

Confortement de la falaise de Villerville face aux phénomènes d'érosion régressive.

Strengthening of the Villerville cliff against regressive erosion phenomena

Robin Retoux¹, Christophe Javersac², Benoit Desamais³

¹ NGE Fondations, Servon-sur-Vilaine, France

² NGE Fondations, Brie-Comte-Robert, France

³ NGE Fondations, Saint-Priest, France

RÉSUMÉ – Afin de répondre aux enjeux associés au processus d'érosion régressive sur la falaise de Villerville (14), des travaux de confortement ont été confiés à NGE FONDATIONS pour stabiliser la paroi et mettre en sécurité les habitations en tête d'une part et la promenade en pied de falaise d'autre part. Cette sécurisation a été réalisée par le confinement des terrains en place et un clouage en profondeur de l'ensemble de la falaise.

ABSTRACT – In order to address the challenges associated with the regressive erosion process on the Villerville cliff (14), reinforcement works were entrusted to NGE FONDATIONS to stabilize the slope and ensure the safety of the residences at the top and the cliffside promenade at the bottom. This securing was achieved through the containment of existing soils and deep anchoring of the cliff.

1. Introduction

Villerville est un village perché sur une falaise le long la côte Fleurie en Normandie. Les études approfondies menées par la mairie sur l'érosion de cette falaise ont conduit à un projet d'envergure visant à renforcer et protéger la falaise contre les phénomènes érosifs.

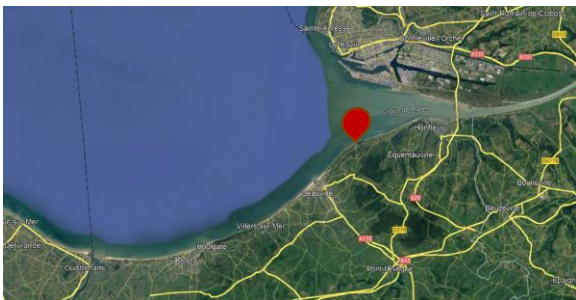


Figure 1 : localisation du projet



Figure 2 : Vue satellite de la falaise avant travaux

L'objectif principal de ce projet consiste à renforcer la falaise, en se concentrant particulièrement sur les risques de glissements de terrain de moyenne ampleur. Simultanément, le projet cherche à mettre en place des mesures de protection contre l'érosion météorique et marine, assurant ainsi la stabilité à long terme de la falaise. L'ensemble de ces travaux permettent la protection des habitations de la commune situées sur la falaise.



Figure 3 : Vue globale de la falaise depuis la plage

La solution technique retenue par le concepteur est la réalisation d'un parement béton projeté armé cloué sur l'ensemble de la surface « naturelle » et un clouage de renfort au droit des murs de soutènements existants.

Un ensemble de clous autoforés, comprenant les types R38-500 et R51-800, a été installés sur 3 à 7 niveaux pour sécuriser la falaise, ses habitations, et le futur itinéraire piéton en contrebas. Ces clous, varient en longueur de 7 à 18 m, avec un espacement compris entre 1.5 et 2.5 m. Au total, plus de 700 clous ont été implantés, totalisant plus de 11 km linéaires, avec un poids total d'armature de 110 tonnes. La gestion des eaux, cruciale pour la stabilité de la falaise, a été abordée par l'instauration d'un système de drainage à l'aide d'un enkadrain, ainsi que la création d'un réseau étendu de drains de 5 à 10 m. En tout, 3.5 km de drains ont été installés pour assurer un écoulement des eaux météoriques adéquat. L'ensemble de ces travaux a été mené à bien sur une période de 12 mois.



Figure 4 : Réalisation des clous et drains au cours du chantier

2. Contexte géologique de l'étude

Les terrains constituant la falaise se composent d'argiles à bloc, dérivées de l'altération des craies à silex, parfois désignées sous le terme de poudingues, mais spécifiquement qualifiées de "Heads" dans le cadre de ce projet. Quant au substratum, il est constitué des Argiles de Villerville (argiles marneuses imperméables).

Le versant côtier auquel appartient Villerville est un versant de forte pente, présentant des sections sous escarpées avec des nombreux gradins et surface bosselées. Cette topographie particulière engendre diverses instabilités et glissements, surtout en période de fortes pluies. Ces phénomènes sont répandus le long de la côte de Fleurie et résultent principalement de circulations d'eau chaotiques dans les formations superficielles, notamment les Heads. La falaise de Villerville est exposée à ces types de phénomènes, en

plus de subir une érosion naturelle causée par la lixiviation du terrain due à la pluie et à l'action de la mer.

3. Choix des techniques

3.1. Parement

Pour la même raison qui nous a conduit à travailler avec un relevé scanner, nous avons dû adapter nos méthodes et nos matériaux pour la réalisation du parement.

L'irrégularité du support nous a orienté vers l'utilisation d'un béton projeté fibré « structurel », avec l'utilisation de fibres métalliques lorsqu'un ferrailage structurel double nappe de treillis, courant à ce type d'ouvrage, ne permettait pas de suivre le support. Dans ce cas, les renforts de ferrailage en tête d'ancrage étant conservés pour assurer une bonne diffusion des efforts dans le parement fibré.

Cette technique nous oblige à réaliser une couche et finition non-fibrée ayant pour but d'isoler les fibres du point de vue de la corrosion. Cette évolution technique du projet implique en particulier :

- La réalisation d'un programme de convenance du béton fibré nous permettant de confirmer le dosage en fibres et qualifier notre fournisseur de béton.
- Le choix et l'investissement dans un matériel de projection adapté à un béton fibré, surtout au niveau du convoyage de ce dernier sur plusieurs centaines de mètres depuis la zone d'installation déportée.

3.2. Ancrages

Le choix de la méthode de forage sur Villerville s'est rapidement orientée vers la technique de l'auto-forant. En effet, la lecture des différents rapports de sol utiles à l'aboutissement du projet nous a conforté dans la possibilité de travailler en auto-forant plutôt qu'en foré/tubé au regard des profondeurs prévues. Les matériaux qui constituent la falaise ont une matrice plutôt fine qui se prête très bien à un outil perdu. Les essais de différentes techniques lors de la campagne d'essais d'ancrages nous l'ont confirmé.

4. Une approche innovante : réalisation d'un Scan 3D de la falaise

4.1. Relevé de terrain

La forme de la falaise devant rester fidèle à sa forme initiale (avant travaux), nous ne pouvons pas travailler avec des surfaces planes ou un rendu orthogonal à un axe. Le traitement du futur parement doit donc se faire en 3 dimensions. Pour cela, nous réalisons un relevé type scanner (balayage laser) à l'aide de 2 dispositifs différents :

- Station totale sur trépied depuis le bas de la falaise pour la partie 2/3 basse et élévation en contre-plongée.
- Drone en survol pour capter le 1/3 haut de la falaise ainsi que ses irrégularités en plongée.

4.2. Traitement et exploitation du relevé

Le nuage de point issu du balayage scanner est traité par un logiciel spécifique, Cyclone 3DR développé par LEICA, dans notre cas. Ce traitement nous permet de matérialiser notre support de parement afin d'identifier nos profils défavorables dans un premier temps et de dessiner notre ouvrage de confortement à la suite du dimensionnement.

Dans le cas de la falaise de Villerville, nous avons eu aussi recourt à un logiciel graphique plus classique (Mensura) pour toutes les zones singulières avec des ouvrages génie civil intégrés à la falaise.

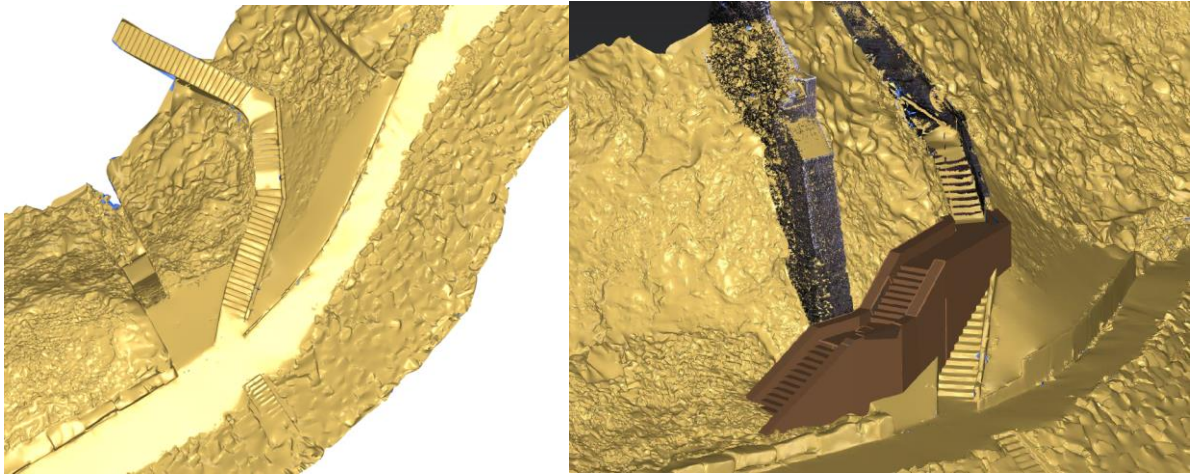


Figure 5 : traitement des données topographique (cyclone) et intégration de l'escalier par mensura)

5. Sécurisation du dimensionnement

5.1. Essais de clou

Une vaste campagne d'essais de clous a été déployée pour évaluer le frottement des clous sur le terrain et déterminer le type de clou le plus approprié pour le forage dans ces terrains hétérogènes. Au total, 47 essais de clous ont été menés jusqu'à la rupture, comprenant 21 essais sur des clous autoforés et 26 sur des clous forés selon la technique traditionnelle (Clous Gewi en injection gravitaire).

L'analyse approfondie de ces essais a permis de définir avec précision les différentes zones du projet et d'ajuster les paramètres de résistance (q_s) en fonction des conditions réelles du terrain dans chaque zone. Ces essais ont révélé de manière particulière l'hétérogénéité des terrains, attribuable à la présence de passes blocailleux au sein des Heads.

5.2. Des essais complexes au service de l'ouvrage

Pour le parement, les fibres utilisées (Beckaert Dramix 3D 65/35GG), dosées à 40 kg/m³, ont été soumises à des essais en laboratoire afin de vérifier leur résistance au moment. Deux types d'essais ont été réalisés pour valider l'approche adoptée conformément au code FIB 2010 : les essais d'absorption d'énergie et les essais de flexion sur trois points. Cet essai, conforme à la norme NF EN 14488-5, sert à évaluer la capacité d'absorption d'énergie des matériaux testés. Il s'agit d'un essai sur appui continu conçu pour comparer les performances des bétons projetés renforcés par des fibres et/ou des treillis soudés. La procédure consiste à appliquer une charge de poinçonnement centrée sur une "dalle éprouvette" jusqu'à ce qu'une flèche de 30 mm soit atteinte. L'énergie absorbée, mesurée sous la courbe charge/flèche de 0 à 25 mm de déplacement, est ensuite calculée. Cet essai permet également de caractériser le comportement du béton jusqu'à sa rupture.

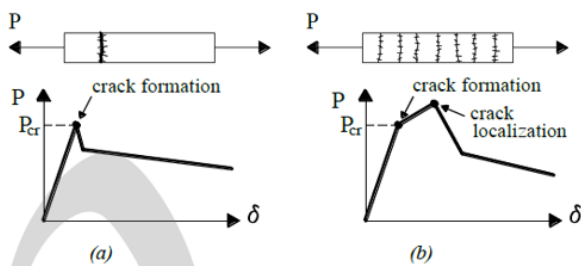


Figure 6 : (a) Comportement écrouissant (b) comportement adoucissant (softening)

L'ensemble des essais réalisés dans le cadre de ce chantier vérifient les conditions d'application du code FIB2010 avec un comportement adoucissant.



Figure 7 : type de rupture observées lors des essais absorption

Onze essais de résistance à la flexion ont été réalisés selon la norme EN 14651 « méthode d'essai du béton de fibres métalliques – mesure de la résistance à la traction (limite de proportionnalité (LOP) et résistance résiduelle. Dans cet essai, le comportement en traction par flexion du béton de fibres métalliques est évalué en appliquant une charge ponctuelle centrée sur un prisme entaillé simplement appuyé. Cet essai conduit à l'établissement d'une courbe de chargement permettant d'observer le comportement post fissuration du béton fibré.

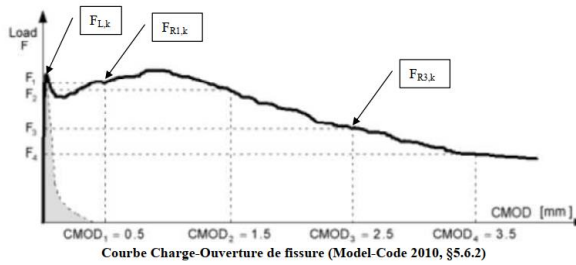


Figure 8 : courbe théorique de la fissuration

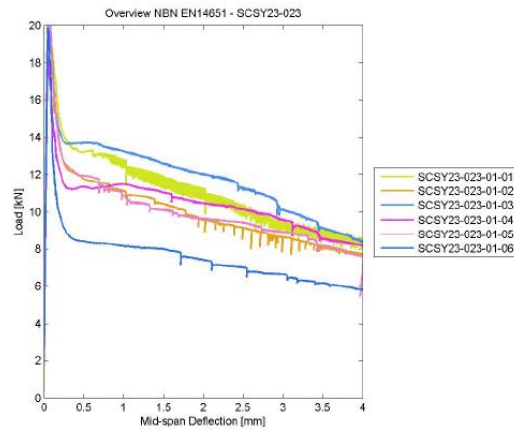


Figure 9 : essais réalisés sur les éprouvettes de béton fibré de villerville

Le comportement des éprouvettes montre bien un pic de rupture de l'échantillons suivie par un ensemble de ruptures plus faibles correspondant au comportement post fissuration du béton

Echantillon	$f_{r3,k}$ [N/mm ²]	f_{r3} [N/mm ²]	f_{tdu} [N/mm ²]
SCSY23-023-1	3.3	1.98	0.66
SCSY23-023-2	3.0	1.8	0.6
SCSY23-023-3	3.7	2.22	0.74
SCSY23-023-4	3.3	1.98	0.66
SCSY23-023-5	3.0	1.8	0.6
SCSY23-023-6	2.3	1.38	0.46
Moyenne			

La méthodologie adoptée pour la réalisation des essais a permis de travailler avec des moments résistants directement dérivés des essais de flexion, correspondant de manière précise à la méthode de production du béton fibré.

6. Modélisation et dimensionnement de la falaise

Le clouage systématique de la falaise a été étudié par le bureau d'études techniques interne NGE FONDATIONS. Un travail conséquent de graphisme et de conception a été réalisé par les méthodes en confortement NGE FONDATIONS.

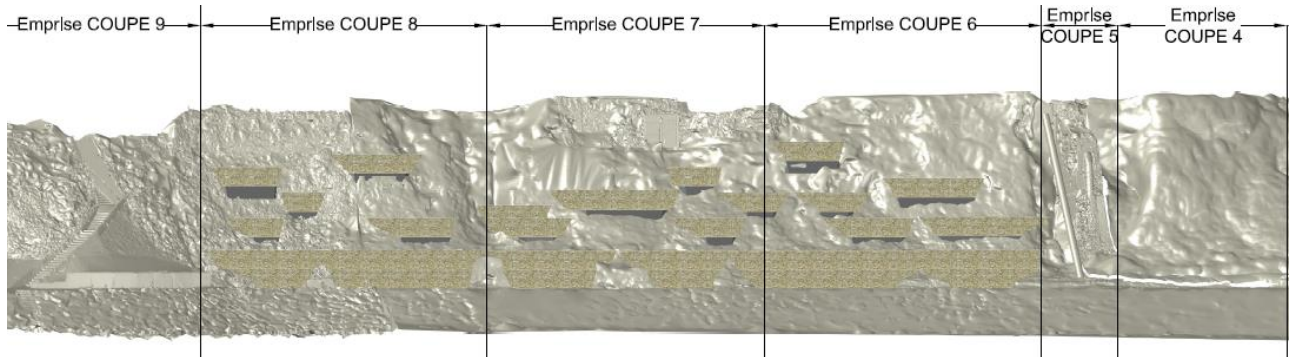


Figure 10 : reconception de l'escalier du Guettoir à l'aide des scans 3D réalisé sur la zone

7. Des matériels et des dispositifs spécifiques

La particularité des travaux de la falaise de Villerville réside dans un accès depuis le bas de l'ouvrage uniquement avec une piste élargie mais en « cul de sac » et d'une hauteur de falaise d'une vingtaine de mètres. Cette configuration nous oblige à la mise en place des dispositifs suivants :

- mise en place d'une main courante en tête de falaise pour assurer l'ancrage des opérateurs cordistes sur toute la longueur du chantier,
- intervention d'une pelle araignée en début de chantier (forages ancrages d'essais/broyage).

La mise au point d'ateliers de forages sur mesure a été nécessaire pour les ancrages en tête de falaise :

- Glissière « lourde » afin de réaliser les forages en diamètre 115mm sur 18ml de profondeur.



Figure 11 : utilisation de la pelle araignée pour la réalisation de certains forages, glissière lourde équipée sur la pelle de démolition

- Porteur lourd type pelle de démolition avec bras de 27mètres (ensemble de 71 tonnes) afin d'amener la glissière à 19 mètres de haut avec un déport de 14 mètres tout en conservant ces chenilles dans l'axe de la piste.

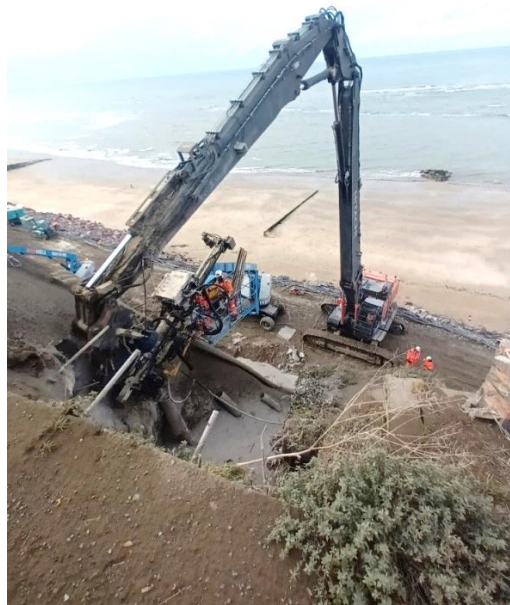


Figure 12 : Porteur lourd équipé de la glissière de forage pour atteindre les zones à plus de 13 m de la piste

8. Des ouvrages particuliers

Le dimensionnement établi a pour objectif de vérifier la stabilité générale du site mais également de conforter les différents ouvrages existants à conserver dont, en particulier, deux murs continental de 10m de hauteur ou l'escalier du Guettoir existant perché dans la falaise à réaménager.

L'escalier du Guettoir est un escalier historique dont la partie supérieure devait être conservée. Sa reconception lors du chantier a fait l'objet de calculs et modélisations complexes pour permettre à la fois la stabilisation de la zone et la mise en œuvre de l'escalier. Un contrefort maçonné, encore présent au droit de l'escalier, était un enjeu supplémentaire de stabilité notamment lors des phases chantier pour ne pas le déchausser et risquer une chute de cet élément.

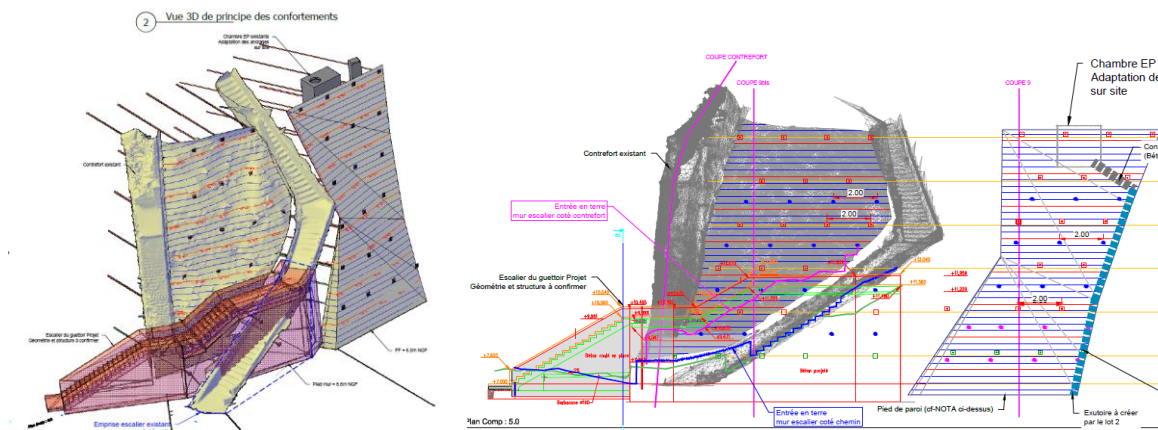


Figure 13 : vues de la modélisation 3D de l'escalier du Guettoir, totalement reconçu lors des travaux

Les murs maçonnés ont quant à eux été stabilisés par des clous mais aussi renforcés et rejointés pour maintenir la cohérence des pierres maçonnées.

9. Une insertion paysagère unique

Ce projet comprend également une dimension paysagère visant à mettre en valeur la falaise, le village de Villerville et la promenade en contrebas. Des jardinières installées en surplomb de la falaise ont été conçues pour accueillir des plantations suspendues. Une

solution technique novatrice utilisant le procédé ADOC® a été choisie pour la réalisation de ces ouvrages distinctifs.



Figure 14 : procédé ADOC® mis en place pour les jardinières

En outre, la création d'un soutènement le long du cheminement en contrebas, partageant la même conception que les écailles ADOC®, a permis de créer un ensemble harmonieux propice à la végétalisation.

L'ensemble de ces aménagements contribuera significativement à la valorisation esthétique des travaux réalisés.

Une opération de mise à découvert du ruisseau du Douet a été réalisée, remplaçant ainsi les canalisations et ouvrages maçonnés délabrés qui parcouraient la falaise. Cette mise à découvert a pour objectif de mettre en valeur ce cours d'eau local, offrant une vue dégagée sur son écoulement constant vers la mer en contrebas.



Figure 15 : Evolution du Douet (Nota : ces travaux d'aménagement notamment le fil d'eau ne sont pas terminés)

10. Conclusion

Au moment de la rédaction de cet article, les travaux de notre lot sont en phase de finalisation : pose des dernières écailles ADOC® le long du cheminement piéton en contrebas de la falaise. Une fois cette étape complétée, le lot 2, consacré à la voirie et aux réseaux, procédera à l'aménagement du cheminement piéton, tandis que le lot 3 sera responsable de l'aménagement paysager. L'achèvement global du chantier est prévu pour l'été 2024.

Les auteurs expriment leur gratitude envers la Mairie de Villerville, en particulier envers M. Marescot, ainsi qu'envers l'assistance maîtrise d'ouvrage, représentée par Mme Kresec, et l'équipe de maîtrise d'œuvre, composée de Mme Rouen et Mme Menard, pour leur disponibilité et la qualité des échanges nécessaires pour conduire à bien un tel projet et pouvoir l'adapter aux conditions réelles du site.