

Étude de la stabilité d'un versant sur le littoral du Bessin : apport du modèle numérique terrestre

Contribution of terrestrial digital modelling to slope stability assessment on the Bessin coastline

Arnaud VANDERCAMERE^{1*}, Matthias FERREIRA²

¹ *Hydrogéotechnique, Bretteville-sur-Odon, France*

² *Hydrogéotechnique, Eslettes, France*

* *a.vandercamere@hydrogeotechnique.com*

RESUME : Le versant amont de la promenade Signac, à Port-en-Bessin-Huppain (Calvados), est affecté par des instabilités gravitaires récurrentes typiques des falaises marneuses du Bessin. L'étude repose sur une analyse intégrée combinant données géotechniques, instrumentation piézométrique et inclinométrique, et exploitation d'un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution. Les résultats mettent en évidence un glissement en grand, à cinématique lente de type fluage de masse, structuré par des surfaces de cisaillement développées au sein des formations marneuses et colluvionnées. L'activité du glissement est principalement contrôlée par la piézométrie de la nappe d'écoulement de versant, dont les niveaux élevés et durables sont systématiquement associés aux phases d'accélération. Le MNT apporte une lecture morphologique complémentaire, utile pour identifier les formes héritées et les instabilités superficielles, sans permettre à lui seul le suivi des déplacements lents. L'approche permet enfin de proposer des niveaux piézométriques seuils pour la surveillance et la gestion de l'aléa.

ABSTRACT: The upslope of the Signac promenade in Port-en-Bessin-Huppain (Calvados) is affected by recurrent gravitational instabilities typical of the marly cliffs of the Bessin coast. This study is based on an integrated approach combining geotechnical investigations, piezometric and inclinometric monitoring, and analysis of a high-resolution digital terrain model (DTM). The results highlight a large-scale landslide with slow kinematics, characteristic of deep-seated mass creep, structured by shear surfaces developed within marly and colluvial formations. Landslide activity is primarily controlled by the piezometry of the slope groundwater system, with sustained high water levels systematically associated with acceleration phases. The DTM provides complementary morphological insight, particularly for identifying inherited landforms and shallow instabilities, but is insufficient on its own to monitor slow displacements. The integrated analysis allows the definition of piezometric threshold levels for hazard monitoring and management.

Mots-clés: Glissement en grand ; Versant marneux ; Piézométrie ; Instrumentation géotechnique ; Modèle numérique de terrain.

1 INTRODUCTION

Le littoral du Bessin présente une forte récurrence de mouvements de terrain, liée à l'alternance de formations marneuses et calcaires et à la sensibilité des sols fins aux variations de la saturation et des niveaux de nappes (Maquaire, 1990, BRGM 2005). Les mécanismes observés associent glissements rotationnels, glissements superficiels et éboulements, avec une activité souvent saisonnière, pilotée par la recharge des aquifères et les précipitations.

Le versant amont de la promenade Signac (Port-en-Bessin-Huppain) illustre ce contexte. La falaise y présente une hauteur variable (≈ 60 m à l'ouest, ≈ 40 m vers l'est) et une morphologie irrégulière marquée par des formes héritées (replats déformés, contre-pentes, niches d'arrachement). L'activité actuelle se

traduit notamment par des arrivées récurrentes d'éboulis et de matériaux remaniés sur la promenade. Des désordres affectant le bâti, en particulier une habitation située à mi-hauteur sur le versant, confirment une instabilité active à l'échelle du versant.

Cette contribution propose une analyse intégrée du fonctionnement du versant, fondée sur les investigations géotechniques et l'instrumentation (piézométrie et inclinométrie), complétées par une lecture morphologique à partir d'un modèle numérique terrestre (MNT) issu de données Lidar. L'objectif est de préciser la structuration et la cinématique des instabilités. L'article discute aussi l'intérêt d'une approche opérationnelle par niveaux seuils piézométriques pour la gestion de l'aléa.

2 CADRE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Le secteur s'inscrit dans les falaises jurassiques du Bessin, où l'érosion marine agit principalement comme facteur de déblaiement au pied, tandis que la dynamique des versants est dominée par les instabilités gravitaires (Maquaire, 1990). Ici le secteur d'étude est protégé en pied par la promenade (figures 1 et 2).



Figure 1. Vue aérienne de la zone d'étude

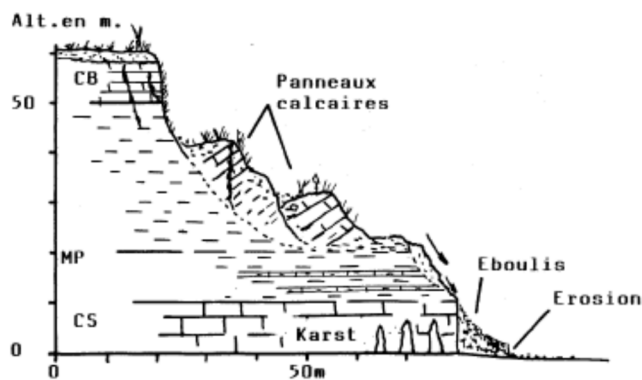


Figure 2. Profil type de la falaise (Maquaire, 1990)

2.1 Contexte géologique

D'après la carte BRGM (1/50 000, feuille Grandcamp-Maisy), le versant recoupe, de haut en bas :

- les calcaires bathoniens de Saint-Pierre-du-Mont formant une corniche compétente,
- les Marnes de Port-en-Bessin (Bathonien), unité clé du point de vue des instabilités, structurée en membres de résistance contrastée,
- puis les calcaires à spongiaires du Bajocien, massifs, fracturés et karstifiés, constituant une assise rigide qui arme le pied et participe peu au mouvement.

La proximité de structures tectoniques (orientation ONO–ESE) suggère une fracturation secondaire susceptible d'influencer localement l'altération et les circulations.

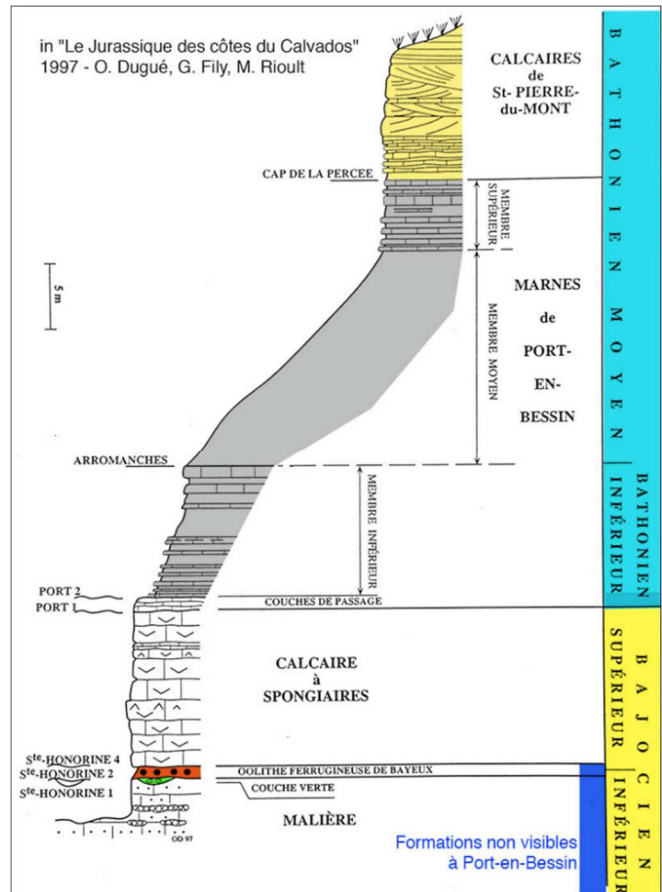


Figure 3. Coupe géologique synthétique du secteur (Dugué et al., 1997)

2.2 Contexte hydrogéologique

Le versant présente une superposition d'unités aquifères. Une nappe libre dans les calcaires bathoniens (plateau/corniche) contribue à alimenter une nappe d'écoulement de versant installée dans les formations fines remaniées et/ou colluvionnées, généralement calée au toit de niveaux plus compétents.

Les circulations sont renforcées par l'infiltration et le ruissellement concentré le long d'axes préférentiels, possiblement guidés par des structures héritées (surfaces de rupture, hétérogénéités).

En pied, les calcaires bajociens renferment une nappe karstique dont l'exutoire se situe au pied de falaise, sur l'estran/plage, avec résurgences. Cette unité fait partie de l'architecture hydrogéologique du site mais n'apparaît pas déterminante dans les mécanismes d'instabilités mis en évidence ici. Rappelons tout de même que lorsque ces calcaires se situent sous le niveau de l'estran, une charge importante peut s'y développer (Maquaire, 1984).

2.3 Organisation géomorphologique

La morphologie traduit une histoire longue d'instabilités : replats déformés, contre-pentes et blocs basculés dominent au sein du membre marneux le plus

sensible. Les instabilités se développent surtout à l'amont ; les formations calcaires et marno-calcaires plus compétentes limitent l'enracinement profond, mais les matériaux mobilisés sont régulièrement transférés vers l'aval sous forme d'éboulis et de coulées atteignant la promenade. L'ensemble est cohérent avec les modèles régionaux de versants marneux évoluant par réactivations successives et dégradations progressives (Maquaire, 1984).

3 DONNEES GEOTECHNIQUES – SONDAGES ET ESSAIS DE LABORATOIRE

3.1 Synthèse du programme d'investigation

Plusieurs campagnes ont combiné forages destructifs avec essais pressiométriques, carottages continus et forages instrumentés. Les profondeurs investiguées (≈ 10 à 30 m) permettent de caractériser les formations superficielles remaniées et les horizons plus compétents sous-jacents. Les essais de laboratoire (identification et quelques essais mécaniques) sont mobilisés ici pour qualifier la nature des matériaux, leur variabilité et leur classification GTR.

3.2 Stratigraphie synthétique

Les résultats indiquent une organisation verticalement reproductible, dominée par des sols fins plastiques, avec remaniement marqué en partie supérieure (figure 11). Les formations identifiées sur le versant sont les suivantes :

- Unité A – Formations fines remaniées (colluvions / masses glissées)

Sous la terre végétale, une unité épaisse de limons à tendance argileuse (localement sableux), avec cailloux calcaires, est recoupée sur des épaisseurs pouvant dépasser 10 à 20 m. Les identifications indiquent majoritairement des sols fins plastiques (classes GTR A2 à A3, localement A4), avec hétérogénéités et teneurs en eau élevées. Les résultats pressiométriques traduisent une compacité faible à moyenne, globalement croissante avec la profondeur.

- Unité B – Marnes en place (Port-en-Bessin)

Des niveaux marneux/marno-calcaires en place sont rencontrés plus en profondeur ou à l'écart des zones remaniées. Ils présentent un comportement d'argiles marneuses à forte plasticité (GTR A3–A4 dans les séquences meubles), compatible avec des résistances très dépendantes du degré de saturation.

- Unité C – Horizon marno-calcaire plus compétent (Bathonien inférieur)

Une unité plus résistante apparaît localement, avec une réponse pressiométrique très élevée (localement rocheuse) et des teneurs en eau plus faibles.

- Unité D – Substratum calcaire (calcaires à spongiaires, Bajocien)

En profondeur, les calcaires à spongiaires présentent un caractère rocheux marqué (valeurs pressiométriques élevées). La variabilité du toit entre sondages suggère une structuration locale (fracturation/failles).

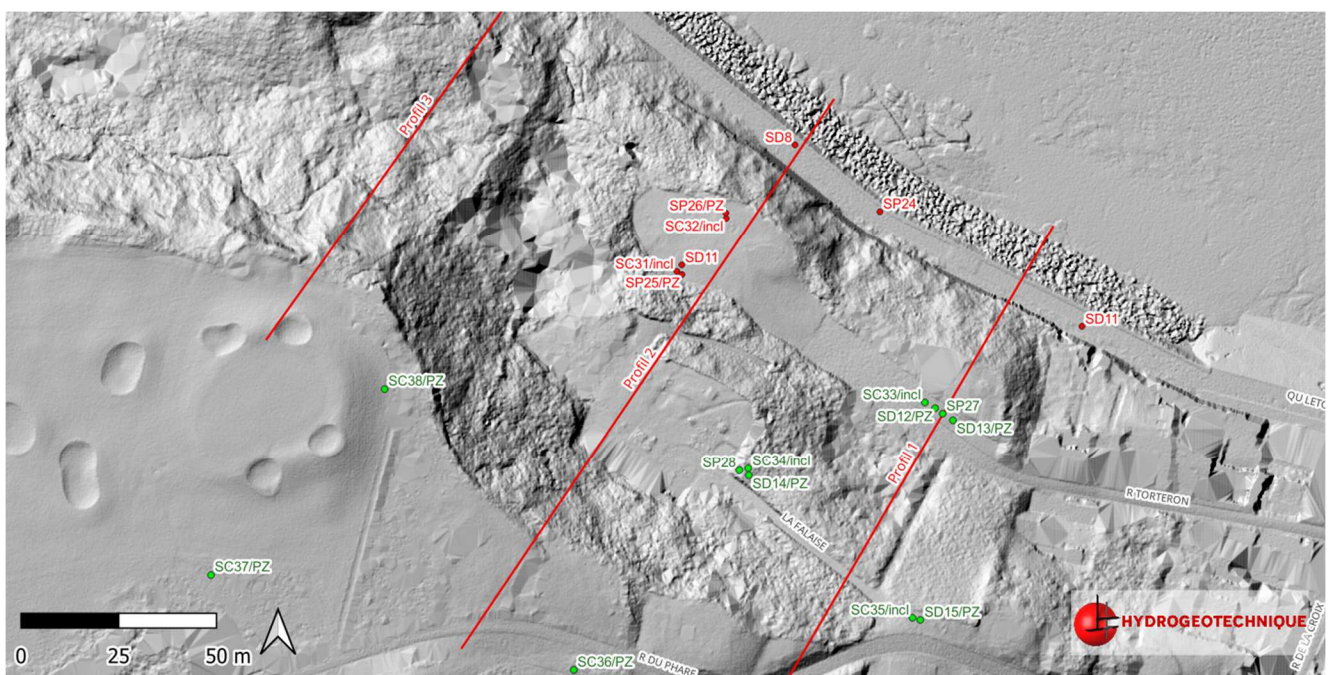


Figure 4. MNT avec implantation des sondages/profils

3.3 Points clés pour la stabilité

Le versant est dominé par des sols fins plastiques (A2 à A4) sur de fortes épaisseurs, reposant sur des horizons plus compétents. Ce contraste, associé à la présence de niveaux marneux sensibles, fournit un cadre favorable au développement de surfaces de cisaillement et à une cinématique de glissement lent, en cohérence avec les contextes marneux du Bessin.

4 MODÈLE NUMÉRIQUE TERRESTRE (MNT)

4.1 Objectifs

Le MNT est utilisé comme outil de lecture morphologique et de spatialisation : localisation des formes héritées, extraction de profils topographiques et appui à l'interprétation des observations de terrain et des mesures instrumentales (figure 4). Il ne vise pas la quantification fine de la cinématique des glissements lents à l'échelle du versant, mais constitue un support d'analyse morpho-structurale pertinent lorsqu'il est couplé à des observations de terrain et à des données instrumentales (Lissak et al., 2014). On accède ainsi à des données de topographie dans des secteurs inaccessibles pour un géomètre classique.

4.2 Données et élaboration

Plusieurs jeux de données LIDAR couvrent le secteur d'étude, issus du programme national LIDAR HD de l'IGN et du programme de suivi du littoral Manche-est – Mer du Nord du réseau régional d'observation du littoral. Les acquisitions (2016–2022) présentent des

densités de 8 à >10 points/m² et des précisions altimétriques de l'ordre de quelques centimètres à une dizaine de centimètres selon les campagnes.

4.3 Comparaison multi-temporelle : apports et précautions

La comparaison 2020–2022 met en évidence des évolutions localisées (variations > ±0,30 m) cohérentes avec des glissements superficiels, loupes et zones de dépôt, en particulier dans les secteurs dégagés et au droit de la promenade (figure 5). Dans les secteurs végétalisés, l'interprétation reste plus incertaine du fait des différences de précision et de traitement des nuages de points. Nous avons ici soustrait les cotes NGF de 2020 aux cotes de 2022 de manière à cartographier les différences sensibles altimétriques. Sur la figure 5, on voit apparaître en bleu les hausses altimétriques pouvant traduire des bourrelets en gonflement ou des nouveaux dépôts (figure 6) et en rouge les zones en déficit.



Figure 6. Exemple de zone mise en évidence (zone A)

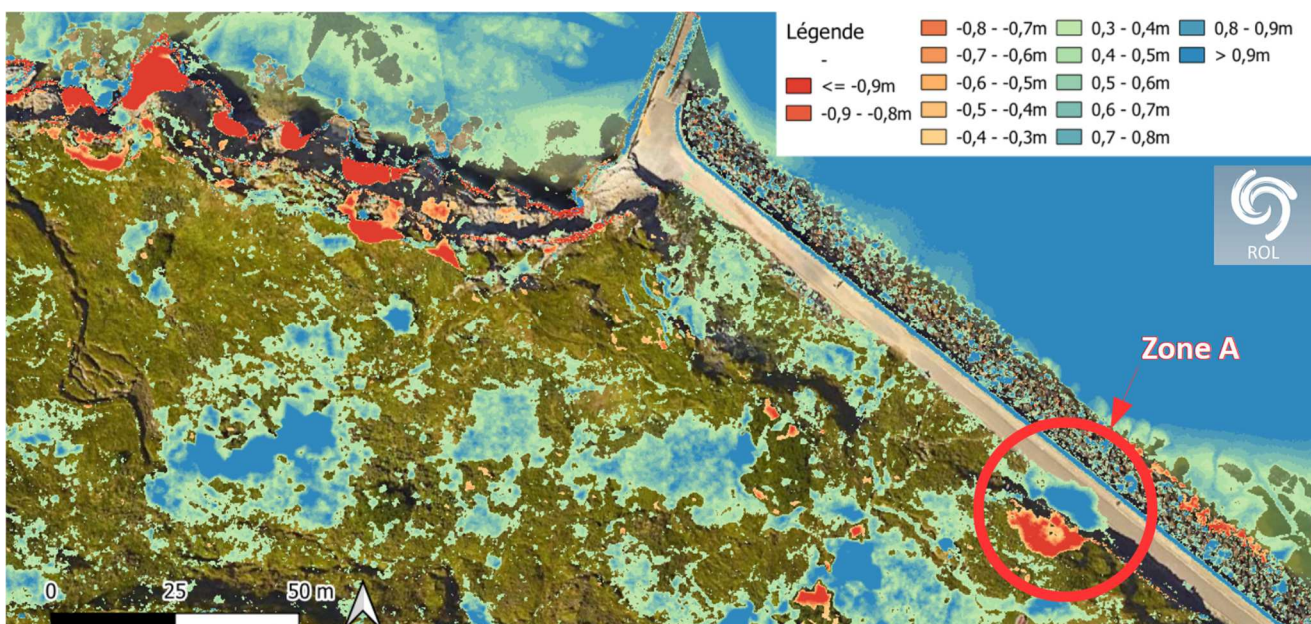


Figure 5. Plan des zones évolutives en altimétrie

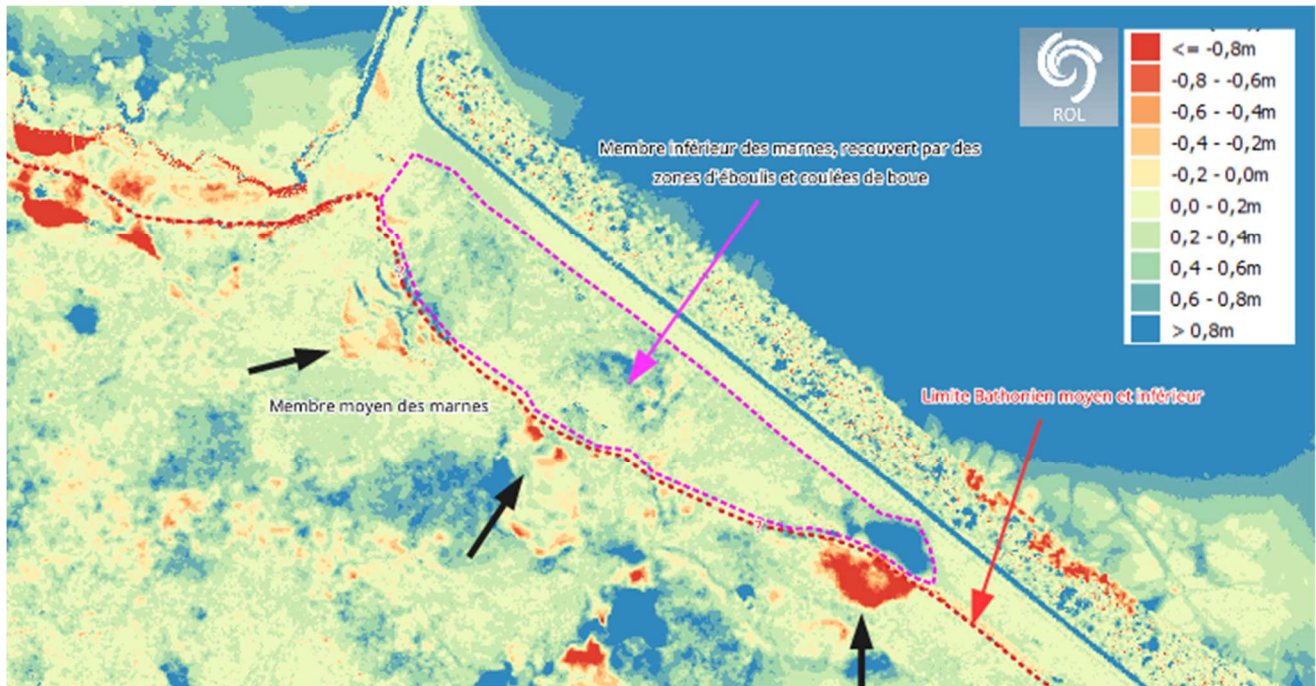


Figure 7. Exemple de détection de limite géomorphologique

La figure 7 illustre un autre exemple de détection différentielle obtenue par analyse multitemporelle entre deux ensembles lithostratigraphiques majeurs : le membre moyen des marnes de Port-en-Bessin et les marnes inférieures, localement masquées par des formations d'éboullis. En ajustant les paramètres de sensibilité, des contrastes spatiaux cohérents apparaissent, mettant en évidence à l'amont des zones de départ de matériaux et de bourrelets caractéristiques d'une mécanique de glissement, tandis qu'à l'aval dominant des zones d'accumulation et d'engraissement. Cette organisation spatiale renforce l'interprétation d'un fonctionnement gravitaire structuré par la limite lithologique, soulignant le rôle de celle-ci comme surface préférentielle de rupture et de redistribution des matériaux.

4.4 Synthèse

À l'échelle du site, le MNT est robuste pour établir une géométrie topographique cohérente, et repérer des phénomènes superficiels sur secteurs dégagés. Il permet notamment la construction du modèle géotechnique (figure 11). Les comparaisons multitemporelles, mettent en évidence des contrastes cohérents entre zones d'érosion et d'accumulation, traduisant un fonctionnement gravitaire contrôlé par les limites lithologiques, notamment à l'interface entre le membre moyen et les marnes inférieures recouvertes d'éboullis. En revanche, il ne permet pas, à ce stade, de suivre de manière fiable la cinématique d'un glissement en grand, dont les déplacements restent

faibles et diffus par rapport aux incertitudes cumulées. Seules des comparaisons à dates plus éloignées permettraient éventuellement de mettre en évidence des mouvements de fluage.

5 INSTRUMENTATION : PIÉZOMÉTRIE ET INCLINOMÉTRIE

5.1 Organisation

Le dispositif associe piézomètres sélectifs répartis de la corniche au pied de versant et inclinomètres implantés dans la zone instable, afin de relier évolution des niveaux de nappes et activité du mouvement.

5.2 Piézométrie : organisation et ordres de grandeur

Les mesures mettent en évidence une nappe libre en tête (calcaires bathoniens) alimentant une nappe d'écoulement de versant dans les formations fines remaniées, avec des niveaux très hauts en période défavorable (parfois à moins de 2 m sous la surface). En pied, l'aquifère calcaire karstifié présente un exutoire sur la plage/estran.

Les enregistrements automatiques ou manuels illustrent des comportements contrastés : dans le calcaire fracturé/karstifié, des variations rapides liées au marnage (aquifère réactif) ; dans la nappe d'écoulement de versant, des variations saisonnières plus progressives, compatibles avec des matériaux fins à dissipation lente.

5.3 Inclinométrie : surfaces de cisaillement et cinématique

Les inclinomètres révèlent des surfaces de cisaillement continues au contact entre formations remaniées et horizons plus compétents. La profondeur des plans varie selon les secteurs, entre $\approx 9\text{--}10\text{ m}$ et $\approx 19\text{ m}$, indiquant une masse instable épaisse et une géométrie complexe du glissement. La cinématique est lente, cumulative, avec épisodes d'accélération et phases de stabilisation relative (figure 8), pour des amplitudes allant de quelques millimètres à quelques centimètres.

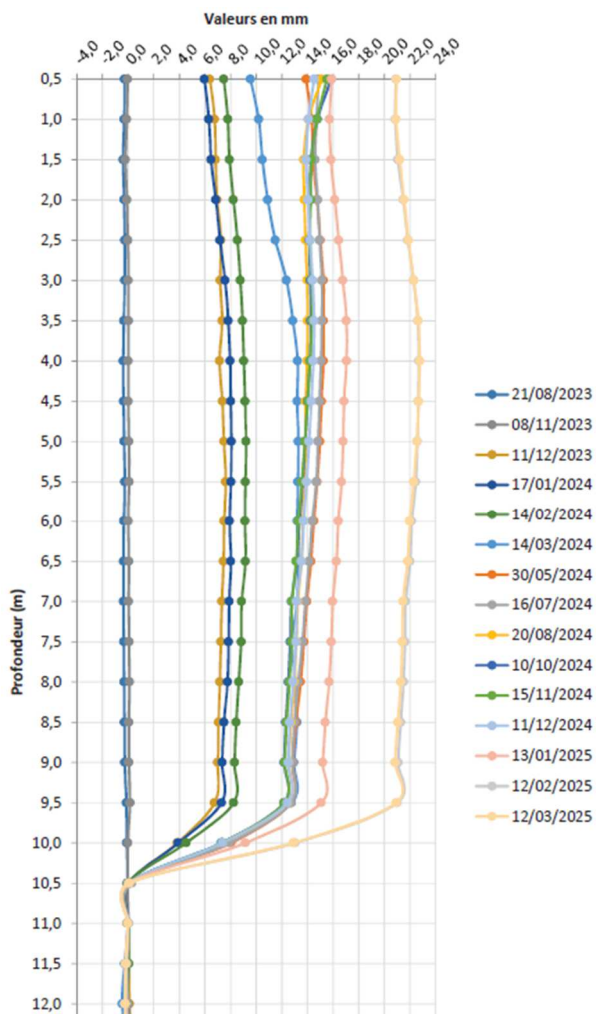


Figure 8. Exemple de déformations inclinométriques (déplacement cumulé)

5.4 Lecture croisée

La lecture croisée met en évidence un lien net entre niveaux piézométriques élevés dans la nappe d'écoulement de versant et activation du glissement en grand. Les observations disponibles suggèrent un contrôle principalement saisonnier, par maintien de niveaux hauts en période défavorable. L'interprétation fonctionnelle et les niveaux seuils sont développés au chapitre suivant.

5.5 Limites

Le caractère ponctuel des ouvrages et la durée de suivi imposent prudence et consolidation. La valeur du dispositif tient à son intégration avec la stratigraphie (chap. 3) et la lecture morphologique (chap. 4).

6 INTERPRETATION INTEGREE : FONCTIONNEMENT DU VERSANT ET NIVEAUX SEUILS

L'analyse intégrée indique un fonctionnement dominé par un glissement en grand structuré, superposé à des instabilités superficielles récurrentes. Le contrôle principal identifié pour le glissement en grand est la piézométrie de la nappe d'écoulement de versant dans les formations remaniées.

6.1 Typologie des instabilités

Deux niveaux d'instabilité coexistent :

- Glissement en grand : fluage de masse lent, actif à l'échelle du versant, avec accélérations lors de situations piézométriques défavorables.
- Instabilités superficielles : glissements peu profonds et coulées boueuses à fortes cinématiques, favorisés par ruissellement, résurgences et pentes localement trop raides, pouvant atteindre la promenade.

6.2 Géométrie et zones de cisaillement

Le glissement en grand mobilise les formations situées au-dessus des horizons marno-calcaires plus compétents. Les surfaces de cisaillement identifiées se situent à la base des matériaux remaniés, avec des profondeurs variables ($\approx 10\text{ m}$ à $\approx 19\text{ m}$), compatibles avec un enracinement amont proche de la corniche (figure 11).

6.3 Rôle déterminant de la piézométrie

Les phases d'activité du glissement apparaissent étroitement corrélées aux niveaux élevés de la nappe d'écoulement de versant, eux-mêmes conditionnés par les précipitations. Celles-ci interviennent principalement par un mécanisme de recharge progressive des aquifères, via les cumuls pluviométriques sur une ou plusieurs décades, favorisant le maintien de niveaux piézométriques durablement hauts. La figure 9 met en évidence cette relation entre la dynamique piézométrique des colluvions et les précipitations, soulignant l'intérêt d'un suivi croisé pluie-nappe comme base d'une

approche prédictive visant à anticiper les phases de réactivation des glissements en grand.

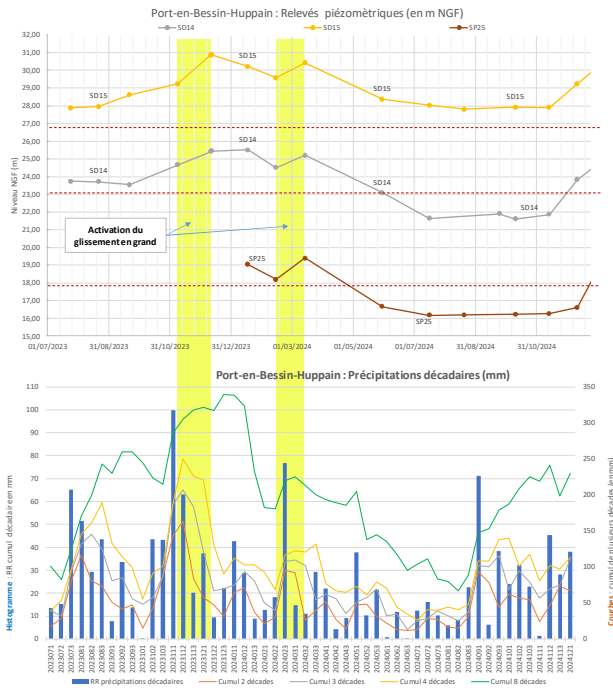


Figure 9. Chroniques piézométriques et précipitations décennales (phases d'activation du glissement en jaune)

6.4 Apport du MNT à l'interprétation

Le MNT apporte principalement : une lecture morphologique cohérente (formes héritées structurantes), une capacité à repérer des phénomènes superficiels et des évolutions sur zones dégagées (promenade/ouvrages). A cela s'ajoute l'accès à des données topographiques dans des zones inaccessibles et avec une précision tout à fait acceptable. En revanche, il reste insuffisant pour suivre de façon robuste un glissement en grand lent, du fait des incertitudes liées aux acquisitions/traitements et à la végétation. Son intérêt est donc complémentaire de l'instrumentation.

6.5 Vers des niveaux seuils piézométriques

La confrontation entre séries piézométriques, déplacements et observations a permis d'identifier des niveaux piézométriques caractéristiques associés aux phases d'activation. Cette base autorise une approche opérationnelle par classes de vigilance, destinée à anticiper les périodes à risque et à structurer la surveillance.

7 DISCUSSION ET IMPLICATIONS POUR LA GESTION DU VERSANT

L'ensemble des résultats met en évidence un fonctionnement du versant structuré par un glissement en grand, qui contrôle l'état mécanique global, tandis que des instabilités superficielles traduisent des réajustements localisés susceptibles d'affecter la promenade.

Le MNT apporte une lecture géométrique utile du versant et permet d'identifier des signatures superficielles, mais il ne se substitue pas à une surveillance instrumentée pour caractériser un mouvement lent et diffus.

L'analyse s'appuie ainsi principalement sur des indicateurs hydrogéologiques et climatiques afin de définir des niveaux seuils à visée opérationnelle (figure 10). La piézométrie in situ apparaît comme l'indicateur le plus pertinent pour qualifier l'état de vigilance du glissement en grand, complétée par l'exploitation de piézomètres régionaux (banque ADES) et par l'analyse des cumuls pluviométriques. Ces indicateurs ont été confrontés aux événements de l'hiver 2024–2025, période marquée par l'apparition de glissements et de désordres en cohérence avec les niveaux atteints. Le glissement affectant le secteur de la tour Vauban, situé sur le versant opposé du port mais dans un contexte similaire, renforce l'hypothèse de mécanismes communs et de seuils de fonctionnement analogues. Cette approche par seuils constitue ainsi une base opérationnelle pour le suivi et la gestion de l'aléa, sous réserve d'une consolidation par un suivi à long terme.

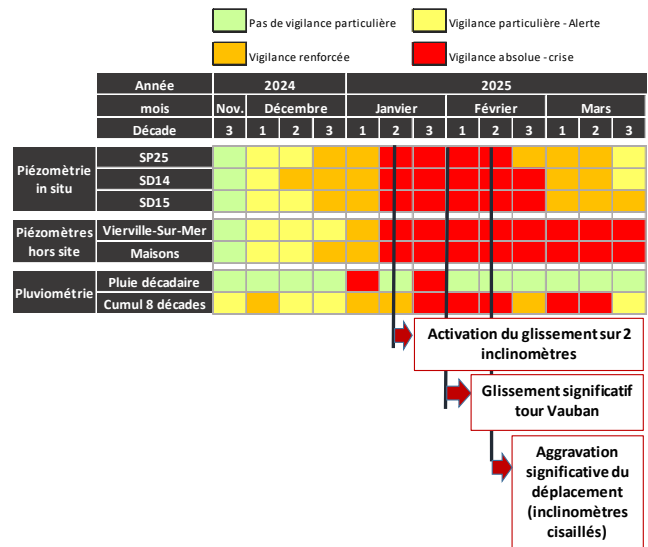


Figure 10. Evolution des indicateurs et lien avec les observations de terrains

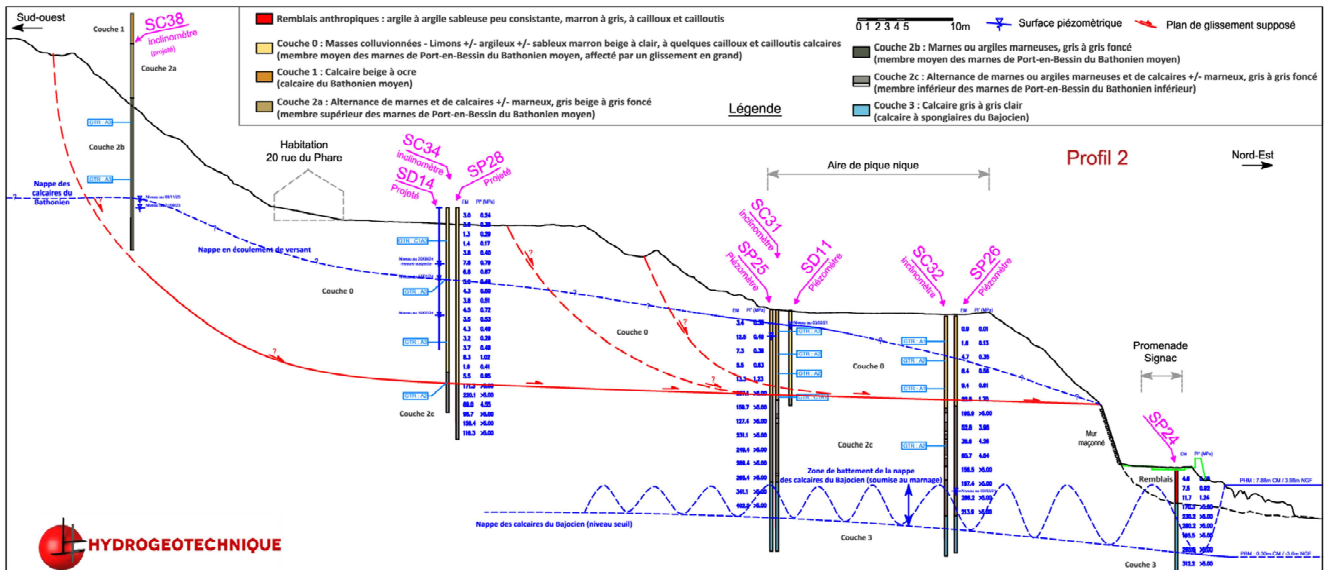


Figure 11. Profil géotechnique synthétique, topographie issue des données MNT

analyse morphologique pour la compréhension et la gestion opérationnelle des instabilités lentes en contexte littoral marneux.

8 CONCLUSIONS

Le versant amont de la promenade Signac est dominé par un glissement en grand à cinématique lente (fluage de masse), sur lequel se superposent des instabilités superficielles récurrentes susceptibles d'affecter la promenade. Les investigations mettent en évidence une forte épaisseur de formations fines plastiques et remaniées reposant sur des horizons plus compétents ; les inclinomètres révèlent des surfaces de cisaillement continues à des profondeurs variables (≈ 10 à ≈ 19 m).

Le résultat central réside dans l'identification d'un contrôle piézométrique du glissement en grand : les phases d'activité sont associées à des niveaux élevés et durables de la nappe d'écoulement de versant développée dans les formations colluvionnées et remaniées. Dans ce contexte, une approche par niveaux seuils piézométriques constitue un outil pertinent pour la surveillance et l'anticipation des périodes à risque, sous réserve d'une consolidation par un suivi prolongé. Les travaux futurs viseront à développer un modèle de type réservoir afin de relier plus directement les cumuls pluviométriques aux niveaux piézométriques ; à ce stade, la durée du suivi reste insuffisante pour établir une relation robuste, bien qu'un lien clair entre ces grandeurs soit déjà observé.

Le MNT contribue à la lecture morphologique et à l'identification de phénomènes superficiels sur les zones dégagées, mais ne permet pas, à lui seul, le suivi fiable d'un glissement lent à l'échelle du versant. L'étude souligne ainsi l'intérêt d'une démarche intégrée combinant géotechnique, instrumentation et

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil départemental du Calvados et la Mairie de Port-en-Bessin–Huppain pour leur soutien, ainsi que les producteurs des données LiDAR utilisées dans cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRGM (2005). Inventaire préliminaire des mouvements de terrain du département du Calvados (Basse-Normandie), Rapport final BRGM/RP-54388-FR, Orléans, France, 148 p. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54388-FR.pdf>,
- Dugué, O., Fily, G., Riout, M (1997), Le Jurassique des côtes du Calvados.
- Lissak, C., Maquaire, O., Malet, J.-P., Bitri, A., Samyn, K., Grandjean, G., Bourdeau, C., Reiffsteck, P., Davidson, R. (2014). Airborne and ground-based data sources for characterizing the morpho-structure of a coastal landslide, *Geomorphology*, 217, pp. 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.019>
- Maquaire, O. (1990). Les mouvements de terrain de la côte du Calvados : recherche et prévention, Thèse de doctorat, Université de Caen, France.
- Maquaire, O. (1984). Etude du glissement du Bouffay (5 Août 1981) : réflexions en vue de la prévision et de la prévention.