

Glissements sous-marins fréquents au niveau du Cap Lopez au Gabon en Afrique de l'Ouest.

Recurrent submarine landslides at Cape Lopez, Gabon, West Africa.

Erik Green

Spécialiste géotechnicien, Total SA, Paris La Défense, France, erik.green@total.com

Bruno Simon, Cécile Babin, Khoa Van Nguyen

Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ : Le Cap Lopez constitue la pointe la plus avancée du Gabon vers l'océan atlantique. Elle est sujette à l'engraissement sédimentaire et des glissements majeurs, de plus d'1 million de m³, surviennent environ tous les 20 ans. Des glissements mineurs, de moindre ampleur, sont plus fréquents. Suite au glissement majeur de 1971, plusieurs campagnes de reconnaissance des sols et de nombreuses observations ont été réalisées ; essais au piézocône, sondages carottés, sondages pressiométriques, mesures de densité in-situ, mesures géophysiques, essais en laboratoire sont complétés par des mesures topographiques et bathymétriques. Les reconnaissances des sols mettent en évidence une prédominance de sables de résistance de pointe moyenne mesurée in-situ de 22MPa. Il s'agit de sables fins à moyens, principalement quartzeux et de granulométrie très uniforme. L'angle de frottement effectif des sables peut-être estimé à 35°, alors qu'au large les pentes s'équilibrent à 5° par rapport à l'horizontal. Les glissements semblent trouver leur explication dans le comportement contractant des sables qui sollicités en cisaillement associé à une augmentation de la surpression interstitielle, perdent leur résistance au cisaillement.

MOTS-CLÉS : géotechnique, sables contractants, glissements sous-marins, écoulement.

ABSTRACT: Cape Lopez is the most advanced land of Gabon towards Atlantic Ocean. This coast is subjected to an increase of sediments deposits and recurrent major landslides, over 1 million m³, occurred every 20 years. Minor landslides are even more frequent. Following the 1971 major landslide many investigations and observations were undertaken: cone penetration tests with pore pressure measurement, cored boreholes, pressuremeter tests, in situ density measurements, geophysical surveys and few laboratory tests. Soil investigations are complemented by numerous topographic and bathymetric surveys. They highlighted predominantly sands, with an average cone resistance of 22 MPa. These sands are fine to medium coarse grain, mainly quartz and very uniform. The effective friction angle is about 35°, while farther from the coastline; natural slopes balance around 5° from the horizontal. Recurrent landslide phenomenon seems to find its explanation in the contractive behaviour of sands under shearing and the associated increase of pore water pressure that induces a loss of shear strength.

KEYWORDS: *geotechnics, contractive sands, submarine landslides, flow slide.*

1 INTRODUCTION.

Le Cap Lopez est situé à l'extrémité Nord du cordon littoral appelé île Mandji, dans la province maritime de l'Ogooué, au Gabon. Il constitue la pointe la plus avancée du Gabon vers l'océan atlantique. C'est un fragment du bassin sédimentaire des cotes gabonaises formé par l'accumulation successive sur plusieurs mètres de dépôts deltaïques et maritimes.

La côte Est du Cap Lopez est soumise aux phénomènes de glissements sous-marins récurrents. Les glissements sous-marins surviennent le long de surfaces de glissement de très faibles pentes et ils peuvent être qualifiés d'écoulement.

2 CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE ET GEOTEHNIQUE.

2.1 Contexte hydrodynamique

Le Cap Lopez peut être défini comme une langue de sable sujette aux courants maritimes. La surveillance des variations du trait de côte a été entreprise par Total Gabon depuis 1971, suite au glissement majeur qui emporta la pointe Odden.

Plus récemment, des modèles couplant modélisation numérique et physique, en bassin à houles, ont été développés pour être comparés aux données recueillies pendant des décennies. Les résultats mettent en évidence un pivotement des vagues autour du Cap, avec une atténuation des courants le long de la côte Est,

favorisant les dépôts sédimentaires et une forte influence de la présence du canyon sur la côte Ouest.

2.2 Campagnes de reconnaissance des sols

2.2.1 Campagnes précédentes

En 1971, le laboratoire d'hydraulique et de mécanique des sols de Delft réalisa une campagne sur la partie terrestre uniquement et comprenant 30 essais de pénétration au cône, 2 sondages carottés avec prélèvement en continu, 5 mesures de densité in-situ complétés par des essais en laboratoire.

En 1972, le même laboratoire de Delft réalisa une nouvelle campagne terrestre comprenant 24 essais de pénétration au cône, 3 sondages carottés avec prélèvement en continu, 3 mesures de densité in-situ complétés par des essais en laboratoire.

En 1974, le centre d'études géotechnique de Louis Ménard réalisa 4 sondages pressiométriques en mer.

En 1984, le laboratoire d'hydraulique et de mécanique des sols de Delft réalisa 7 essais de pénétration au cône en mer, 8 essais de pénétration au cône à terre, 3 mesures de densité in-situ en mer, 3 mesures de densité in-situ à terre, 7 sondages carottés avec prélèvement discontinu, 2 piézomètres complétés par des essais en laboratoire.

En 2011, Gefor réalisa une campagne terrestre comprenant 23 essais au pénétromètre statique.

2.2.2 Campagne 2015

En 2015, une nouvelle campagne de sol terrestre a été réalisée par Geolem, spécifiquement le long de la côte Est. Elle comprend 31 essais de pénétration au piézocône, la pose de 10 piézomètres et la réalisation de 2 sondages carottés avec récupération en continu.

Tous les points sondés sont représentés sur la Figure 1.

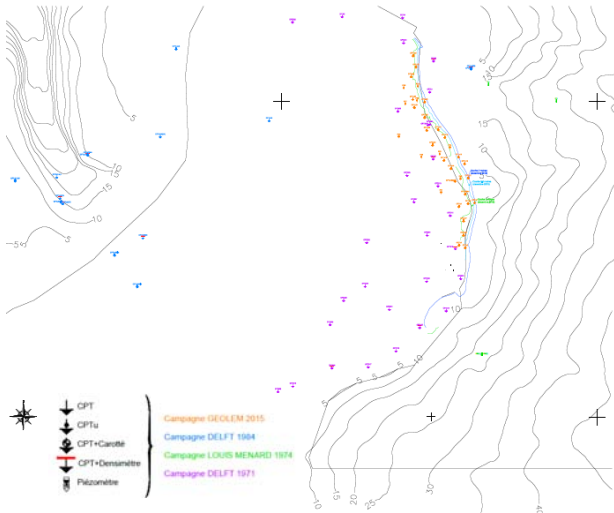


Figure 1: Emplacements des points sondés au niveau du Cap

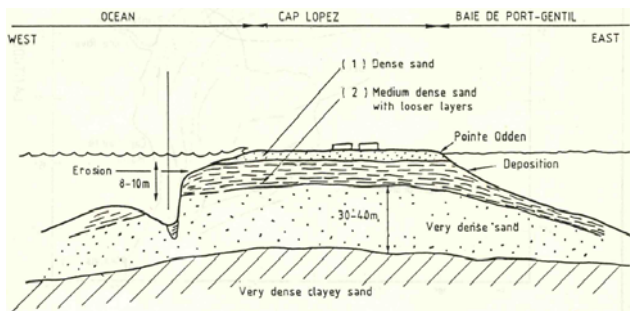


Figure 2: Profil en travers type du Cap Lopez établi par le NGI.

Les résultats des campagnes de reconnaissance mettent en évidence des sols en place principalement sableux, de grossier à tendance limoneuse. Quelques rares lentilles d'argile et de sols organiques ont également été reconnues. Les résistances de pointe mesurées récemment sont cohérentes avec les précédentes.

2.3 Description des sables en place

Les résistances de pointes récentes varient de 1.2 à 44MPa, avec une valeur moyenne de 22MPa. 80% des résistances de pointe sont supérieures à 10MPa, ce qui est représentatif d'un sol pulvérulent dense à très dense. Malgré les bonnes caractéristiques mécaniques, les glissements surviennent régulièrement.

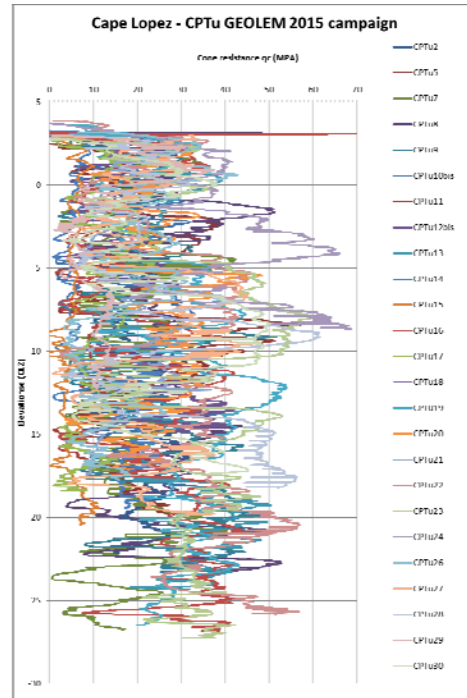


Figure 3: Campagne GEOLEM 2015, résultats des essais au pénétromètre statique

La majorité des courbes granulométriques sont très uniformes ; 80% des particules ont un diamètre supérieur à 60µm et 100% des particules ont un diamètre inférieur à 200µm, correspondant à un sable fin selon la classification ASTM (American Society for Testing and Materials). Les courbes granulométriques évoluent vers des sables moyens à grossiers.

En plus des mesures de densité in-situ, des mesures de densité en laboratoire ont permis de déterminer les porosités minimales, maximales et critiques saturées (cf. Figure 4).

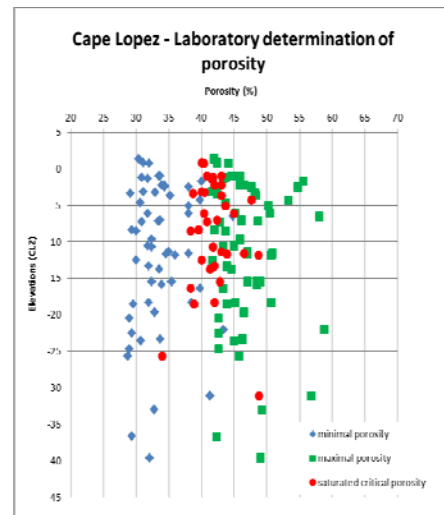


Figure 4: Graphique illustrant la répartition des porosités minimales, maximales et critiques saturées en fonction des cotes

La Figure 4 met encore en évidence l'uniformité des sols en place. Les porosités sont fonction des caractéristiques des matériaux, de la taille des particules. Si les sols sont déposés par les courants dans un état hydrique proche de la porosité critique, ils deviennent susceptibles de se contracter et de devenir instable.

Au Cap Lopez, la porosité minimale moyenne est égale à 34% (soit une densité relative équivalente $Dr=98\%$), la porosité maximale moyenne est égale à 48.8% (soit une densité relative

équivalente $D_r=0\%$) et la porosité critique saturée moyenne est égale à 41.9%. En termes de densité relative critique saturée, cela correspond à 43.8%, valeur correspondante normalement à des sables moyennement denses.

Quelques essais de cisaillement à l'appareil triaxial de révolution en conditions consolidées non drainées, ont été réalisés sur des échantillons reconstitués, en raison des difficultés de prélèvement, aux porosités ciblées. Comme attendu, les sables adoptent un comportement contractant à des porosités de l'ordre de 48% et un comportement dilatant à des porosités de l'ordre de 40%.

Les sables dilatants résistent pendant l'augmentation du cisaillement. A l'opposé, les sables contractants perdent leur résistance quand le cisaillement augmente avec l'apparition de surpression interstitielle (chemin en rouge sur la Figure 5).

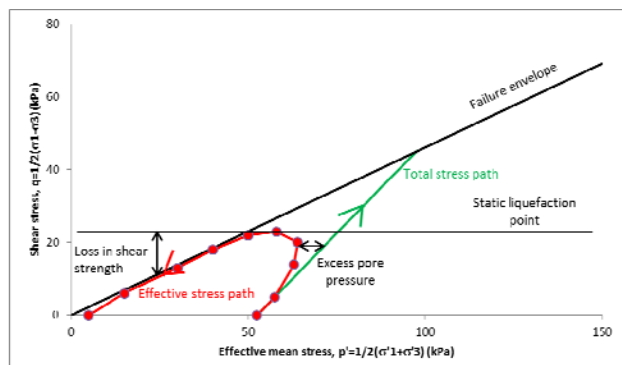


Figure 5: Chemins de contraintes effectives et totales pour les sables contractants

Une tentative d'établissement d'un critère sur les résistances de pointe a été faite, dans le cadre particulier du Cap Lopez, afin dans un premier temps de repérer les zones instables à renforcer et dans un second temps de donner une valeur seuil aux Entreprises en fonction de la majorité des données disponibles ; les essais de pénétration statique.

En effet, la relation usuelle établie par Baldi et al. en 1986 liant la résistance de pointe (q_c) et la densité relative (D_r) pour des sables normalement consolidés est telle que :

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{q_c}{C_0 (\sigma'_{v0})^{C_1}} \right)$$

avec $C_0 = 157$; $C_1 = 0.55$; $C_2 = 2.41$; $R = 0.96$ n'est pas d'une part pas fiable pour les faibles profondeurs et d'autre part, suite à l'analyse des mesures de densité in-situ, elle ne permettait pas l'identification systématique des zones instables, ni leurs épaisseurs. Un exemple de densité relative établie à partir de cette corrélation est illustré sur la Figure 6. Les densités relatives inférieures à 35% (sables lâches à très lâches) apparaissent par pic dans les zones instables identifiées en bleu à partir de 13 mètres de profondeur par rapport au terrain naturel.

En conservant la même approche que la corrélation précédente mais en s'appuyant sur les mesures de densité en laboratoire et in-situ disponibles, le critère suivant a été établi, permettant de mieux identifier et caractériser les zones instables :

$$q_c^{crit} = C'_0 (\sigma'_{v0})^{C'_1} \exp(C'_2 \cdot D_r^{crit})$$

avec $C'_0 = 4100$; $C'_1 = 0.05$; $C'_2 = 2.41$ et une densité relative critique saturée égale à 43.8%. La valeur seuil évolue de 13 MPa à un mètre de profondeur par rapport à la surface du sol à 15.50 MPa à 24 mètres de profondeur. L'augmentation du critère en fonction de la profondeur a été réduite au maximum compte-tenu des observations. Le critère illustré par le trait vert sur ci-dessous et il est mieux corrélé avec les zones instables identifiées en bleu :

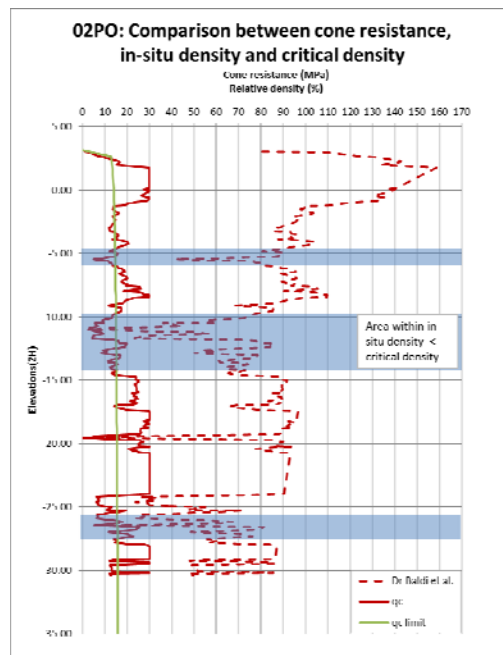


Figure 6: Comparaison entre résistance de pointe mesurée, valeur seuil sur les résistances de pointe, mesure de densité in-situ, densité relative critique et densité relative établie à partir des corrélations usuelles.

Le long de la côte Est, les mécanismes de déclenchement possible identifiés, capables de créer une augmentation du cisaillement associé à l'apparition de surpression interstitielle sont multiples :

- engraissement de la cote par les sédiments marins (le plus probable) ;
- gradients hydrauliques et écoulements sous-marins (un lac est formé au centre du Cap Lopez et des échanges hydrauliques avec la mer se produisent) ;
- opérations de dragage ;
- micro-séismes ou vibrations anthropiques (phénomènes rares) ;
- érosion ;
- effet hydrodynamiques des vagues (faible probabilité le long de la côte Est).

Quand les lentilles ou passées de sables contractants sont stimulées par l'un ou l'autre des mécanismes déclencheurs, les sables instables perdent leur résistance au cisaillement et les glissements se produisent. La masse de sol est statiquement liquéfiée et s'écoule. En fonction de la position des lentilles ou passées de sables contractants, les volumes qui s'écoulent sont variables. Parfois, les glissements remontent vers la cote et parfois ils restent sous-marins. A chaque fois, les surfaces de glissement sont très faibles, de l'ordre de 5°.

3 MESURES DE PROTECTION CONTRE L'EROSION.

Afin de protéger la côte Est contre l'érosion provoquée par les glissements sous-marins, plusieurs solutions peuvent être envisagées ; des plus lourdes au plus légères et toujours inspirées par les techniques empruntées au domaine des travaux maritimes. Historiquement, des solutions de type palplanches, épis et mur vibroflotté ont été érigées.

Comme décrit précédemment, les volumes glissés sont très variables. Ils peuvent se produire aussi bien à l'amont des structures de protection, qu'en dessous si celles-ci ne sont pas assez profondes.

Trois volumes de sol dans lesquels peuvent s'inscrire les glissements potentiels ont été définis selon leurs impacts sur les installations terrestres existantes à protéger. Les volumes ont été définis grâce aux observations des surfaces après glissement.

Des illustrations du grand glissement de référence qui emporta la pointe Odden d'abord, puis des volumes à considérer pour les différents cas dimensionnants sont données ci-après :

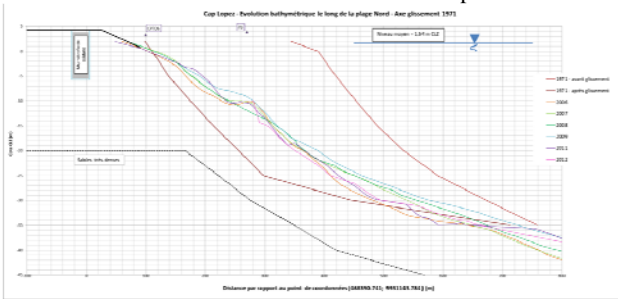


Figure 7: Très grand glissement de référence et glissements récurrents.

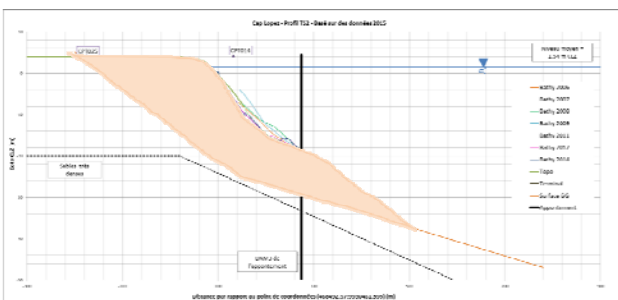
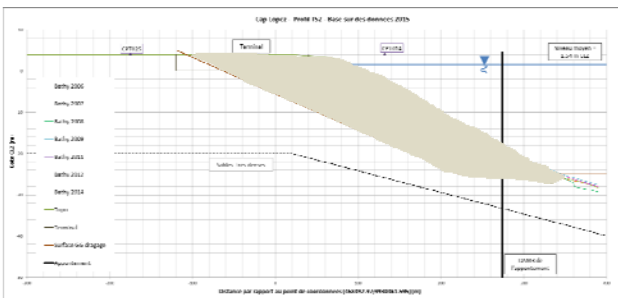
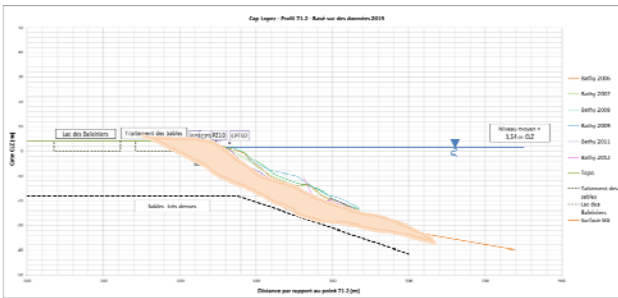


Figure 8: Volumes de glissement utilisables pour le dimensionnement et définis en fonction des zones et des enjeux.

Les coefficients de sécurité demandés après confortement dépendent de l'impact sur les installations terrestres existantes et également de la probabilité d'occurrence de ces glissements.

Les structures de protection peuvent être envisagées parmi :

- les méthodes d'amélioration des sols ;
- les écrans de soutènement ;
- les murs poids ;
- les solutions de confortement des sols (clouage).

Les méthodes d'amélioration des sols visent soit à densifier les sols en place soit à incorporer des matériaux pour en améliorer la résistance au cisaillement. Elles peuvent consister en :

- la vibroflottation ;

- les colonnes ballastées ;
- le deep soil mixing ;
- les injections solides ;
- les inclusions rigides.

Les solutions d'écran de soutènement peuvent consister en des écrans de palplanches ancrés par rideau arrière ou tirants passifs. Les solutions de confortement peuvent consister en des solutions de parois de pieux jointifs ou sécants ou palplanches en console, etc...

En tous les cas, la mise en œuvre de ces solutions devra être précautionneuse afin de ne pas déclencher des glissements.

Enfin, les solutions de protection ne devront pas perturber l'équilibre hydraulique et les échanges existants entre le lac de Baleiniers, situé au centre du Cap, et la mer en créant une barrière hydraulique.

4 CONCLUSION

Le phénomène de glissements sous-marin au niveau du Cap Lopez est lié au mode de dépôt et à la granulométrie des particules déposées. Même si les caractéristiques géomécaniques peuvent être qualifiées de bonnes, les risques de lentilles ou passées instables sont répartis de façon aléatoire le long du littoral Est.

Lorsqu'une poche instable est stimulée par un phénomène déclencheur, elle s'effondre, et la masse de sol s'écoule le long de très faibles pentes. Le glissement est également susceptible de remonter loin en amont.

Les glissements sont donc inhérents à la situation du Cap Lopez, et en particulier à la côte Est sujette à l'engraissement.

Les solutions de protection mises en œuvre antérieurement, et à venir, sont nécessaires pour préserver la morphologie souhaitée du Cap.

5 REMERCIEMENTS

Terrasol souhaite remercier tout particulièrement Total Gabon pour son accueil et sa participation qui a permis de recueillir et de synthétiser les données nécessaires à la bonne compréhension du phénomène.