



## **Caractérisation d'un système de cheniers par une approche innovante combinant des méthodes géophysiques et la géotechnique par CPT: Les cheniers de Cayenne-Rémire-Montjoly (Guyane) - Projet GuyArche**

**Julie BILLY<sup>1</sup>, François LONGUEVILLE<sup>2,3</sup>, Benjamin FRANCOIS<sup>4</sup>, Adnand BITRI<sup>4</sup>, Méline LANSON<sup>3</sup>, Gildas NOURY<sup>4</sup>, Guillaume BRUNIER<sup>3</sup>**

1. BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Direction des risques et prévention, Unité : Risques Côtiers et Changements Climatiques – DRP/R3C  
Parc technologique Europarc, 24 Av. Léonard de Vinci, 33600 Pessac, France.  
*j.billy@brgm.fr*
2. BRGM, Direction Régionale de Nouvelle Aquitaine, Parc technologique Europarc, 24 Av. Léonard de Vinci, 33600 Pessac, France.
3. BRGM, Direction Régionale de Guyane, Domaine de Suzini, Route de Montabo, 97333 Cayenne, Guyane française.
4. BRGM, Direction des risques et prévention, 3 Av. Claude Guillemin, 45100 Orléans, France.

### **Résumé :**

Dans un contexte d'évolution du littoral et d'adaptation des territoires face au changement climatique, l'apport de connaissances sur les géosystèmes côtiers est indispensable. Ainsi, la plage des Salines (Cayenne-Rémire-Montjoly) a été retenue comme site pilote pour développer une méthodologie d'investigation et de caractérisation des cheniers de Guyane. Les particularités de ces environnements en termes de compositions sédimentaires (alternance de dépôts argileux et sableux), leur faible altitude, la proximité de zones humides difficilement accessibles, font qu'ils sont complexes à investiguer. Ce projet a pour objectif de mettre en place une approche innovante combinant des méthodes de géophysiques et géotechniques dans l'optique (A) de cartographier le substratum et (B) de caractériser les cheniers et la plage adjacente. Les méthodes déployées ont montré leur capacité à améliorer de manière significative les connaissances géologiques sur ces systèmes littoraux complexes en contexte amazonien. L'association de la sismique passive (H/V) à la sismique active a permis de couvrir de manière quasi-homogène le secteur d'étude et ainsi de proposer la 1<sup>ère</sup> carte de la morphologie-profondeur du toit du substratum. Le couplage des approches géophysique (géoradar et ERT) et géotechnique (CPT, tarières) a montré un fort potentiel et une complémentarité des outils pour la caractérisation des cheniers et de la plage. Riche de cette expérience, la méthodologie développée ici pourrait être appliquée sur d'avantage de systèmes littoraux de ce type.

### **Mots-clés :**

## *Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection*

Cheniers, Environnement littoral sablo-vaseux, Géoradar, Résistivité électrique, Sismique terrestre, Tests de pénétration au cône, Cartographie du substratum, Guyane.

### **1. Introduction**

Le développement du littoral guyanais est étroitement lié aux différentes phases de transgressions et régressions marines qui ont façonné la plaine côtière. Cette plaine côtière, de basse altitude (0 à 5 m), est une succession de dépôts fluviomarins quaternaire influencés par la migration de bancs de vase (BOYE, 1963). Les cheniers, caractéristiques de la Guyane, sont le résultat de l'alternance entre le dépôt de vase et le dépôt de cordon sableux sur ces cortèges vaseux (PROST, 1989). Actuellement, les cheniers actifs continuent d'évoluer en fonction de la migration des bancs de vase le long du plateau des Guyanes (*e.g.* ANTHONY *et al.*, 2019). Si la migration des bancs de vase, leur évolution surfacique et leur impact sur les côtes sableuses commencent à être bien documentés (*e.g.* GARDEL & GRATIOT, 2005 ; LONGUEVILLE *et al.*, 2018), des questionnements persistent sur la caractérisation de ces espaces littoraux, notamment sur i) les épaisseurs de sédiments, ii) l'interface avec le substratum, iii) l'architecture interne des unités sédimentaires, ou encore iv) leurs propriétés (géo)physiques. Les particularités de ces environnements en termes de compositions sédimentaires (alternance de dépôts argileux et sableux), leur faible altitude ainsi que la proximité de zones humides salées ou saumâtres difficilement accessibles, font qu'ils sont complexes à investiguer.

Le projet de recherche GuyArche (financé par le BRGM et la DGTM Guyane) avait pour objectif de mettre en place une approche innovante combinant des méthodes géophysiques et géotechniques dans l'optique de (A) cartographier le substratum et de (B) caractériser la partie terrestre des cheniers et la plage adjacente. Dans un contexte de changement climatique et de hausse du niveau de la mer, ces nouvelles connaissances seront importantes à prendre en compte pour appréhender l'évolution du littoral, fournir des informations structurelles pour la modélisation de ces environnements et appuyer les acteurs publics dans sa gestion.

Du fait de sa situation géographique et de la concentration des enjeux patrimoniaux, économiques et environnementaux, la plage des Salines localisée sur les communes de Cayenne et Rémire-Montjoly (Figure 1) a été retenue comme site pilote pour développer une méthodologie d'investigation et de caractérisation des cheniers de Guyane. Ce secteur, long de 3.5 km, situé entre deux promontoires rocheux (Mont Ravel au nord, Mont Bourda au sud), présente différents environnements: étang naturel, mangrove, cheniers, plage sableuse, substrat rocheux affleurant.

### **2. Matériel et méthodes**

Afin de cartographier le substratum et de caractériser les dépôts en subsurface, l'approche multiméthodes mise en place dans cette étude comprend de (1) la sismique terrestre, (2) la méthode H/V, (3) la résistivité électrique (ERT), (4) du géoradar, et (5) la géotechnique

par pénétromètre (CPT, tests de pénétration au cône) ainsi que des tarières mécaniques. Ces acquisitions sont couplées à un GPS différentiel. Cette approche multiméthodes se base sur l'expérience de travaux du BRGM en métropole (Pays-de-Monts - Vendée) où les questionnements sont similaires (BILLY *et al.*, 2020).

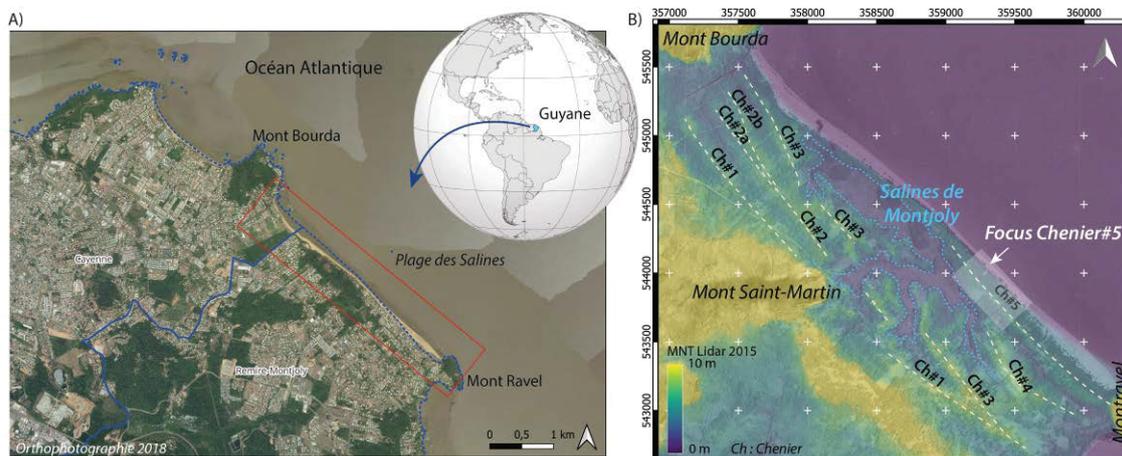


Figure 1. A) Carte de localisation de la zone d'étude et B) des différents cheniers identifiés par l'analyse du LiDAR (Ch#1-5; dans cet article sont présentés les résultats du Ch#5).

## 2.1 Cartographie du substratum par sismique terrestre active et passive

La sismique terrestre utilisée est une méthode active, qui consiste à générer des ondes sismiques à l'aide d'une masse (10 kg), tout en enregistrant le mouvement du sol le long d'une flûte tractable de 24 capteurs (géophones 10 Hz, espacés de 2 m et tirs tous les 10 m, Figure 2A.1; SAMYN *et al.*, 2014). Les données ont été traitées à la fois par i) tomographie sismique réfraction, qui permet d'obtenir la répartition dans le sol de la vitesse de propagation des ondes sismiques P, ii) par analyse spectrale des ondes de surface (MASW; PARK *et al.*, 1999), qui permet d'obtenir des indicateurs sur les propriétés mécaniques des sols comme l'élasticité, la rigidité, etc., et iii) par traitement sismique réflexion dans le but de montrer l'agencement des réflecteurs le long des profils. La méthode H/V est une méthode de sismique passive. C'est une technique qui consiste à enregistrer le bruit de fond sismique ambiant à l'aide d'un sismomètre relié à un enregistreur (ici un Minishark© ; Figure 2A.2), afin d'isoler la fréquence de résonance ( $F_0$ ) de l'interface recherchée (*i.e.* NAKAMURA, 1989; BRULE & JAVELAUD, 2013). La profondeur ( $H$ ) de cette interface est évaluée à partir de  $F_0$  et de la vitesse des ondes de surface ( $V_s$ ) en ce point :  $H = -V_s / 4 * F_0$ . La vitesse des ondes de surface  $V_s$  est obtenue à partir de la méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (MASW).

### Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection



A2 - Sismomètre et enregistreur Minishark © (H/V, sismique passive)



B2 - Géoradar (Mala ProEx, 500 MHz)



Figure 2. Outils géophysiques déployés : A1) sismique terrestre, A2) sismomètre (méthode H/V), B1) résistivité électrique et B2) géoradar.

L'application de cette méthode pour caractériser l'interface avec le substratum est innovante et a été testée ici pour venir compléter la sismique active terrestre dans les zones ne permettant pas son déploiement.

#### 2.2 Caractérisation des cheniers et de la plage par ERT, géoradar et sondages CPT :

Les méthodes de tomographie par résistivité électrique (ERT) par OhmMapper et le géoradar sont des méthodes géophysiques non-invasives d'acquisition en continu qui permettent d'investiguer le proche sous-sol. Elles ont des profondeurs d'investigation du même ordre de grandeur (pluri-métriques, ici 6 à 10 m), et sont complémentaires.

L'ERT consiste à injecter un courant électrique dans le sol et à mesurer la différence de potentiel ainsi générée, afin de déterminer la résistivité de la portion de terrain traversée. Le résistivimètre OhmMapper (Figure 2B.1) utilise des électrodes capacitives posées au sol (une émettrice et 4 à 5 réceptrices). Cette méthode peut apporter des éléments sur la

constitution des cheniers en particulier les alternances sableuses / niveaux de vase, ainsi que la saturation en eau (douce ou salée) des sédiments.

Le géoradar s'appuie sur la propagation et la réflexion d'ondes électromagnétiques, afin d'imager l'architecture interne de ces systèmes littoraux. Cela permet ainsi de mettre en évidence leurs phases de construction, la superposition de dépôts, des marques d'érosion, etc. Le système utilisé est un Mala ProEx avec une antenne dont la fréquence est centrée sur 500 MHz (Figure 2B.2).

L'essai de pénétration statique (*Cone Penetration Test*, CPT) est un essai géotechnique normé (ISO 22476-1, classe TE1). Il consiste à mesurer la réaction du sol à l'enfoncement d'une pointe instrumentée qui avance à vitesse constante (2 cm/s). Les capteurs mesurent deux pressions (MPa) tous les 2 cm : 1) la résistance à la pénétration de la pointe  $q_c$  et 2) le frottement latéral exercé par le sol sur les côtés de la pointe  $f_s$ . En se basant sur ces données, il est possible de calculer des paramètres donnant accès aux propriétés des sols traversés comme le rapport de frottement  $R_f (=100 * f_s/q_c, \text{ en } \%)$ , qui donne une indication sur la granulométrie du sol traversé, ou la densité relative  $Dr$  (en %), qui représente l'enchevêtrement des grains (équivalent de la porosité). Via l'utilisation d'abaques éprouvées (e.g. ROBERTSON, 1990) ces valeurs classent les sols traversés en fonction de leur comportement (*Soil Behavior Type*, SBT ; sables denses, argiles molles, etc.). La réalisation de tarières mécaniques permet de conforter l'interprétation des classes de sols traversées par les CPT.

### 3. Cartographie du toit du substratum

Les données de sismique terrestre traitées par sismique réflexion ont permis de déterminer la profondeur du substratum sous couverture le long de chaque profil 2D réalisé. Ce traitement s'est avéré le plus approprié pour caractériser cette interface dans l'environnement étudié (Figure 3A), même lorsqu'il est localisé à des profondeurs importantes (supérieure à 50 m).

Le traitement MASW a quant à lui permis d'estimer les vitesses des ondes de cisaillement en profondeur et de produire une carte interpolée de la vitesse  $V_S$  moyenne dans la couche de sédiment (Figure 3C). La combinaison des 13 km de profils sismiques et des analyses des 54 mesures H/V a permis de dresser une 1<sup>ère</sup> carte de l'altitude du substratum (MNT Figure 3D). En se basant sur ces résultats, on constate que le toit du substratum est bien en connexion avec les deux promontoires rocheux, Mont Ravel au nord et Mont Bourda au sud. Il se situerait à des profondeurs entre -15 et -20 m au nord-ouest du secteur étudié alors qu'il semble former une dépression sur la partie sud-est (prof. > 50 m).

## Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

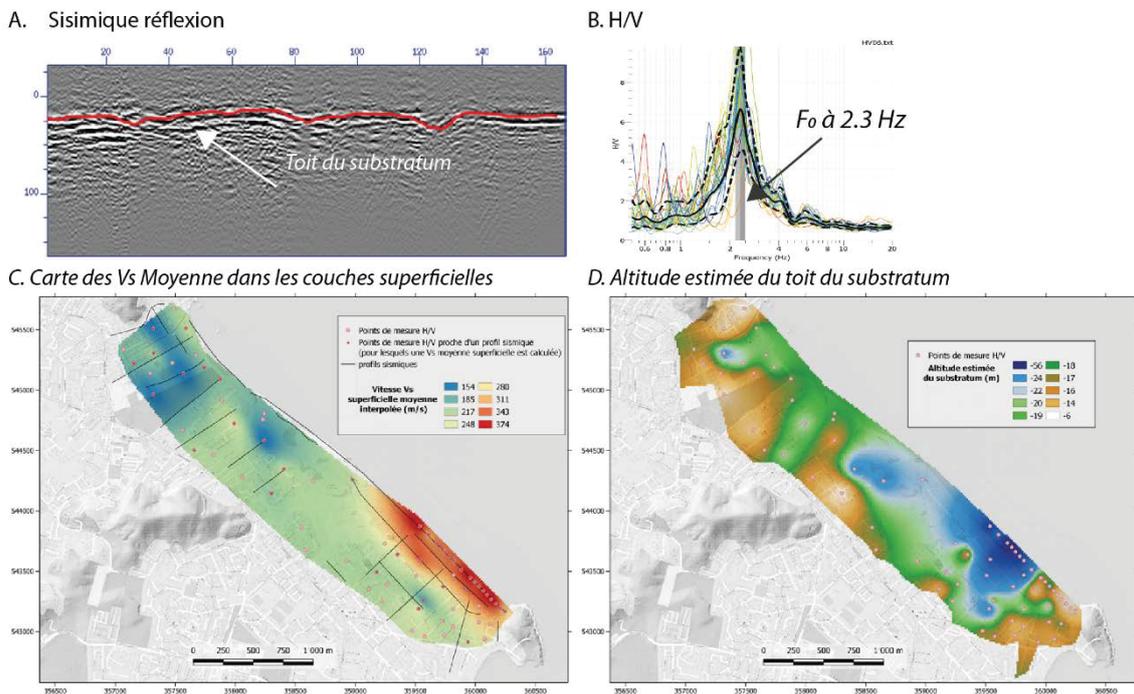


Figure 3. Exemple de résultats A) sismique réflexion et B) H/V. C) Carte des vitesses Vs moyennes, dans les couches superficielles et D) altitude estimée du toit du substratum, sur la zone d'étude.

### 4. Investigation des formations en subsurfaces

#### 4.1 La résistivité de surface

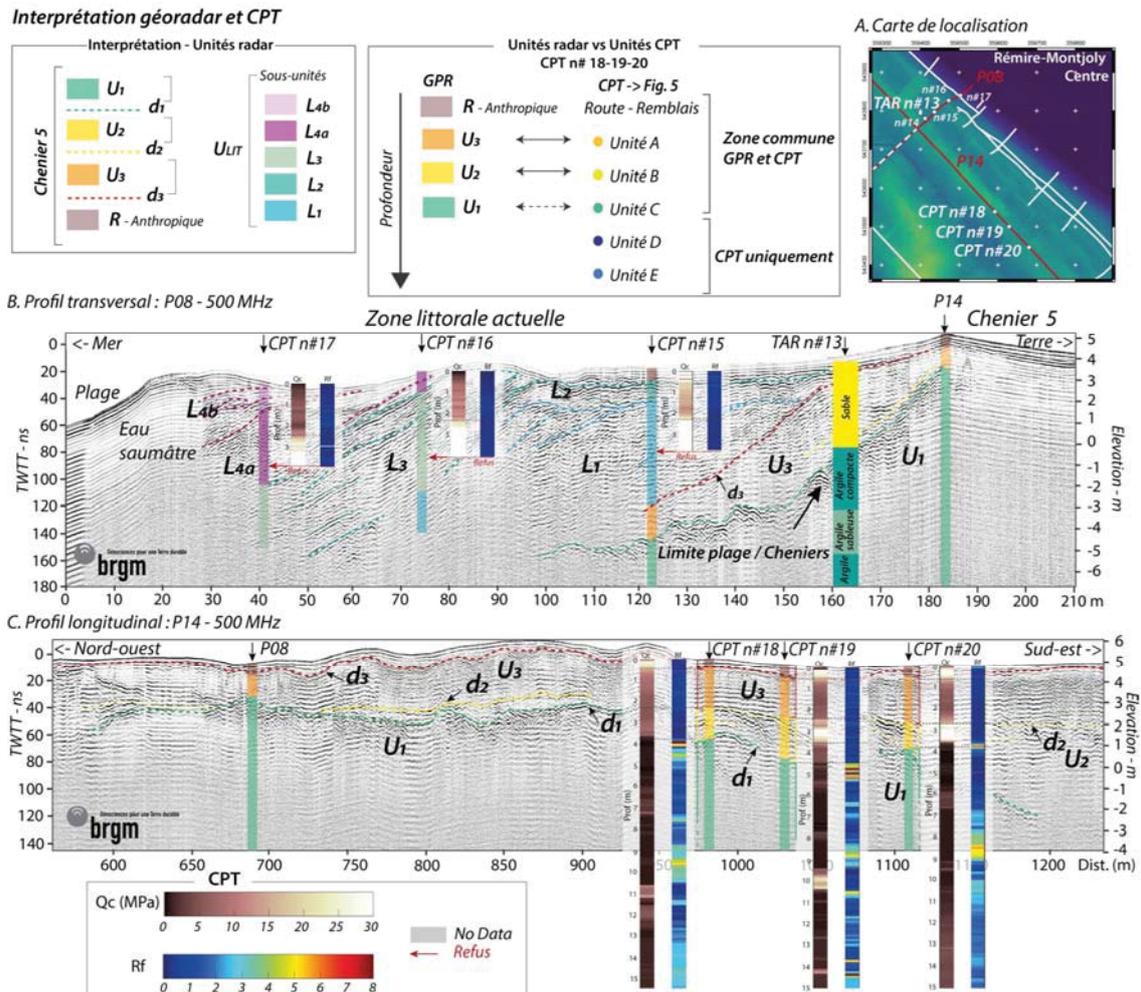
La résistivité de surface est variable sur la zone (de 6 à 2 000 ohm.m). Les anomalies de plus fortes résistivités concordent avec la localisation des cheniers, déterminées préalablement par l'analyse géomorphologique sur le LiDAR, et contrastent avec les zones inter-cheniers plus conductrices. Cette alternance entre chenier/résistant et inter-chenier/conducteur pourrait s'expliquer par la composition sédimentaire des dépôts en subsurface (*i.e.* argilosité), leur différence de compaction ou de teneur en eau.

#### 4.2 Géoradar et CPT

Le couplage géoradar et CPT (Figure 4) fournit des informations sur l'architecture des dépôts et leurs caractéristiques géotechniques, permettant notamment d'interpréter des typologies de sédiment. Cette analyse combinée a notamment permis de distinguer :

- 1) la présence d'un ancien exutoire maintenant comblé sur le secteur sud-est,
- 2) la structuration des dépôts du système dune/avant plage (Figure 4 ; *P08 – transversal, ULIT*),

3) l'interface entre les dépôts de plage sableux et le chenier le plus récent (chenier#5), conforté par la tarière n°13 qui atteste d'un changement lithologique entre du sable et de l'argile compactée (Figure 4.B).



Cette double approche géophysique-géotechnique est particulièrement complémentaire pour la description du chenier#5 présenté ici (Figure 4C ; P14 – longitudinale). Tout d'abord, quatre unités ont été identifiées sur les 5 premiers mètres (Figures 4C et 5):

- L'unité radar U<sub>1</sub>, en profondeur (turquoise), est concordante avec l'unité CPT U<sub>C</sub>, elle correspond à des dépôts avec une dominance de matrice argileuse (SBT 3-5, argile à sable limoneux ; Figure 5C) ;
- U<sub>2</sub> (jaune) drapait l'unité sous-jacente sur une épaisseur de 1 à 2 m (max). U<sub>2</sub> est concordante avec l'unité CPT U<sub>B</sub>, elle est de composition sableuse (SBT 7-6) ;

### Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

- U<sub>3</sub> (orange) recouvre l'unité précédente et peut être directement connectée aux dépôts du système de plage. U<sub>3</sub> est concordante avec l'unité CPT U<sub>A</sub> (SBT 7-6). La répartition des points sur le diagramme de Robertson montre une faible dispersion, ce qui implique une population assez homogène de ces sables (figure 5B) ;
- L'unité « R » en surface est à rattacher à un horizon de remblais et la présence de la route.

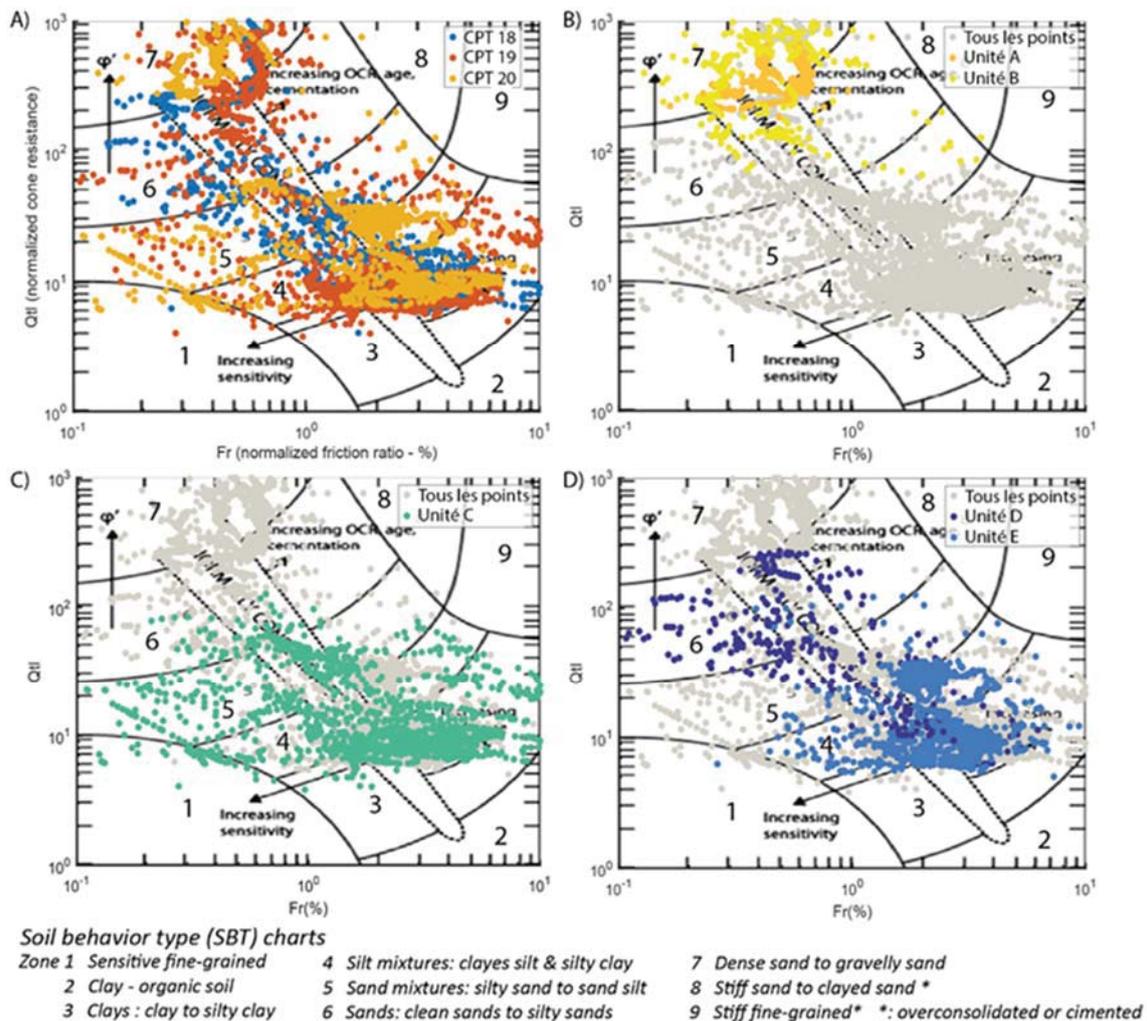


Figure 5. Représentation de A) l'ensemble des points des CPT 18, 19 et 20 en fonction du type de comportement du sol (soil behavior type, SBT), et pour les différentes populations de points identifiées (U<sub>A</sub>-U<sub>E</sub>) correspondant à des horizons aux paramètres géo-mécaniques distincts : B) Unités A et B sableuses et en surface ; C-D) Unités C, D et E alternance d'horizons avec plus ou moins de matrice argileuse.

Les CPT complètent par ailleurs l'investigation en profondeur (ici jusqu'à 15 m de prof.), là où les profils géoradar ne permettent pas d'apporter des éléments (*i.e.* présence

importante de dépôts argileux ; limite de pénétration du signal). Cela permet de distinguer la fin de l'unité  $U_C$  ainsi que deux autres unités sous-jacentes ( $U_D$  et  $U_E$ ) aux caractéristiques distinctes (Figure 5C-D). L'analyse par le diagramme de Robertson (1990) des CPT permet de caractériser les différentes populations de points de ces deux unités. Le comportement du sol pour  $U_D$  est à relier avec la classification des sables propres à sables silteux (SBT 6), alors que  $U_E$  est à relier avec la classification des sédiments argileux (SBT 3-4 : limon argileux à argile). La signature de l'unité  $U_E$  montre des similitudes avec celle de l'horizon argileuse  $U_C$ , précédemment décrite. Ces alternances de dépôts argileux et d'argile sableuse sont concordantes avec les sédiments extraits des tarières (Figure 4).

L'utilisation de CPT pour l'investigation des systèmes littoraux complexe est ici démontrée, permettant une acquisition de données hautes résolutions sur l'ensemble des profils réalisés. De plus, c'est une méthode facile à déployer et peu onéreuse.

#### **4. Conclusions**

L'investigation du littoral guyanais peut être difficile à appréhender notamment en raison des difficultés d'accès aux sites, de la présence de mangrove ou de l'alternance de dépôts sableux et argileux propre au système amazonien. L'association des méthodes déployées dans cette étude a démontré leur capacité à étudier ces littoraux complexes et à caractériser les systèmes de chenier.

D'un côté, le couplage de la sismique passive à la sismique active a permis de couvrir de manière homogène le secteur étudié ainsi que de proposer la 1<sup>ère</sup> carte de la morphologie et de la profondeur du toit du substratum sous couverture sur la zone de Cayenne – Rémire-Montjoly.

De l'autre, l'approche combinée géoradar et géotechnique, par CPT (haute résolution : points tous les 2 cm) et tarière mécanique (résolution pluri-décimétrique), a montré un fort potentiel et une complémentarité des outils pour caractériser finement la géologie de la subsurface. Ainsi, au niveau du chenier n°5, présenté ici, 4 unités communes ont été caractérisées avec les méthodes géoradar et CPT, et 2 unités supplémentaires, aveugles au géoradar, ont été caractérisées en profondeur avec les CPT.

Cette étude multi-méthode à l'interface entre géologie conventionnelle et géotechnique améliore ainsi de manière significative notre capacité à imager et caractériser la couverture sédimentaire de subsurface de la zone d'étude, ainsi que la profondeur et la morphologie du toit du substratum.

L'ensemble des connaissances apporté par ce type d'investigations permet d'alimenter des modèles géologiques, hydrogéologiques, etc., ou des modèles d'évolution du littoral, en fournissant des données de référence sur les géosystèmes côtiers. Spécifiquement, les résultats acquis dans le cadre de ce projet apportent un socle de connaissances primordiales pour les acteurs du littoral notamment en prévision d'aménagement, d'actions de gestion des sédiments et plus largement de gestion du domaine côtier.

### Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Ces plus-values permettent d'envisager d'étendre la méthodologie développée dans cette étude sur d'avantage de géosystèmes littoraux sablo-vaseux du même type, en Guyane ou ailleurs.

#### 5. Références bibliographiques

- ANTHONY E., BRUNIER G., GARDEL A., HIWAT M. (2019). *Chenier morphodynamics on the amazon-influenced coast of Suriname, South America, implications for beach ecosystem services*. *Frontiers in Earth Science*, 7, 2019, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00035>
- BILLY J., BAUDOUIN V., PORTAL A., DEPARIS J., BITRI A., GARCIN M. (2020). *An innovative approach for a comprehensive characterization of coastal dune systems through internal architecture and the associated intrinsic geophysical properties*. *Journal of Coastal Research* 95, 387–391. <https://doi.org/10.2112/SI95-075.1>
- BOYE M. (1963). *La géologie des plaines basses entre Organabo et le Maroni (Guyane française)*. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle. 148 p., Paris.
- BRULE S., JAVELAUD E. (2013). *Méthode H/V en géotechnique. Application à un modèle bicouche*. *Rev. Fr. Géotech.* N° 142, pp. 3–15. doi:10.1051/geotech/2013142003
- GARDEL A., GRATIOT N. (2005). *A satellite image-based method for estimating rates of mud bank migration, French Guiana, South America*. *Journal of Coastal Research* 21, 720-728. <https://doi.org/10.2112/03-0100.1>
- LONGUEVILLE F., AERTGEERTS G., PAQUET F., THINON I., BERNARD J., BORIE A., MORVAN S., GRIGOLETTO F. (2018). *Observatoire de la dynamique côtière de Guyane ODYCG: bilan 2017*. BRGM/RP-67756-FR, 89p.
- ROBERTSON P.K. (1990). *Soil classification using the cone penetration test*. *Can. Geotech. J.* 27, 151–158. <https://doi.org/10.1139/t90-014>
- NAKAMURA Y. (1989) *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 30, 25-33.
- PARK C. B., MILLER R. D., XIA J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. *Geophysics*, 64(3), 800-808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- PROST M.T. (1989). *Coastal dynamics and chenier sands in French Guiana*. *Marine Geology* 90(4): 259–267. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90128-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90128-X)
- SAMYN K., MATHIEU F., BITRI A., NACHBAUR A., CLOSSET L. (2014). *Integrated geophysical approach in assessing karst presence and sinkhole susceptibility along flood-protection dykes of the Loire River, Orléans*. *Engin. geology*, 183, 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.013>