

# CARACTERISATION DES ALLUVIONS DE LA LOIRE ET CORRELATIONS SUR LE SITE DU NOUVEAU CHU DE NANTES.

## CARACTERISATION OF DEPOSITS OF THE LOIRE AND CORRELATIONS ON THE SITE OF THE NEW HOSPITAL OF NANTES.

Olivier DAVID<sup>1</sup>, Anne CHASSAING<sup>1</sup>, Romain BRIELLES<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup> FONDOUEST, Angers, France

**RÉSUMÉ** – Les campagnes de reconnaissances géotechniques réalisées depuis le lancement de l'opération du nouveau CHU de Nantes constituent une importante base de données sur les formations alluvionnaires de l'estuaire de la Loire ; A l'appui de ces résultats, cet article fait une présentation rapide de la lithologie et des données géomécaniques du site et présente quelques corrélations entre les paramètres obtenus.

**ABSTRACT** – The geotechnical survey campaigns carried out since the launch of the operation of the new hospital of Nantes constitute an important database on the alluvial formations of the Loire estuary ; based on these results, this article provides a quick overview of the site's lithology and geomechanical data and analyzes some correlations between the parameters.

### 1. Le projet

Le nouvel ensemble hospitalo-universitaire de Nantes ouvrira ses portes en 2026 en plein cœur de l'île de Nantes. Il s'étendra sur 10 ha en lieu et place de l'actuel MIN.

Le projet se décompose en un ensemble de 12 bâtiments en R+4 à R+6, établis sur un niveau de sous-sol ou vide-sanitaire technique.

La Maîtrise d'Ouvrage du projet est déléguée par le CHU de Nantes à La SODEREC. La Maîtrise d'œuvre du projet est assurée par le groupement ART&BUILD Architecte et mandataire du groupement, PARGADE Architecte, ARTELIA Bâtiment et Industrie, et SIGNES Paysage. Les reconnaissances géotechniques et l'étude géotechnique de conception ont été confiées à FONDOUEST.

### 2. Reconnaissances et lithologie du site

Les investigations réalisées sur le site ont comporté, en particulier, plus de 1500 essais pressiométriques répartis dans 98 sondages, 46 sondages carottés, 43 sondages au pénétromètre statique CPT et CPTu, des profils MASW et 3 essais cross-hole ainsi que des

des essais en laboratoire : identifications, essais œdométriques, triaxiaux CD et UU, Rc...

Le projet occupe la partie Ouest de l'île de Nantes, formée par la réunion de plusieurs îles, la Prairie au Duc étant la principale. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, le site a été progressivement remblayé lors de l'aménagement de la Gare de l'Etat et de l'industrialisation de cette partie de l'île et les boires canalisées ou comblées. Le Sud du site a été aménagé au début du XX<sup>ème</sup> siècle avec la construction des Quais Wilson puis l'implantation du MIN au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle.

La stratigraphie du site est représentée par :

- **des recouvrements sableux supérieurs (RS)** constitués de remblais divers, de remblais hydrauliques sableux propres ou de dépôt naturel sur 1 à 4,5 m d'épaisseur environ,

- **des limons sableux à sables limoneux (LS)** recoupés sous les remblais sur un à six mètres d'épaisseur généralement. Ils sont surtout présents à l'intérieur de l'île et correspondent à des dépôts de crue relativement récents du fleuve,
- **des alluvions à dominante sableuse (ALLs)**, constituées de sables fins, moyens ou grossiers, pouvant inclure une fraction limoneuse ou argileuse variable,
- **des alluvions à dominante argileuse ou limoneuse (ALLa)**, incluant localement des passages organiques à tourbeux,
- le substratum constitué de **micaschistes** peu altérés, compacts, dont le toit est très variable, puisqu'atteint entre 14 et 30 m de profondeur (figure 2).

Les dépôts alluvionnaires sableux ALLs et argileux ALLa sont plus moins imbriqués les uns dans les autres et sont présents en proportion variable, les couches argileuses représentant entre 5 et 60% de la formation suivant les zones. Leur structure souligne l'histoire des cheminements de La Loire et des variations de son lit.

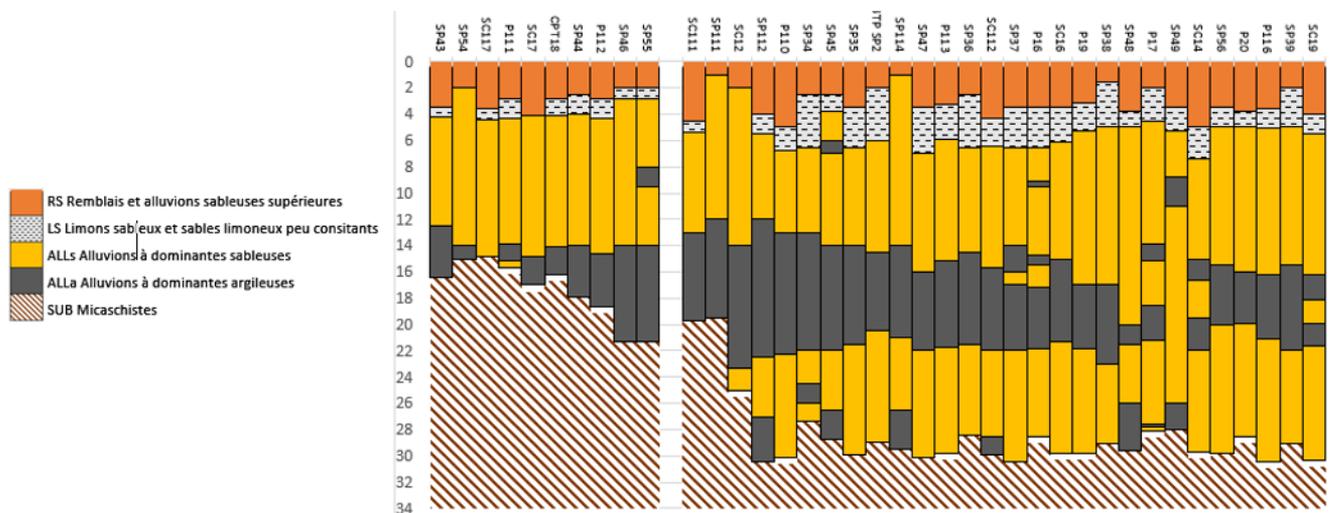


Figure 1. Illustration de la stratigraphie sur une des zones du site

Les terrains sont baignés par la nappe alluviale. A l'étiage, celle-ci présente un gradient moyen de l'ordre de 0,2 à 0,5% et son niveau, très peu influencé par les marées, reste proche du niveau moyen de la Loire près des axes de drainage. Elle est en revanche sensible aux crues du fleuve et son niveau est susceptible de fortes variations en période hivernale.

### 3. Caractérisation géotechnique des formations alluvionnaires

Les valeurs moyennes (moyenne arithmétique ou moyenne inférieure au sens de l'EC7) des principales caractéristiques obtenues sont synthétisées dans le tableau 1.

On note une dépendance avec la profondeur assez marquée des valeurs pressiométriques, dans les alluvions sableuses ALLs en particulier, et de la cohésion non drainée des argiles. Hormis pour les résultats des triaxiaux CD qui sont peu variables (coefficients de variation CV de 5 à 7% par rapport à la droite moyenne sur le diagramme de Lambe), les mesures sont assez dispersées au sein d'un même faciès (CV de l'ordre de 30 à 60% suivant le paramètre et le faciès concerné) mais se répartissent de manière relativement homogène sur l'ensemble du site (composante verticale de la dispersion de 70 à 80 % dans les alluvions ALLs et ALLa).

Eu égard à la nature des formations, les résultats pressiométriques des sols argileux LS et ALLa sont assez atypiques avec des modules  $E_M$  et des rapport  $E_M/\rho_i$  plutôt élevés.

Tableau 1. Caractéristiques moyennes des alluvions

	Limons sableux LS	Alluvions sableuses ALLs	Alluvions argileuses ALLa
Classification LPC	Lp	Sm à Sl	Lt à At (Op localement)
Classe GTR	A1	B1 à B4	A2 à A4
w <sub>n</sub> (%)	30 à 40	5 à 25	50 à 100
IP (%)	-	-	25 à 46
γ <sub>h</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	18,5	19	15,5
VBS	1,3 à 2,5	0,1 à 2,2	-
Cc/(1+e <sub>0</sub> )	0,1	0,04	0,3
Cv (m <sup>2</sup> /s)	7.10 <sup>-7</sup>	8.10 <sup>-6</sup>	3.10 <sup>-8</sup>
Cu (kPa)	45	-	17+1,3.z
φ' / c'	31° / 7 kPa	38° / ≈0	22° / 15 kPa
p <sub>l</sub> * (MPa)	0,5	1,5 p <sub>l,mi</sub> (z) = 0,02.z+1,25	0,7 p <sub>l,mi</sub> (z) = 0,01.z+0,5
E <sub>M</sub> (MPa)	6,5	12 E <sub>M,mi</sub> (z) = 9.(0,1.z+0,5) <sup>0,5</sup>	10
q <sub>c</sub> (MPa)	1,5	10,5	1,6
Indice de comportement I <sub>c</sub>	2,7	1,9	3,1
V <sub>s</sub> (m/s)	150 à 200	200 à 250	150 à 200

(z : profondeur en m par rapport au TN)

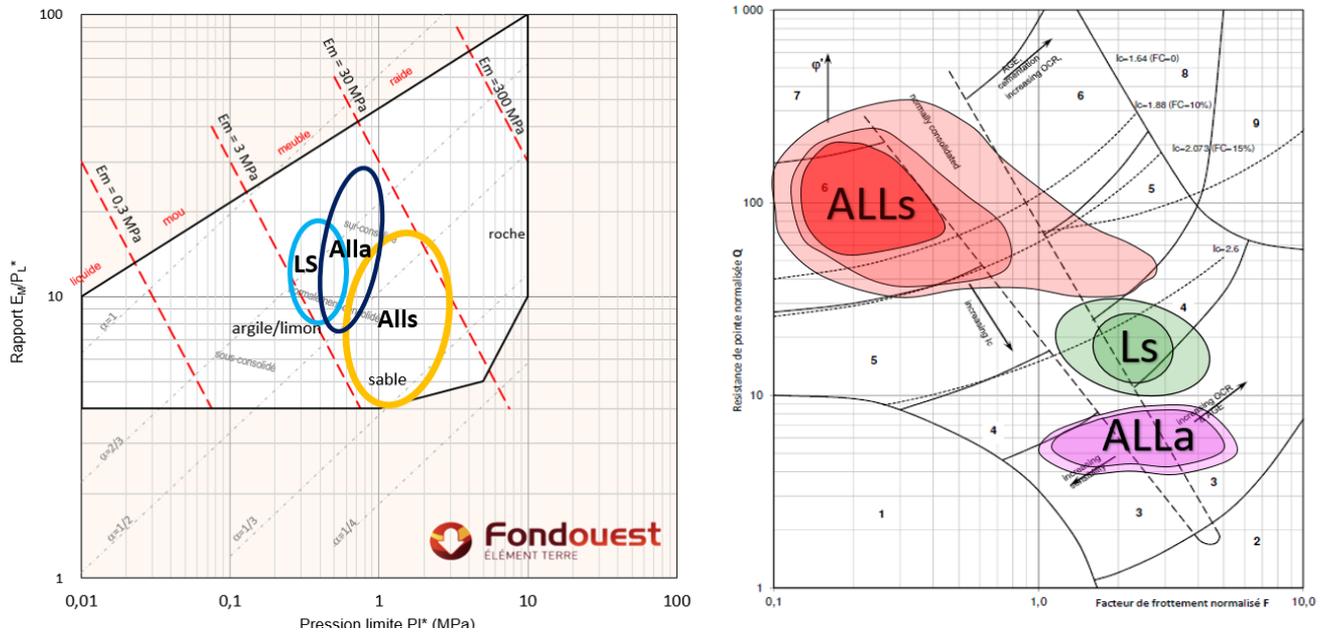


Figure 2. Zones de densité maximale dans les diagrammes de Baud et de Q-F de Robertson

#### 4. Corrélations entre les paramètres

##### 4.1. Corrélations entre q<sub>c</sub>, p<sub>l</sub> et E<sub>M</sub>

Les rapports entre q<sub>c</sub>, p<sub>l</sub> et E<sub>M</sub> présentés dans le tableau 2, restent dans les intervalles de valeurs donnés par la bibliographie (Vaillant et Aubrion, 2014) : dans la moyenne pour l'horizon sableux ALLs, et dans la fourchette basse pour les faciès argileux et limoneux (LS et ALLa) avec des valeurs généralement associées à un état de surconsolidation.

Tableau 2. Rapports moyens entre q<sub>c</sub>, p<sub>l</sub> et E<sub>M</sub>

Faciès	(q <sub>c</sub> -σ <sub>vo</sub> )/p <sub>l</sub> *	q <sub>c</sub> /E <sub>M</sub>
LS	3	0,25
ALLS	7	0,9
ALLA	2,5	0,16

De même, la corrélation  $p_i^* \# (q_c - \sigma_{v0})^{0,8}$  (Gress, 2012) est bien vérifiée dans le faciès sableux ALLs, alors qu'elle sous-estime de 30 à 60% la valeur de  $p_i^*$  dans les sols fins LS et ALLa.

#### 4.2. Corrélations entre $q_c$ et $C_u$

La littérature et l'Eurocode 7 (NF EN 1997-2) proposent entre  $q_c$  et  $C_u$  des relations du type  $C_u \# (q_c - \sigma_{v0})/N_k$ . La figure 3 permet une comparaison :

- des demi-déviateurs mesurés au triaxial UU dans les faciès LS et ALLa,
- des courbes de régression moyennes inférieures (mi) et basse (b) retenues pour  $C_u$ ,
- des cohésions corrélées sur les résultats de trois pénétromètres jugés représentatifs dans les faciès argileux par  $C_u \# (q_c - \sigma_{v0})/17$  qui donne une bonne correspondance.

On note une faible dispersion des valeurs corrélées sur  $q_c$  sous la droite moyenne.

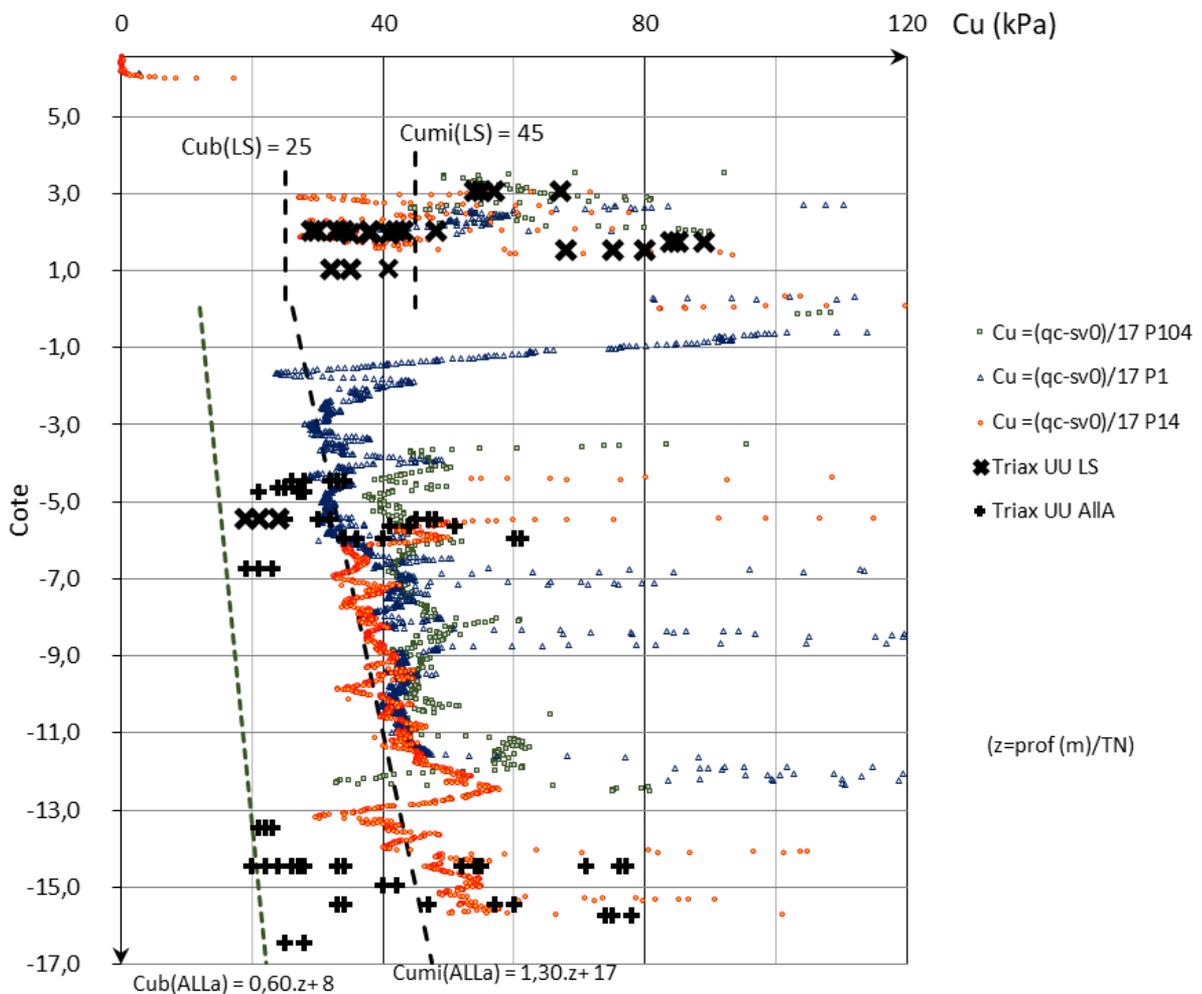


Figure 3. Corrélation entre  $C_u$  et  $q_c$

A titre de comparaison, la corrélation  $C_u = p_i^*/12 + 30$  kPa,  $0,3 < p_i^* < 1$  MPa (Cassin, 2005) conduit à des valeurs respectives de  $C_u$  de 65 kPa et 80 kPa dans les faciès LS et ALLa, ce qui confirme le caractère a priori atypique des résultats pressiométriques obtenus dans les horizons limono-argileux.

### 4.3. Corrélations entre $\varphi'$ , $q_c$ et $p_i^*$

Le tableau 3 ci-après permet de comparer les caractéristiques moyennes obtenues à l'essai triaxial CD dans les sables ALLs et diverses corrélations entre  $\varphi'$  et  $q_c$  ou  $p_i^*$  :

- (1) Ménard :  $\varphi = 24^\circ + 4. \ln(4. p_i^*) / \ln(2)$
- (2) Combarieu :  $\sin \varphi = 1,125. (0,125 + \ln(p_i' / \sigma'_{v0}) / (\ln(p_i' / \sigma'_{v0}) + 3,375))$
- (3) EC7 (Stenzel et al.) :  $\varphi = 23^\circ + 13,5. \log(q_c)$ , sables mal gradués hors nappe
- (4) Kulhawy & Mayne :  $\varphi = 17,6^\circ + 11. \log(q_{c1})$ , sable roulé propre
- (5) Robertson & Campanella :  $\tan \varphi = 0,373. (\log(q_c / \sigma'_{v0}) + 0,29)$

Tableau 3. Comparaison des résistances au cisaillement corrélées

Essais in situ (moyennes)			Triax. CD	Ménard (1)	Combarieu (2)	EC7 (3)	Kulhawy & Mayne (4)	Robertson & Campanella (5)
Prof. (m)	$q_c$ (MPa)	$p_i^*$ (MPa)	$\varphi'_{mi}$ (°)	$\varphi'_{cor}$ (°)				
5	10,5	1,35	38	34	40	37	40	41
12		1,50		34	37	37	36	39
20		1,65		35	36	37	33	37

Les valeurs corrélées sont globalement en accord avec celles mesurées au triaxial. La relation (2) apparaît plus représentative que la relation (1) qui sous-estime la résistance au cisaillement d'environ 12 à 15%. La formule (3), qui ne fait pas intervenir la contrainte effective se prête bien, en première approche, à une interprétation à partir de la valeur moyenne de  $q_c$  mais, de manière générale, une exploitation correcte des corrélations sur le pénétromètre nécessite un traitement graphique point par point sur chaque profil.

### 4.4. Corrélations entre OCR, $C_u$ , $c'$ et $q_c$

La figure 4 permet de comparer les taux de consolidation dans les sols fins LS et ALLa :

- issus de l'interprétation des essais œdométriques
- corrélés sur  $C_u$  à partir de la relation de Skempton :  
 $C_u = (0,11 + 0,0037. IP). \sigma'_p = 0,22. \sigma'_p$
- corrélés sur  $c'$  par :  $OCR = [1 + c' / (\sigma'_{v0} \cdot \tan \varphi')]^{1,8}$  (Gress, 2012)
- corrélés sur un pénétromètre représentatif par les deux relations ci-après :
  - o  $OCR = (2,625 + 1,75. \log Fr)^{-1,25} \cdot [(q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}]^{1,25}$  (Robertson, 2012)
  - o  $OCR = [(q_t - \sigma_{v0})^{0,8m} / \sigma'_{v0}]^{1,25}$ , avec  $m = 0,9$  (Gress, 2012)

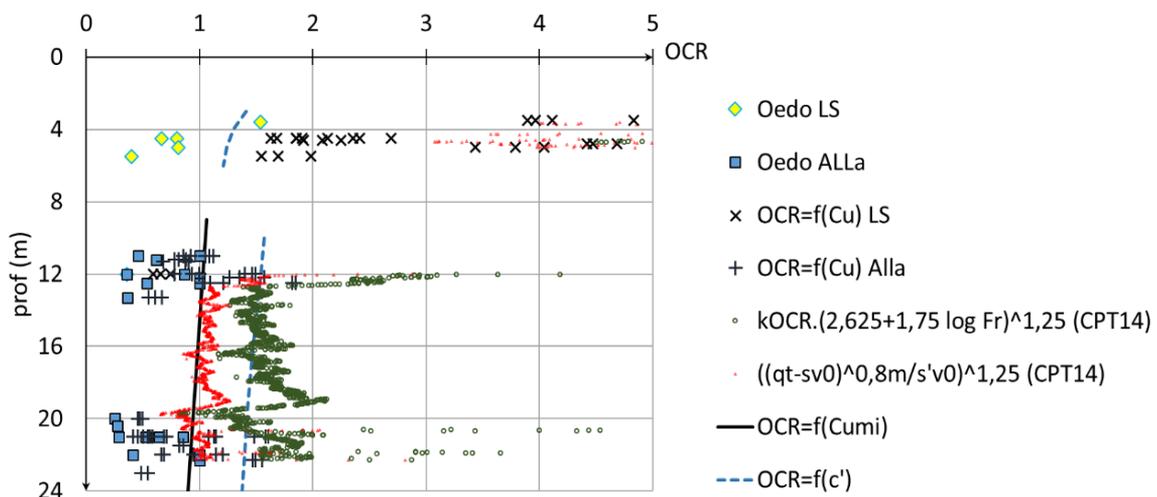


Figure 4. Corrélation sur l'OCR

Globalement, les essais réalisés traduisent des états normalement à légèrement surconsolidés, en cohérence avec l'interprétation de la figure 2.

La corrélation sur la moyenne inférieure des cohésions mesurées au triaxial UU dans les argiles ALLa,  $C_{u_{mi}} = 17 \text{ kPa} + 0,1.z$ , reste en particulier très proche de 1.

Les OCR donnés par les essais œdométriques, compris entre 0,25 et 1, apparaissent nettement sous-estimés et sont à associer à un probable remaniement des échantillons.

#### 4.5. Corrélations entre $C_c$ et $W_n$

Les indices de compressibilité œdométriques sont bien corrélés pour l'ensemble des faciès avec la teneur en eau par une régression linéaire d'équation  $C_c = 0,012.(W_n-10)$ .

La courbe de tendance  $C_c/(1+e_0) = f(\log(W_n))$  reproduit remarquablement la relation proposée par F.Blondeau :  $C_c/(1+e_0) = 0,45.\log(W_n/15)$ .

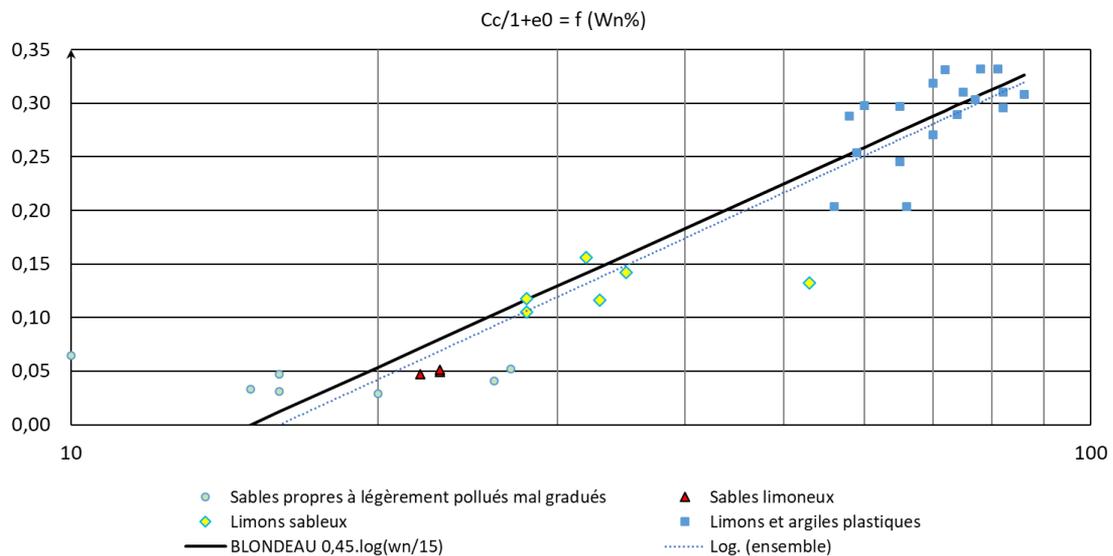


Figure 5.  $C_c/(1+e_0) = f(W_n)$

#### 4.6. Corrélations sur $V_s$

La littérature propose des corrélations de type  $G_{max} = \rho.V_s^2 \# k.E_M$  avec des valeurs de  $k$  variant généralement de 6 à 12 (Pecker :  $k=7$  ; Jandel :  $k = 9$  pour les essais avec préforage, 6 pour les essais avec refoulement...).

Sur cette base, les profils Cross Hole (CH2 et CH3) sont comparés sur la figure 6 avec les résultats des sondages pressiométriques les plus proches et les valeurs moyennes de  $E_M$ . L'ordre de grandeur des  $V_s$  corrélées avec  $k = 6$  est globalement très correct.

Les Cross-Hole sont également comparés sur la figure 7 avec les  $V_s$  corrélées sur les CPT et CPTu les plus proches suivant plusieurs approches : Baldi et al (1989) dans les sables, Mayne et Rix (1995) dans les argiles, Andrus et al (2007).

Ces corrélations fonctionnent bien dans les sables sous nappe. En surface (hors nappe) et dans les alluvions argileuses, les  $V_s$  apparaissent sous-estimées. Dans les argiles, ce constat peut (au moins partiellement) être lié à un effet d'échelle et à la nature lenticulaire des passées argileuses.

#### 4.7. Modules de déformation et courbes de dégradation

La figure 8 donne une représentation synthétique, sur la courbe de dégradation  $G=f(\epsilon)$ , des corrélations entre le module élastique et les valeurs moyennes de  $E_M$ ,  $E_a$ ,  $q_c$ ,  $E_{oed}$ ,  $V_s$ . Les taux de déformation associés sont indicatifs et peut-être discutables mais témoignent d'une bonne cohérence entre les résultats obtenus.

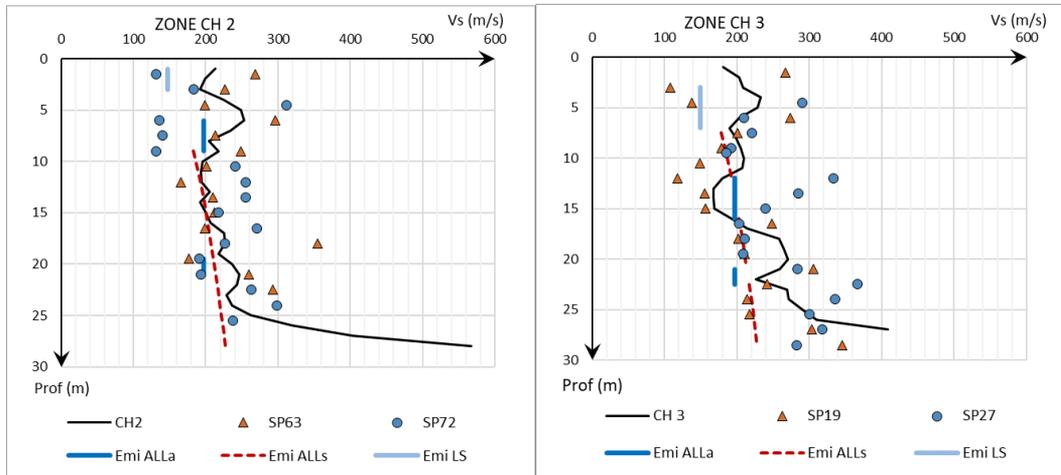


Figure 6. Comparaison des profils Cross-Hole et des corrélations sur  $E_M$

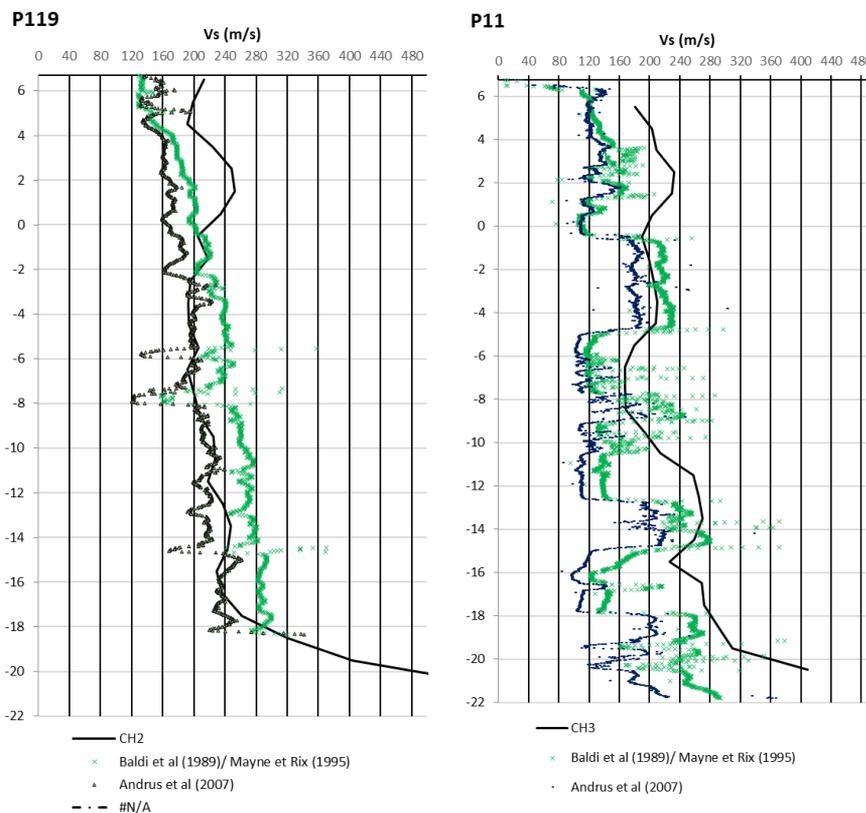


Figure 7. Comparaison des profils Cross-Hole et des corrélations sur le pénétromètre

## 5. Conclusions

L'analyse détaillée et la mise en perspective des données géotechniques recueillies lors des campagnes de reconnaissance réalisées sur le site du futur CHU de Nantes permettent de préciser les corrélations entre les résultats d'essais et d'apprécier leur représentativité dans le contexte régional. Dans le cadre de l'étude géotechnique de conception du projet, cette démarche, mise en œuvre dès la phase d'avant-projet, a permis de limiter les incertitudes associées à la définition des valeurs caractéristiques à considérer pour la justification des ouvrages et d'optimiser le programme des investigations complémentaires nécessaires pour finaliser la conception, en privilégiant notamment les investigations in situ.

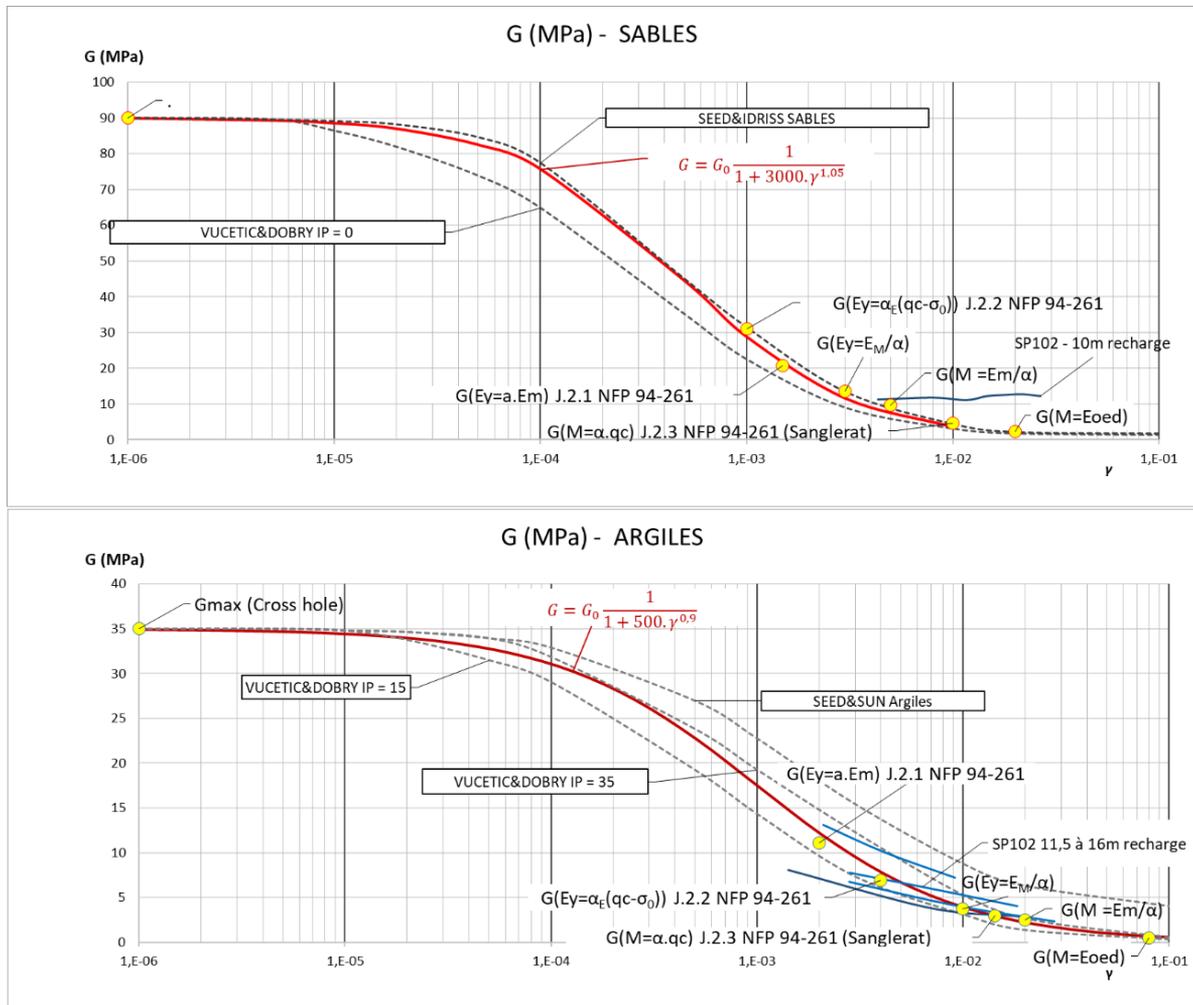


Figure 8. Courbes de dégradation du module de cisaillement

## 6. Références bibliographiques

- Blondeau F. (2014). Florilège de retours d'expérience à l'attention des jeunes géotechniciens. Conférence Coulomb 2014.
- Cassan M. (2005). Le Pressiomètre et la résistance au cisaillement des sols cas particulier des argiles saturées. Actes du Symp. Intern. ISP5 – PRESSIO 2005, Paris, Vol.1.
- Combarieu O. (1996). Estimation rapide de l'angle de frottement d'un sol granulaire au pressiomètre. BLPC, vol. 203, pp. 121-123.
- Gress J.C. (2012). Corrélations nouvelles pour améliorer la pertinence du diagnostic géotechnique. JNGG 2012.
- Hamza M., Shahien M. (2013). Compressibility parameters of cohesive soils from piezocone. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2015). Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering 6th Edition. Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Vaillant J.M., Aubrion P. (2014). Correlations entre les résultats d'essais pressiométriques et de pénétration statique, JNGG 2014.
- NF P94 261 (2013), Norme française d'application de l'Eurocode 7 pour les fondations superficielles, AFNOR
- NF EN 1997-2 (2007), Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais Reconnaissance des terrains et essais, AFNOR.