

# Evaluation du risque érosif et sismique au niveau de la digue de protection marine de la Duchesse Anne entre Cancale et le Mont-Saint-Michel

R.BENOT<sup>1</sup>, O.MALASSINGNE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest, Département Laboratoire de Saint-Brieuc, raphael.benot@developpement-durable.gouv.fr

## Résumé

Dans le cadre de l'opération de recherche DOFEAS, les risques érosif et sismique pouvant impacter une digue de protection marine ont été étudiés par méthodes géophysiques et géotechniques. Une digue maritime entre Cancale et Le Mont-Saint-Michel a été choisie comme site test pour mener ce projet.

Après un diagnostic général de l'ouvrage basé sur une inspection visuelle et une analyse des données historiques trois tronçons d'ouvrage ont été suivis et instrumentés entre janvier 2010 et décembre 2012.

Deux méthodes géophysiques ont été proposées pour ce projet : une méthode électromagnétique, un Slingram-EM31, et une méthode sismique basée sur la mesure des ondes de surface (MASW) complétées par des sondages géotechniques in situ et des essais en laboratoire.

Concernant le risque érosif, les premiers résultats des investigations montrent des variations de la résistivité mesurée par EM31 dans le corps de l'ouvrage pouvant être liées à une évolution structurelle du corps de digue.

Au niveau du risque sismique, les mesures en ondes de surface corrélées par les essais géotechniques semblent indiquer que les sols supports de l'ouvrage sont potentiellement liquéfiables sous sollicitation sismique.

Des instrumentations complémentaires restent à entreprendre en 2013 pour confirmer ces résultats.

## Abstract

For the research's operation DOFEAS, the erosive and seismic risks being able to impact a coastal levee were estimated by geophysics and geotechnics instrumentations. A coastal levee between Cancale and The Mont Saint- Michel was chosen as test site to lead this project.

After general diagnosis of the levee based on a visual inspection and historic data analysis, three sections of the levee were followed and instrumented between 2010 and 2012.

Two geophysics methods were proposed for this

project: an electromagnetic method, a Slingram-EM31 and a seismic method based on the surface's waves measures (MASW) completed by geotechnical soundings and laboratory tests.

Concerning the erosive risk, the first results of the investigations show variations of the resistivity measured by EM31 in the body of the levee that could be connected to a structural evolution of the levee's body.

For the seismic risk, the surface's waves measures correlated by the geotechnical results seems to indicate that liquefaction can occur under the levee under seismic request.

Additional instrumentations must be realized in 2013 to confirm these results.

## Mot-clé :

risque érosif, risque sismique, liquéfiable, géophysique, géotechnique

## Introduction

Dans le cadre de l'opération de recherche «DOFEAS» (Digues et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillements et Séismes) pilotée par l'IFSTTAR, le Département Laboratoire Régional du Cete de l'Ouest de Saint-Brieuc a proposé la digue de la Duchesse Anne, entre Cancale et le Mont-Saint-Michel, comme site test pour aborder par instrumentations géophysiques et géotechniques, le risque érosif, mais aussi le risque sismique pouvant affecter l'ouvrage.

Le risque sismique est rarement pris en compte au niveau des digues maritimes (hors portuaires), pourtant la réglementation en matière de classement des zones de sismicité en France a évolué et de nombreuses zones sont passées en zone de sismicité potentielle. Il semblait, donc, intéressant d'étudier conjointement sur un même site ces deux types de risque.

L'évaluation du risque érosif doit permettre de caractériser l'aléa de rupture du site pilote, en croisant les éventuelles variations de résistivité des matériaux de l'ouvrage (pouvant traduire des phénomènes d'érosion interne), les charges hydrauliques et les hydrogrammes des marées obtenus par la pose de piézomètres à différents endroits de l'ouvrage. Ceci permettra, à terme, d'étudier les phénomènes transitoires

intervenant lors des cycles de mises en charge et décharge journaliers, notamment les vitesses de saturation et les écoulements internes dans l'ouvrage.

La caractérisation du risque sismique (ou plus précisément de liquéfaction), et en particulier de la stabilité de l'ouvrage, sous sollicitations sismiques semble nécessaire car l'ouvrage proposé est une digue maritime protégeant un polder situé dans une zone non sismique qui passe dans une zone de sismicité faible selon la nouvelle réglementation.

## Présentation de l'ouvrage

La digue de la Duchesse Anne s'étend depuis la pointe de Château Richeux (sud de Cancale), à l'ouest, jusqu'au petit massif de Saint-Broladre, à l'est, sur un linéaire de 17 km, et protège des submersions marines les secteurs urbanisés des Marais de Dol-de-Bretagne.



FIGURE 1: LOCALISATION DE LA DIGUE DE LA DUCHESSE ANNE

La digue s'appuie sur un cordon littoral (formation IX – X<sup>ème</sup> siècle) résultant de l'accumulation de débris coquilliers. Construite à l'initiative du Duc de Bretagne Alain IV (XI<sup>ème</sup> siècle) pour protéger le banc coquillier de l'action de la marée, sa structure est un appareillage irrégulier de moellons en pierres de formes et de dimensions variées. Cette «carapace» en maçonnerie de pierres sèches fut prolongée et renforcée, au cours des siècles suivants, transformant ainsi les marais du sud en polders.



FIGURE 2: VUE DE LA DIGUE DE LA DUCHESSE ANNE

Les sondages géotechniques réalisés en divers points de la

digue dans le cadre de ce projet présentent plus ou moins la même coupe lithologique : des remblais sableux avec ou sans blocailles pour ceux réalisés sur la digue puis des sables jusqu'à une profondeur moyenne de 3 mètres, puis des silts sur environ 6 à 7 mètres.

La carte géologique du BRGM indique que l'épaisseur des sédiments quaternaires est comprise entre 15 et 20 mètres au droit de la digue et ceux-ci sont essentiellement constitués de sols saturés en eau, des tangues (classe granulométrique des lutites) et de sables fins. L'ensemble repose sur le substratum schisteux Brioverien.

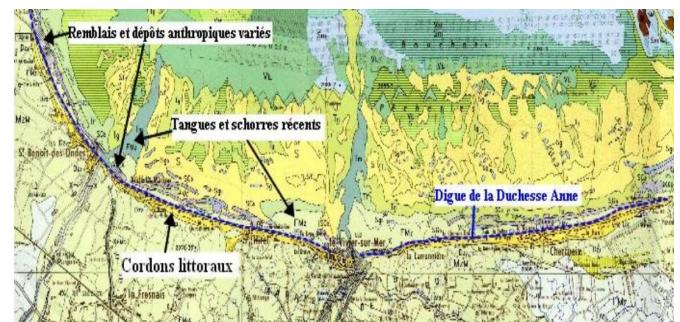


FIGURE 3: EXTRAIT DE LA CARTE GÉOLOGIQUE N°208 DE LA BAIE DU MONT-SAINT-MICHEL AU 1/50 000 (BRGM)

## Choix des méthodes géophysiques et géotechniques

La méthode géophysique retenue pour évaluer le risque érosif est le Slingram-EM31. Elle permet d'obtenir en continu un profil de résistivité apparente sur une profondeur d'environ 6 mètres. Cette méthode a, déjà, été utilisée dans le cadre de l'opération Solem-Erinoh et en particulier sur la levée de l'Authion (49), en bordure de Loire, pour évaluer l'érosion interne de l'ouvrage.

L'EM31 a montré une stabilité dans la mesure, une répétitivité, d'une mission à l'autre. Par contre, du fait de l'absence de crue de la Loire ayant pu impacter la levée durant l'opération, nous n'avions pas pu valider la capacité de la méthode à caractériser l'érosion interne dans l'ouvrage. Le site de la Duchesse Anne, de part sa configuration, se prête davantage à cette application car l'ouvrage peut-être régulièrement atteint par la mer aux grandes marées. D'autre part, la résolution horizontale de la méthode a été améliorée depuis les essais sur l'Authion en augmentant le pas d'échantillonnage.

La méthode utilisée pour caractériser le risque sismique est la sismique par onde de surface (MASW). Elle permet, par l'analyse des ondes de surface, d'évaluer la vitesse des ondes de cisaillement et, ainsi, de caractériser le potentiel de liquéfaction du sol support de la digue. Cette méthode est complétée par des essais géotechniques.



FIGURE 4: EM31 SUR SON CHARIOT EN CRÈTE D'OUVRAGE

Parallèlement aux investigations géophysiques, des sondages de reconnaissance à la tarière équipés de piézomètres ont été réalisés sur les sites retenus, doublés par des essais au pénétrometre statique. Des essais en laboratoire (granulométrie) ont complété ces reconnaissances. Des essais pressiométriques, triaxiaux cycliques et au piézocône sont prévus in situ courant 2013.

### Choix des sites tests

En 2010, en préalable aux investigations géophysiques et géotechniques, un diagnostic de sûreté (diagnostic visuel, complété par des données historiques et géotechniques) de l'ouvrage a été mené pour localiser les différentes zones ayant subi des désordres dans le passé (brèches liées à la submersion principalement).

Suite à ce diagnostic, trois tronçons de la digue ont été retenus, deux du fait de la présence d'anciennes zones de brèches et un troisième sans désordre signalé.

### Caractérisation du risque érosif

En 2011, des profils de résistivités apparentes ont été réalisés, à six reprises, sur chaque tronçon entre février et mars. Les valeurs de résistivités obtenues caractérisent des formations plutôt argileuses (valeurs inférieures à 100 ohm.m) et se situent dans des gammes de résistivité assez différentes.

Ainsi, les deux premiers tronçons présentent les valeurs les plus fortes (matériaux plus sableux), mais aussi, les plus contrastées, signe d'une variation latérale marquée de la nature des matériaux (alternance de sable et vase) tendant à confirmer la présence d'anciennes brèches. Le troisième tronçon montre le profil le plus stable avec des valeurs de résistivité faibles caractérisant des matériaux plus argileux et plus homogènes que sur les deux autres sites. C'est sans doute lié à la nature plus argileuse des matériaux constituant l'ouvrage, mais aussi à un sol support argileux plus proche du fait d'une topographie moins élevée sur ce tronçon.

La méthode utilisée, l'EM31, permet une mesure de la

résistivité apparente ( $\rho_a$ ) sur 5 à 6 mètres environ de profondeur. Il est difficile de distinguer les valeurs correspondant à l'ouvrage de celles de son sol support.



FIGURE 5: PROFILS DE RÉSISTIVITÉ APPARENTE PAR TRONÇON

Entre les zones 1,2 et 3, l'ouvrage présente respectivement des hauteurs moyennes de 5, 3 et 2 mètres. La Figure 5 montre des valeurs de résistivités plus fortes pour les zones les plus hautes (exemple en zone 1, de 60 à 80 ohm.m) qui semblent plutôt liées à la nature de l'ouvrage, tandis que pour les parties basses (ouvrage 3), les résistivités plus faibles, sont davantage influencées par le sol support (résistivités inférieures à 10 ohm.m), caractérisant, ainsi un corps d'ouvrage moins argileux que son support.

En règle générale, les résistivités apparentes augmentent en été par rapport à l'hiver. Ce qui peut être lié aux variations hydrologiques confirmées par les relevés piézométriques qui montrent une diminution des niveaux d'eau (0,50 m) sous l'ouvrage en été, ou aux variations thermiques qui influent, aussi, sur la résistivité.

Cependant, à partir de juillet, une zone singulière apparaît, en contradiction avec le reste du profil de résistivité, au niveau du troisième tronçon : les résistivités semblent, en effet, diminuer l'été par rapport à l'hiver. Un profil réalisé en octobre 2012 confirme cette tendance.

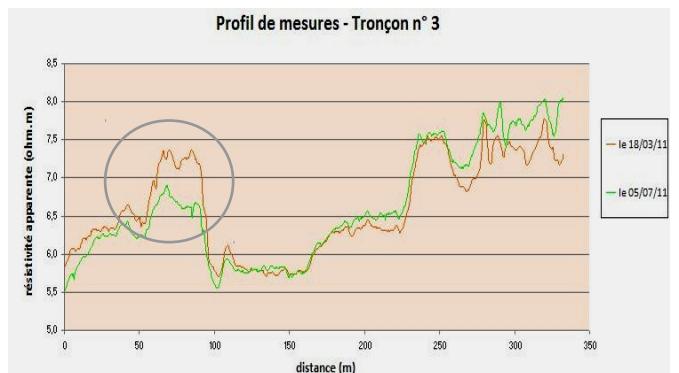


FIGURE 6: EVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ DE MARS A JUILLET 2011

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène et entre autres :

**Une erreur de manipulation du système de mesure.** Les courbes ne montrent pas de décalage en abscisse qui aurait pu être lié à un problème de codeur de distance et engendrer des anomalies. D'autre part, les profils de répétitivité réalisés à chaque fois montrent des résultats similaires.

**Un élément parasite présent à proximité de l'ouvrage.** Il ne peut s'agir d'un véhicule garé à proximité étant donné l'allure du signal. La présence d'une zone plus humide liée à une accumulation d'eau (pluviale ou de mer), pourrait être une cause possible de cette variation.

**Un désordre survenu dans l'ouvrage entre deux interventions.** Il n'a pas été noté de désordres apparents de l'ouvrage lors des dernières interventions. L'éventuelle évolution peut se situer dans des endroits moins visibles, en pied de digue ou en interne à l'ouvrage. Suite aux mesures de juillet, une visite sur place a été effectuée et n'a pas révélé d'eau stagnante ou de zone érodée en pied d'ouvrage.

Un suivi de la résistivité apparente est prévu en 2013 sur le troisième tronçon pour tenter de confirmer et d'expliquer le phénomène observé.

Les effets de mise en charge et décharge de l'ouvrage aux vives eaux n'ont pas encore été étudiés. En 2013, nous instruirons les piézomètres placés devant, dans et derrière l'ouvrage par des capteurs de niveau pour, notamment, mieux comprendre les échanges sous l'ouvrage entre la marée et la nappe phréatique. Des mesures de conductivité ont, toutefois, étaient réalisées au niveau de l'eau prélevée dans les piézomètres sur chaque tronçon. Les valeurs sont très différentes entre les piézomètres placés en amont et en aval de l'ouvrage pour le premier et le second tronçon, et très proches pour le troisième, caractérisant des modes de circulation, sans doute, différents entre les sites, qu'il reste, encore, à étudier.

## Caractérisation du risque sismique

Il est rappelé que suivant la nouvelle réglementation, le département d'Ille et Vilaine, jusqu'à présent considéré comme une zone non sismique, devient une zone de sismicité faible.

En effet, le 30 septembre 2002, un séisme de forte intensité a eu lieu au sud de la Bretagne, avec une magnitude mesurée de 5,4 M<sub>L</sub>. L'épicentre situé à Hennebont correspond à un mouvement de la faille dite de cisaillement Sud Armorican, autre faille majeure structurale de la Bretagne. Malgré sa forte magnitude, ce tremblement de terre n'a produit que des dégâts mineurs ce qui explique sa classification comprise entre V et VI sur l'échelle de Mercalli. La survenance d'un séisme de même intensité n'est pas à écarter à proximité du site d'étude, compte tenu de la présence de failles majeures et de la séismicité régulière observée et historique dans la région présentant des intensités comprises entre V et VI sur l'échelle de Mercalli.

De ce fait un séisme de référence d'une magnitude de 5,5 a été retenu, ce qui d'après l'annexe B de l'eurocode 8 (Norme

NF EN 1998-5) correspond à une zone de sismicité modérée, donc une accélération maximale agr de 1,1 m/s<sup>2</sup>. Il est donc à noter que cela vient en contradiction du zonage sismique de la France qui classe la Bretagne de séismicité faible (agr de 0,7 m/s<sup>2</sup>) .



FIGURE 7: LOCALISATION DES SÉISMES HISTORIQUES EN BRETAGNE

L'évaluation du risque sismique et plus particulièrement du potentiel de liquéfaction du sol support des tronçons de digues retenus s'appuie sur les règles de l'Eurocode 8, basées en partie sur la mesure géophysique de VS<sub>30</sub> (analyse des vitesses de cisaillement sur 30m de profondeur). Cette évaluation a été complétée par les recommandations de l'AFPS 90 (Association Française du Génie Parasismique) et la méthode proposée par Robertson [1], nécessitant la réalisation d'essais géotechniques.

La liquéfaction du sol est un phénomène observé pour des sols saturés en eau qui perdent toute portance sous sollicitations sismiques notamment. De ce fait, les essais géotechniques et géophysiques réalisés pour évaluer le risque sismique ont, seulement, porté sur le sol support de la digue qui, contrairement à l'ouvrage, peut, par moment, être saturé d'eau.

En géotechnique, une série d'essais en laboratoire a été réalisée sur des prélèvements de sol :

- des teneurs en eaux.
- des granulométries par tamisage.
- des limites de liquidité au cône.

Les résultats de ces essais sont les suivants :

TABLEAU 1: RÉSULTATS DES ESSAIS SUR PRÉLÈVEMENTS DE SOLS

Sondage	Profondeur en m	Nature des matériaux	Teneur en eau w en %	Limite de liquidité WL	Indice de plasticité par calcul, pour information *	Granulométrie			
						D <sub>max</sub> (mm)	%<80 µm (Pourcentage fines)	%<2 mm	%<50 mm
S5	2	sable	6,1	33	9	25,74	0,7	53	98
S5	4	silt argileux	41,8	44	14	10,02	67,8	88	100
S5	6	silt argileux	35,1	30	7	8,05	74,6	91	100
S9	6	silt	52,7	62	24	18,76	40,1	59	99

Selon les recommandations de l'AFPS90 les sols du sondage S5 sont « suspects » de liquéfaction pour la fraction sableuse et argileuse.

Pour être exploités selon la méthode de Robertson, ces essais ont été complétés par des sondages au pénétromètre statique (CPT) en crête de chaque tronçon. Le résultat de l'ensemble des essais géotechniques, analysé selon cette méthode, montre un potentiel de liquéfaction en particulier pour le troisième tronçon (matériaux en limite de la classe sols granulaires fins sensibles selon la classification de Robertson, Indice de consistance  $I_c = 2.6$ , rapport de frottement normalisé  $F$  compris entre 0.1 et 0.4).

Du fait de ces résultats, seul le troisième tronçon a, ensuite, été instrumenté en géophysique pour répondre aux règles de l'Eurocode 8. Les premiers résultats des mesures par onde de surface, obtenus par inversion à partir du pointé des courbes de dispersion des vitesses de phase en fonction des fréquences (cf. figure 8), montrent des valeurs de  $VS_{30}$  de l'ordre de 120 à 140 m/s qui permettent de classer les matériaux sous l'ouvrage en un sol de Classe D (Eurocode 8). Les essais au pénétromètre statique sont ensuite exploités avec une magnitude de référence de 5.5 et en fonction de la classe de sol. A partir de 4 m sous l'ouvrage, les facteurs de sécurité  $F_s$ , au droit du sondage 3, sont compris entre 0.5 et 0.6, liquéfaction certaine, et au droit du sondage 2 entre 0.9 à 1.2, liquéfaction probable à certaine.

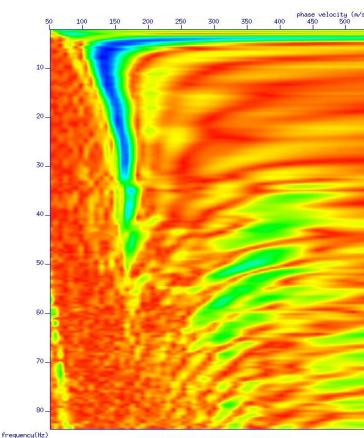


FIGURE 8: EXEMPLE DE COURBE DE DISPERSION PERMETTANT DE PROPOSER UNE DISTRIBUTION DES VITESSES DE CISAILLEMENT SOUS L'OUVRAGE

## Conclusion

Dans le cadre du projet de recherche Dofeas, une méthodologie basée sur du suivi et de l'instrumentation par méthodes géophysiques et géotechniques, a été proposée pour qualifier le risque érosif et sismique pouvant affecter une digue en terre de protection marine située entre Cancale et Le Mont-Saint-Michel.

En géophysique, deux paramètres ont été étudiés, les variations de la résistivité apparente et la mesure des ondes sismiques de surface, complétés par des essais géotechniques in situ et sur prélèvements en laboratoire.

Entre 2010 et 2012, plusieurs campagnes de mesures ont été menées sur divers tronçons de la digue.

Sur l'aspect érosif, les premiers résultats montrent une zone présentant des variations de la résistivité apparente, entre l'hiver et l'été 2011, semblant indiquer un changement dans l'ouvrage qui pourrait être lié à des mécanismes d'érosion interne. Cependant pour l'instant, nous ne disposons pas de suffisamment de données pour conclure sur l'origine du phénomène observé. La poursuite de l'étude qui passe par la répétition des profils de résistivité pourrait confirmer les tendances observées.

Ces phénomènes seront à corrélérer avec l'hydrologie du site et notamment les mises en charge de l'ouvrage qui seront étudiées par l'instrumentation des piézomètres, lors des forts coefficients de marée. A noter, de plus, qu'une correction des mesures reste à faire pour tenir compte des variations de température.

Au niveau du risque sismique, plusieurs approches basées sur des essais sur prélèvements et des sondages in situ complétés par des mesures en ondes de surface ont permis de caractériser un sol support liquéfiable de façon certaine sous un séisme de référence d'une magnitude de 5.5. Des essais géotechniques in situ au piézocône et des essais pressiométriques et triaxiaux cycliques in situ seront réalisés courant 2013 pour étayer ces résultats. Il serait, à terme, intéressant d'étudier les effets d'une sollicitation sismique (source à définir) sur l'ouvrage (test in situ avec instrumentation par capteurs de vibrations, modélisation,...) et pour des hauteurs de nappes variables.

Enfin, ce travail pourrait participer à l'élaboration d'une méthodologie pour prendre en compte le risque érosif et sismique pouvant affecter des digues marines en terre dans les zones potentiellement sismiques.

## Remerciements

L'Association des Marais Dol de Bretagne pour l'accès à la Digue et aux archives.

Donatiene Leparoux, Philippe Reiffsteck de l'IFSTTAR pour leurs conseils.

## Références

- (1) Roberston P.K and Wride, C.E (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test." *Can. Geotech.J.*, Ottawa, 35(3), 442-459.
- Programme Génie Civil et Urbain (PGCU) 2006-2008 : ANR ERINOH (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques), Axe 2-Méthodes de détection de l'érosion interne, rapport final avril 2009