



**École Nationale d'Ingénieurs de Tunis**  
**Unité de Recherche Ingénierie Géotechnique**  
**05/UR/11-06**



**Le 25/06/2009**

**Thèse de Doctorat**

# **Détermination des caractéristiques physiques et mécaniques de l'argile molle de Tunis**

**Lamia TOUITI BOUEBDELLAH**

**Directeur de thèse: Prof. M. Bouassida & Co Directeur de thèse Prof. W. Van Impe**

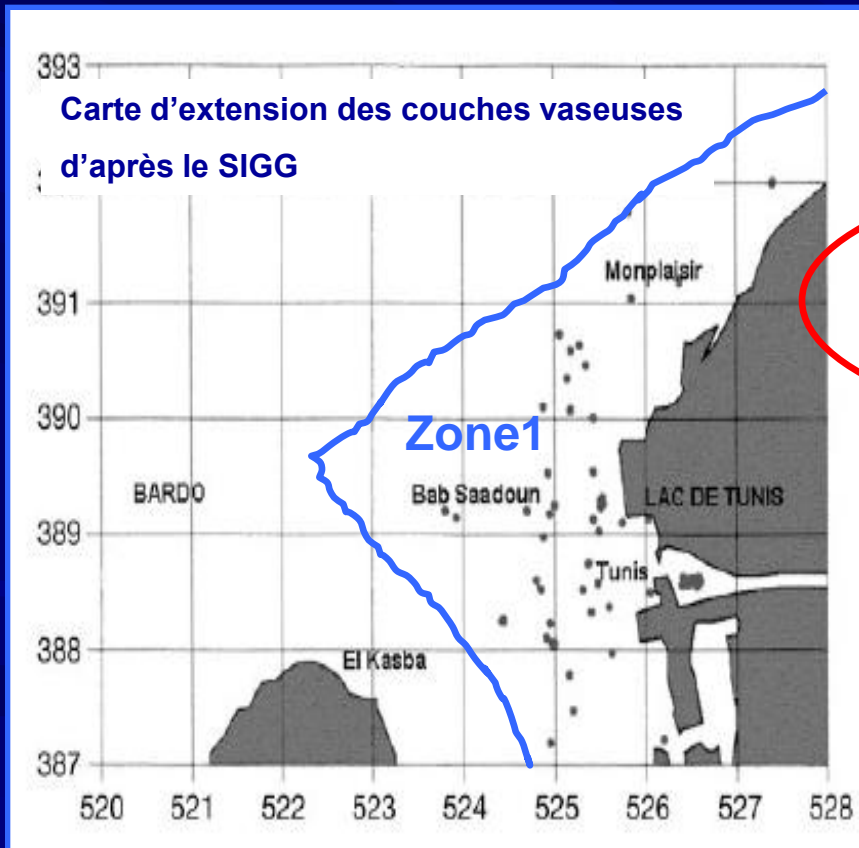
## Plan de l'exposé

- Introduction
- La sensibilité de l'argile molle de Tunis (amT)
- Le comportement mécanique de l'amT
  - État critique et état limite de l'amT
  - La compressibilité
  - Impact de la sensibilité
- Classification de l'amT
- Essais pressiométriques dans l'amT
  - Etude analytique , numérique et analyse inverse
  - Domaine de validité
- Conclusion générale

# ORIGINE GEOLOGIQUE

Analyse du SIGG (Kaaniche, Inoubli, Zargouni, 2000)

**Zone 1: Plaine de Tunis = importante vaseière (quaternaire récent)**



Remblai: 1 à 8m

Complexe vaseux

**Vases superficielles**

Environnement lagunaire: Dépôt vases superficielles grises et noires

**Vases semi-profondes**

**Vases profondes**

Substratum : Complexe argilo-sableux

# Paramètres Géotechniques

Teneur en eau $w$			6 [13,3-18,2]
Limite de liquidité $W_L$			6 [5,7-14,2]
Limite de plasticité $W_P$			6 [0,27-1,58]
Indice de plasticité $I_p$			25 [2-40]
Indice de liquidité $I_L$			65 [28-138]
Indice des vides $e$	1,69[0,89-3,68]	Pression limite (kPa)	65 [28-138]



# Sensibilité

$$S_t = \frac{C_u}{C_{ur}}$$

## Exemples de mesures de sensibilité de l' AMT

Cu (scissomètre) (kPa)	Cur (scissomètre) (kPa)	Sensibilité (S <sub>t</sub> )
30,0	8,0	3,8
22,0	4,0	5,5
20,0	5,0	4,0
8,0	2,0	4,0
9,0	2,0	4,5
8,0	2,0	4,0
13,0	3,0	4,3
18,0	3,0	6,0
21,0	3,0	7,0
7,0	2,0	3,5
12,0	2,0	6,0
11,0	2,0	5,5
19,0	3,0	6,3
22,0	5,0	4,4
27,0	2,0	13,5
9,0	2,0	4,5
10,0	2,0	5,0
12,0	2,0	6,0
5,0	1,0	5,0
11,0	0,5	22,0
18,0	2,0	9,0
18,0	4,0	4,5
12,0	2,0	6,0



Site Avenue  
de Ghana

Site Radès-  
Goulette



Cu (scissomètre) (kPa)	Cur (scissomètre) (kPa)	Sensibilité (S <sub>t</sub> )
17,9	4,3	4,2
21,5	2,4	9,0
21,5	9,0	2,4
14,1	2,4	5,9
39,7	3,3	12,0
12,0	3,0	4,0
16,0	6,0	2,7

## **Facteurs contribuant à la sensibilité**

*(Quigley 1979, Rankka et al, 2004)*

**F1- Origine marine**

**F2- Forte teneur en carbonates**

**F3- Faible vitesse de sédimentation**

**F4- Faible surface spécifique (forte teneur en silt)**

**F5- Faible teneur en smectite**

**F6- Faible activité**

**F7- Potentiel en ion d'hydrogène  $\text{pH} > 7$**

**F8-  $w \geq W_L$**

**F9- Lessivage**

**F10- Présence de dispersants organiques (Fort Potentiel Zeta -  
Double Couche Diffuse large)**



## Présence en abondance de la MO

- Couleur grise noirâtre à verdâtre (fer réduit)
- Teneur en MOA

N° Echantillon	Echantillon	Corg (%)	MO (fraction < 63µm)	MO (%)
1	Radés-Canal Kheireddine (27.3-28.0)	0.47	0,8	0,7
2	Radés-Canal Kheireddine (30.10-30.8)	0.70	1,2	1,0
3	Rades-Goulette-Route liaison Nord (5.20-8.70)	3.98	6,9	6,5
4	Goulette-Canal Kheireddine (18.6-19.3)	0.66	1,1	1,1
5	Région du lac Sud (Z=4m)	1.72	3,0	2,2
6	Port de pêche Goulette	1.57	2,7	-

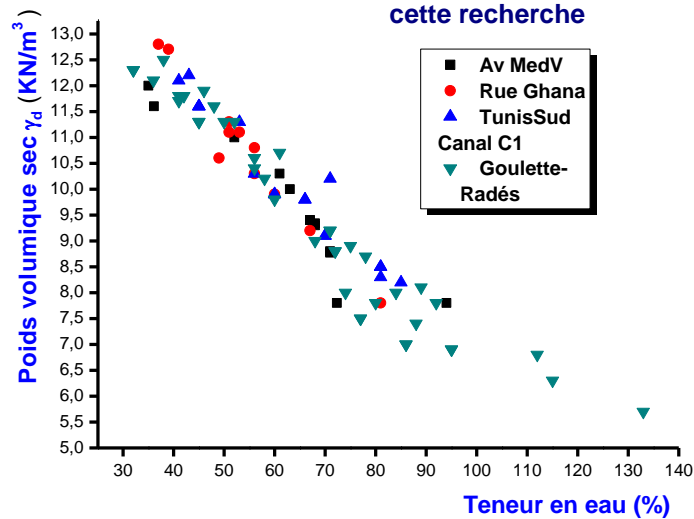
## Fortes Teneurs en carbonates

Ech N°	Teneur en CaCO <sub>3</sub> (fraction<63µm)
1	32
2	36
3	28
4	24
5	-
6	30

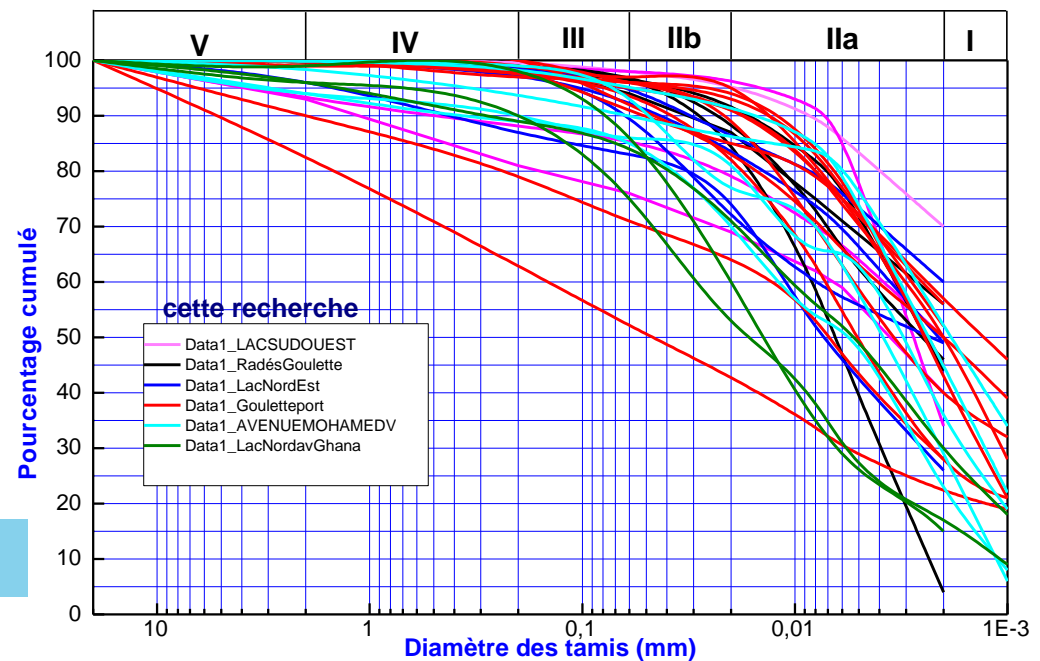


- Abondance de calcaire
  - Abondance de la MO
  - Abondance du quartz
  - Abondance d'argile en grumeaux (2 à 63  $\mu\text{m}$ ) (floculations)
  - Courbe de variation du milieu de dépôt
- 
- L'amT est d'origine marine

## F3 et F4 :



Fuseau granulométrique des sols mous de la ville de Tunis (Z&lt;20m)



**Faible vitesse de sédimentation**

**Faible surface spécifique  
(forte teneur en fraction classe II)**

## F5

## L'identification des minéraux argileux par diffraction des rayons X

*Tributh et Lagaly (1991)*

Echantillons	1	2	3	4	5	6
Montmorillonite	0,8	0	3	6,6	3,4	0
Chlorite	2,5	13,4	1,4	3,6	3,8	5,0
Kaolinite	25,4	33	40,7	47,6	35,6	31,7
Illite	71,3	53,6	54,9	42,2	57,2	63,3



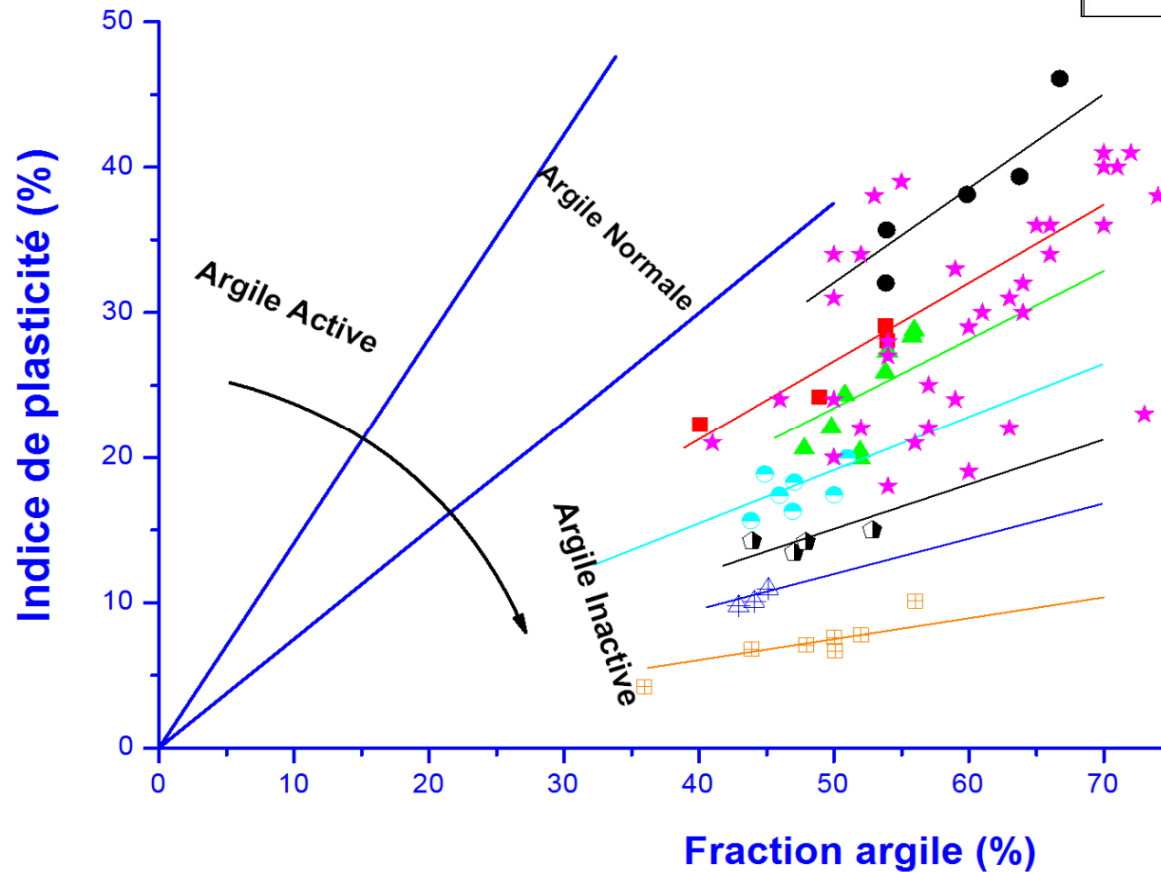
Faible teneur en smectite de l'amT

F6

## ACTIVITE

$$A_c = \frac{I_p}{d < 2\mu\text{m}}$$

- Studenterlunden, Oslo:  $A_c=0,54$ , concentration en sel=27g/l
- Oslo harbour:  $A_c=0,47$ , concentration en sel=12g/l
- ▲ Horton:  $A_c=0,44$
- Ensjoevin, soraca above quick clay:  $A_c=0,38$
- ◐ Toyen, Oslo, argile sensible:  $A_c=0,30$  concentration en sel=5,9 g/l
- ◓ Bekkelagat:  $A_c=0,24$  concentration en sel=1g/l
- ◑ Toyn, Oslo, quik clay strata:  $A_c=0,15$  concentration en sel=3g/l
- ★ Argile molle de Tunis :  $A_c=0,50$



(Bjerrum, 1955),  
(Mitchell, 1976) et (Resenqvist, 1978)

★ cette recherche

**Ac (argiles sensibles) < 0,65**



**Faible activité**

## F7

- Sols naturels  $5,5 < \text{pH} < 8,3$   
*P.O Van Impe, 2003*
- Forte teneur en calcaire de l'amT

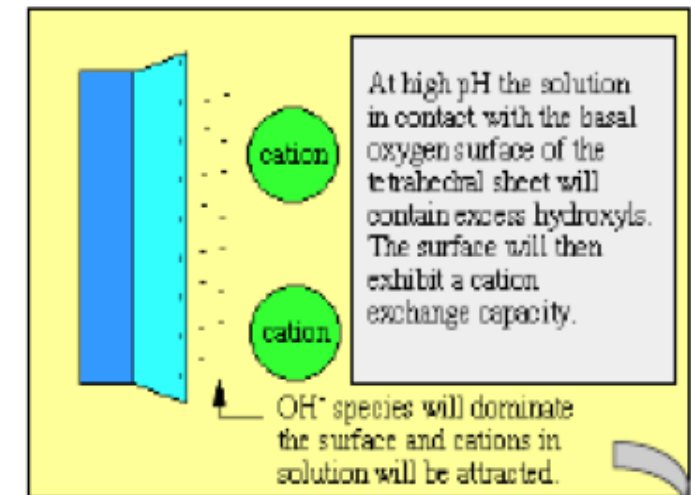
amT est un milieu alcalin

minéral	pH <sub>ZPC</sub>
Quartz	1 - 3
Illite	6,5
Kaolinite	1 - 4,6
Montmorillonite	< 2 - 3

**Stumm et Morgan 1981**

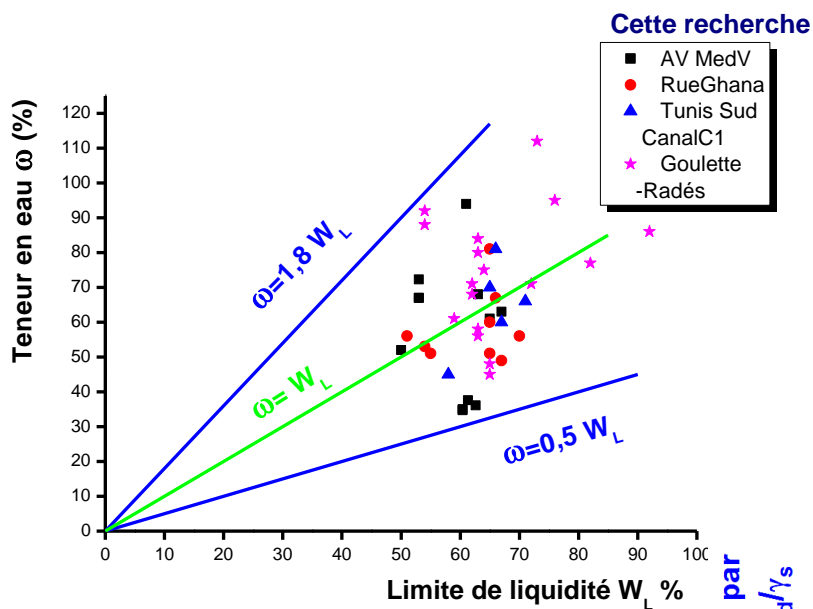


**pH (milieu) > pH<sub>ZPC</sub> (minéraux AMT)**  
**⇒ MOH + OH<sup>-</sup> → MO<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>O**



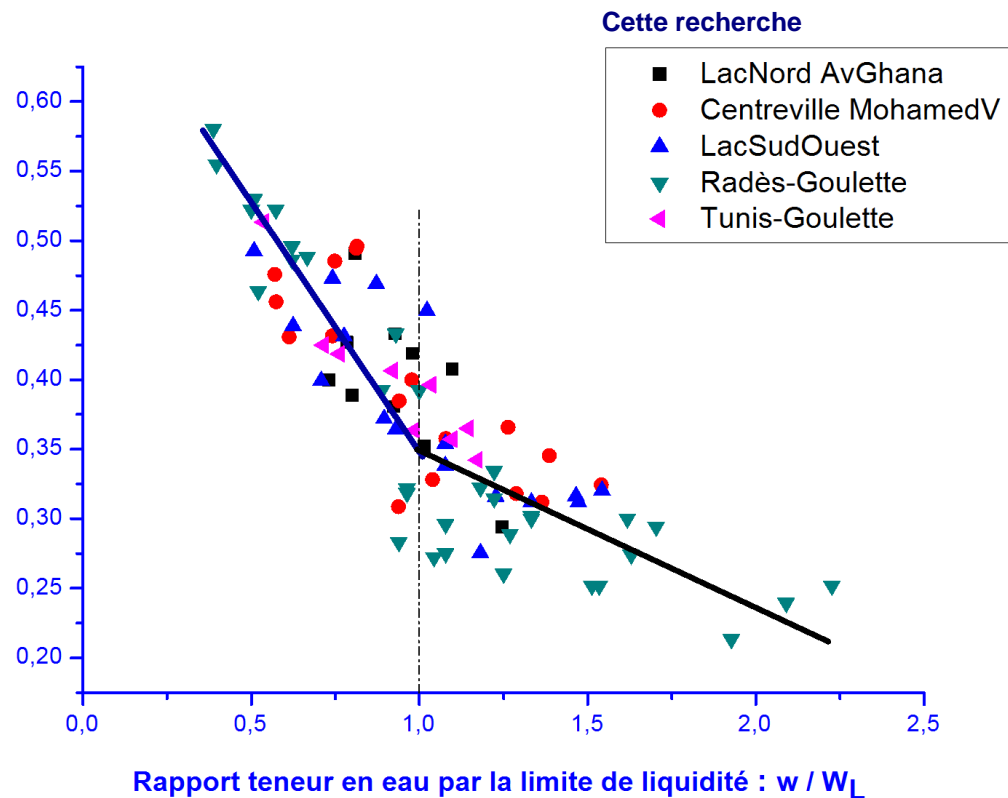
pH's above the pH<sub>ZPC</sub>, the solid would have cation exchange capacity.

## F8



$$w \geq W_L$$

Rapport du poids volumique sec par  
le poids volumique spécifique  $\gamma_d/\gamma_s$



## F9 Le lessivage est un processus de post-dépôt

(Brenner et al., 1981; Lebuis et al., 1983; Fallman et al., 2001)

### lessivage

Dans l'eau douce

Structure floculée

→ Élimination des ions de sels dissouts ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , ...) de l'eau interstitielle



Argiles à de niveaux élevés de sensibilité

### Lessivage

Dans l'eau dure

Structure floculée

→ Élimination des ions de sels dissouts ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , ...) de l'eau interstitielle



Niveaux modérés de sensibilité

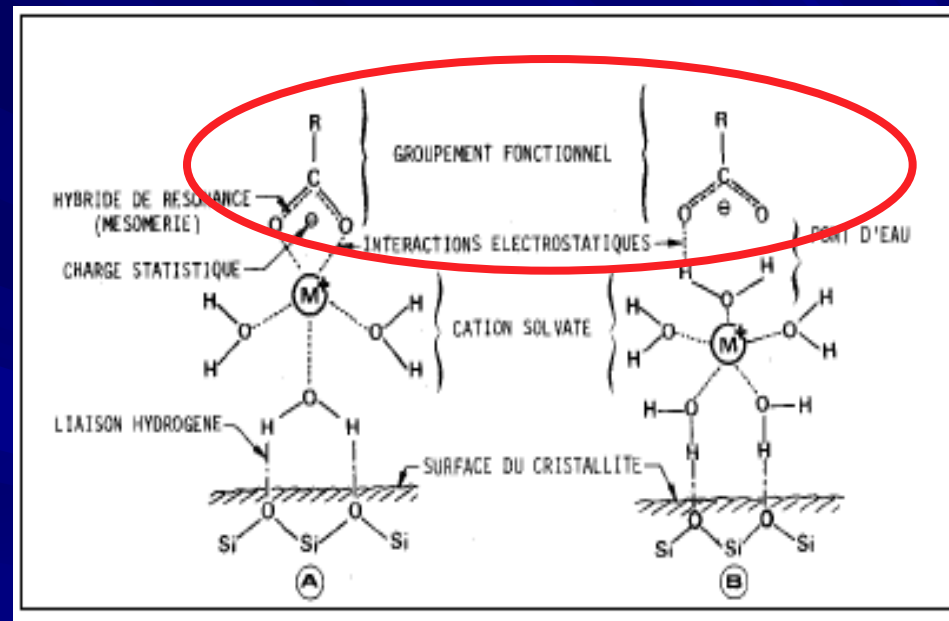
## F10

## ACTION MOA

CEC (MOA) = 150 à 300meq/100gr

Millar et al., 1965 et P.O Van Impe, 2003

Greenland, 1971



Söderblom, 1969

Addition de MOA à l'argile → RCOO<sup>-</sup> s'associent Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>

Potentiel electrocinétique beaucoup plus élevée et alors des degrés de sensibilité plus élevées



## Conclusion1

**Modèle physique de développement de la sensibilité dans la ville de Tunis**

**Argile molle de Tunis (  $z < 20\text{m}$  ) = minéraux argileux non gonflants + quartz**

**Origine marine: Dépôt dans l'eau salée**

**Faible potentiel Zéta résultant d'une structure flocculée**

**Présence C. plus perméables, forte abondance de la fraction carbonatée, forte  $w$ , indiquent un lessivage dans une eau dure**

**Faible sensibilité, argile normale**

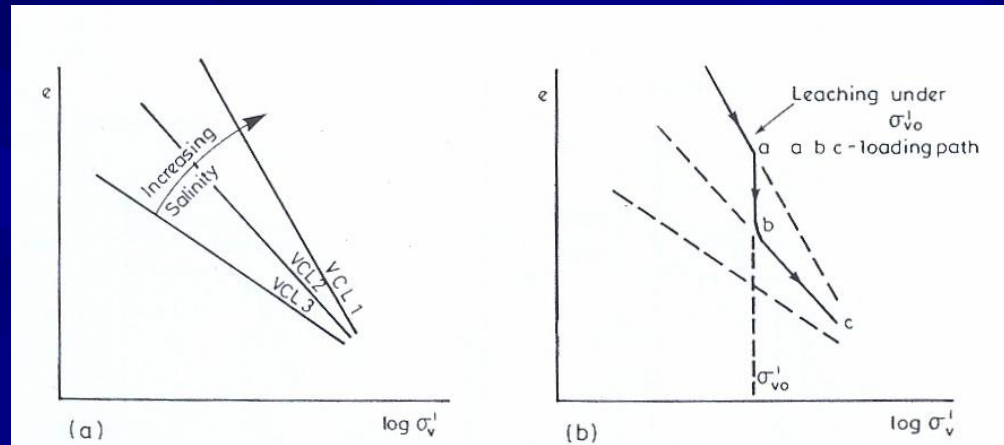
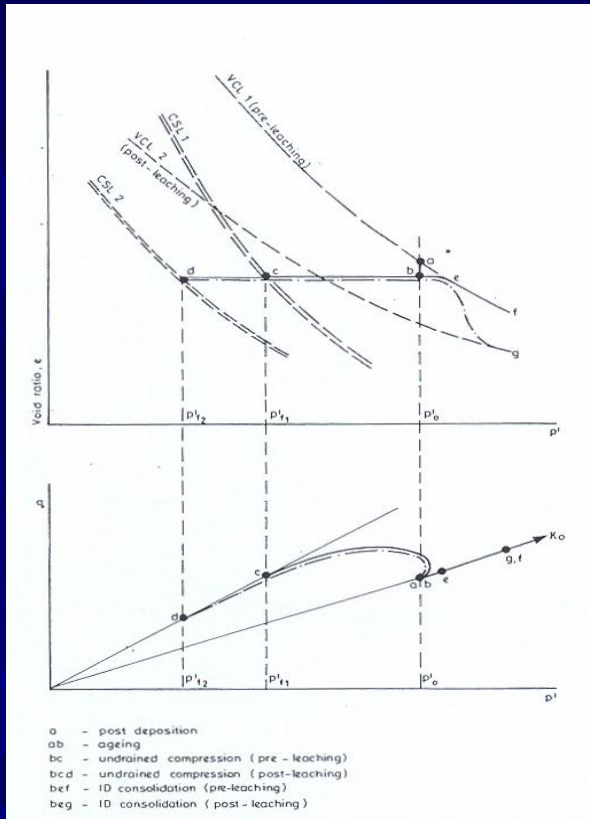
**Action de la MOA (agents de dispersion)**

**Sensibilités élevées Quick clays**

# 1. Principes - Impact de la sensibilité

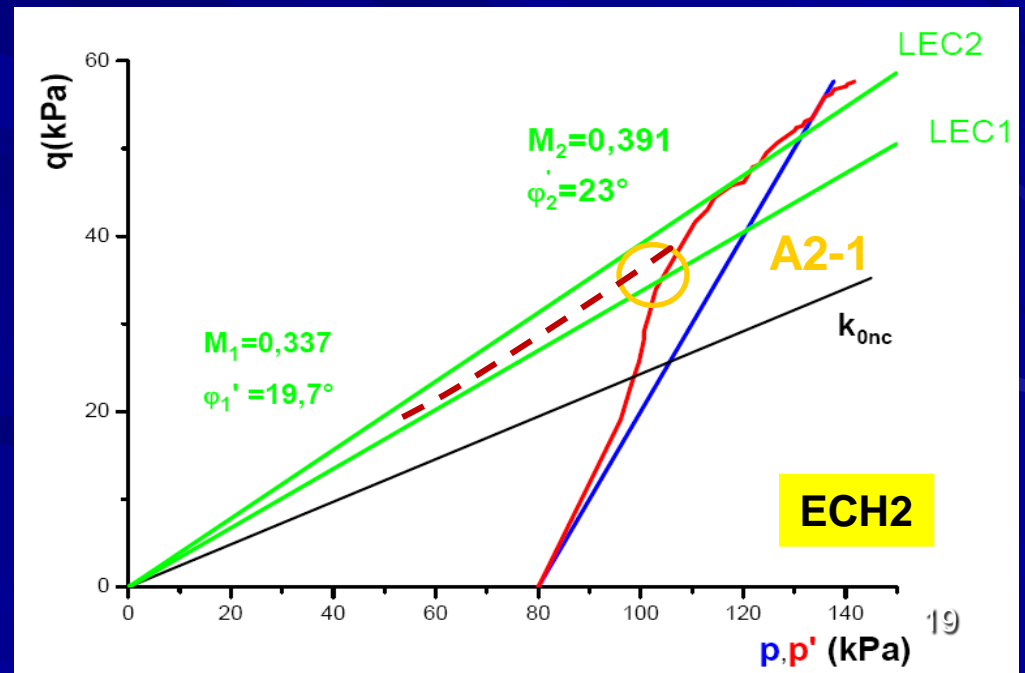
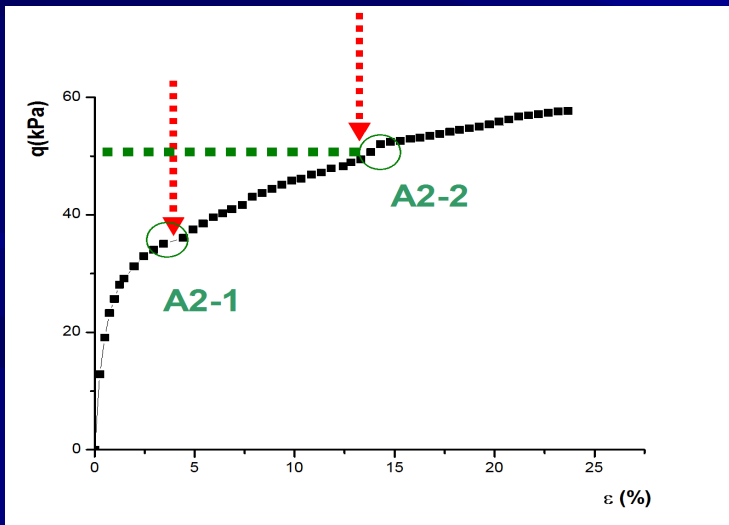
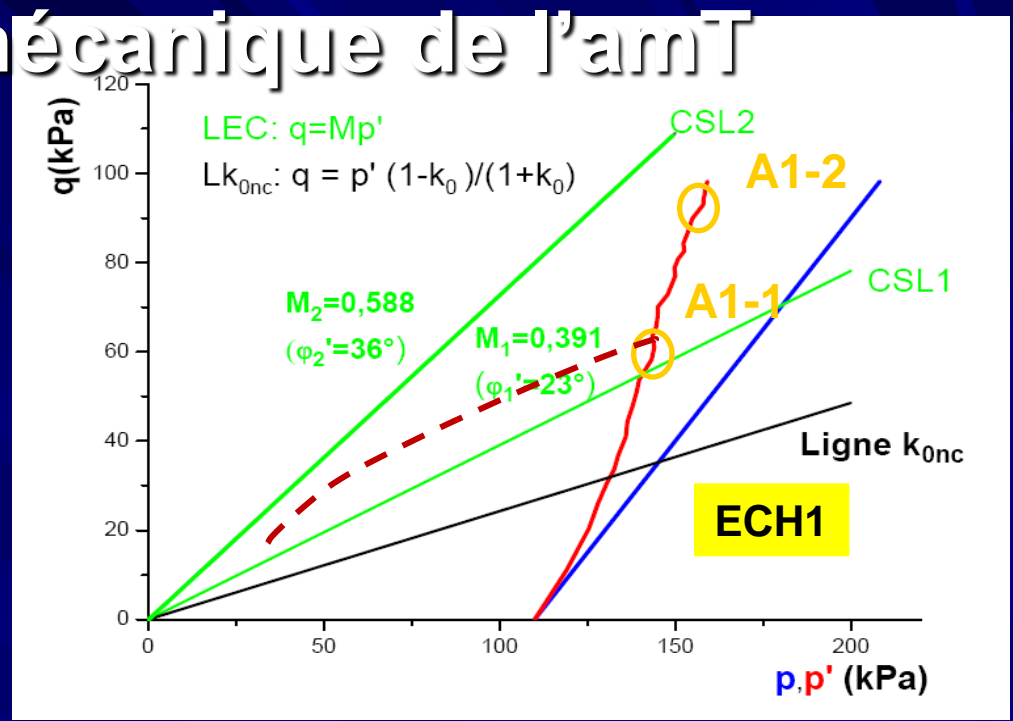
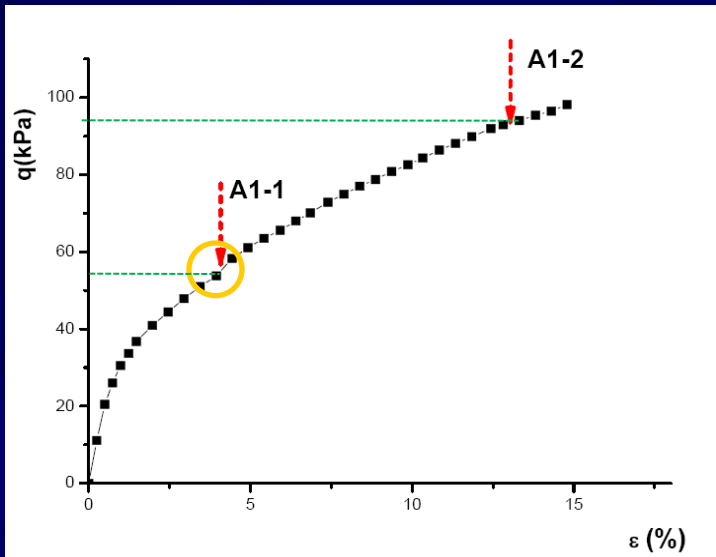
Déplacement de LCI (ICL) et LEC (CSL)

Réponse métastable

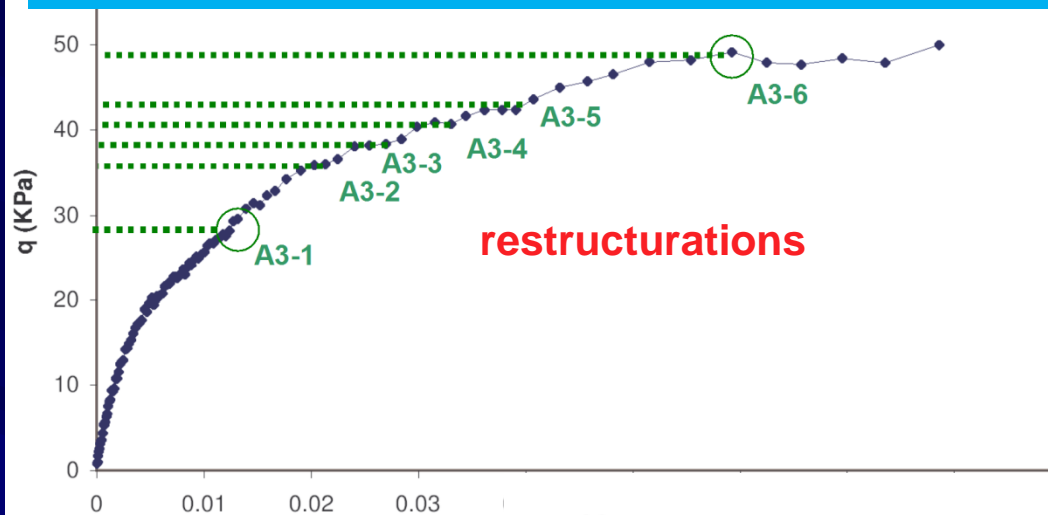


# 2. Comportement mécanique de l'amT

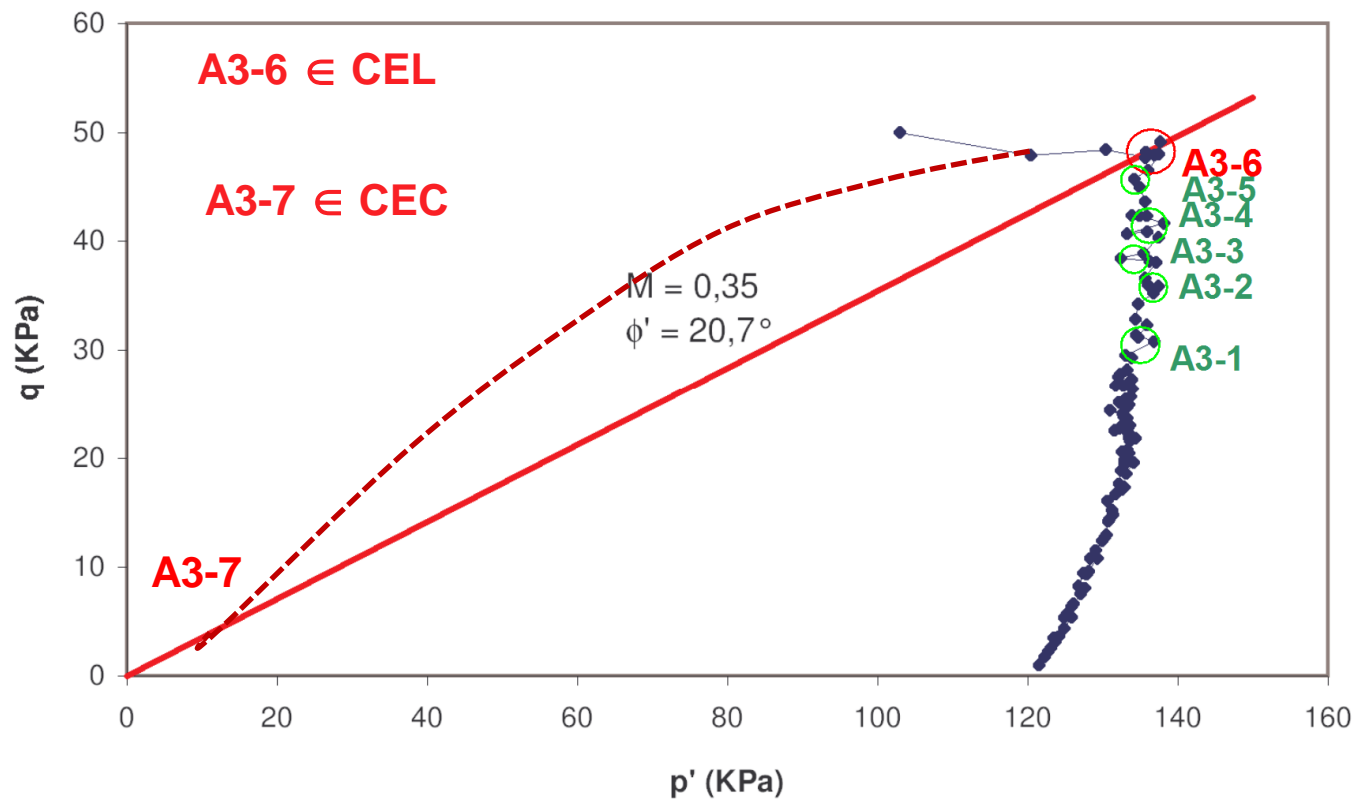
2 essais TACU



# 1 essai TXICU (Bender element), $St(\text{ scissomètre})=13,5$

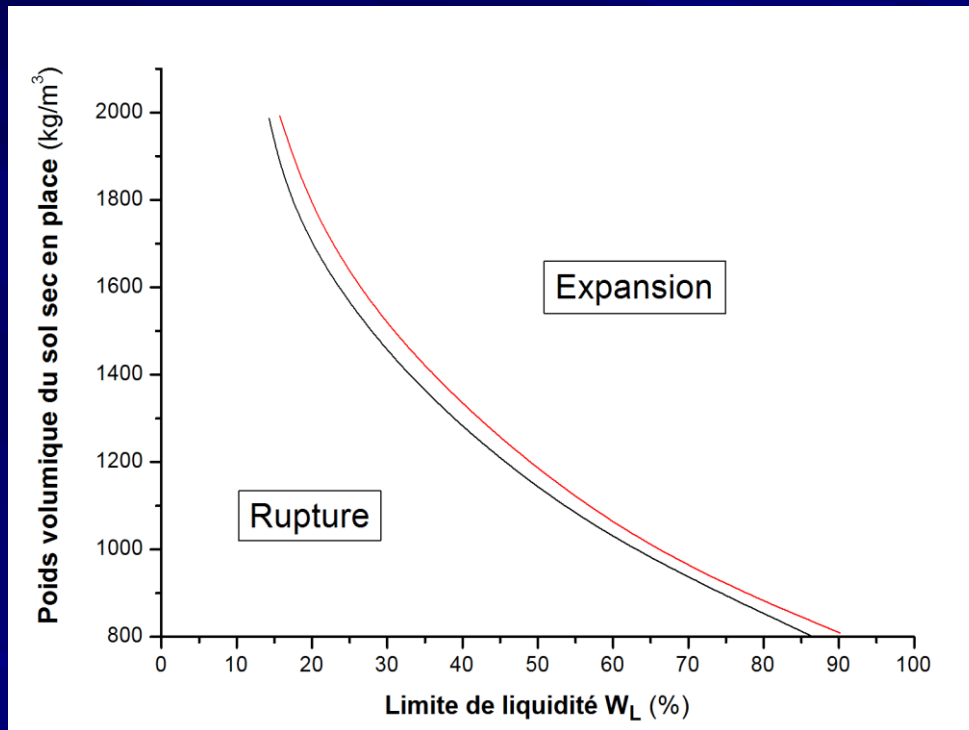


ECH 3 argile sensible

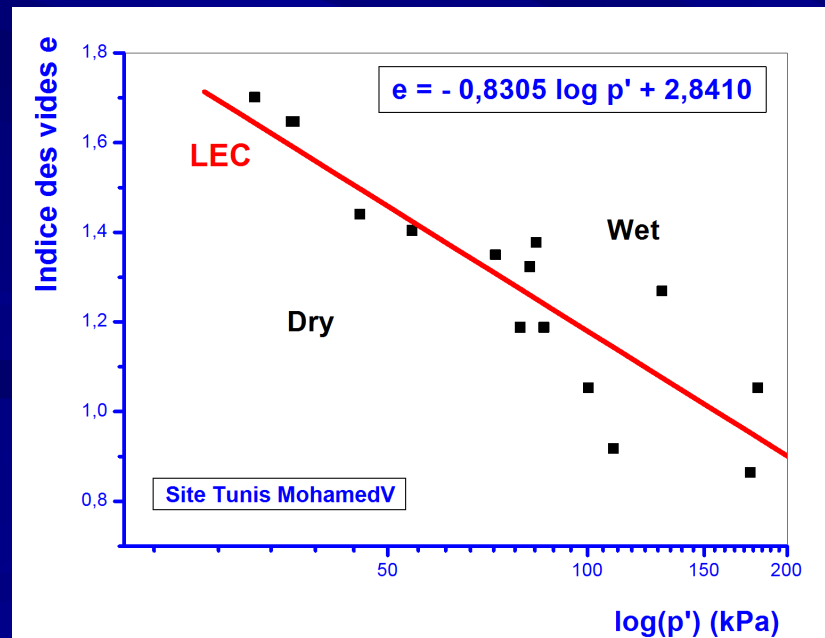
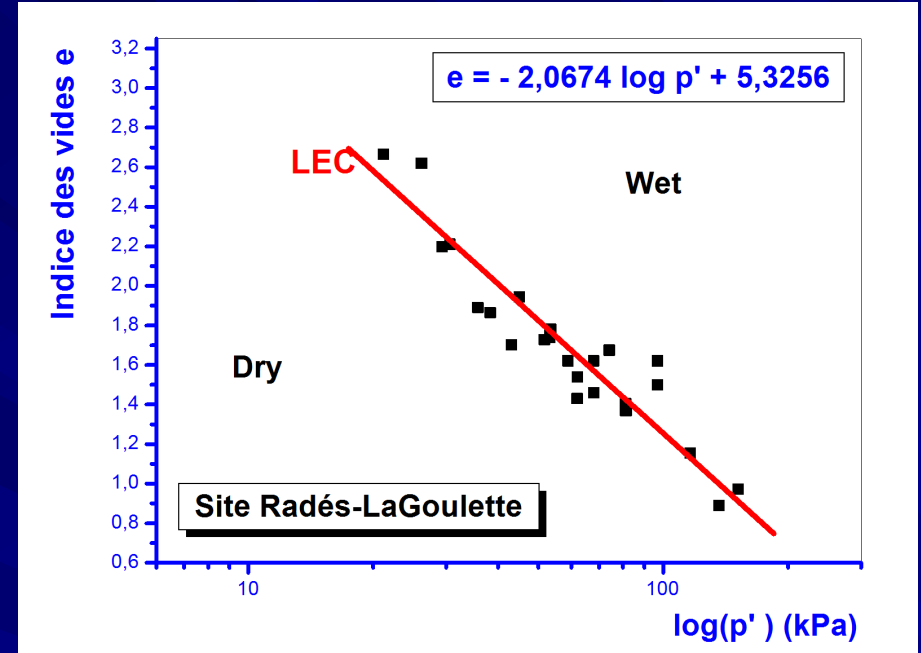
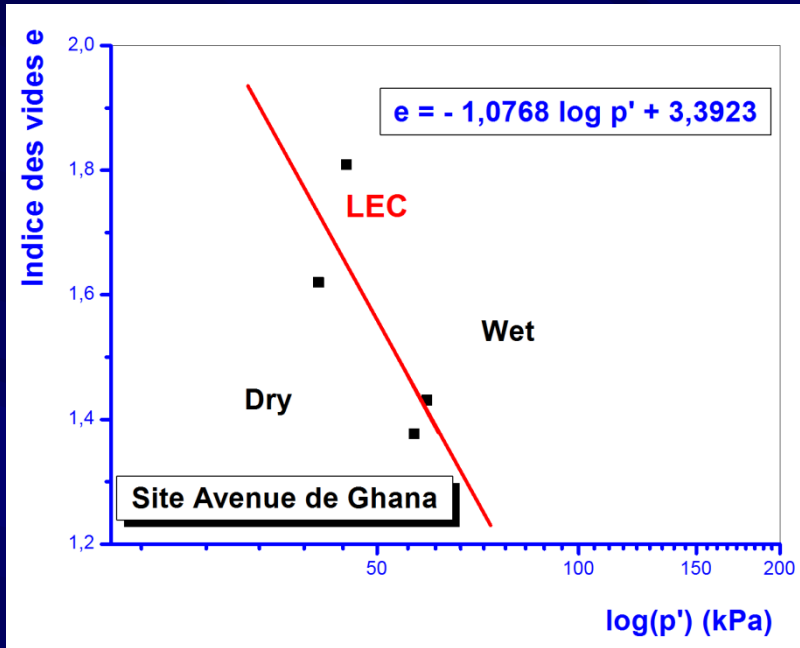


# LEC de l'argile molle de Tunis

Base de données géotechniques relative aux argiles molles de Tunis (I)



## Base de données géotechniques relative aux argiles molles de Tunis (II)



### 3. Discussion de la compressibilité

Skempton 1952

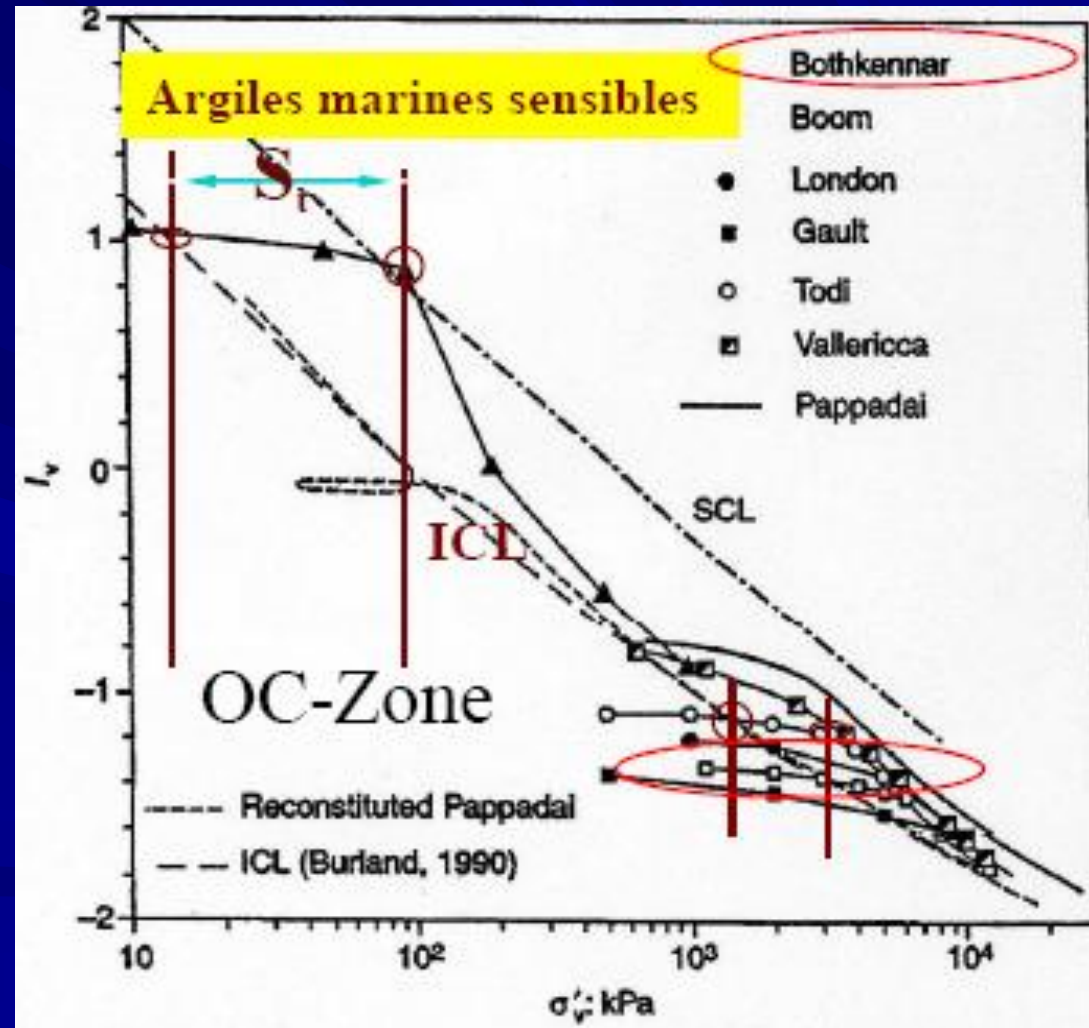
Compressibilité Argiles Intactes NC = f( Ip, structure )

Burland, 1990

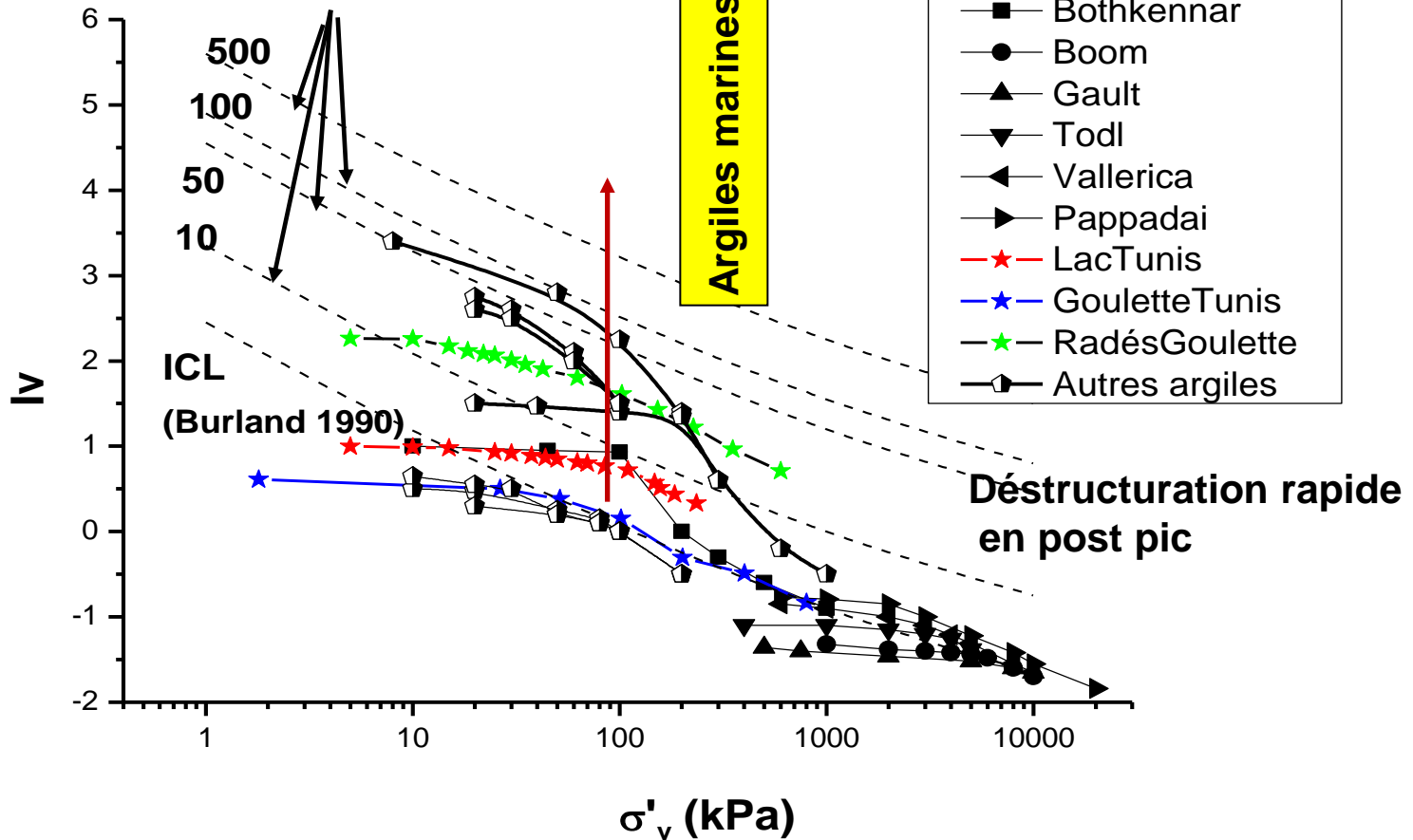
$$I_v = \frac{e_0 - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*}$$

$$S_t = C_{u \text{ intacte}} / C_{u \text{ remaniée}}$$

$$S_t = p'_{pic} - p'_{ICL}$$

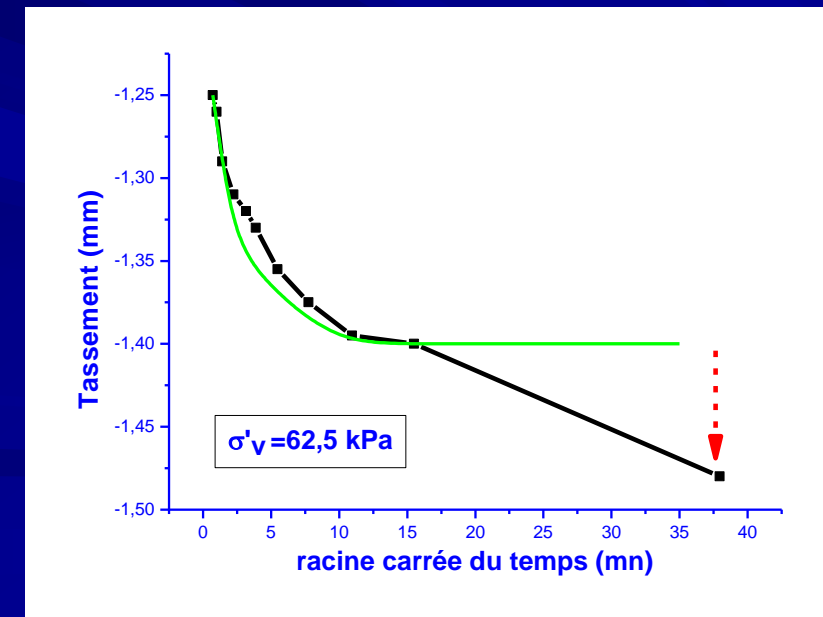
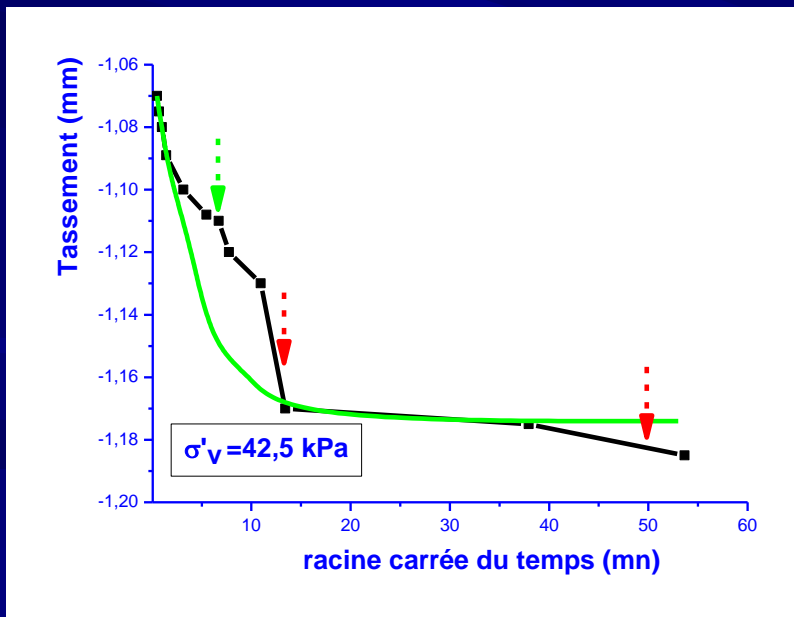
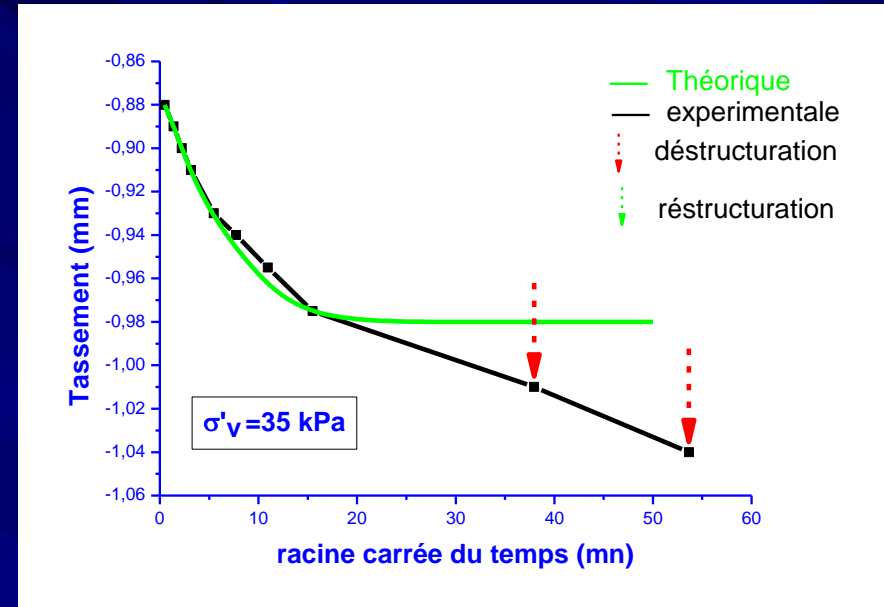
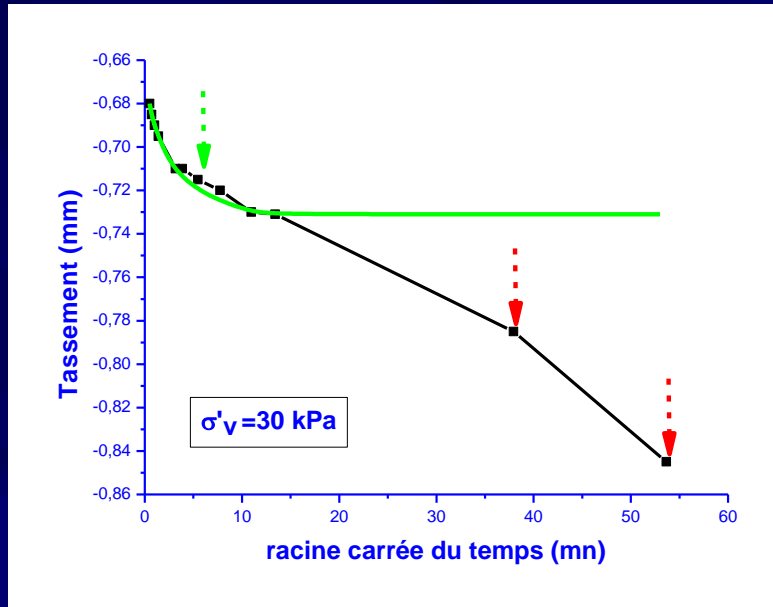


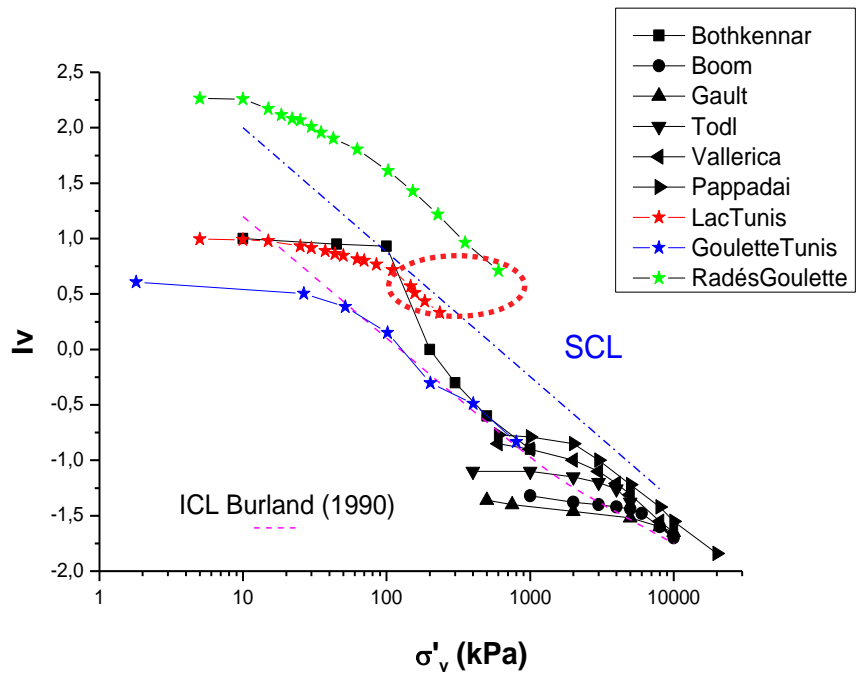
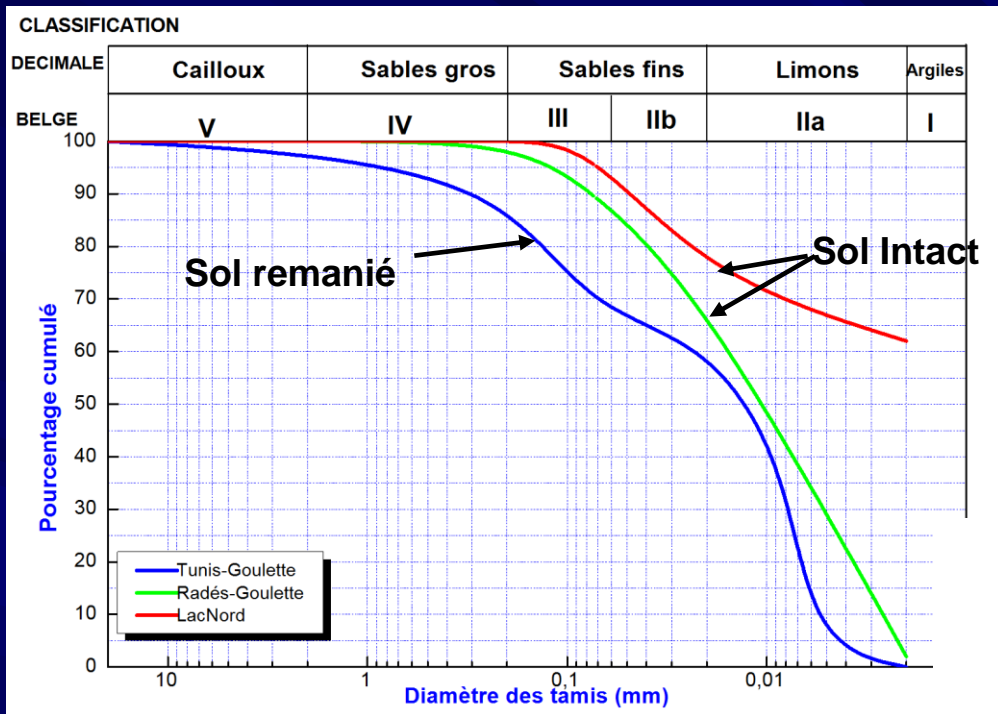
Contours de sensibilité CCS  
Cotecchia et Chandler, 2000

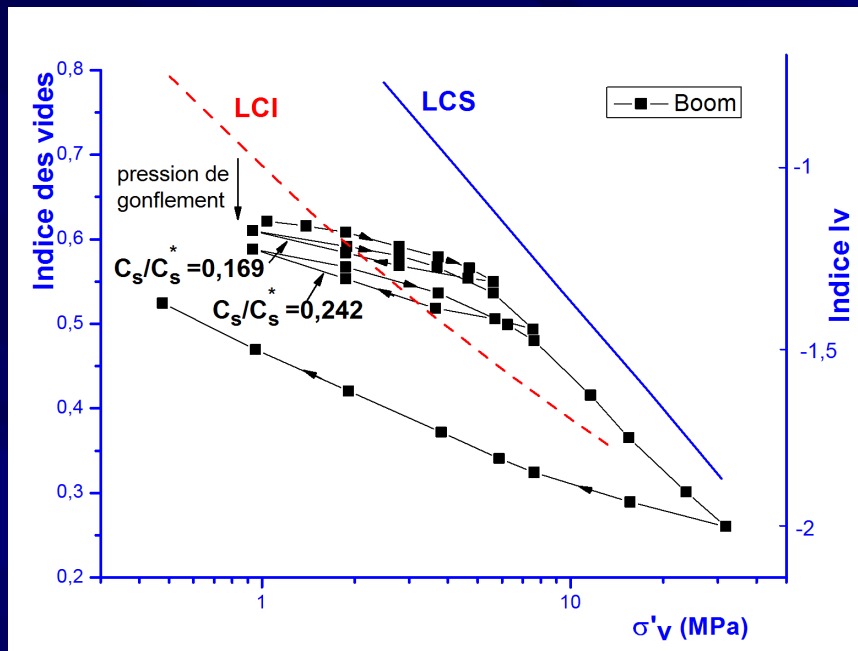


★ Cette recherche

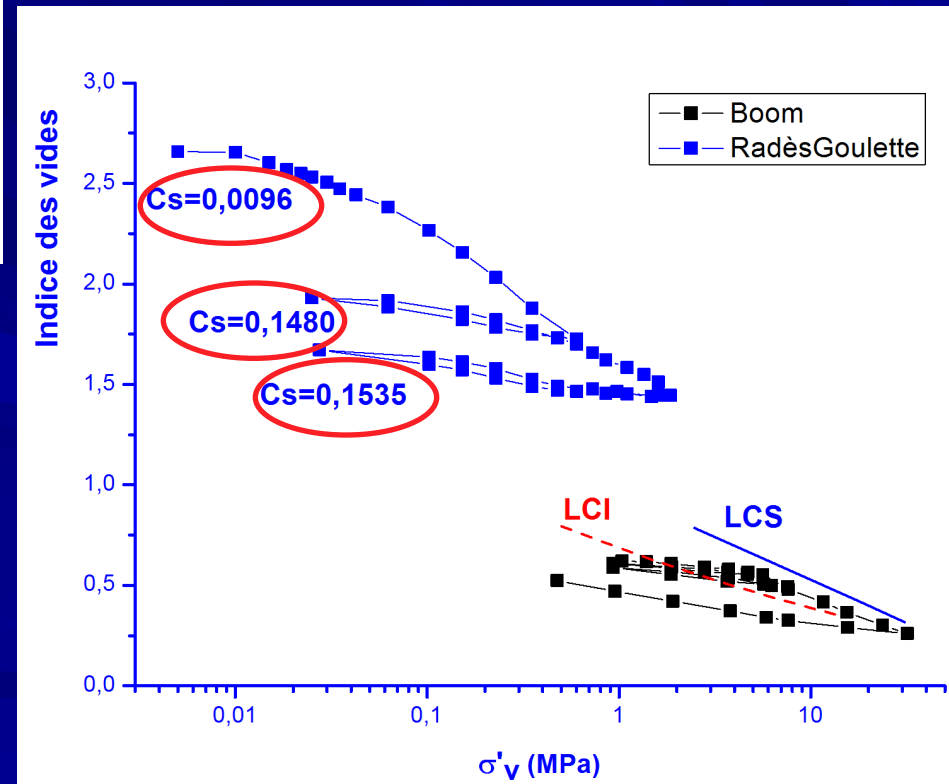






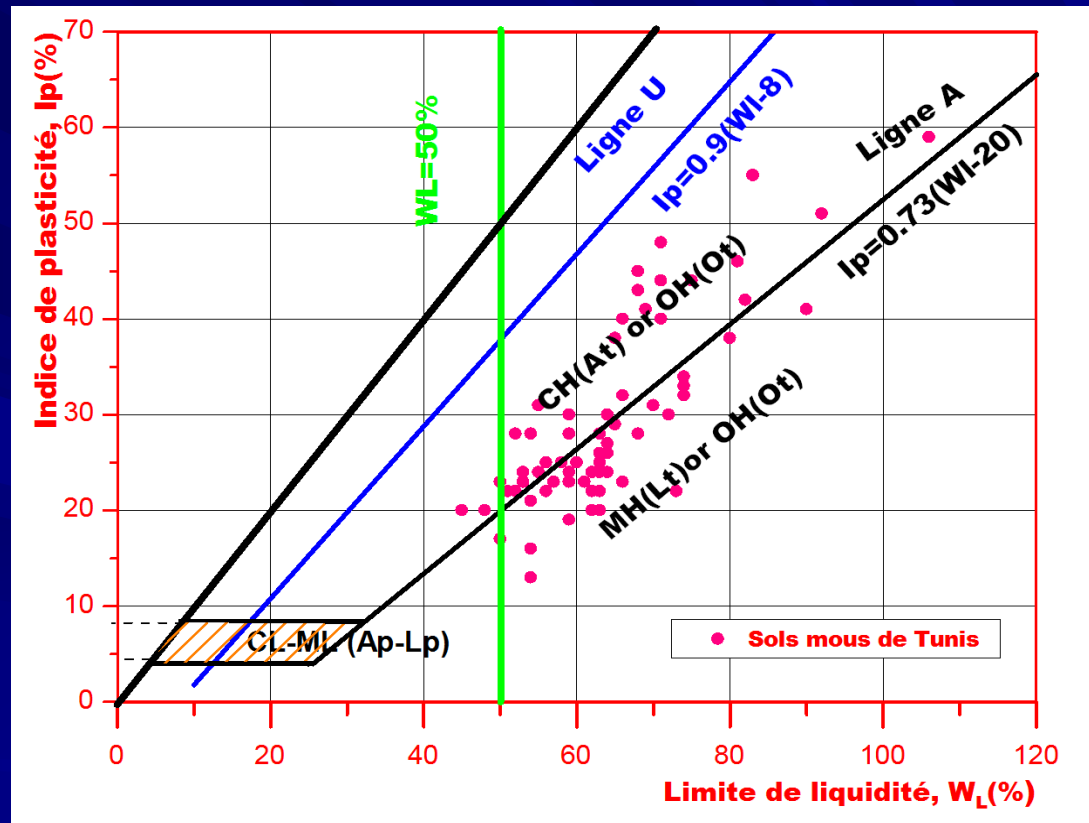


$$\text{Sensibilité au gonflement} = \frac{C_{s \text{ recons}}^*}{C_{s \text{ sint act}}}$$

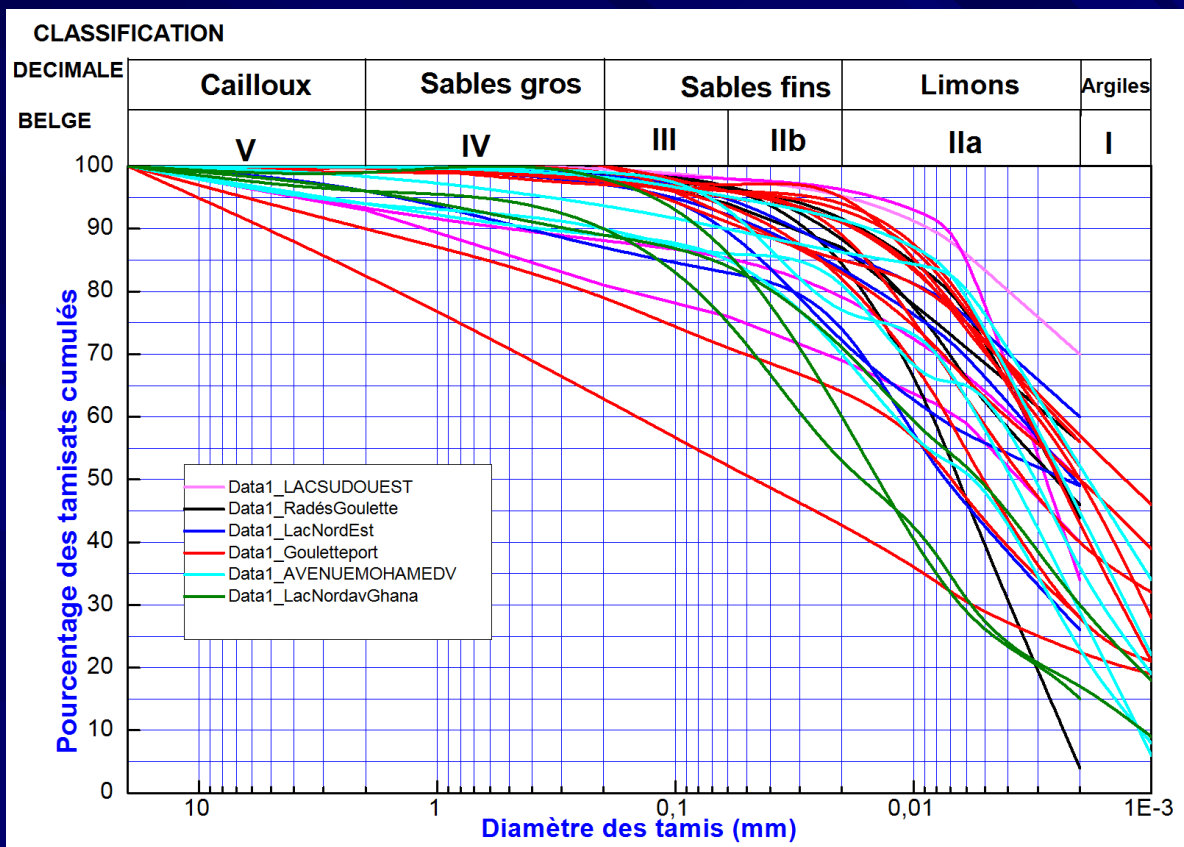


# Classification de l'argile molle de Tunis

La vase superficielle de Tunis selon la classification USCS (ASTM)



# La vase superficielle de Tunis selon la classification des sols adoptée en Belgique



Etude sédimentologique →  
Abondance d'argiles en grumeaux

- IV entre 2mm et 0,2mm
- III entre 200 et 60µm
- IIb entre 60 et 20µm
- IIa entre 20 et 2µm
- I inférieur à 2µm

## Classification Belge

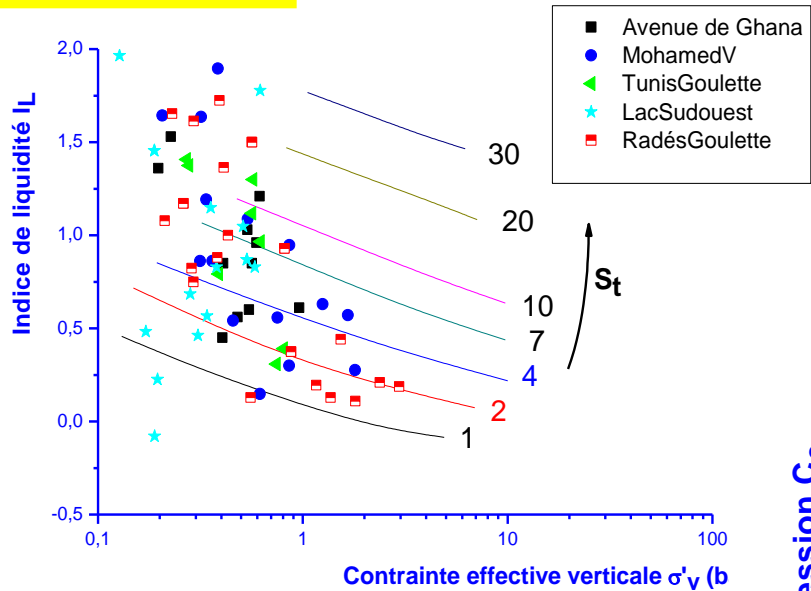
	Ip = 5	Ip = 15	Ip = 25
Sable peu argileux Sable peu limoneux	1. III + IV + V ≥ 50% Sable argileux Sable limoneux	1. III + IV + V ≥ 50% Argile sableuse	Argile
	2. III + IV + V < 50% Limon	2. III + IV + V < 50% et II < 50% Argile limoneuse 3. II > 50% Limon	



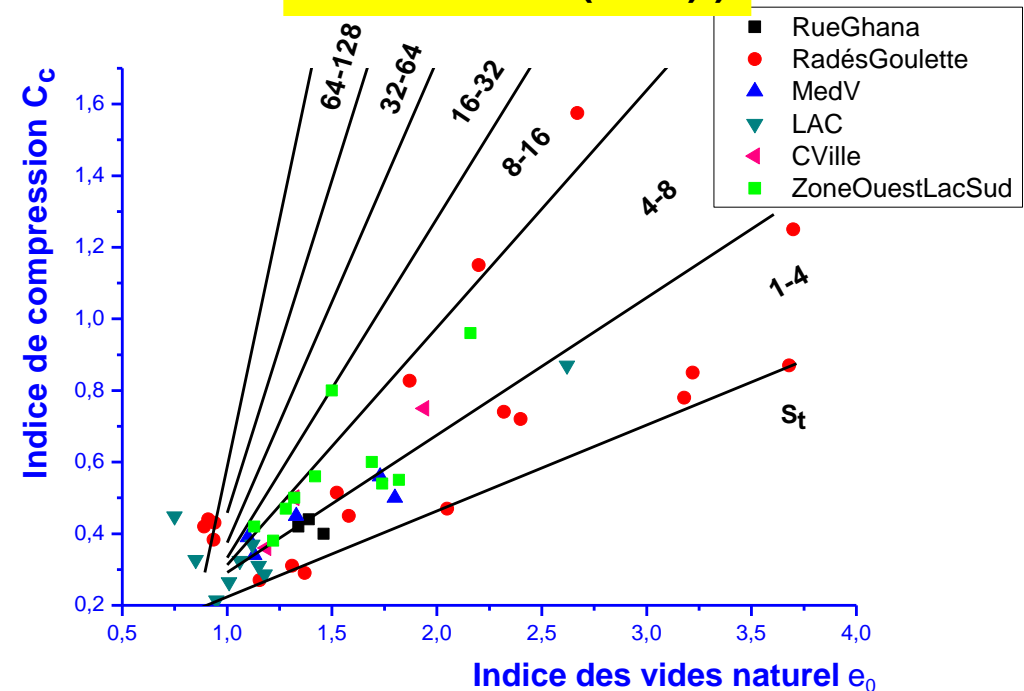
**AmT = argile limoneuse**

# Proposition d'une classification de sensibilité pour la vase superficielle de Tunis

## Mitchell (1976)



## Leroueil et al (1983)



➔ Résultats peu précis

## Christoulas et al, (1987)

argiles marines Suédoises (très sensibles)

MO &gt; 5%

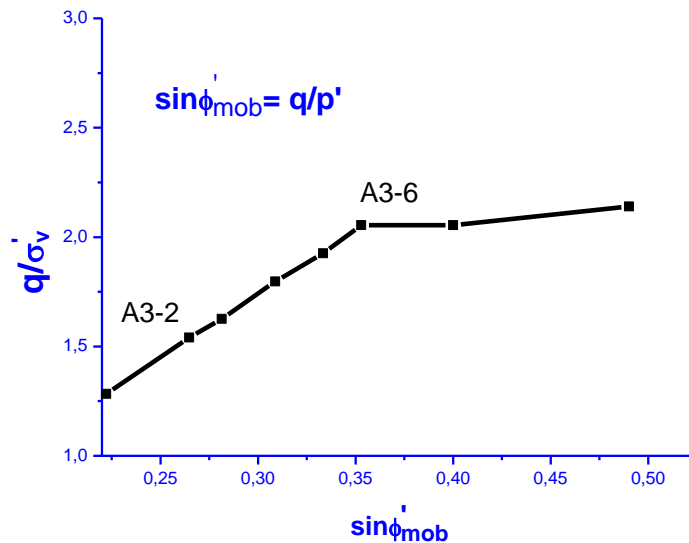
argiles marines Norvégiennes (très sensibles)

MO &lt; 0,5 %

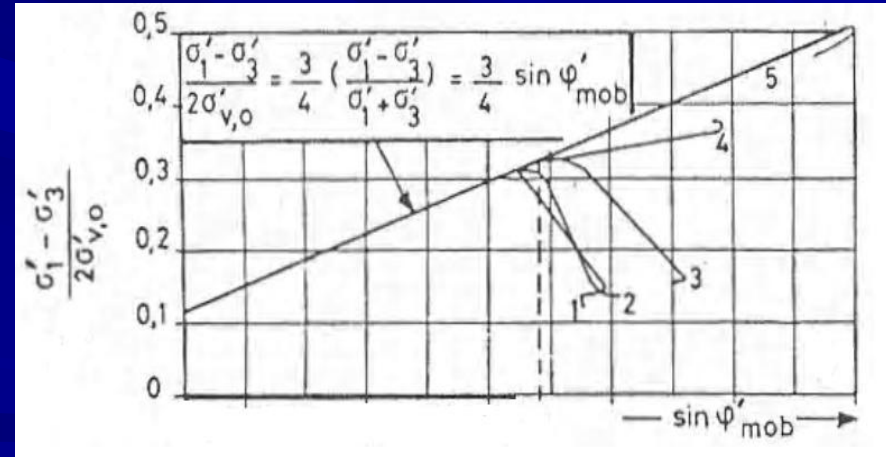
St(scissomètre, Ech3 ) =13,5

Classification Rosenquist  
échantillon 3 = quick clay

CCE relatif à l' échantillon 3 (amT)



CCE relatif à une quick clay norvégienne



Van Impe, De Beer (1984)

**Classification propre à l'argile molle de Tunis**

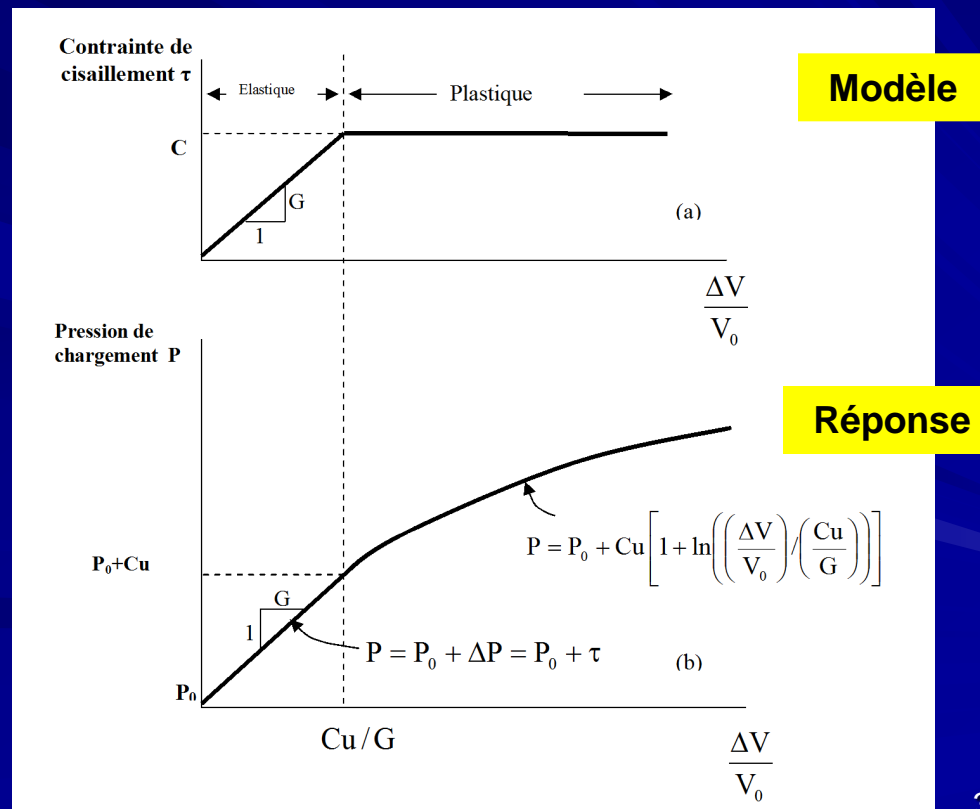
<b>Sensibilité <math>S_t</math></b>	<b>Classification</b>
<b>1</b>	<b>argile non sensible</b>
<b>1 à 4</b>	<b>argile peu sensible</b>
<b>4 à 8</b>	<b>argile moyennement sensible</b>
<b>8 à 30</b>	<b>argile fortement sensible</b>
<b>&gt; 30</b>	<b>Argiles ultra-sensibles (quick clays)</b>



# Essai Pressiométrique dans l'AMT

- Plusieurs méthodes **d'interprétation de l'essai pressiométrique** (Baguelin et al, 1972 ; Gibson et Anderson, 1961 ; Silvestri, 1995 et plus récemment Frikha et Bouassida, 2006)

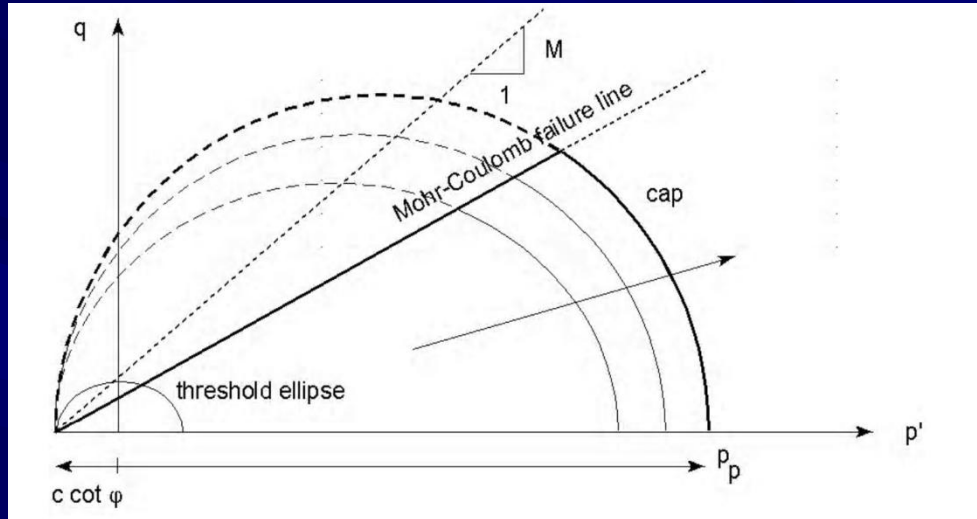
## I ETUDES ANALYTIQUE, NUMERIQUE ET ANALYSE INVERSE



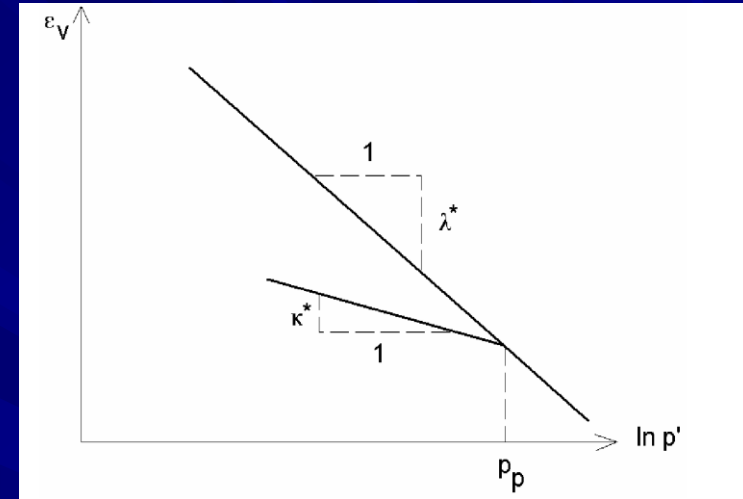
*Gibson et Anderson (1961), Rängeard (2002)*

# I-2 MODELISATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

## Modèle SSM (Cam Clay modifié)



$$M = \frac{6 \sin \varphi_{cv}}{3 - \sin \varphi_{cv}}$$



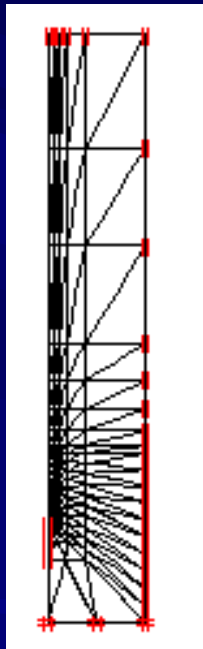
$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} = \frac{Cc}{2,3(1+e)}$$

$$k^* = \frac{k}{1+e} = \frac{2Cs}{2,3(1+e)}$$

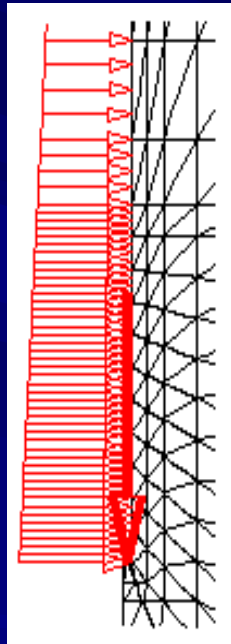
Les paramètres du modèle SSM :  $\lambda^*$ ,  $k^*$  et  $M$

## MODELISATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

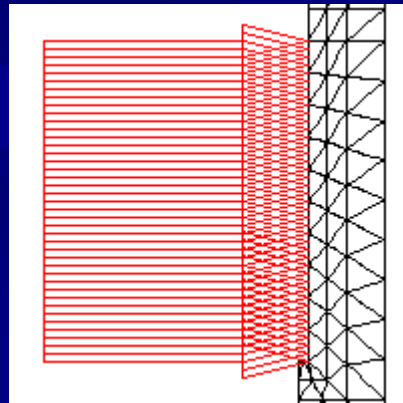
*Al Husein (2001)*



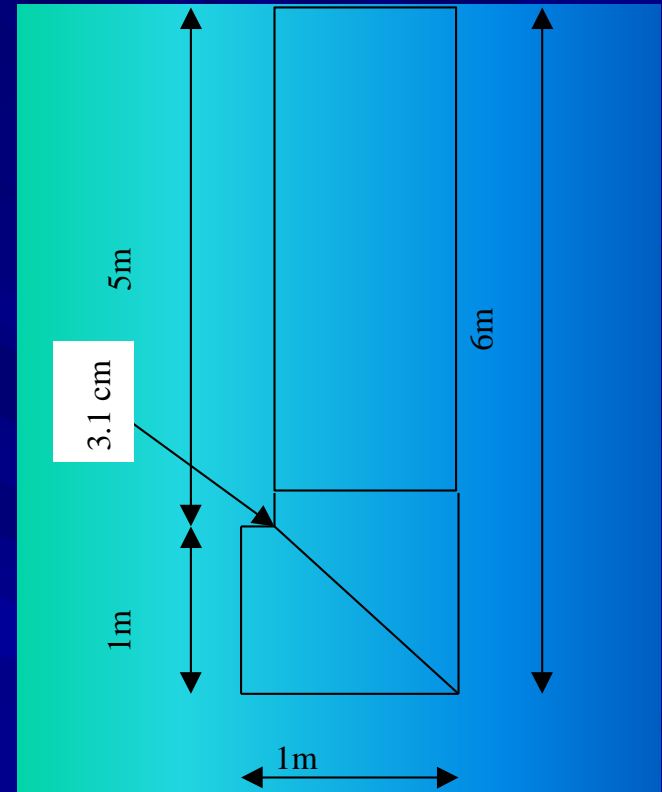
**a**



**b**



**c**

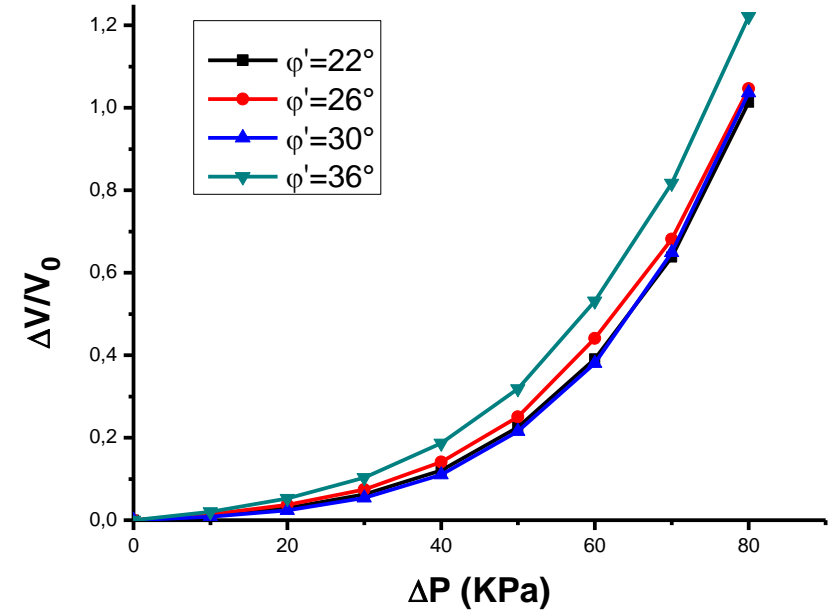
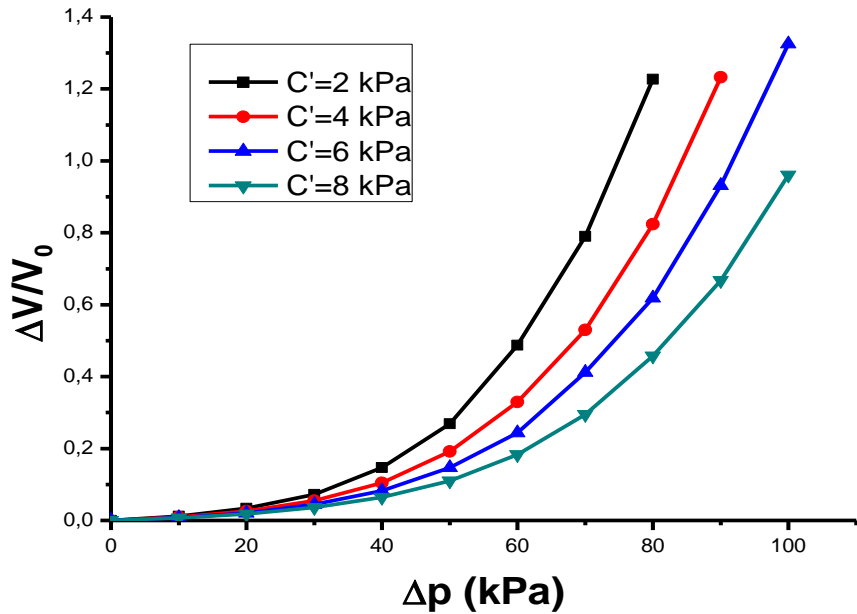


*Dimension du massif modélisé*

*a : Maillage et Conditions aux limites, b : Simulation du forage, c : Chargement de la sonde*

# Principaux résultats

Paramètres d'entrée:  $\lambda^* = 0,094$ ,  $K^* = 0,016$ ,  $e_0 = 1,32$



*Influence de  $C'$  sur la  $C.$  pressiométrique*

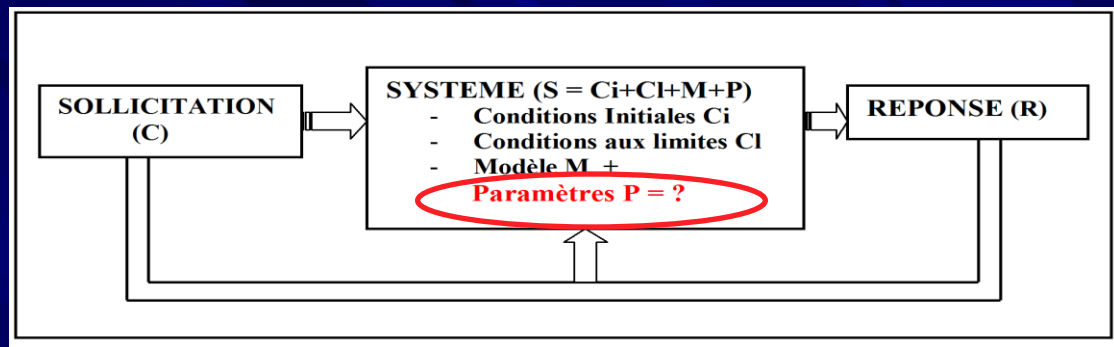


*Influence de  $\phi'$  sur la  $C.$  pressiométrique*



# I-3 ANALYSE INVERSE APPLIQUÉE À L'ESSAI PRESSIOMÉTRIQUE

Définition des problèmes inverses  
(Rangeard, 2002)



**M Analytique :**

**Problème: Paramètres  $G = ?$  ,  $C_u = ?$**

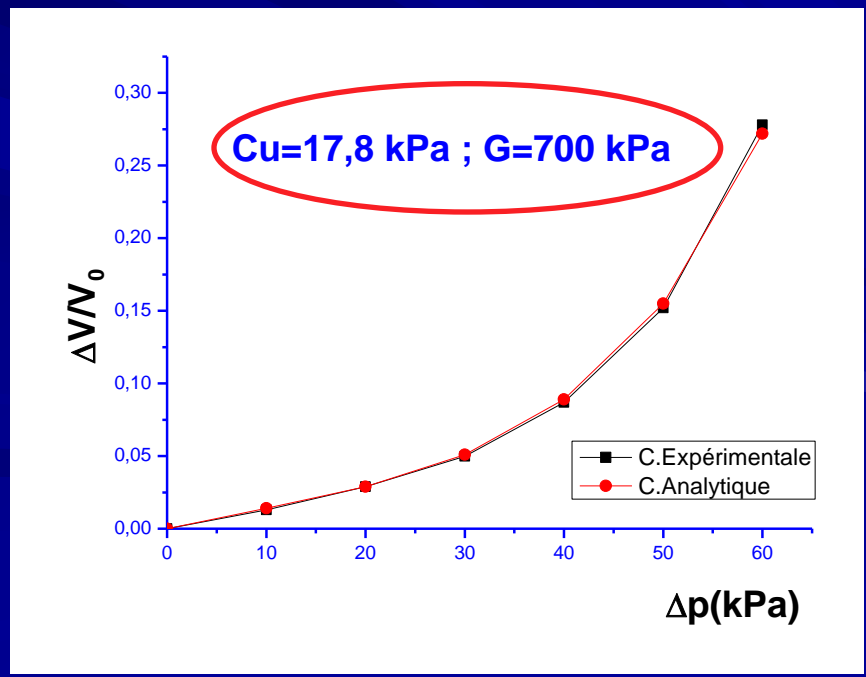
**Données**

**Calcul d'erreur C.experimentale, C.analytique Excel**

**Réponse: C expérimentale**

**Modèle élastique parfaitement plastique**

**Condition non drainée  
Déformation plane  
isotropie**



# Modèle Nnumérique :

Problème = Paramètres:  $C' = ?$  ,  $\phi' = ?$

## Données

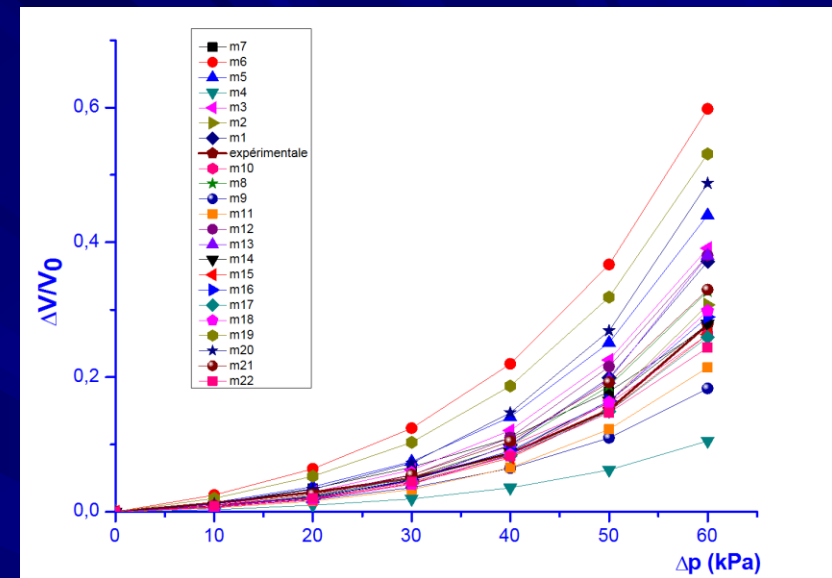
Réponse: C expérimentale

Modèle SSM (Plaxis)

$\lambda^* = 0,094$	$K^* = 0,016$	$e_0 = 1,32$
$OCR = 1,43$	$\gamma_h = 16,80 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_d = 11,00 \text{ kN/m}^3$

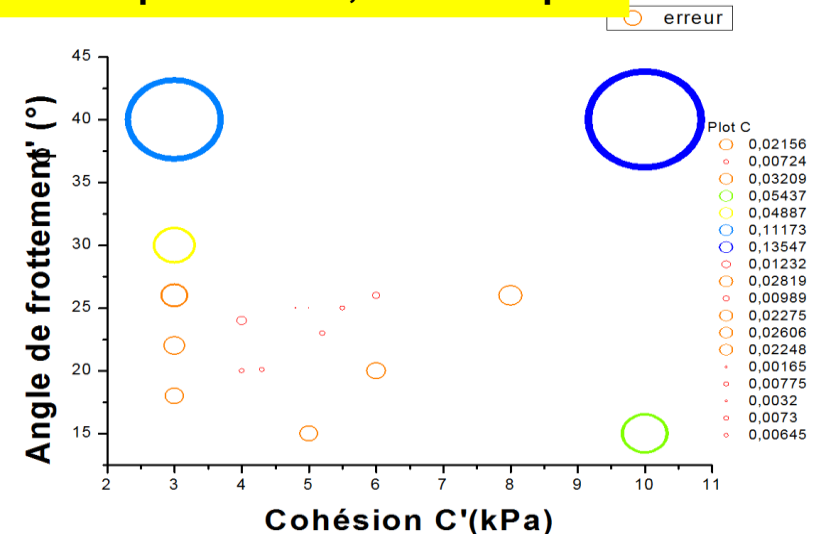
Paramètres du modèle SSM retenus pour les 22 simulations

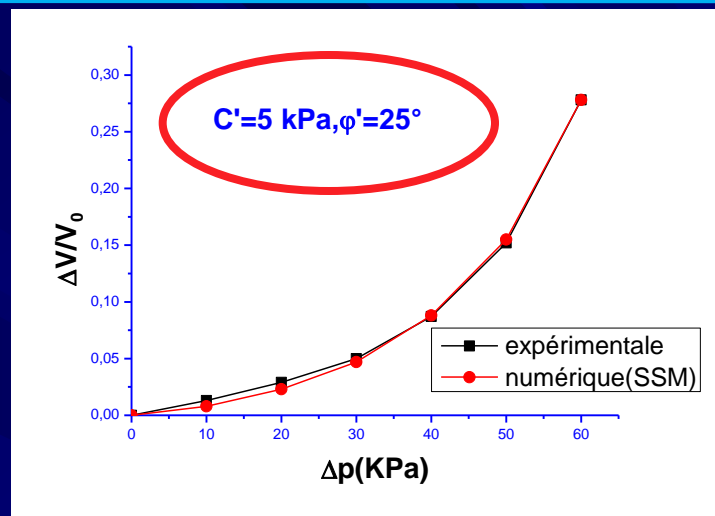
Condition non drainée  
Axisymétrie  
Sol isotrope



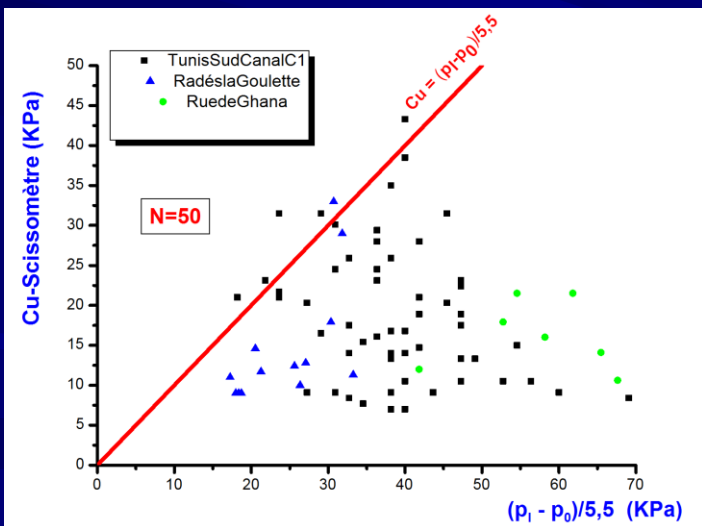
diverses valeurs de  $C'$  et  $\phi'$

Erreur C.expérimentale, C.numérique





## I-4 Cohésion non drainée de l'argile molle de Tunis mesurée au pressiomètre



Pl* (kPa)	G (pressiomètre) (kPa)	Cu <sub>1</sub> (Ménard) (kPa)	Cu <sub>2</sub> (Gibson et Anderson) (kPa)	Cu <sub>3</sub> (Scissomètre) (kPa)	Cu <sub>1</sub> / Cu <sub>3</sub>	Cu <sub>2</sub> / Cu <sub>3</sub>
99	477	18	25	9	2,00	2,77
95	557	17	22	11	1,56	2,05
101	427	18	27	9	2,04	3,00
117	833	21	26	12	1,82	2,22
113	700	20	26	15	1,40	1,81
149	867	27	35	13	2,11	2,77
145	733	26	36	10	2,60	3,60
141	933	26	32	12	2,06	2,62
167	667	30	45	18	1,70	2,51
183	537	33	56	11	2,94	4,96
230	700	42	69	12	3,48	5,80
300	800	54	96	21	2,53	4,65
340	817	62	115	21	2,87	5,34
360	800	65	127	14	4,64	9,00
290	667	53	100	18	4,08	12,72
372	913	68	124	10	6,38	11,70
320	960	58	97	16	3,64	6,06



**Cu pressiomètre >> Cu scissomètre**

**Baguelin et al, (1978) ; Hamouche, (1995) ; Ladanyi, (1995) ; Silvestri 1995, Penumadu and Chameau, (1997)**

- la consolidation partielle de l'argile molle causée par le drainage autour de la sonde pressiométrique ;
- l'existence de fortes vitesses de déformations dans le sol en contact avec la membrane en expansion ;
- le remaniement du sol ;
- l'utilisation de sondes courtes ayant un rapport (L/D) faible

**Cu (pressiomètre)  
surestimée**

**Chandler, 1988 ; Wroth, 1984 ; Roy et Leblanc, 1988, Bouassida et Frikha (2007)**

**Cu (scissomètre)  
sous-estimée**

- la **rupture progressive** dans les argiles **sensibles** due aux déformations de cisaillement qui se produisent autour des arêtes du scissomètre , (*Chandler, 1988*)



## II DOMAINE DE VALIDITE DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

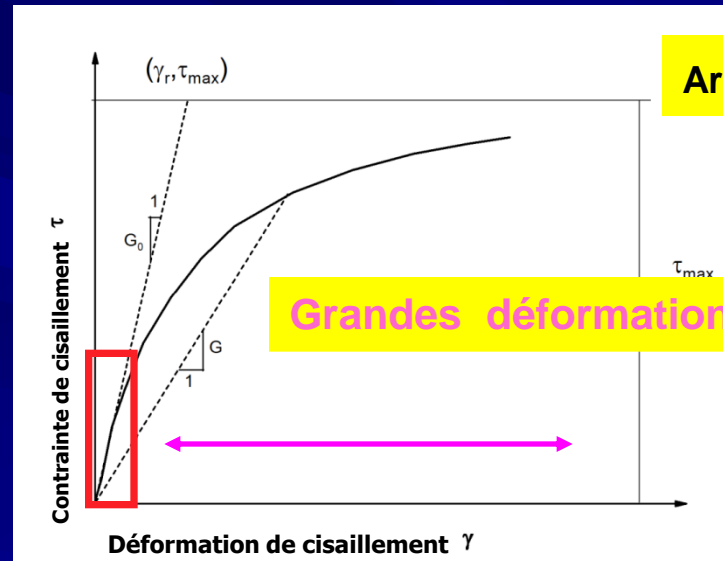
Les facteurs qui sont à l'origine de différences et incertitudes du  $C_u$  (pressiomètre)



Ces facteurs affectent  $E_p$  (Gpressiomètre)

Module de cisaillement  $G$ :

Domaine élastique :  $G_0$



Argiles:  $C_u = \tau_{max}$

Grandes déformations:  $G$

## Méthodes de détermination du module de cisaillement G:

## Mesures in Situ

$$G_0 = V_s^2 \cdot \rho$$

Vs: vitesse de propagation de l'onde de cisaillement

## Relations empiriques

Larsson (1986):  $G_0$  (L-86)

$$G = G_0 = \frac{72 C_u}{I_p} \ln \left( \frac{C_u}{G 1,5 \cdot 10^{-5}} \right) \quad \gamma \leq 1,510^{-5}$$

Hardin (1978):  $G_0$  (H-78)

Argiles peu plastiques, argiles non homogènes (silteuses, coquillières et organiques)

$$G_0 = f(p', e, OCR, k)$$

Larsson et Mulabdic (1991) :  
 $G_0$ (IP),  $G_0$ (WL) ,  $G_0$ (w)

Argiles très plastiques à moy plastiques

$$G_0 = \left( \frac{208}{I_p} + 250 \right) C_u$$

## Cas: argiles Suédoises

$$G_0 = 504 \cdot \frac{C_u}{W_L}$$

$$G_0 = 541 \cdot \frac{C_u}{w}$$

# Argile molle de Tunis

$p_i^*$ (kPa)	G (pressiomètre) (kPa)	Cu (Scissomètre) (kPa)	G/ Cu	Gmin
99	477	9	53	1800
95	557	11	51	2200
101	427	9	47	1800
117	833	12	71	2340
113	700	15	48	2920
149	867			
145	733			
141	933			
167	667			
183	537			
230	700			
300	800			
340	817			
360	800			
290	667			
372	913			
320	960			
180	267			
170	233			
200	367			
180	267			
210	333			
220	433			
198	700			
150	283			
130	400			
150	433			
198	700			
150	283			
300	423			
130	300			
180	267			
190	267			
210	233			
170	233			
220	833			

$$G_{\text{pressiomètre}} \square G_{\text{min}} = 300 \cdot Cu$$

$$10 < G/Cu < 86, G/Cu \approx 42$$

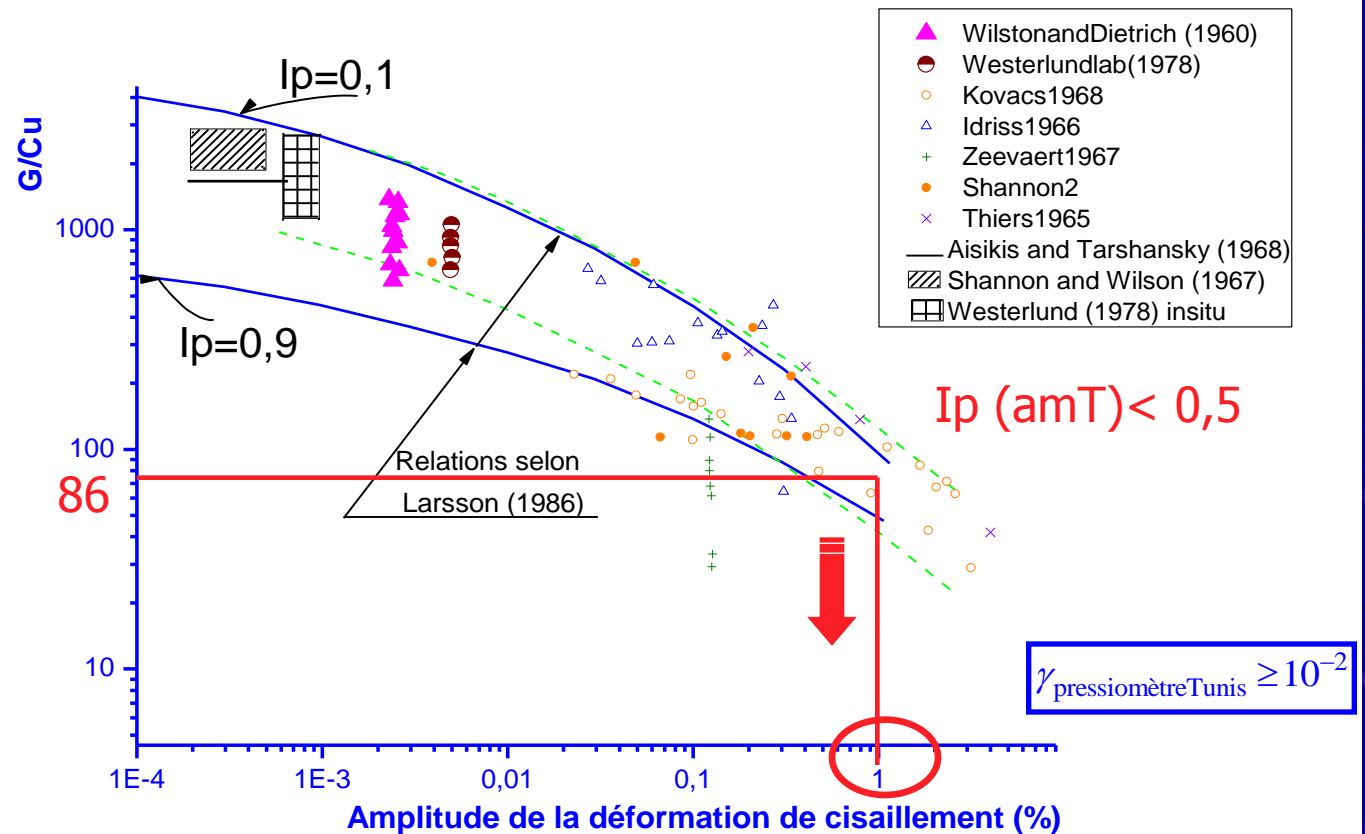
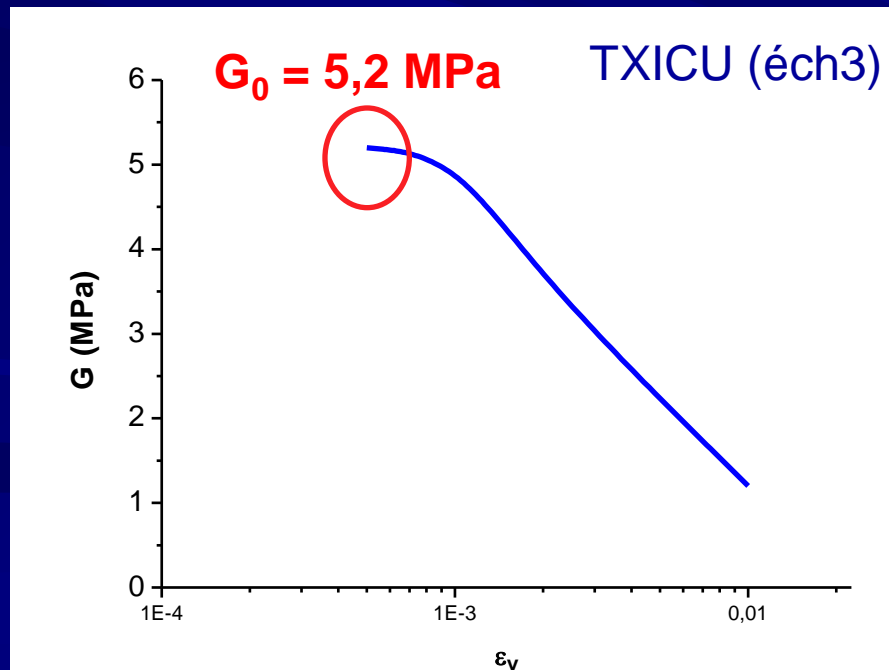
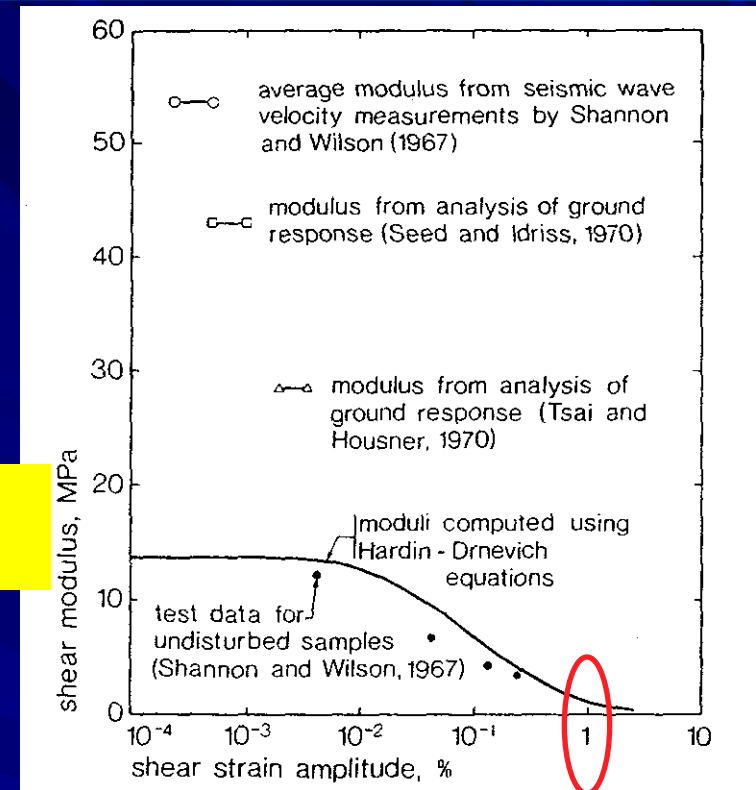


Diagramme des valeurs de G/Cu normalisées

## Pressiomètre amT

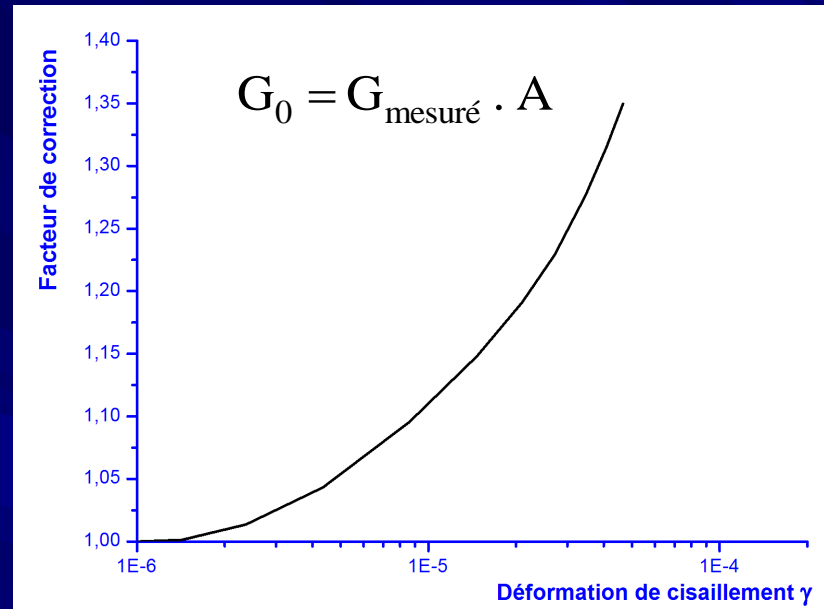
Pourquoi ?

Le remaniement est inévitable lors de la réalisation de l'essai pressiométrique dans l'argile molle



$$G \text{ (pressiomètre)} \ll G_0$$

Larsson (1991)



$$G_0(\text{amT}) = G_{\text{pressiomètre}} \cdot A$$

$$A \gg 1,40$$

# Module de cisaillement initial de l'argile molle de Tunis

## Mesures in Situ

Sites vaseux de Tunis: pas de mesures directes

Estimation de  $V_s$  : Romdhane, (2002), (Seed et Idriss (1970) et Hardin (1978))



$$22 \leq V_s \text{ (m/s)} \leq 74$$



$$630 \leq G_0 \text{ (kPa)} \leq 9850$$

$$G_{0\text{mes}} \text{ amT} = 5200 \text{ kPa}$$

## Relations empiriques

Corrélations ( $G_0$  (H-78),  $G_0$  (L-86),  $G_0$  (IP),  $G_0$  (WL) et  $G_0$  (WN)) et  $G_0$  mes

*Larsson et Mulabdic (1991): A M Suède*

Corrélations (G en kPa)	Coefficient de corrélation
$G_{\text{corr1}} = 0,9727 G_{(\text{H-78})} + 520$	0,9388
$G_{\text{corr2}} = 0,6340 G_{(\text{L-86})} + 6837$	0,9127
$G_{\text{corr3}} = 0,6570 G_{(\text{IP})} + 6925$	0,9187
$G_{\text{corr4}} = 1,0057 G_{(\text{WL})} + 1433$	0,9309
$G_{\text{corr5}} = 0,7641 G_{(\text{WN})} + 6867$	0,8867

argiles peu plastiques

Corrélations (G en kPa)	Coefficient de corrélation
$G_{\text{corr6}} = 0,8442 G_{(\text{H-78})} + 2203$	0,9263
$G_{\text{corr7}} = 0,9258 G_{(\text{L-86})} + 732$	0,9766
$G_{\text{corr8}} = G_{(\text{IP})} + 86$	0,9776
$G_{\text{corr9}} = G_{(\text{WL})} + 779$	0,9655
$G_{\text{corr10}} = G_{(\text{WN})} + 758$	0,9730

argiles moyennement à fortement plastiques

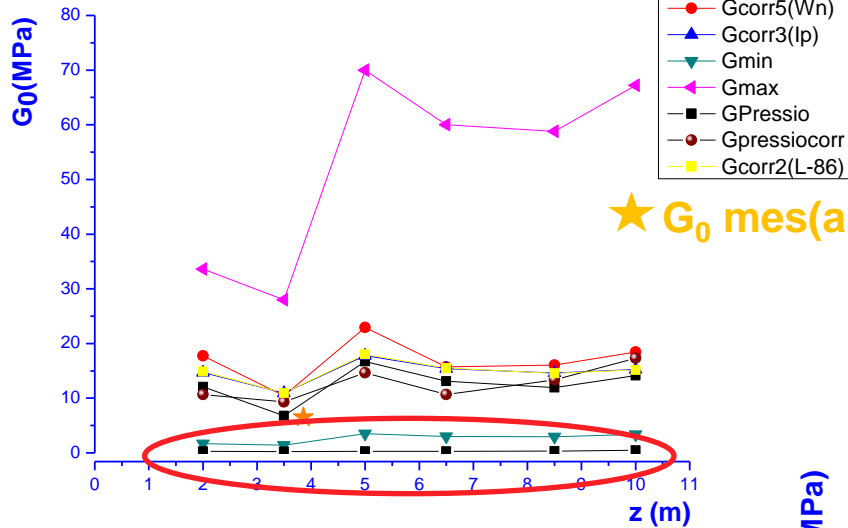
$G_0$  argile molle de Tunis

## Exemples d'estimation de $G_0$ (amT)

### site1: Lac Sud Ouest ( avenue de Ghana)

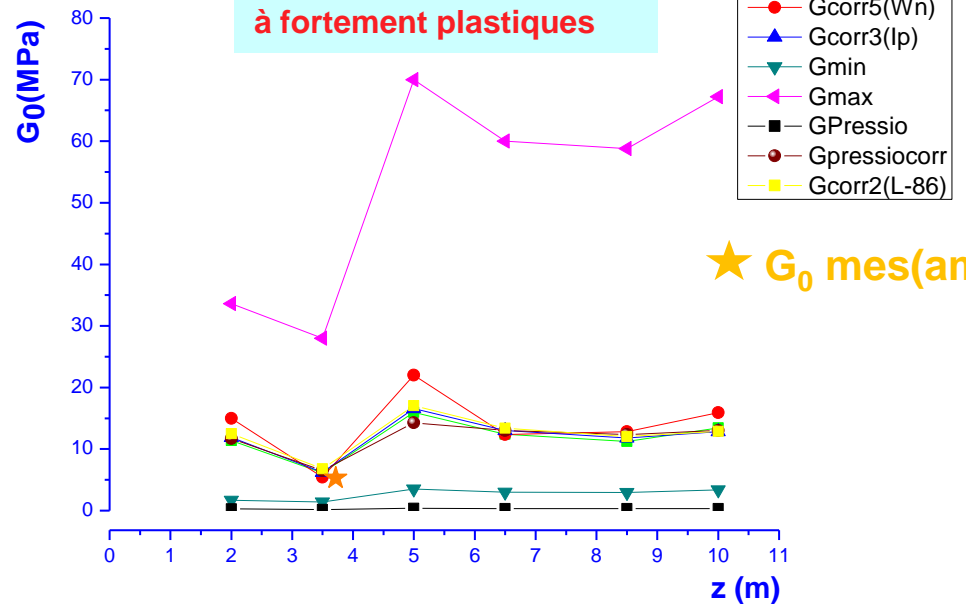
Profondeur	Description du sol	Granulométrie			Teneur en eau				$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cu (kPa)
		III et IV 60 $\mu$ m	II 2 $\mu$ m	I	20	40	60	80		
2	Remblai	64	20	16					19,8	08,4
3,5	Argile silto-sableuse, molle noirâtre, riches en coquilles	25	35	40					15,3	07
5		10	29	61					16,8	17,5
6,5	Argile molle grisâtre	15	35	50					15,50	15
8,5		02	24	74					16,30	14,7
10		02	28	70					15,9	16,8

### Argiles peu plastiques



$$G_{\text{pressiomètre}} < G_{\text{min}} = 300 \cdot C_u$$

### Argiles moyennement à fortement plastiques



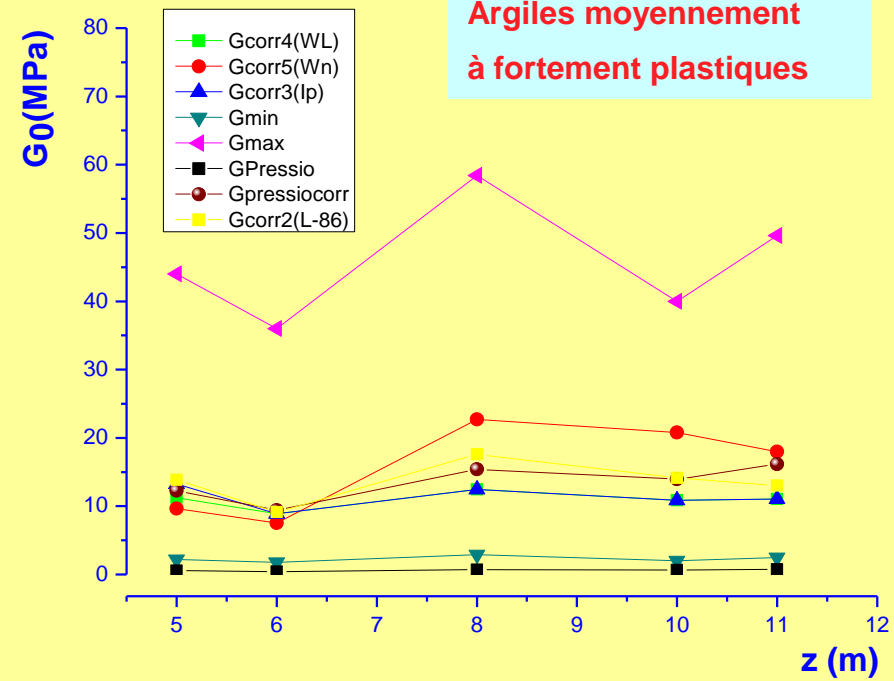
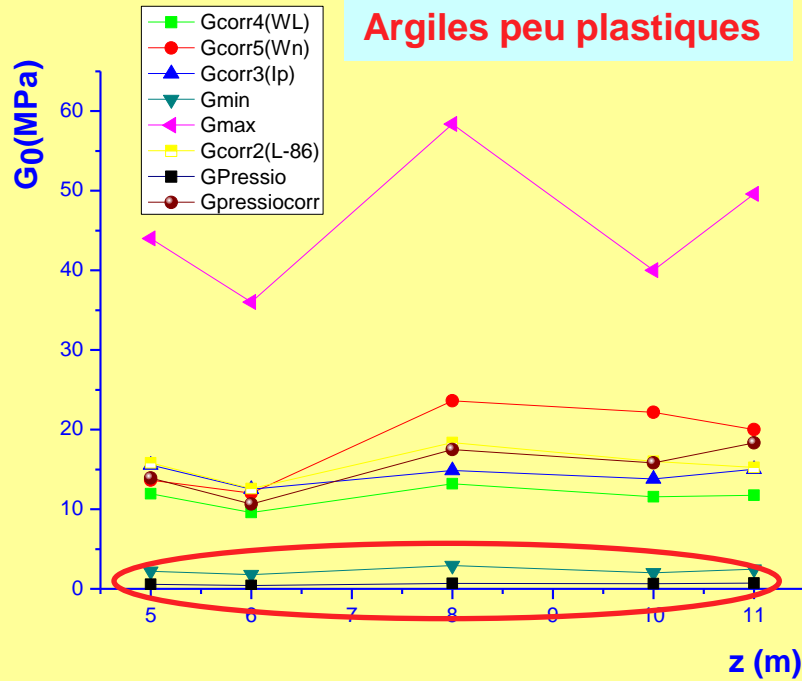
$$G_{0\text{mesuré}}(\text{site1}) = 14 \cdot G_{\text{pressiomètre}}$$

$$G_{0\text{corrélations}}(\text{site1}) = 21 \cdot G_{\text{pressiomètre}}$$



## Site2: Avenue Mohamed V

Profondeur	Description du sol	Granulométrie			Teneur en eau				$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cu (kPa)
		IIIlet IV 60 $\mu$ m	II 2 $\mu$ m	I	20	40	60	80		
2	Remblai									
5	argile molle coquillée à débris végétaux et passage graveleux	25	66	9					15,7	11
6		14	48	38					13,50	09
8	Argile grisâtre	07	23	70					15,80	14,6
10		03	29	68					16,40	10
11	Argile gris-verdâtre	17	12	71					15,50	



$$G_{0\text{site2}} = 25 \cdot G_{\text{pressiomètre}}$$

$$G_{0\text{site2}} = 22 \cdot G_{\text{pressiomètre}}$$

## Conclusion

- **Analyse inverse (déterminer à partir d'une courbe expérimentale)**
  - \* **G et  $C_u$  du modèle élastique parfaitement plastique en CND**
  - \*  **$C'$  et  $\varphi'$  , en utilisant un processus d'optimisation avec Plaxis (simulation numérique de l'essai et méthode d'optimisation graphique).**
- **La comparaison de  $C_u$  (scissomètre) avec  $C_u$  ( Ménard ) et  $C_u$  (Gibson et Anderson), de l'amT, montre que  $C_u$  (pressiomètre)  $\gg C_u$  scissomètre**
- **Les résultats des essais pressiométriques (Base des données géotechniques) dans l'amT montrent que:  $G_{\text{pressiomètre}}(\text{amT}) \ll G_{\text{min}}$**
- **Les déformations de cisaillement initiales (créées dans la phase de mesure du module pressiométrique) sont supérieures à  $10^{-2}$ , dépassant ainsi le domaine élastique et appartenant au domaine des grandes déformations.**
- **Estimation du  $G_0$  amT des sites 1 et 2:**
  - \* **Les facteurs de correction du G pressiomètre AMT sont :  
14, 21, 22 et 25.**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

- Identification de l'argile molle de Tunis (AMT): paramètres physiques, minéralogie, sédimentologie, essais triaxiaux et oedométriques, résultats pressiométriques.
- Détermination du processus qui a conféré à l'AMT sa méta-stabilité.
- Élaboration d'un modèle physique de développement de sensibilité dans l'AMT
- Discussions du comportement mécanique de l'AMT
- Proposition d'une classification de sensibilité propre à l'argile molle de Tunis
- Le  $G$  (pressiomètre)  $\ll G_0$

## PERSPECTIVE

- Affiner encore l'étude de la sensibilité de l'AMT en particulier pour l'estimation de la rigidité
- Déduire le comportement de l'amT avec le temps (théorie de consolidation?)

**Merci**