



MISE EN ÉVIDENCE DU FONCTIONNEMENT HYDROMÉCANIQUE D'UN GLISSEMENT DE TERRAIN COMPLEXE : L'EXEMPLE DE VILLERVILLE, NORMANDIE

Guillaume Thirard^{*,}, Benjamin François^{**}, Gilles Grandjean^{**}, Adnand Bitri^{**},
Yannick Thiery^{**}, Michael Delatre^{**}, Olivier Maquaire^{*}, Stéphane Costa^{*}**

**Normandie Univ, Unicaen, CNRS, LETG, 14000 Caen, France*

*** BRGM Orléans, 3 avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2*

Journées Aléas Gravitaires (JAG)

Valbonne, le 09 octobre 2019

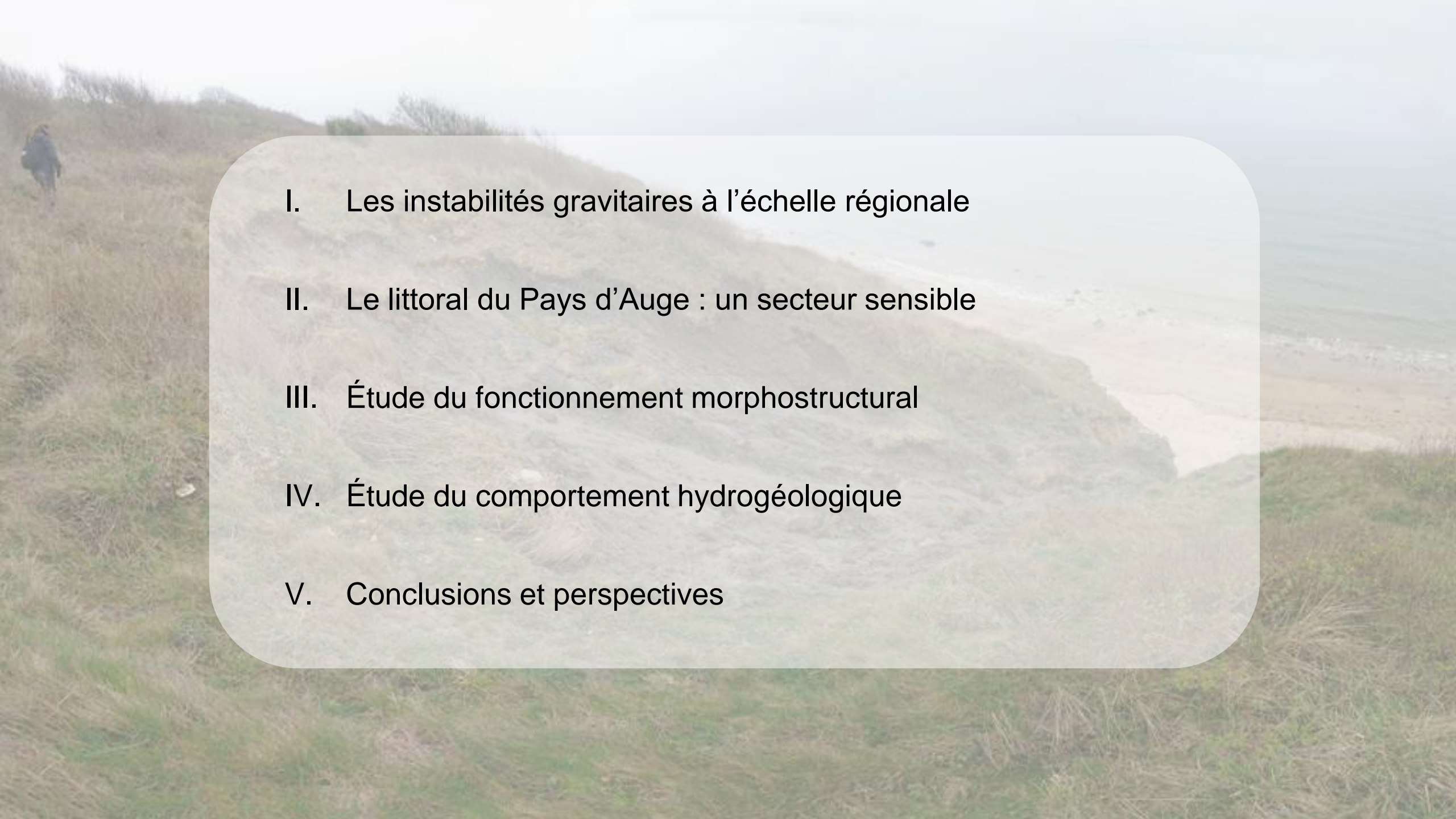


Direction de thèse

COSTA Stéphane (LETG-Caen)
GRANDJEAN Gilles (BRGM Orléans)

Co-encadrement de thèse

MAQUAIRE Olivier (LETG-Caen)
THIERY Yannick (BRGM Orléans)

- 
- I. Les instabilités gravitaires à l'échelle régionale
 - II. Le littoral du Pays d'Auge : un secteur sensible
 - III. Étude du fonctionnement morphostructural
 - IV. Étude du comportement hydrogéologique
 - V. Conclusions et perspectives



I. Les instabilités gravitaires à l'échelle régionale

II. Le littoral du Pays d'Auge : un secteur sensible

III. Étude du fonctionnement morphostructural

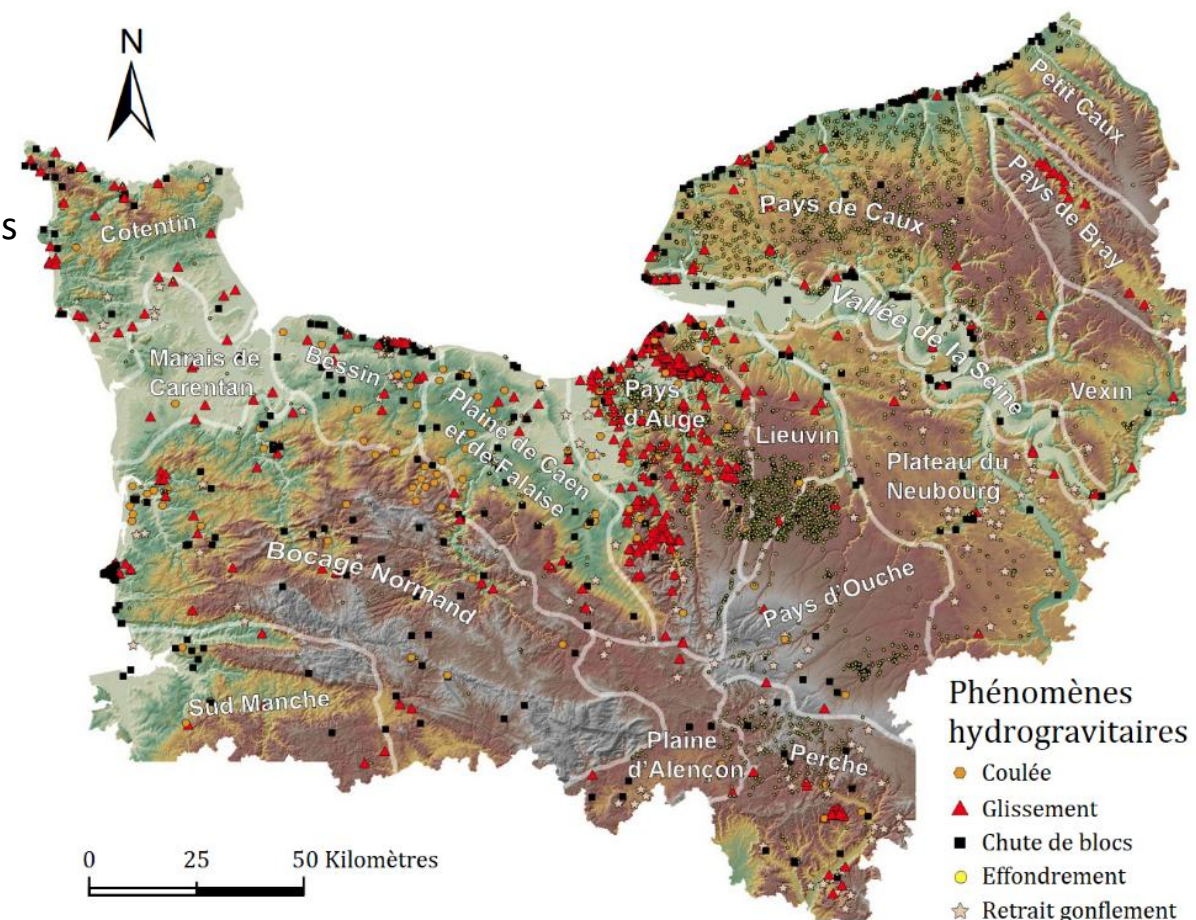
IV. Étude du comportement hydrogéologique

V. Conclusions et perspectives



Les aléas gravitaires en Normandie

- Une large typologie de mouvements gravitaires affecte la région Normandie
- Certains secteurs sont particulièrement sensibles à ces phénomènes



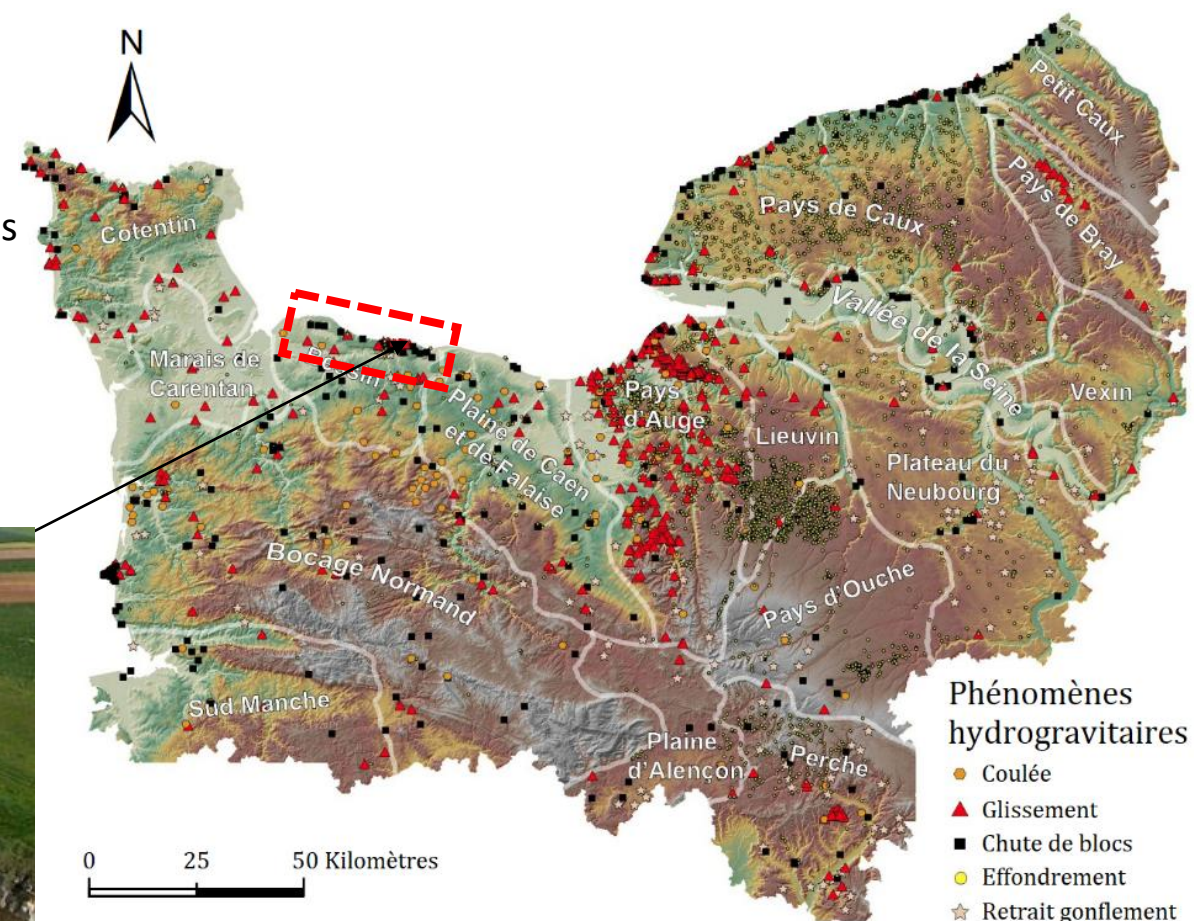
Répartition spatiale des mouvements hydrogravitaires recensés en Normandie (modifié d'après M. Fressard, 2013)

Les aléas gravitaires en Normandie

- ➔ Une large typologie de mouvements gravitaires affecte la région Normandie
- ➔ Certains secteurs sont particulièrement sensibles à ces phénomènes :
 - **Le littoral du Bessin**



*Eboulement de falaise près du Cap Manvieu (Calvados)
(France 3 Basse-Normandie, 2015)*



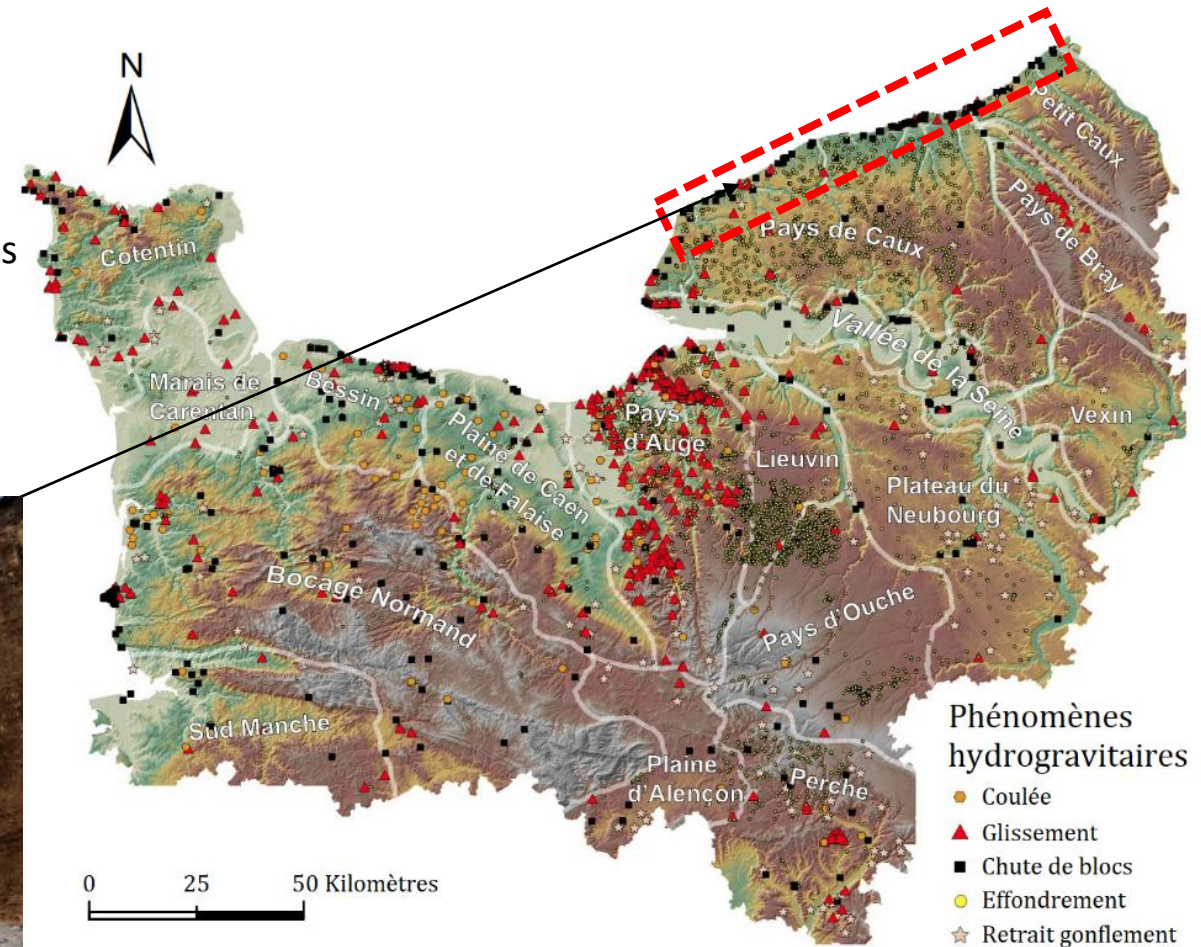
Répartition spatiale des mouvements hydrogravitaires recensés en Normandie (modifié d'après M. Fressard, 2013)

Les aléas gravitaires en Normandie

- Une large typologie de mouvements gravitaires affecte la région Normandie
- Certains secteurs sont particulièrement sensibles à ces phénomènes :
 - Le littoral du Bessin
 - **Le littoral du Pays de Caux**



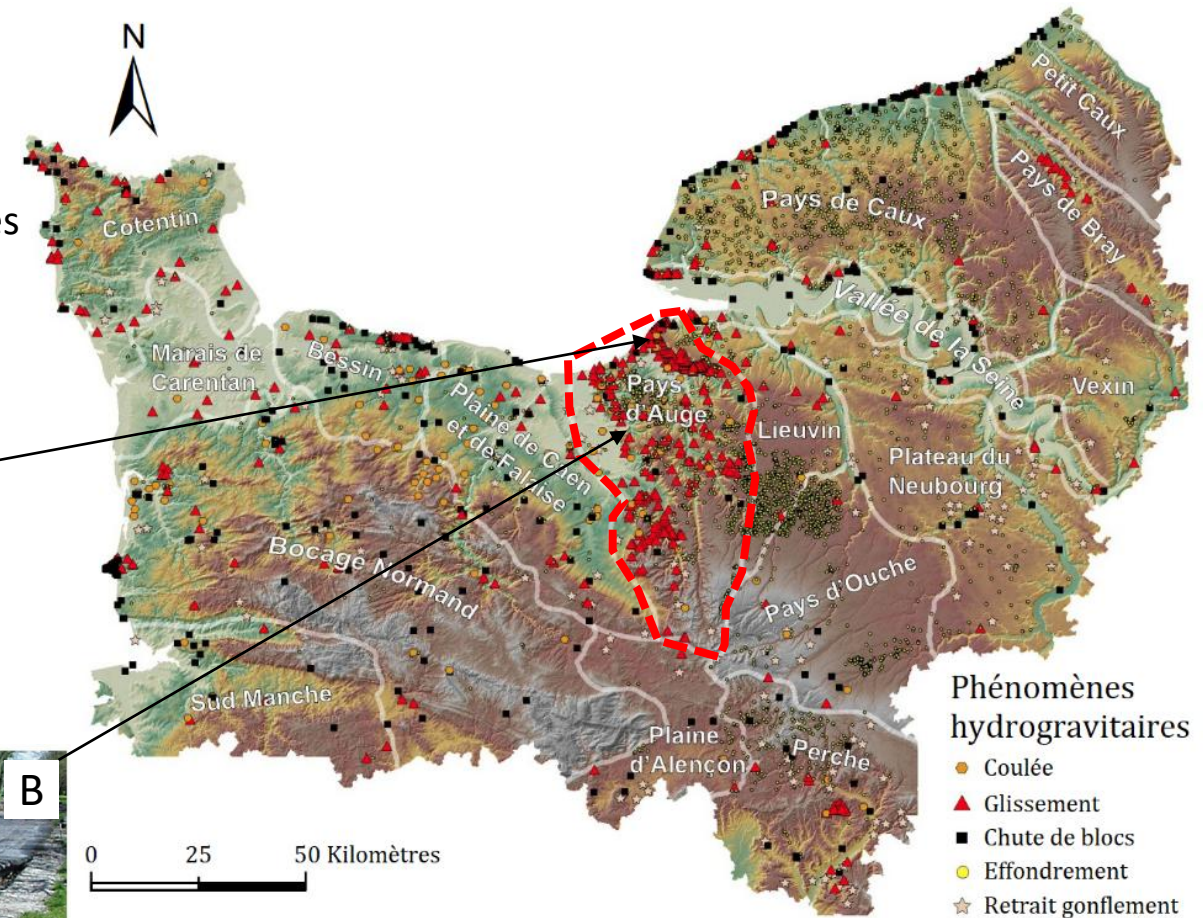
*Eboulement de craie, Saint-Léonard (Seine-Maritime)
(Paris-Normandie, août 2019)*



Répartition spatiale des mouvements hydrogravitaires recensés en Normandie (modifié d'après M. Fressard, 2013)

Les aléas gravitaires en Normandie

- ➔ Une large typologie de mouvements gravitaires affecte la région Normandie
- ➔ Certains secteurs sont particulièrement sensibles à ces phénomènes :
 - Le littoral du Bessin
 - Le littoral du Pays de Caux
 - **Le territoire du Pays d'Auge**



Répartition spatiale des mouvements hydrogravitaires recensés en Normandie (modifié d'après M. Fressard, 2013)

(A) Glissement des Fosses du Macre, Cricqueboeuf (Maquaire, 1995)
(B) Glissement de Lécaude (TP-Géo, 2001 in Fressard, 2013)



I. Les instabilités gravitaires à l'échelle régionale

II. Le littoral du Pays d'Auge : un secteur sensible

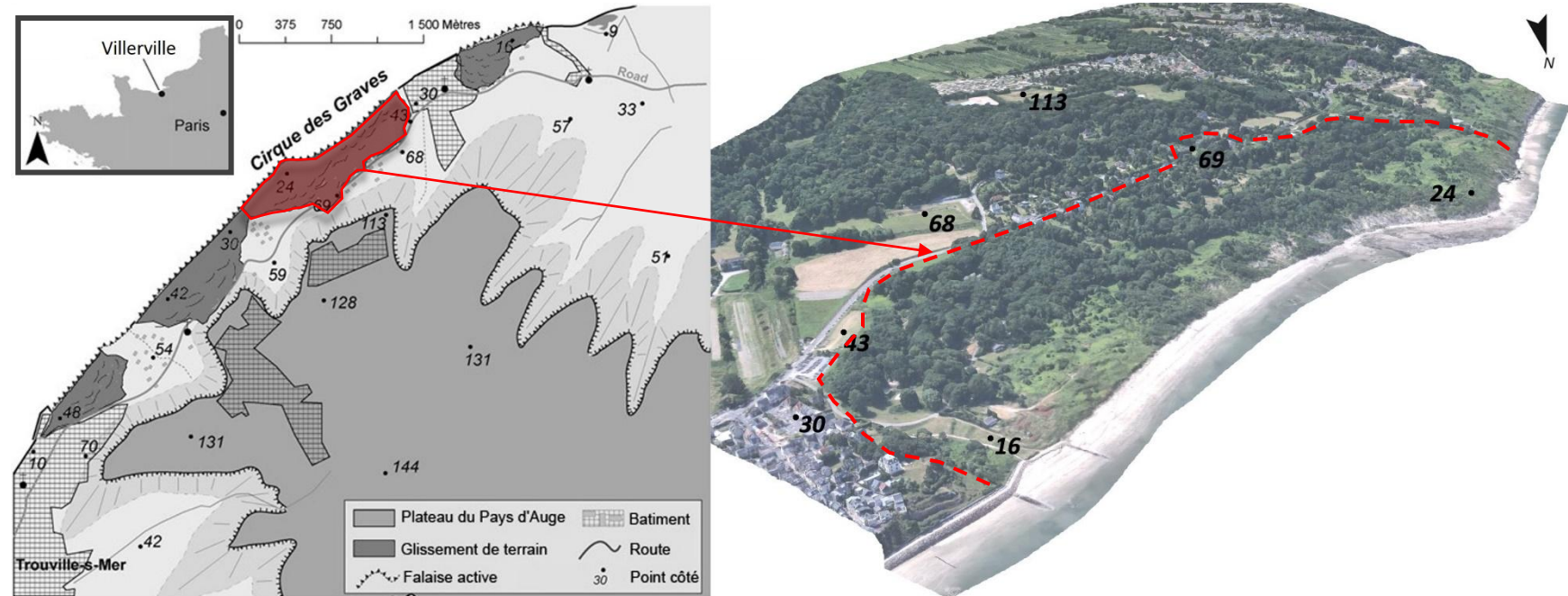
III. Étude du fonctionnement morphostructural

IV. Étude du comportement hydrogéologique

V. Conclusions et perspectives

Les instabilités de la bordure littorale du Pays d'Auge

- ➔ 4 grands glissements de terrain de Trouville à Honfleur
- ➔ Une géologie très sensible (alternances sédimentaires hétérogènes)
- ➔ Un contact avec la mer qui ne permet pas d'atteindre d'état d'équilibre (érosion)
- ➔ Site pilote : le cirque des Graves



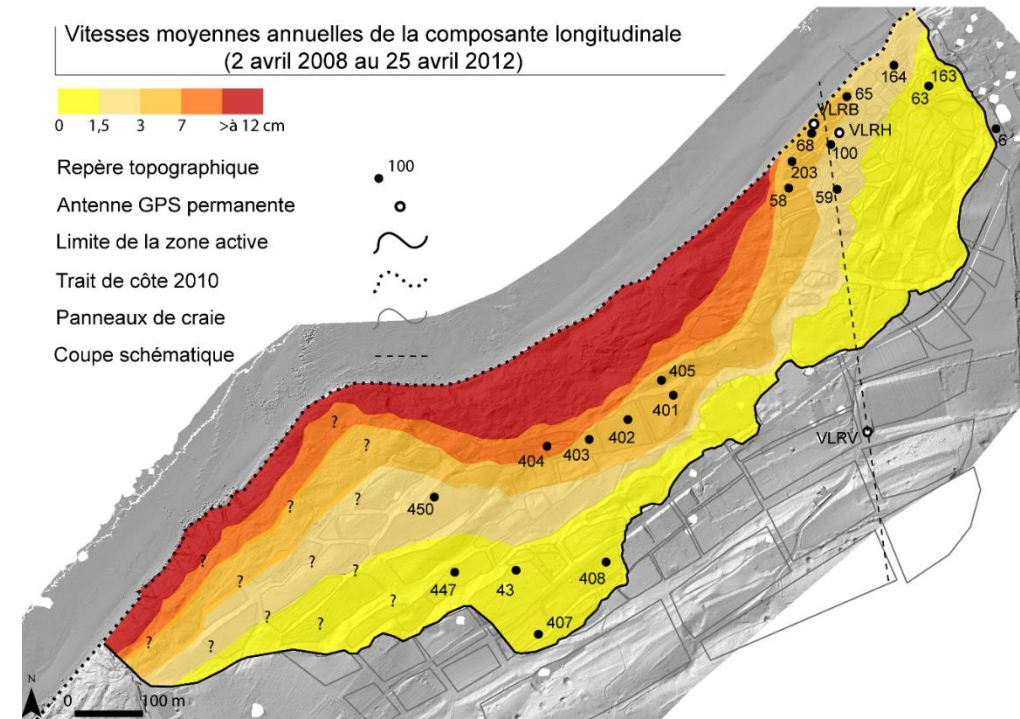
Localisation du cirque des Graves (Villerville, Calvados) sur la frange côtière du Pays d'Auge, Modifié d'après Lissak et al. (2014).

Le Cirque des Graves (Villerville)

- Site étudié depuis 1984
- Deux thèses et plusieurs travaux d'étudiants
- De nombreuses connaissances déjà acquises

Des approfondissements nécessaires

- Amélioration des connaissances sur l'écoulement interne de l'eau
- Amélioration des connaissances structurales
- Mise en place de modèles permettant de simuler le comportement du glissement à partir des données de suivi long et court terme



Vitesses de déplacement annuelles moyennes constatées entre 2008 et 2012 (Lissak, 2012)



Suivis par station GNSS permanente (Thirard, 2018)



I. Les instabilités gravitaires à l'échelle régionale

II. Le littoral du Pays d'Auge : un secteur sensible

III. Étude du fonctionnement morphostructural

IV. Étude du comportement hydrogéologique

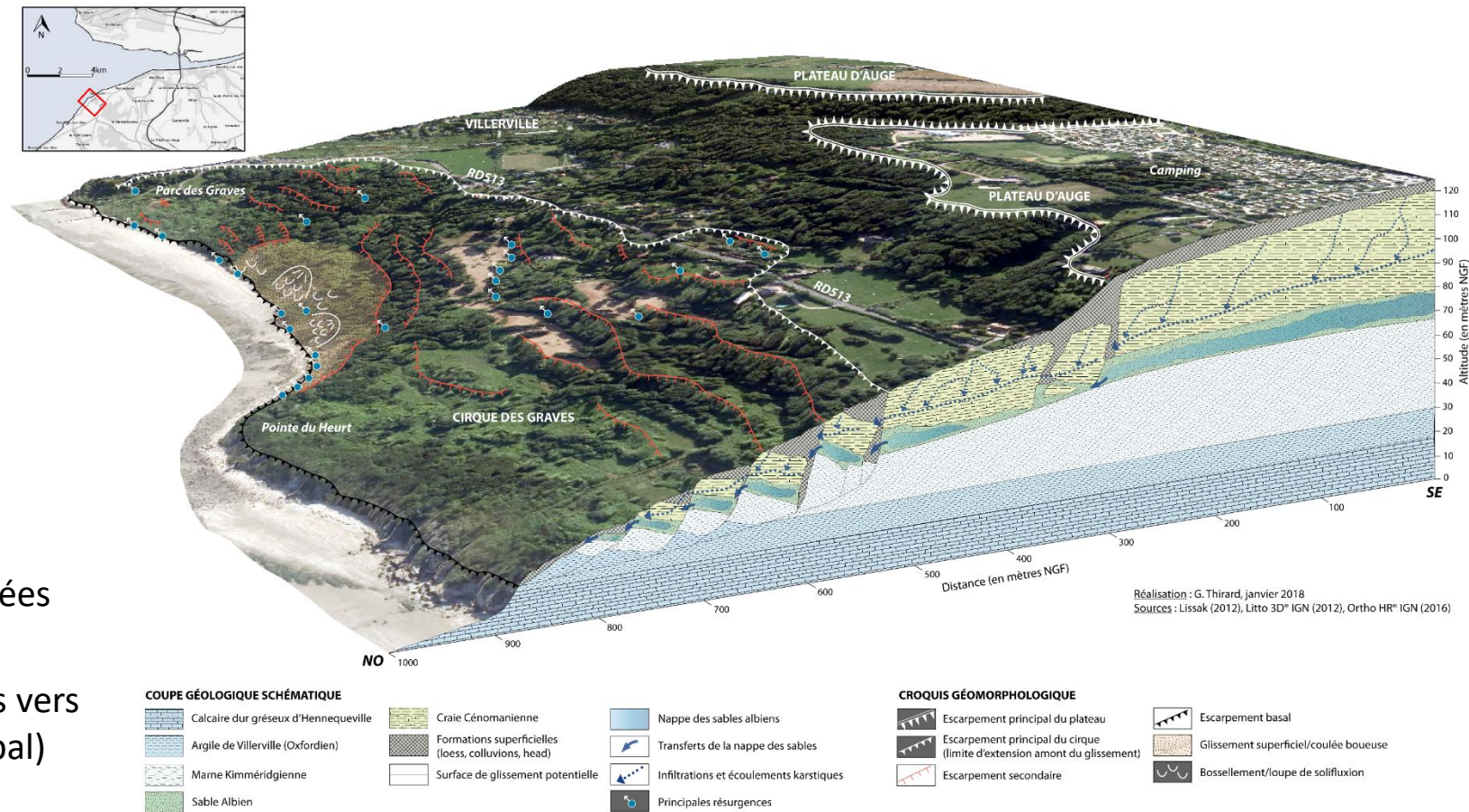
V. Conclusions et perspectives

1. Géomorphologie et lithostratigraphie

➔ De nombreuses hétérogénéités morphologiques et stratigraphiques



- Nombreux escarpements
- Morphologie en escaliers
- Des plans de glissement complexes et emboîtés
- Une zone médiane de coulées marneuses à l'aval
- Une topographie en dévers vers l'Est (sens du pendage global)



Représentation schématique des caractéristiques hydrogéologiques et géomorphologiques du cirque des Graves (Thirard, 2019)

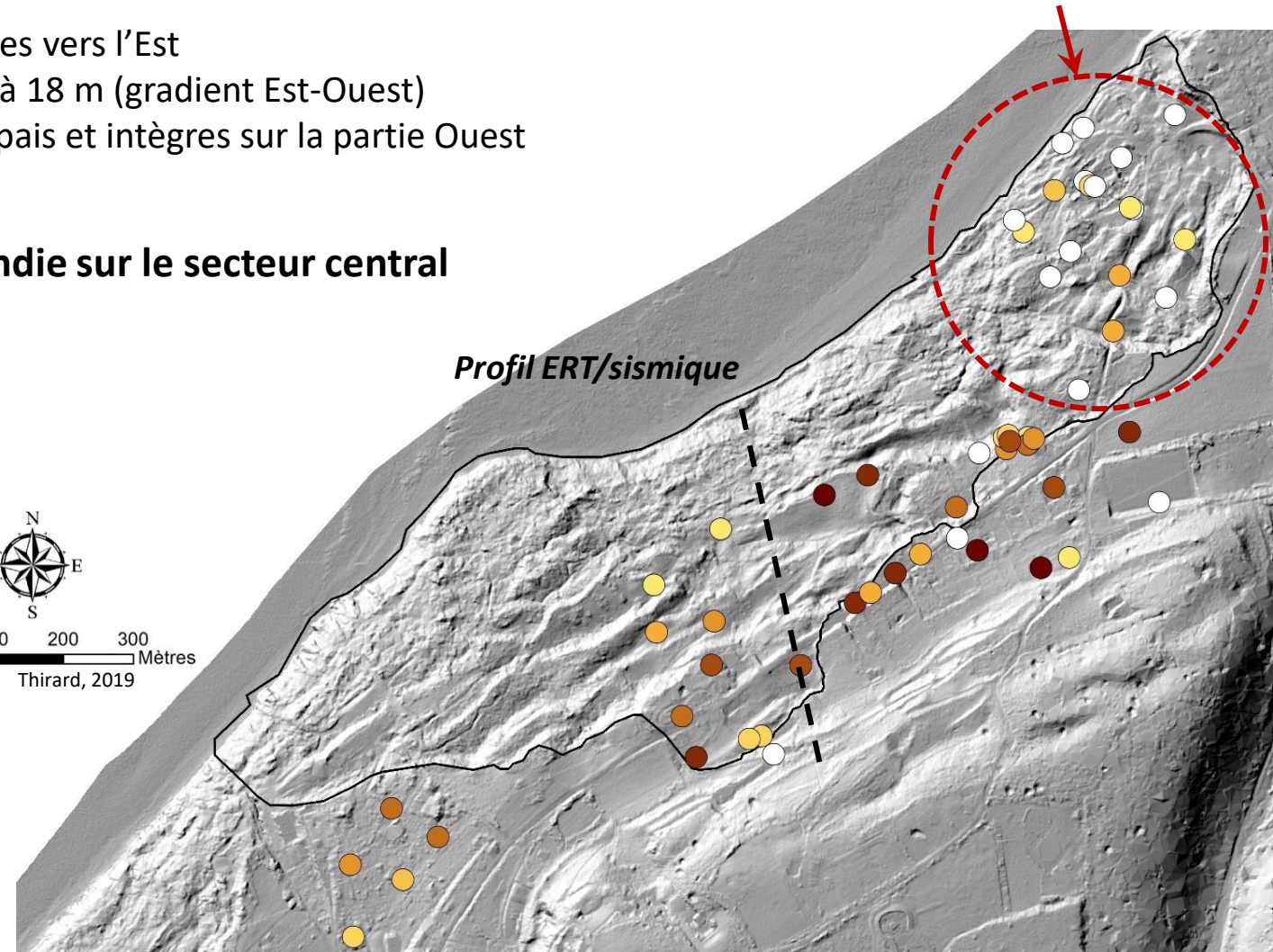
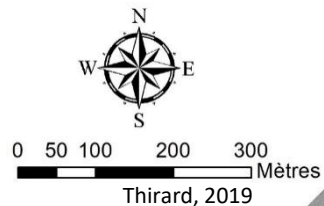
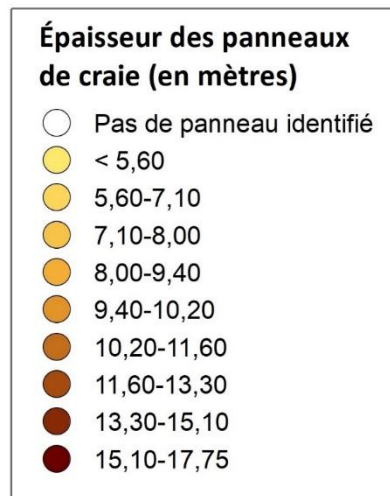
2. Étude géologique du site

→ 62 logs de forages disponibles sur le cirque des Graves datant de 1985 à 2019

- Des formations plus remaniées vers l'Est
- Des épaisseurs de craie de 3 à 18 m (gradient Est-Ouest)
- Des panneaux plus grands, épais et intègres sur la partie Ouest

→ Étude géophysique approfondie sur le secteur central

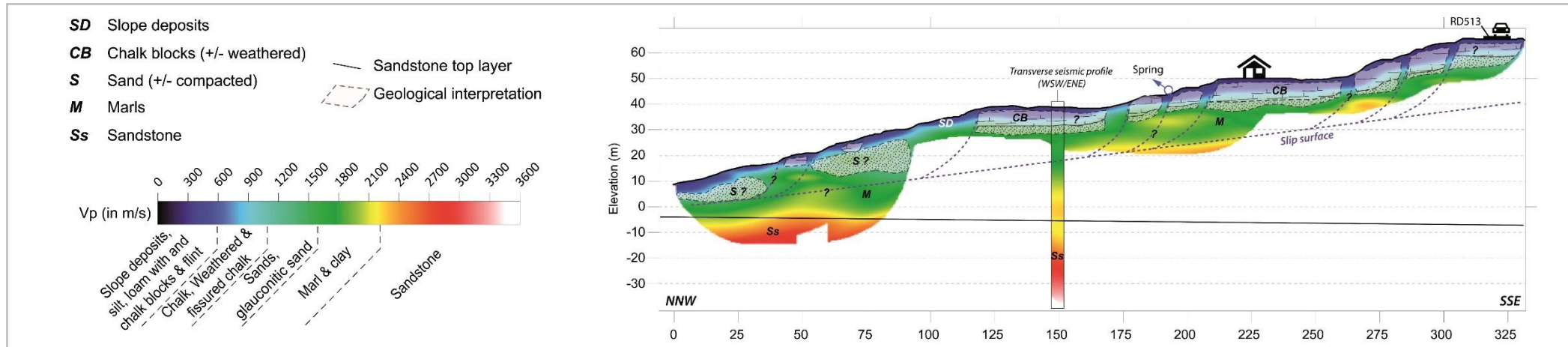
Parc des Graves : panneaux de plus faible épaisseur et/ou très remaniés



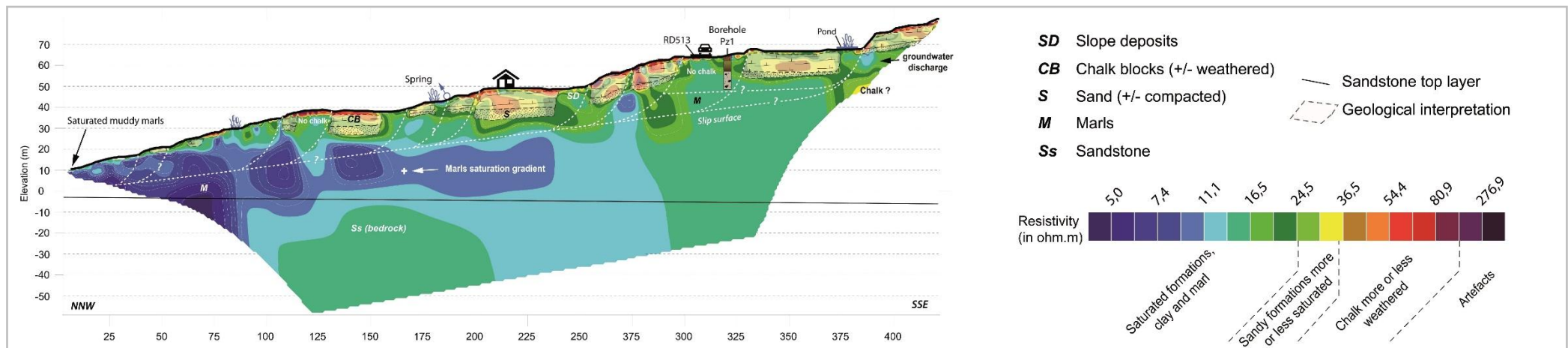
3. Investigations géophysiques complémentaires

➔ Mise en œuvre de méthodes géophysiques non destructives (électrique/sismique)

- Sismique : définition de l'épaisseur des formations + position du bedrock
- ERT : contraindre la largeur des panneaux + gradient de saturation des formations



Interprétation du levé de sismique réfraction en zone médiane du cirque des Graves

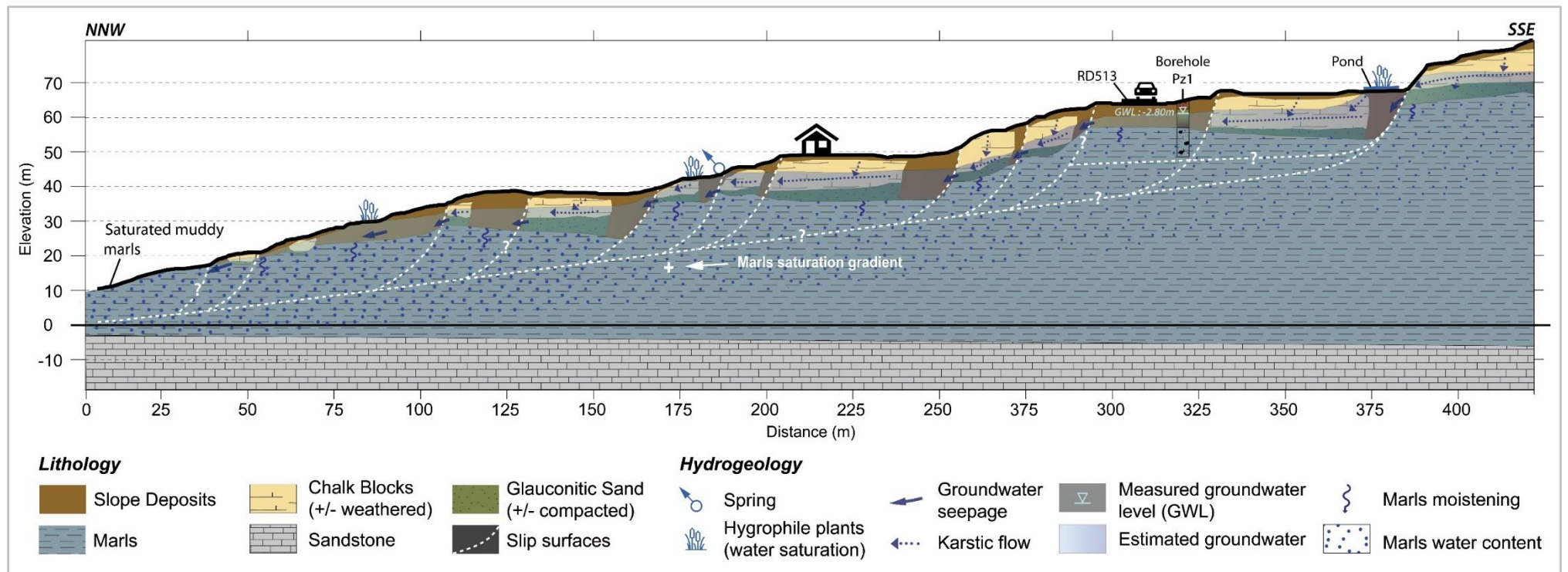


Interprétation du levé de tomographie de résistivité électrique en zone médiane du cirque des Graves

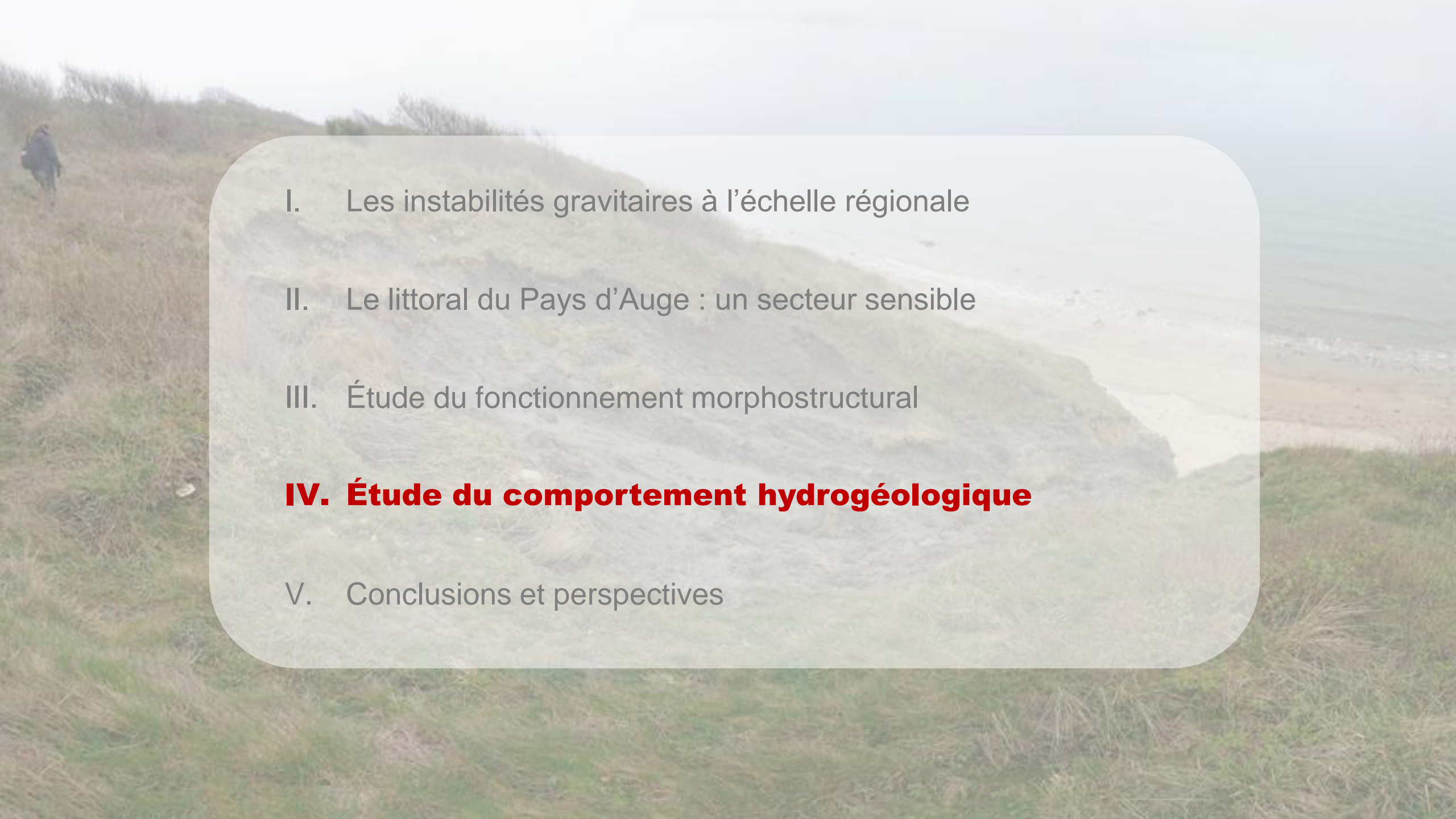
3. Investigations géophysiques complémentaires

➔ Mise en œuvre de méthodes géophysiques non destructives (électrique/sismique)

- Un gradient de résistivité croissant de l'amont vers l'aval
- Imprégnation des marnes en profondeur, au contact de la nappe des sables
- Absence de panneaux de craie intègres à l'aval (marnes, sables et/ou FS)



Modèle conceptuel de fonctionnement issu de l'interprétation croisée des missions de géophysique (Thirard, 2019)

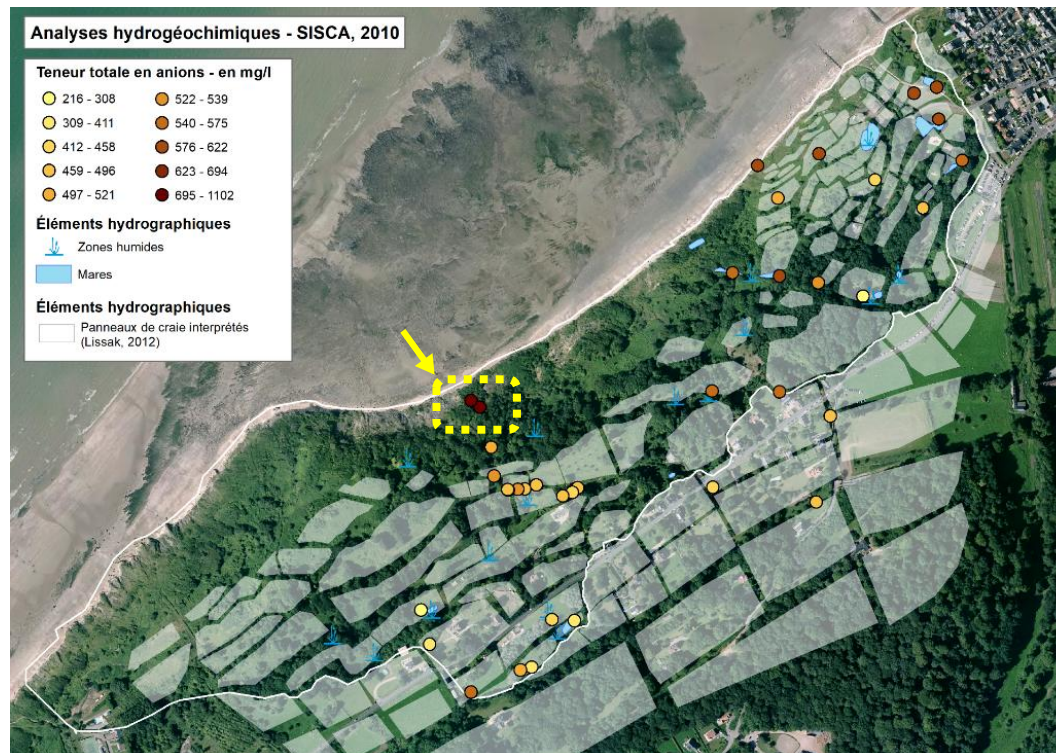
- 
- I. Les instabilités gravitaires à l'échelle régionale
 - II. Le littoral du Pays d'Auge : un secteur sensible
 - III. Étude du fonctionnement morphostructural
 - IV. Étude du comportement hydrogéologique**
 - V. Conclusions et perspectives

1. Géochimie de l'eau

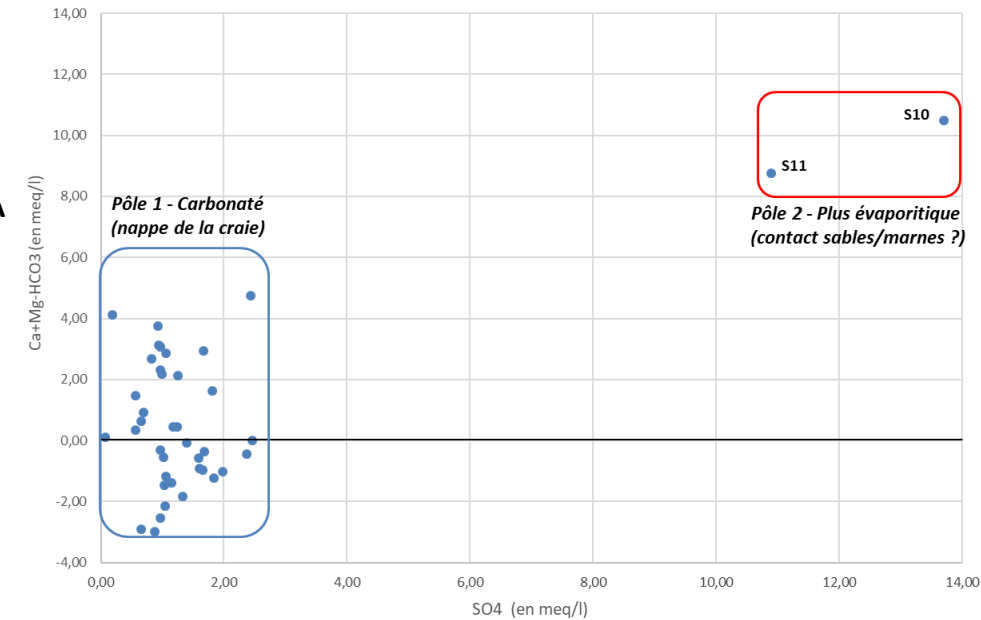
→ Etude d'analyses géochimiques du projet SISCA

- Étude des ions majeurs sur 45 échantillons
- 2 sources en bas de versant avec signature ionique très riche en Ca^{2+} , Cl^- , F^- , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-}
- Balance ionique non-équilibrée pour une partie des échantillons

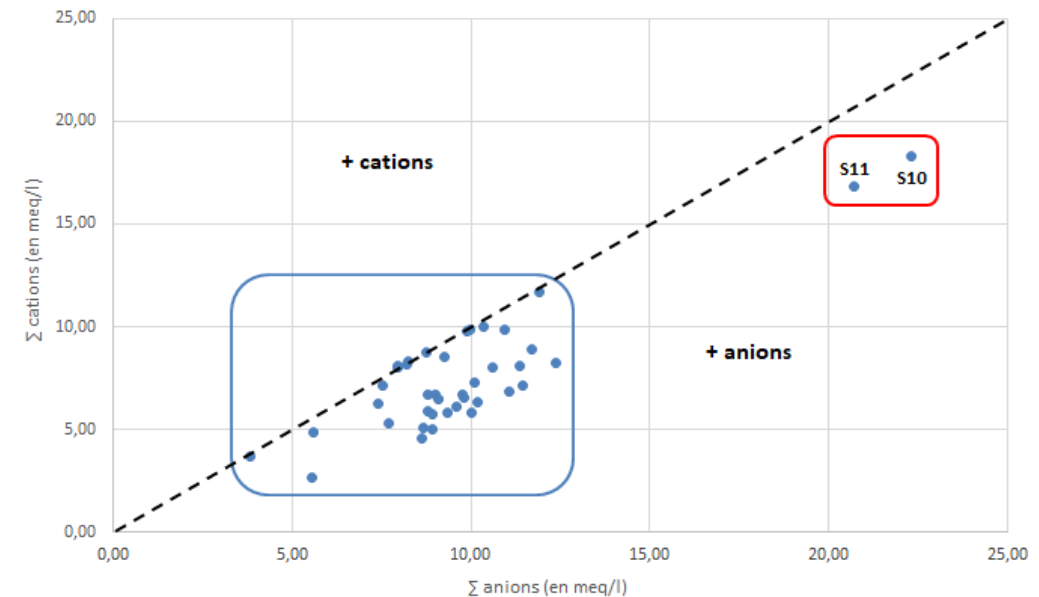
↳ **Observations à confirmer**



Total des anions des eaux analysées du cirque des Graves



Signature hydrogéochimique des sources du cirque des Graves



Balance ionique de l'ensemble des échantillons

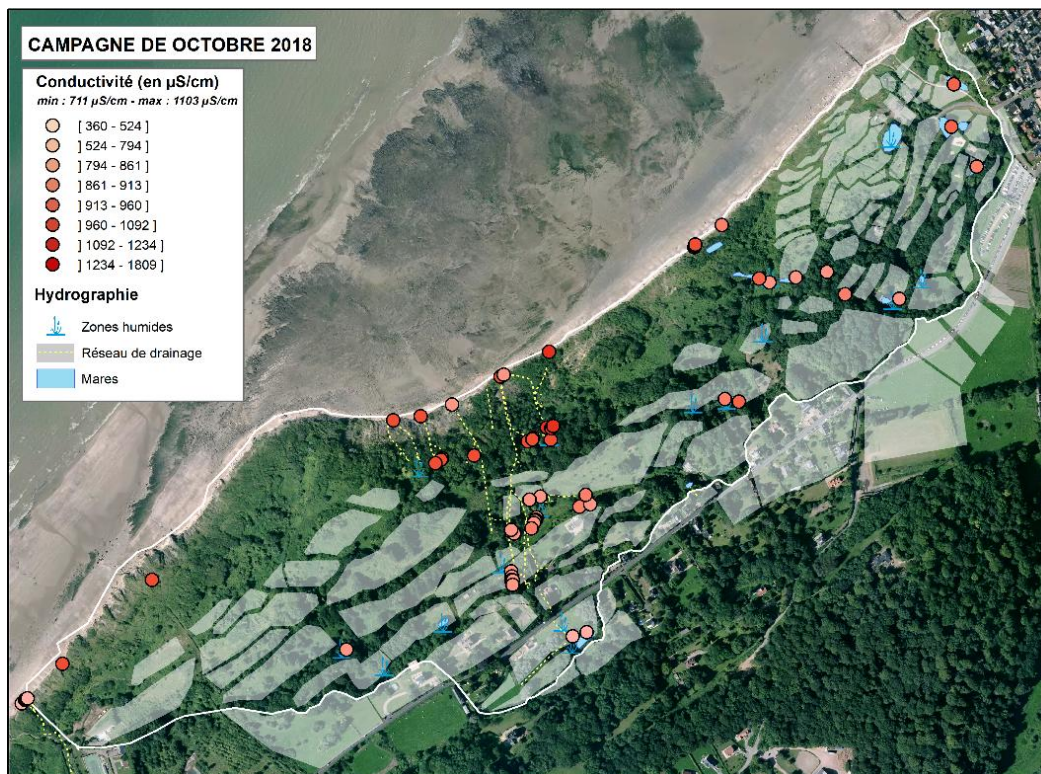
2. Étude des écoulements de surface

→ Levé de pH, conductivité et débit des eaux de surface

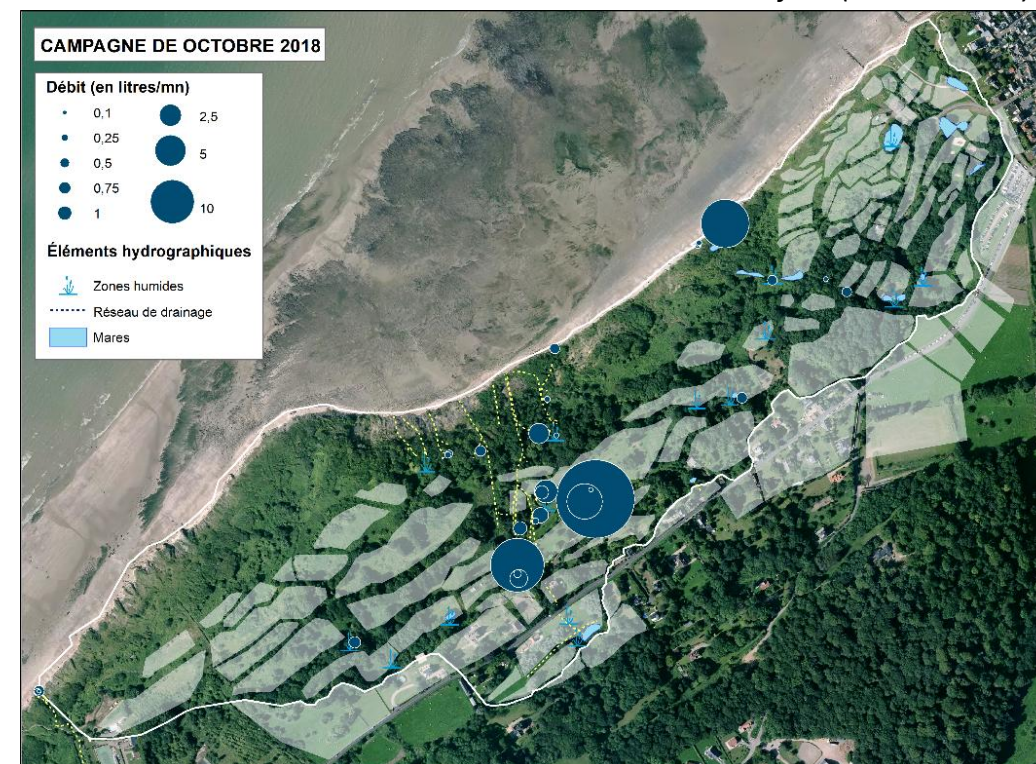
Objectif : identifier les zones d'écoulement et en comprendre l'origine



Prélèvement pour
mesure de débit
d'une source



Mesures de conductivité des eaux de surface (octobre 2018)



Débit des eaux de surface (octobre 2018)

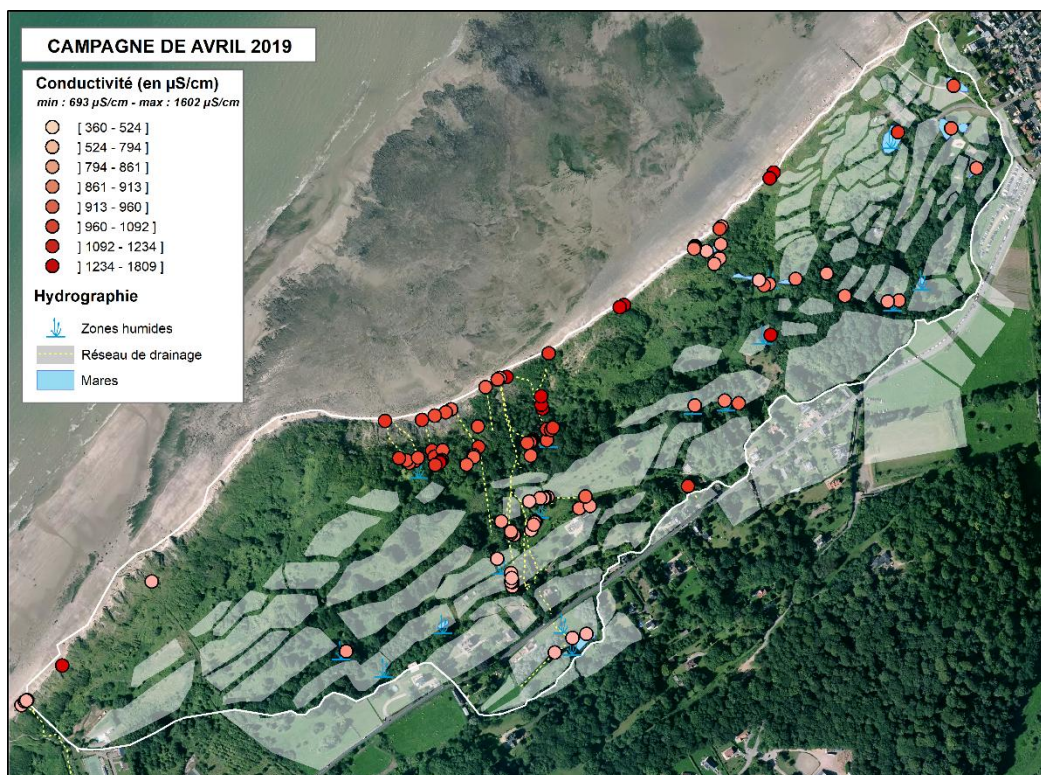
2. Étude des écoulements de surface

→ Levé de pH, conductivité et débit des eaux de surface

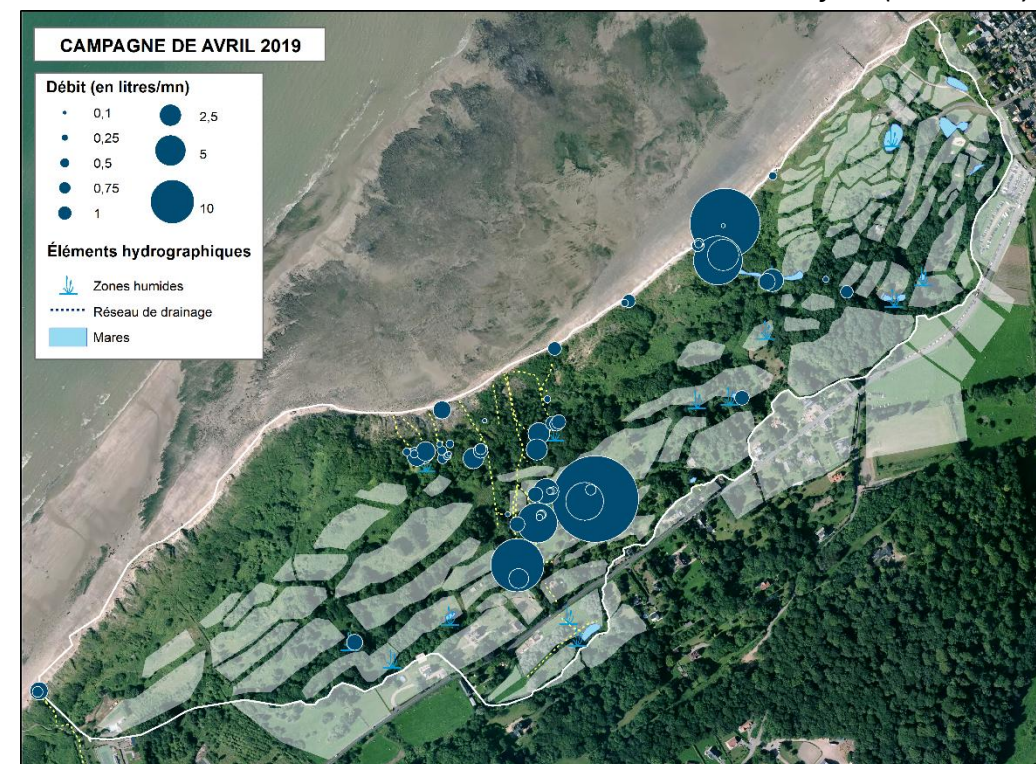
Objectif : identifier les zones d'écoulement et en comprendre l'origine



Prélèvement pour
mesure de débit
d'une source



Mesures de conductivité des eaux de surface (avril 2019)



Débit des eaux de surface (avril 2019)

2. Étude des écoulements de surface

→ Chiffres clés des deux campagnes

Mesures	Octobre 2018	Avril 2019	Évolution
Sources mesurées	47	72	+25
Mares mesurées	8	18	+10
Drains mesurés	7	11	+4
Intervalle de température (en °C)	12,0-20,3	9,3-17,7	↘
Intervalle de conductivité (en μS)	711-1103	693-1602	↗
Intervalle de pH	6,68-8,55	7,19-8,58	↗
Débit moyen (litres/mn)	2,52	2,59	→
Débit total du versant (litres/mn)	80,87	158,38	↗

- 39 points de mesures supplémentaires en sortie d'hiver
- Un débit total doublé après un hiver peu pluvieux (baisse de l' ET_r = hausse du ressuyage du versant)
- Augmentation de la conductivité de l'amont vers l'aval (zone des coulées centrales)

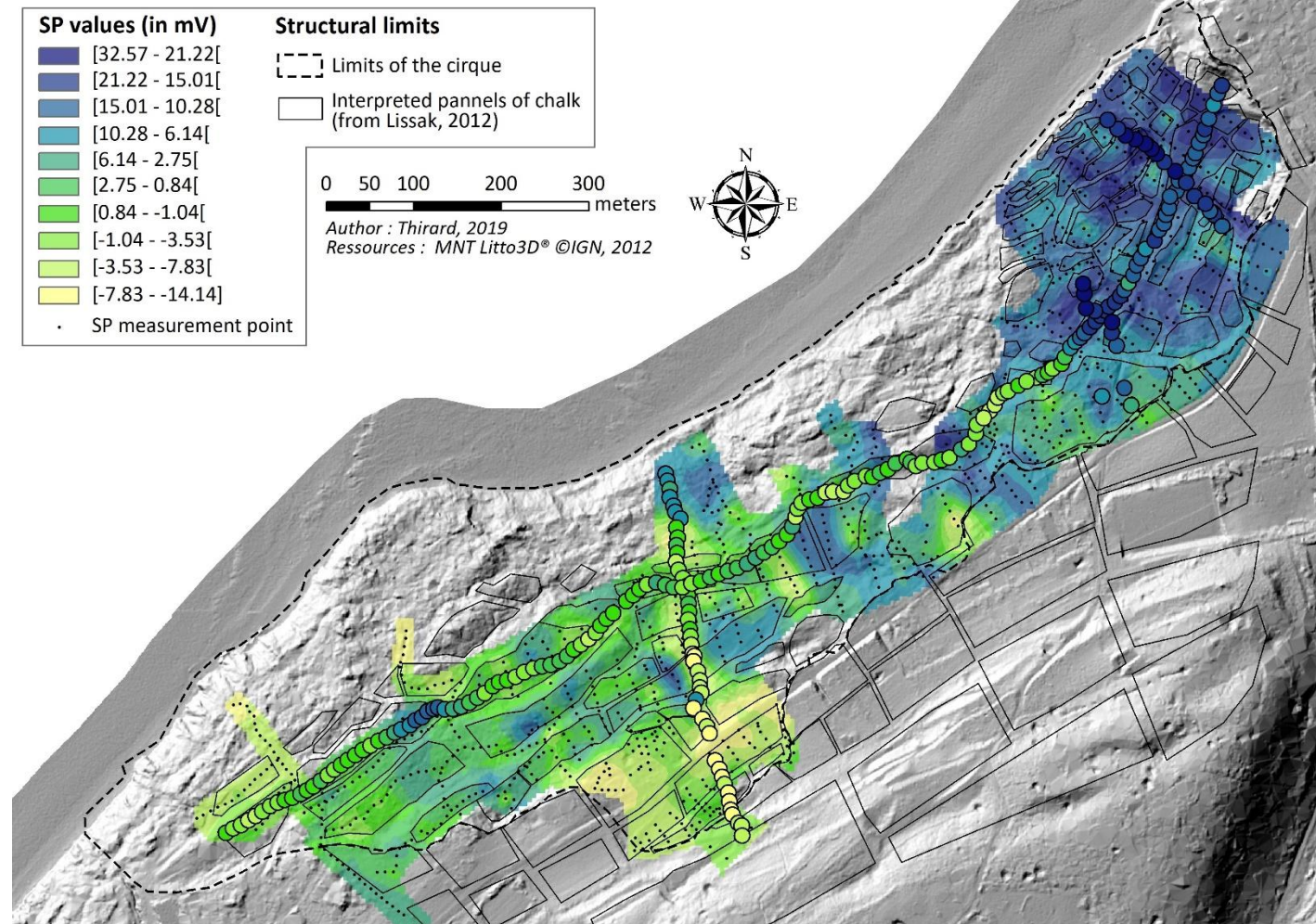
↳ **Corrobore l'hypothèse d'une dissociation amont/aval des nappes**

3. Levé de polarisation spontanée (PS)

→ Etude du potentiel d'électrofiltration (mesure du champ électrique naturel)

- 1200 points de mesures sur deux semaines (+ 230 pts de validation)
- Augmentation du potentiel vers l'Est selon le gradient topographique
- Anomalies négatives vers l'Ouest et à l'aval : infiltrations préférentielles / mouvement descendant de l'eau
- Anomalies positives sur le parc (Est) : résurgences et écoulements plus proche de la surface

↳ **Concordance du gradient PS avec l'état des panneaux de craie**



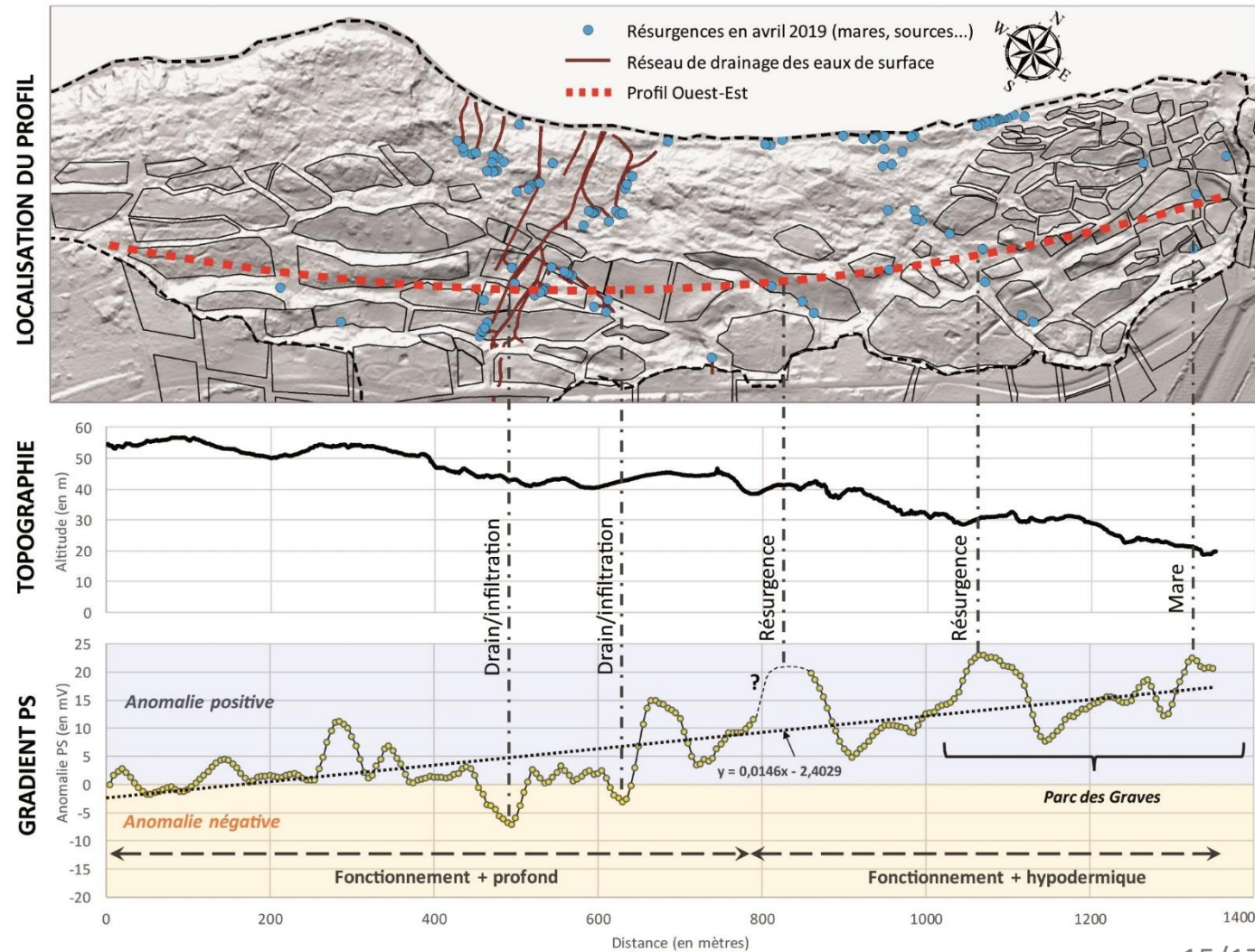
Gradient de polarisation spontanée du cirque des Graves (levés de avril 2018 et 2019)

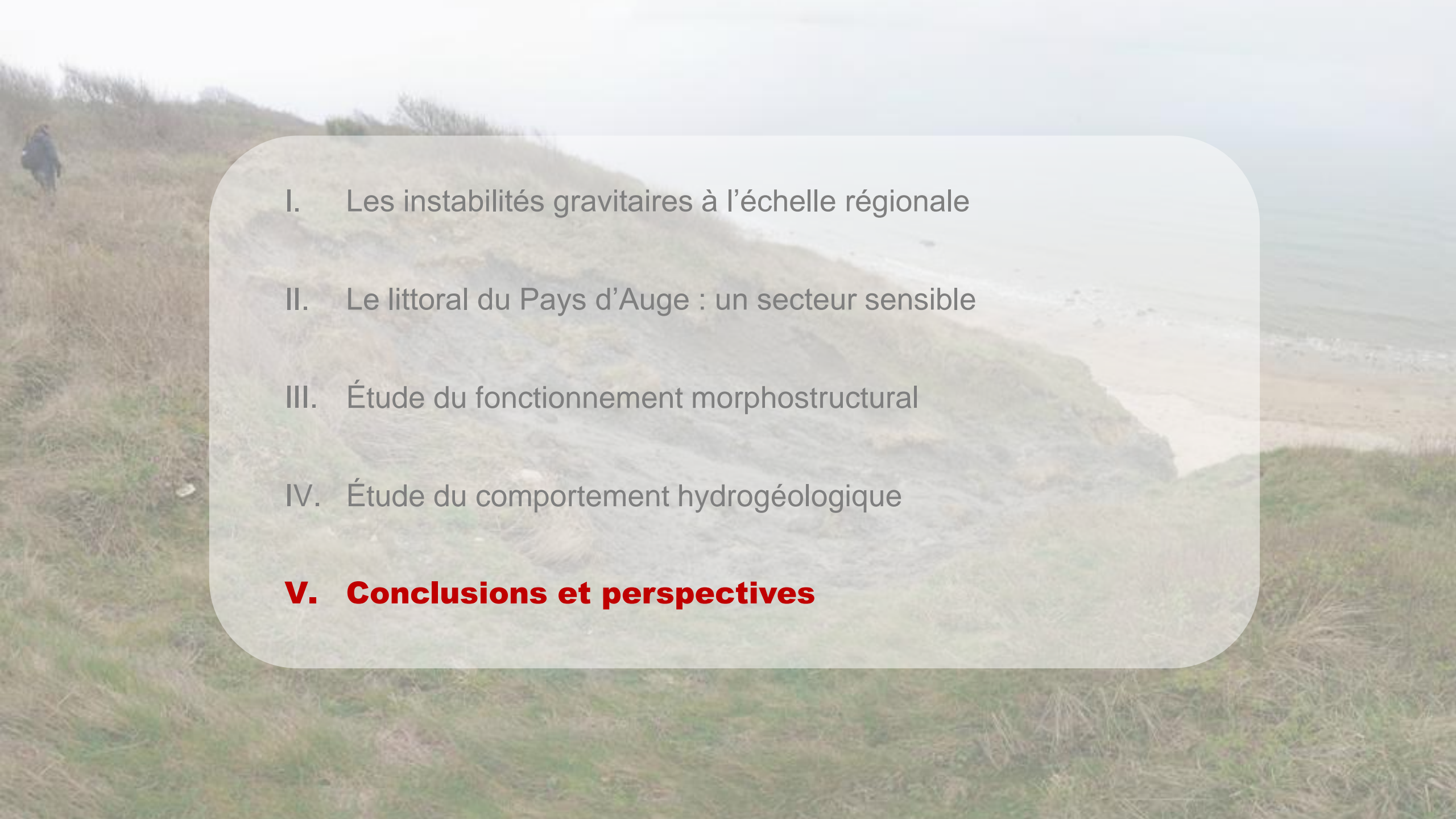
3. Levé de polarisation spontanée (PS)

→ Etude du potentiel d'électrofiltration (mesure du champ électrique naturel)

- 1200 points de mesures sur deux semaines (+ 230 pts de validation)
- Augmentation du potentiel vers l'Est selon le gradient topographique
- Anomalies négatives vers l'Ouest et à l'aval : infiltrations préférentielles / mouvement descendant de l'eau
- Anomalies positives sur le parc (Est) : résurgences et écoulements plus proche de la surface

↳ **Concordance du gradient PS avec l'état des panneaux de craie**



- 
- I. Les instabilités gravitaires à l'échelle régionale
 - II. Le littoral du Pays d'Auge : un secteur sensible
 - III. Étude du fonctionnement morphostructural
 - IV. Étude du comportement hydrogéologique
 - V. Conclusions et perspectives**

Conclusions sur le fonctionnement hydrogéologique

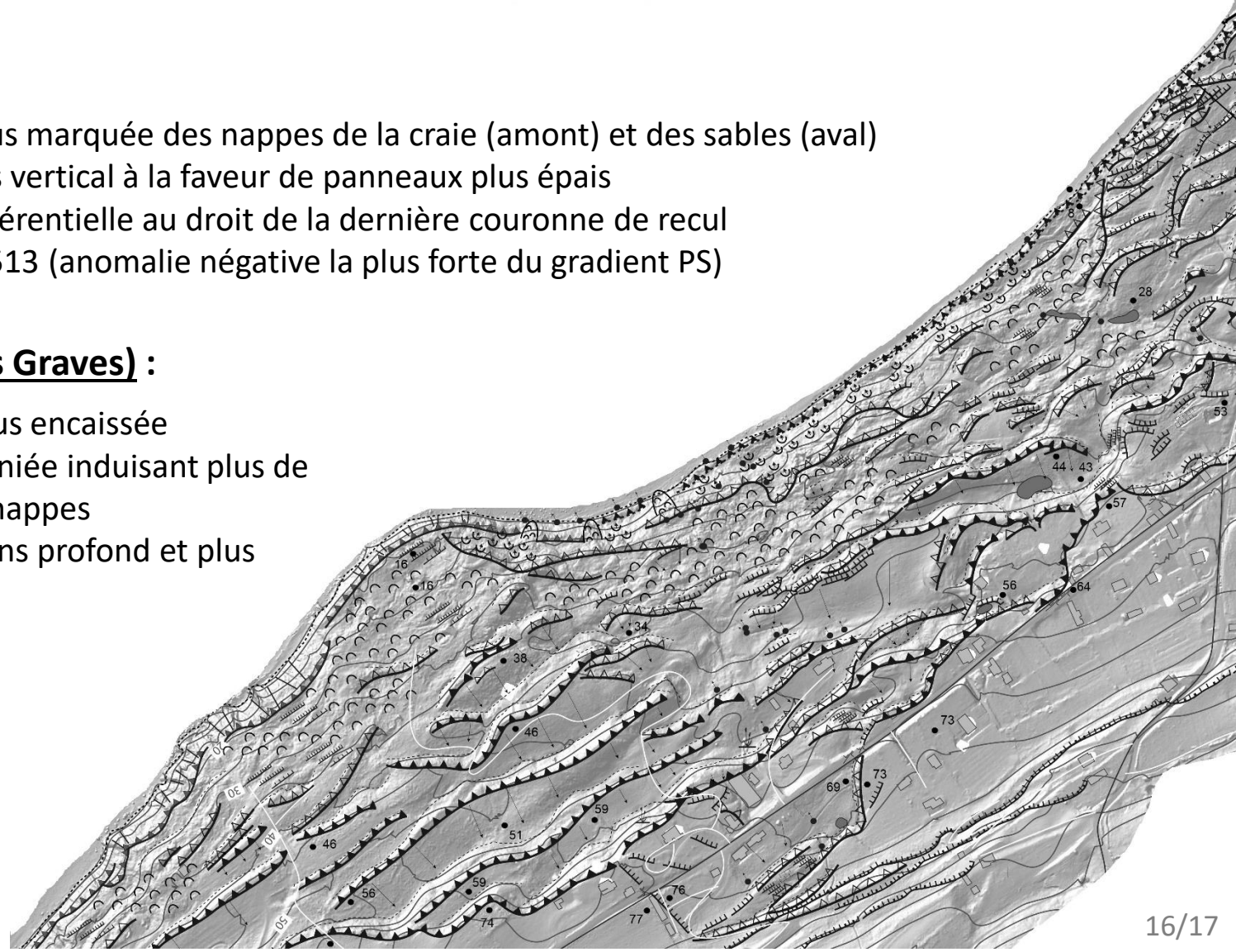
Les résultats des différentes investigations (sondages, hydrogéochimie, géophysique...), mettent en évidence un fonctionnement dissocié avec :

→ Sur la partie Ouest :

- ✓ une dissociation plus marquée des nappes de la craie (amont) et des sables (aval)
- ✓ un écoulement plus vertical à la faveur de panneaux plus épais
- ✓ une infiltration préférentielle au droit de la dernière couronne de recul en arrière de la RD513 (anomalie négative la plus forte du gradient PS)

→ Sur la partie Est (Parc des Graves) :

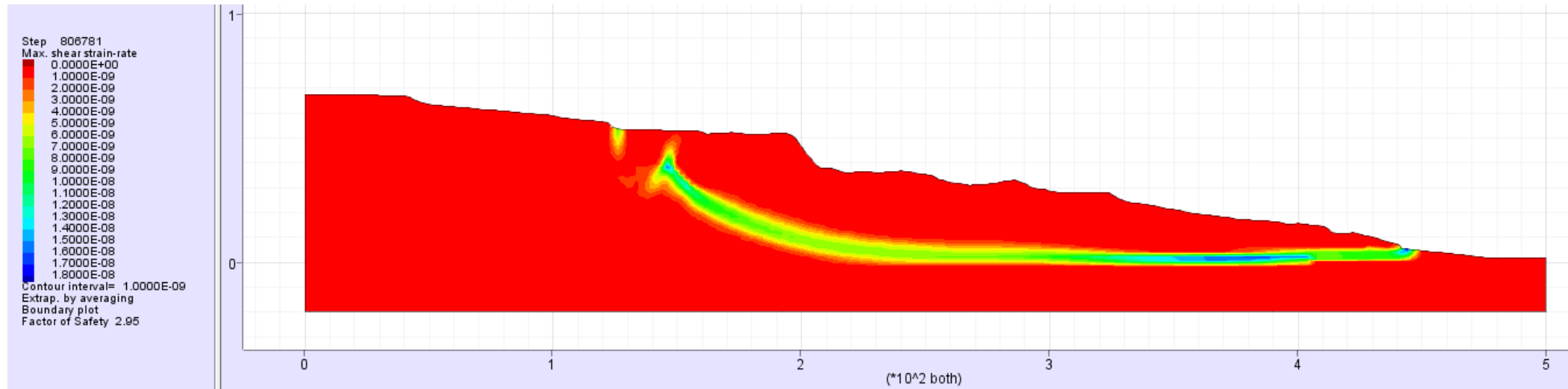
- ✓ une topographie plus encaissée
- ✓ une lithologie remaniée induisant plus de perméabilité inter-nappes
- ✓ un écoulement moins profond et plus parallèle à la pente



Perspectives des travaux entrepris

→ Poursuite des recherches :

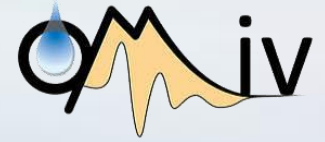
- Réalisation de nouvelles analyses géochimiques : confirmation des observations de 2010
- Validation des enveloppes/seuils par des modèles hydromécaniques (FLAC, Seep-Slope)
- Application de la méthodologie à d'autres sites littoraux/arrière-littoraux



Contrainte maximale de cisaillement calculée par le modèle FLAC au Parc des Graves en conditions sèches (travaux en cours)

→ Objectifs opérationnels et d'aide à la décision :

- Mise en place de suivis télétransmis en quasi-temps réel (piézomètres / GPS)
- Définition de seuils d'alerte locaux



MERCI DE VOTRE ATTENTION