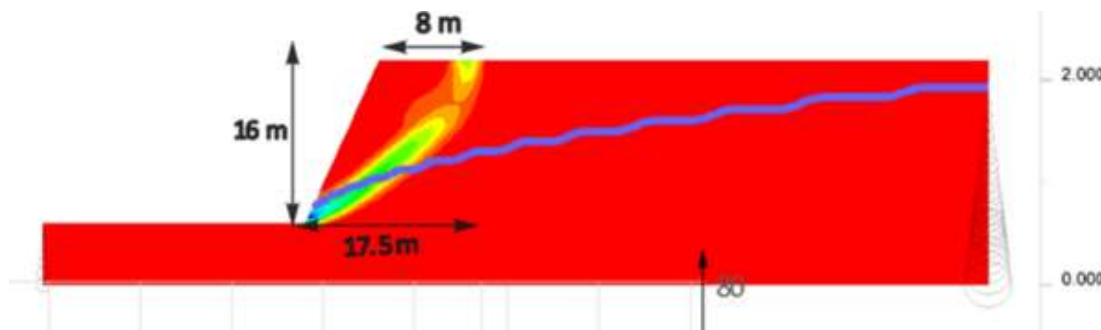
- **Elévation future du niveau marin** se traduira par **une érosion accrue**
- **Recul** du pied de falaise **sera proportionnel** à la **résistance des matériaux** (variable selon les secteurs pour les falaises des Vaches Noires)
- Pour les falaises crayeuses de Seine-Maritime, un doublement des vitesses actuelles de recul est envisagé (Costa, 2002)
- En conséquence, **un raidissement du profil transversal** pourrait, à moyen et long terme, entraîner **un déséquilibre** et une **recrudescence des processus hydrogravitaires**



**Recul certain du trait de côte avec conséquences sur
l'équilibre précaire des falaises mais fortes incertitudes**

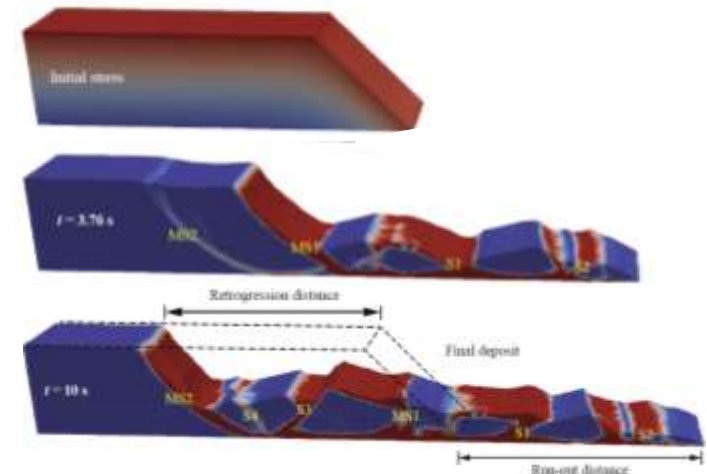
6.3. Conclusions

- Confirmation de certains mécanismes :
 - ✓ Comportement variable dans le temps et l'espace avec relais de processus de l'amont à l'aval des falaises (profil transversal) ;
 - ✓ **Des secteurs actifs vs des secteurs « stables »** recouverts par une végétation arborée.
- Verrous et points forts :
 - ✓ **Complexité / asynchronisme** des processus
 - ✓ **Importance des forçages** et donc de l'**impact du changement climatique**
 - ✓ **Complémentarité** des approches (*i.e.* pluridisciplinarité) et des logiciels utilisés
 - ✓ **Site labélisé Dynalit** permet de poursuivre les observations pour nourrir les réflexions et les modèles



6.3. Conclusions

- Confirmation de certains mécanismes :
 - ✓ Comportement variable dans le temps et l'espace avec relais de processus de l'amont à l'aval des falaises (profil transversal) ;
 - ✓ **Des secteurs actifs vs des secteurs « stables »** recouverts par une végétation arborée.
- Verrous et points forts :
 - ✓ **Complexité / asynchronisme** des processus
 - ✓ **Importance des forçages** et donc de **l'impact du changement climatique**
 - ✓ **Complémentarité** des approches (*i.e.* pluridisciplinarité) et des logiciels utilisés
 - ✓ **Site labélisé Dynalit** permet de poursuivre les observations pour nourrir les réflexions et les modèles
- Bien considérer les **limites des modèles utilisés** :
 - **Simplification de la réalité** : paramétrage, limites de la 2D...
 - Mauvaise gestion des **grandes déformations** sous FLAC2D®
 - Pas de réel **couplage hydromécanique** (données insuffisantes)
 - **Modèles de climat** ne permettent pas d'analyses sur les temps courts

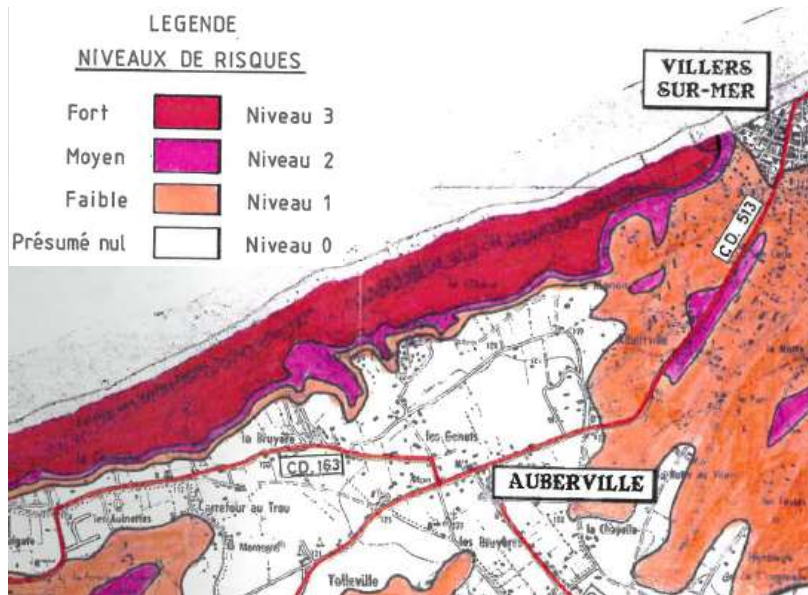


Exemple de modèle rétrogressif réalisé avec la méthode SPFEM (Zhang et al., 2021)

6.4. Enjeux et perspectives opérationnelles



- Résultats utiles à la **gestion des sites** et de l'**appropriation du risque** (ex. : ANR Ricochet)
 - ✓ Amélioration de la **connaissance** et des **rythmes d'évolution** ➡ **Seuils d'alerte**
 - ✓ Aide à la décision pour les collectivités ➡ **Urbanisme/aménagement (SCoT/PLU)**
 - ✓ Aide à la décision pour les services de l'État ➡ **Évaluation de l'aléa (PPR)**



Réunion d'échange entre scientifiques, élus, services techniques et services de l'État dans le cadre du programme ANR Ricochet.
Comité local, Le Tréport, 28 juin 2017 (photo : P. Letortu)

Extrait du plan de prévention des risques de mouvement de terrain des falaises des Vaches Noires a été approuvé le 28 juin 1993 puis le 13 février 1997 pour la commune de Gonneville sur Mer. Quatre communes : Auberville ; Gonneville sur Mer ; Houlgate et Villers sur Mer.

6.4. Enjeux et perspectives opérationnelles



- Résultats utiles à la **gestion des sites** et de l'**appropriation du risque** (ex. : ANR Ricochet)
 - ✓ Amélioration de la **connaissance** et des **rythmes d'évolution** ➡ **Seuils d'alerte**
 - ✓ Aide à la décision pour les collectivités ➡ Urbanisme/aménagement (SCoT/PLU)
 - ✓ Aide à la décision pour les services de l'État ➡ Évaluation de l'aléa (PPR)
- Quels **aménagements ou adaptations** face au changement climatique ?
 - Coûts pour la collectivité vs enjeux à protéger (analyse coûts/bénéfices)
➡ Quid sur le long terme ?



Digue au pied de la falaise sur la commune d'Auberville (extrait Google Earth)

- ❑ **Une recherche menée grâce aux soutiens et programmes scientifiques permettant des collaborations multidisciplinaires avec de nombreux laboratoires français et étrangers**

Soutiens :

La mairie d'Auberville et de Villers-sur-Mer (personnels du service technique, ...)

Conservatoire du littoral et le Département du Calvados, Direction de l'environnement et des milieux naturels, Service Milieux Naturels, Garde gestionnaire (François Marchalot)

Programmes régionaux :

RIN Normandie Terre et Mer projet « Raivcôte : Risque et Aléa inondation de villes côtières : Approche quantitative et diffusion par la réalité virtuelle » (2018-2019) (Coord. S. Costa, UMR LETG-Caen)

RIN Normandie Terre et Mer projet « TéléDETaC: Télédétection par DronE du TrAit de Côte (2018-2019) (Coord. C. Fauchard, CEREMA-Normandie, Rouen)

RIN SELINE « Les Sédiments des Littoraux de Normandie. Étude des différentes sources d'apports sédimentaires qui participent au fonctionnement et à l'évolution des littoraux en Normandie » (2018-2021) (Coord. S. Lesourd, M2C-Caen)

RIN Dephy3Géo : Détection et Etude de la fracturation par approche Hydrologique, GEOMorphodynamique, GEOlogique et GEOphysique (2022-2024). Ce projet est co-financé par la Région Normandie et l'Union Européenne dans le cadre du programme opérationnel FEDER/FSE 2021-2027, (Coord. C. Fauchard & R. Antoine, CEREMA-Normandie, Rouen)

Contrats de plan Etat/Région :

CPER Projet GR²TC 'gestion des ressources, risques et technologies du domaine côtier' (2007-2013) (Coord. F. levoy, UMR M2C-Caen)

CPER Projet Manche 2021 (2014-2020) (Coord. P. Sourdain, UMR Borea-Caen)

CPER Normand'Sea (2021-2027) (Coord. O. Maquaire, puis S. Costa > 2024, UMR IDEES-Caen)

Programmes nationaux :

ANR RICOCHET : Évaluation multirisques de territoires côtiers en contexte de changement global (2017-2020) (Coord. O. Maquaire & S. Costa)



Publications :**Thèses de doctorat :**

Roulland, T., 2022. Modalités et rythmes d'évolution des falaises des Vaches Noires (Normandie, France) : caractérisation et quantification des dynamiques hydrogravitaires par approches multi-scalaires. Thèse de l'Université de Caen Normandie, 358 p.

Kouah, M. A., 2024. Modélisation numérique des glissements de terrain : de l'initiation à la transition solide-fluide des géomatériaux. : application aux falaises des Vaches Noires (Normandie, France). Géographie. Normandie Université, 267 p.

Sandberg, B., 2025. Contribution à l'étude des relations entre cortèges de végétation et processus hydrogravitaires : applications aux falaises des Vaches Noires (Normandie, France), Université de Caen-Normandie, 490 p.

Articles dans revues à comité de lecture et résumés lors de congrès nationaux et internationaux

Costa, S., Maquaire, O., Letortu, P., Thirard, G., Compain, V., Roulland, T., Medjkane, M., Davidson, R., Graff, K., Lissak, C., Delacourt, C., Duguet, T., Fauchard, C. et Antoine, R. (2019). Sedimentary coastal cliffs of Normandy : Modalities and quantification of retreat. Journal of Coastal Research, 88(sp1), 46p. <https://doi.org/10.2112/SI88-005.1>

Fauchard, C., Guilbert, V., Antoine, R., Ledun, C., Beaucamp, B., Maquaire, O., Costa, S., Medjkane, M. et Roulland, T. (2023). Diachronic UAV study of coastal badlands supported by geophysical imaging in the context of accelerated erosion processes. Landslides, 20(5), 1065-1082. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02006-2>

Kouah M., Thiery Y., Maquaire O., Nicot F., Wautier A., Roulland T., Thirard G., Fressard M., Costat S., Davidson R. (2024). Reconstruction and verification of mechanism and triggering conditions of the Hermitage landslide at the Vaches Noires cliffs (Normandy). Geomorphology, 465, art. no. 109399

Kouah, M., Thiery, Y., Nicot, F., Wautier, A. et Maquaire, O. (2022b). Reconstruction et vérification des conditions de déclenchement du glissement de l'Hermitage aux falaises des Vaches Noires (Normandie). Journées « Aléas Gravitaires ». https://jag2022.sciencesconf.org/data/pages/Resumes_1.pdf

Kouah, M., Tran, H., Nicot, F., Wautier, A. Thiery, Y., et Maquaire, O. (2024). Development of a elasto-viscoplastic model to simulate the solid-fluid transition: application to mudflows on the Vaches Noires cliffs, Normandy, France. XIVth International Symposium on Landslides, 8 th-12th July 2024, Chambéry, France. Communication et résumé de 4 pages.

Lambert, Z., Antoine, R., Mauget, C., Guilbert, V., Beaucamp, B., Aubi, L., Davidson, R., Costa, S., Maquaire, O. & Fauchard, C. (2025). A new automatic approach based on visible-thermal infrared data fusion to detect geological fracturation: the case of the Vaches Noires badland, Normandy, France. Landslides, Technical note. Doi: 10.1007/s10346-025-02637-1

Medjkane, M., Maquaire, O., Costa, S., Roulland, T., Letortu, P., Fauchard, C., Antoine, R. et Davidson, R. (2018). High-resolution monitoring of complex coastal morphology changes : cross-efficiency of SfM and TLS-based survey (Vaches-Noires cliffs, Normandy, France). Landslides, 15(6), 1097-1108. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0942-4>

Rieux A., Copard Y., Maquaire O., Roulland T., (2025). Sediment and organic carbon discharges to the coastal oceans by badlands (English Channel, Normandy, France). Earth Surface Processes and Landforms, 50 (5), <https://doi.org/10.1002/esp.70060>

Roulland, T., Maquaire, O., Costa, S., Compain, V., Davidson, R. et Medjkane, M. (2019). Dynamique des falaises des Vaches Noires : analyse diachronique historique et récente à l'aide de documents multi-sources (Normandie, France). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 25(1), 37-55. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12989>

Roulland, T., Olivier, M., Costa, S., Medjkane, M., Davidson, R., Fauchard, C. et Antoine, R. (2022). Seasonal activity quantification of coast badlands by TLS monitoring over five years at the "Vaches Noires" cliffs (Normandy, France). Geomorphology, 400, 16 p. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108083>

MERCI DE VOTRE ATTENTION



Contact : olivier.maquaire@unicaen.fr



Géosciences pour une Terre durable
brgm

