



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Restitution GT gonflement des terrains argileux

## Caractérisation et essais

**Jean-Pierre Magnan**  
Université Gustave Eiffel

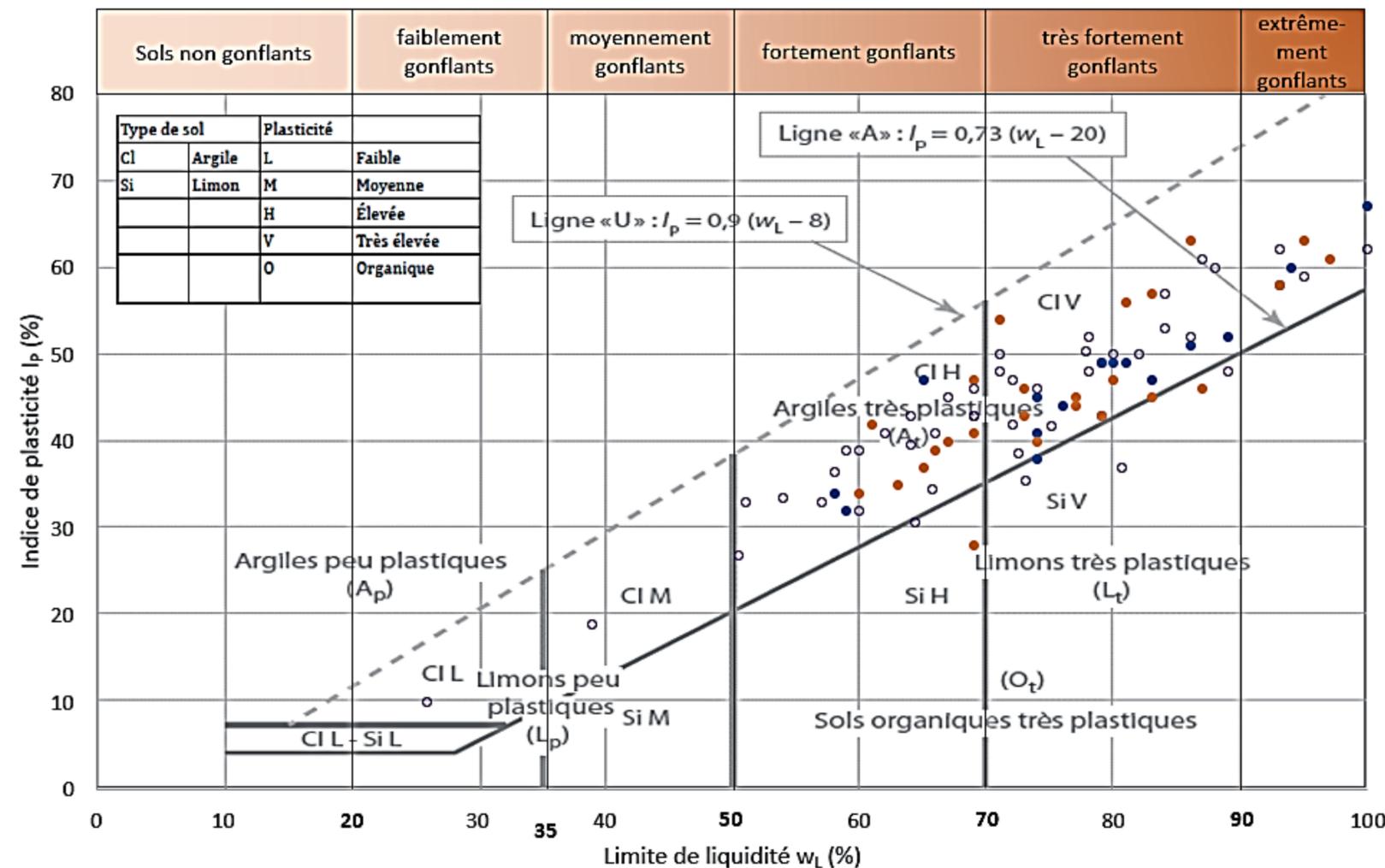
JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 25 AVRIL 2024

## Sommaire

- **LES SOLS ARGILEUX SATURÉS PROFONDS**
- **MODÈLE DE COMPORTEMENT**
- **LES ESSAIS**
- **QUALITÉ DES ÉCHANTILLONS TESTÉS**
- **PARAMÈTRES POUR LES CALCULS**

## LES SOLS ARGILEUX SATURÉS PROFONDS

- Sols argileux (argiles et marnes) non soumis aux alternances « sécheresse-réhumidification » à la surface des terrains. Le phénomène majeur est le déchargement provoqué par les travaux.
- La nature des argiles est importante car elle conditionne l'interaction du sol avec l'eau, mais la saturation limite les variations de volume.



- Argile verte de Romainville
- Marnes d'Argenteuil
- Argile plastique de l'Yprésien

## LES SOLS ARGILEUX SATURÉS PROFONDS

- Les terrains argileux potentiellement gonflants que l'on peut rencontrer jusqu'à une centaine de mètres de profondeur sont les suivants, classés par âge géologique (liste non exhaustive)

### Dans la région parisienne

- Oligocène / Stampien : marnes à huîtres,
- Oligocène / Stampien / Sannoisien : glaises à Cyrènes et argile verte de Romainville,
- Eocène / Priabonien / Ludien supérieur : marnes bleues d'Argenteuil,
- Eocène / Yprésien / Sparnacien : argile plastique de l'Yprésien.

### Dans le Nord de la France :

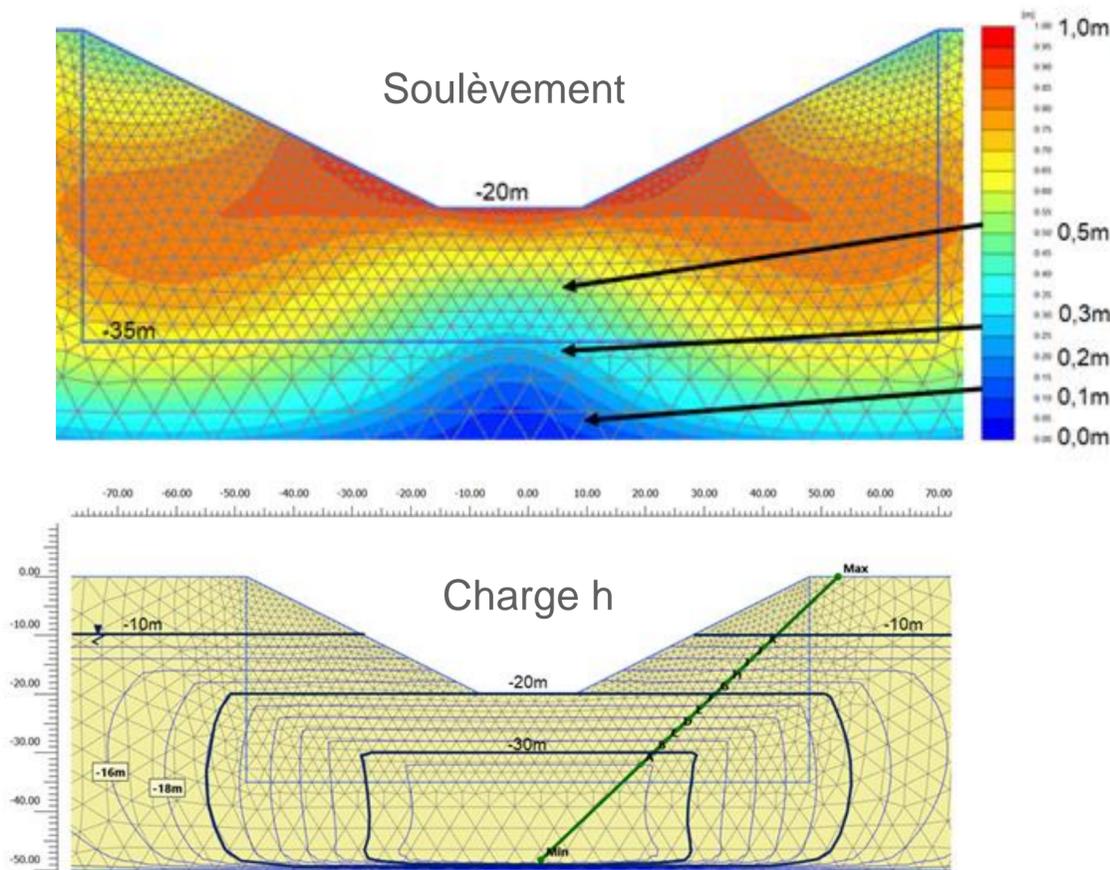
- Eocène / Yprésien : argile des Flandres,
- Paléocène / Thanétien : argile de Louvil,
- Crétacé / Albien : argile du Gault.

### Dans la région de Marseille :

- Quaternaire : argiles,
- Oligocène/Stampien : argiles et marnes,
- Crétacé supérieur / Maestrichtien inférieur : argiles et marnes,
- Crétacé inférieur / Gargasien : calcaires et marnes noires,
- Crétacé inférieur / Bédoulien : calcaires argileux et marneux.

## MODÈLE DE COMPORTEMENT

- Les déformations de gonflement des sols argileux profonds s'établissent en présence d'eau dans un contexte de déchargement mécanique produit par une excavation.
- Le gonflement d'un sol argileux saturé dans son état naturel résulte de la diminution des contraintes en place après une excavation. On peut distinguer :
  - une partie instantanée (gonflement mécanique à court terme, sans évolution de la teneur en eau),
  - une partie différée, liée à l'arrivée progressive d'eau dans le sol.

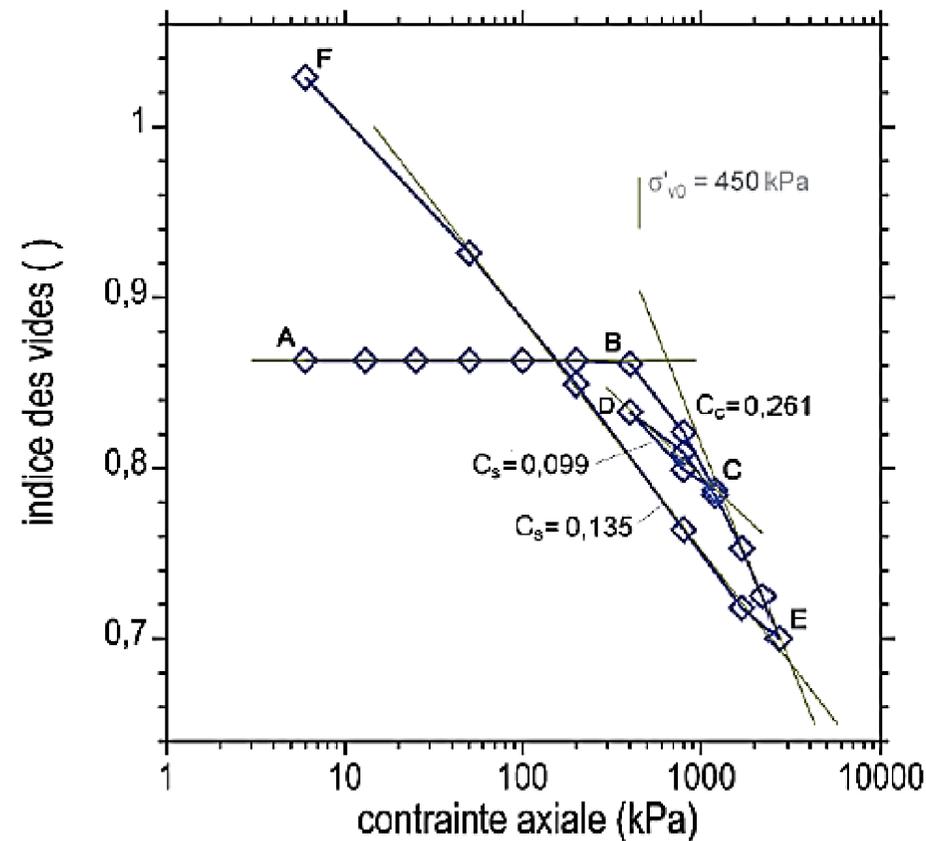


Le déchargement fait baisser les contraintes totales et la pression de l'eau dans les pores à une valeur qui peut être négative. Cette succion attire l'eau du sol avoisinant et les éventuelles arrivées d'eau en fond de fouille induisent une diminution des contraintes effectives et l'augmentation de volume du sol (son gonflement).

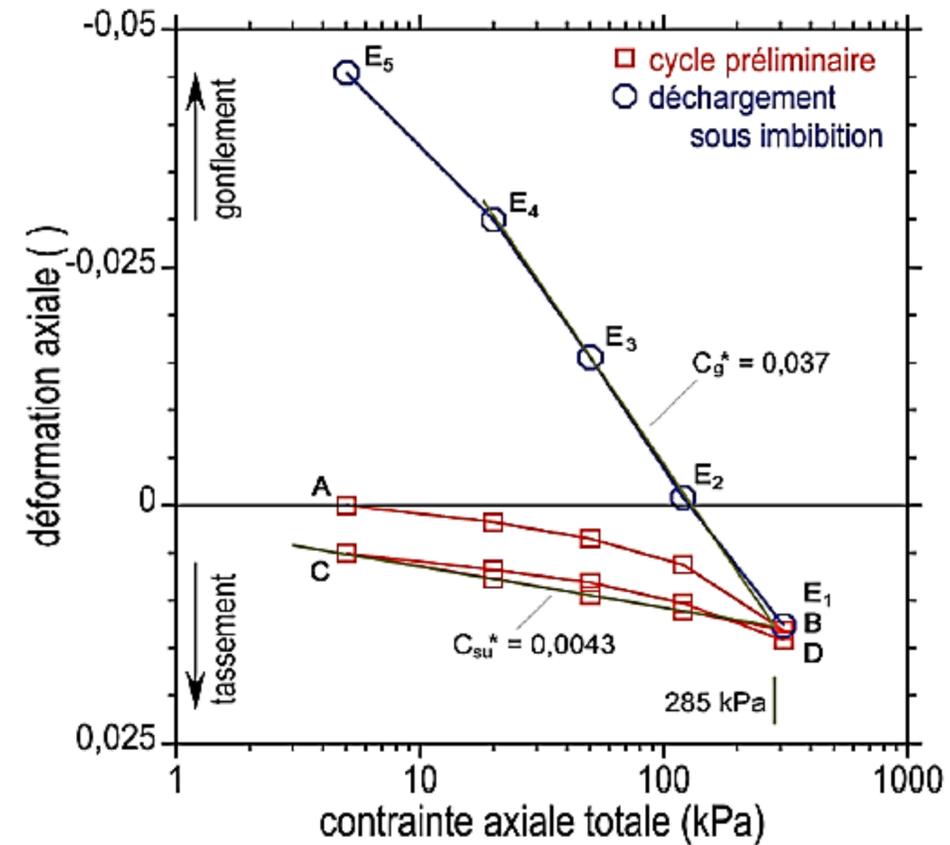
Si cette distinction peut être justifiée sur le plan théorique, elle est moins évidente dans les essais de laboratoire comme sur chantiers. En laboratoire, l'échantillon soumis à l'essai a été déchargé lors de son prélèvement et il est déjà remanié avant le début de l'essai. Sur chantier, le déchargement instantané se produit généralement au fur et à mesure des terrassements.

## LES ESSAIS

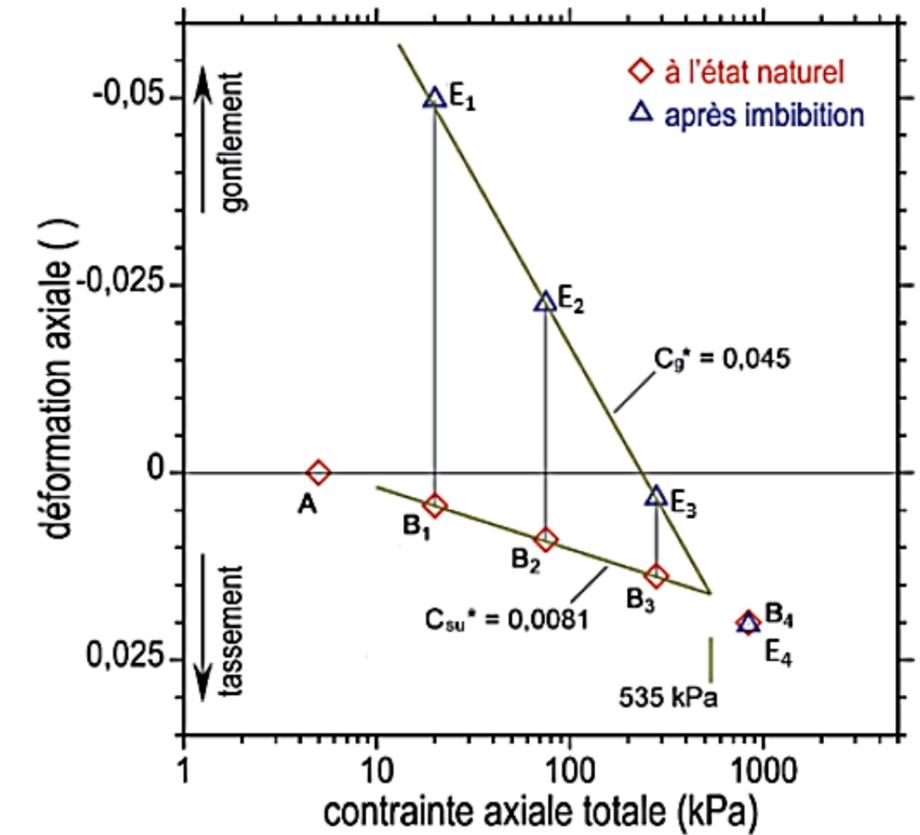
- Toutes les procédures d'essai font référence à l'œdomètre. Des consignes pratiques sont proposées pour améliorer la réalisation des essais (choix des paliers, durée des cycles et des paliers, protection des cellules œdométriques, etc.)



Essai œdométrique standard



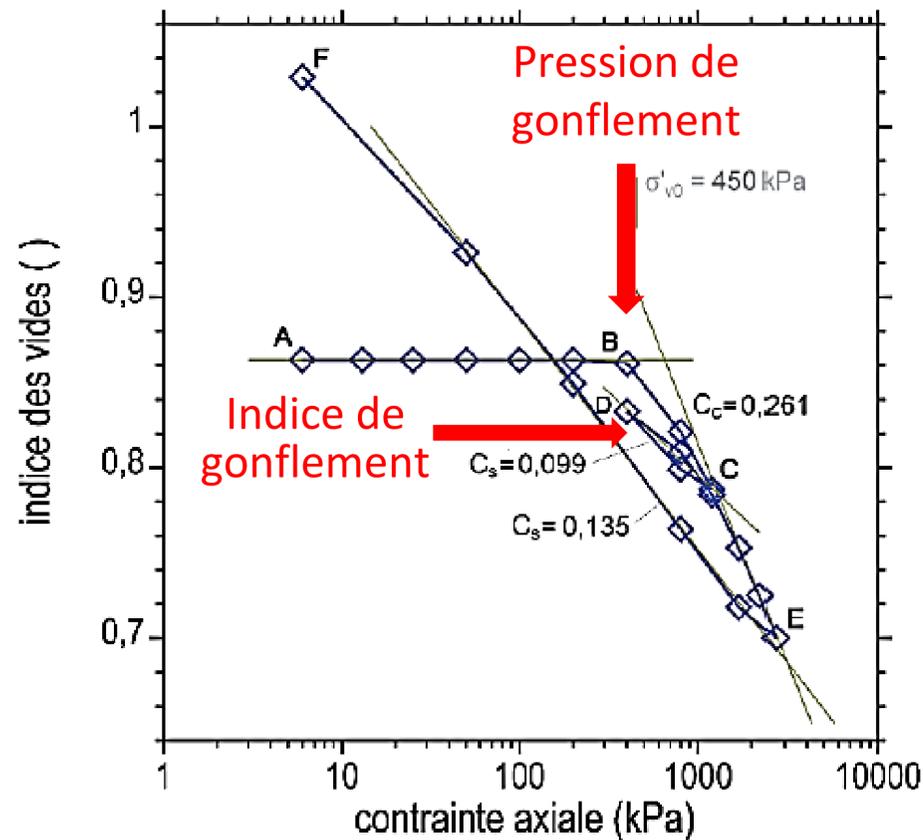
Essai de chargement par paliers



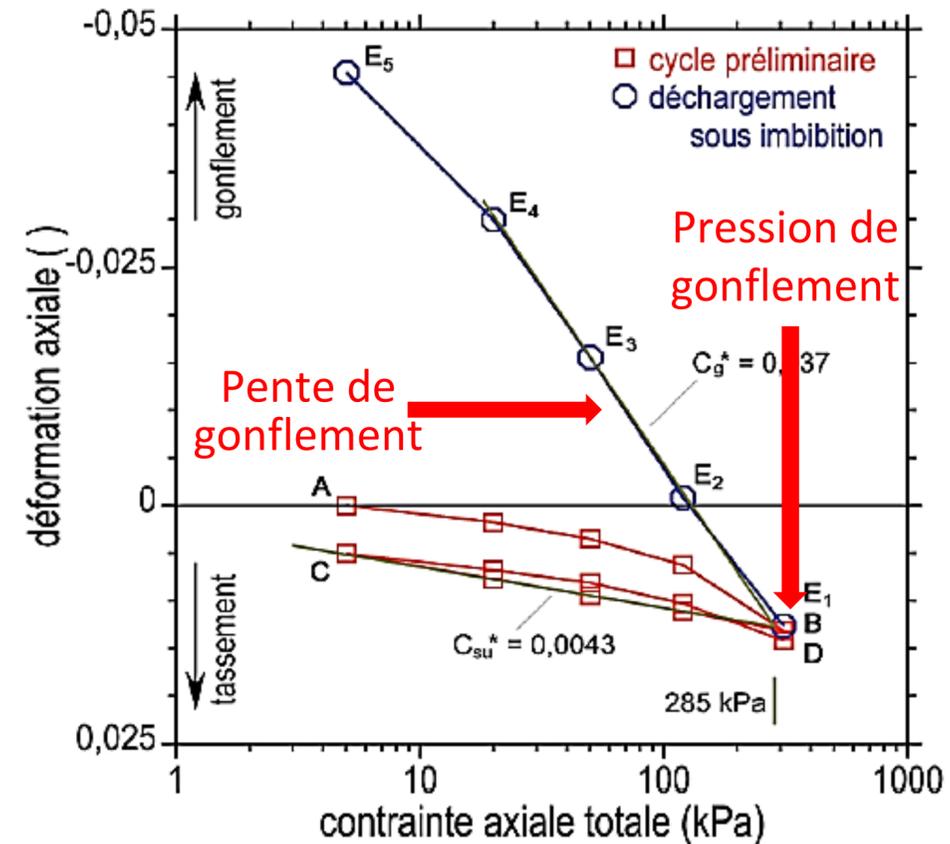
Essai de gonflement en parallèle

## LES ESSAIS

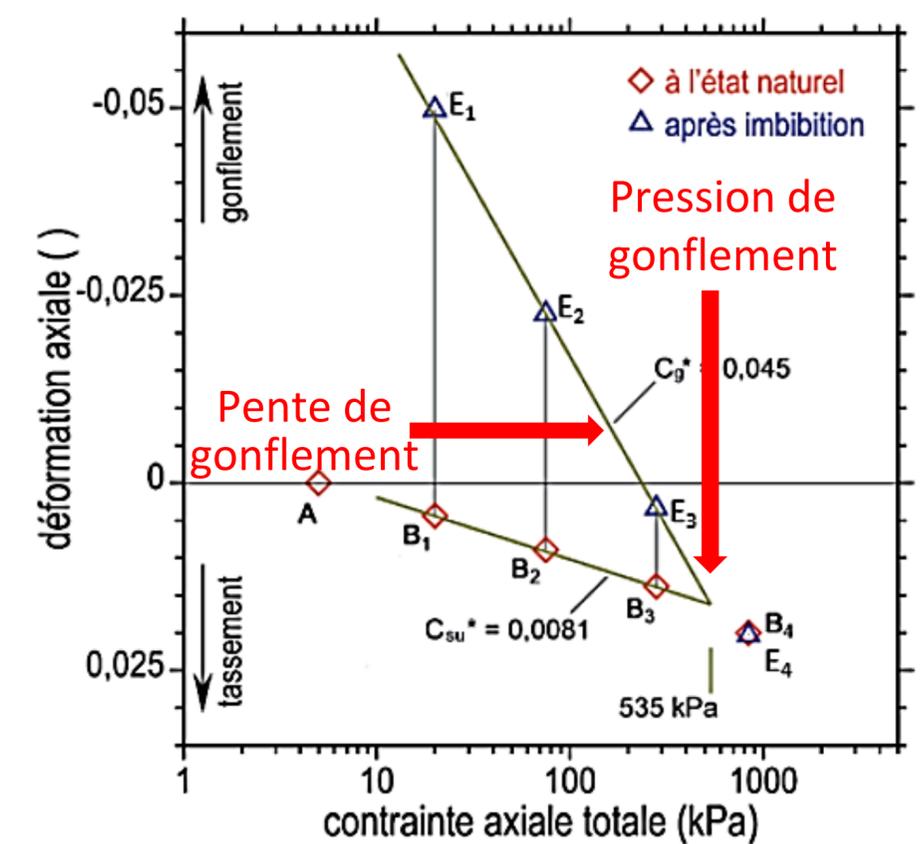
➔ On peut déduire de ces courbes des paramètres de pression et de déformabilité pour le déchargement.



Essai œdométrique standard  
(éprouvette en contact avec l'eau)



Essai de chargement par paliers  
(éprouvette sans eau puis avec eau)



Essai de gonflement en parallèle  
(éprouvette sans eau puis avec eau)

## LES ESSAIS

- Les essais mesurent les réponses du sol à des sollicitations différentes. Il est compliqué de distinguer la part des comportements qui caractérisent des sols saturés et ce qui est dû aux difficultés expérimentales, comme le remaniement lié à l'extraction des carottes, à leur conservation et à leur découpage final. Par contre, la variabilité des résultats des essais réalisés lors des campagnes de reconnaissance géotechnique montre qu'il existe un grand problème. C'est l'une des raisons de la durée des travaux du groupe de travail.
- Dans les processus de retrait et gonflement observés dans les terrains superficiels, les amplitudes de déformation sont associées à la désaturation des sols argileux, puis à leur resaturation. Dans un sol saturé, il n'y a pas en théorie de modification du degré de saturation  $S_r$ . Il ne devrait pas y avoir de gonflement dû à l'arrivée d'eau car l'eau est déjà présente. Les déformations doivent être associées à des variations des contraintes effectives, dues au déchargement.
- Dans les essais, on observe pourtant en général des modifications dues à la mise en contact avec de l'eau. Elles montrent que les éprouvettes ne sont pas totalement saturées. Les causes possibles sont :
  - l'effet du déchargement lors de l'extraction des carottes, qui peut créer des fissures de décompression,
  - les manipulations associées à la taille et à la mise en place des éprouvettes dans l'œdomètre.
- La décompression peut être très importante (jusqu'à 5-10% de la hauteur initiale de l'éprouvette). Le cycle de chargement et déchargement proposé au début des essais vise à limiter ses effets.

## LES ESSAIS

- L'interprétation des essais cherche à déterminer les parts instantanée et différée du gonflement du sol lors du déchargement. Si l'on admet que seules des variations de contraintes effectives peuvent expliquer les déformations d'un sol, le schéma de la figure montre ce que l'on va chercher à déduire des essais. En général on n'est pas capable de vérifier sur les chantiers les déformations dues au déchargement rapide.

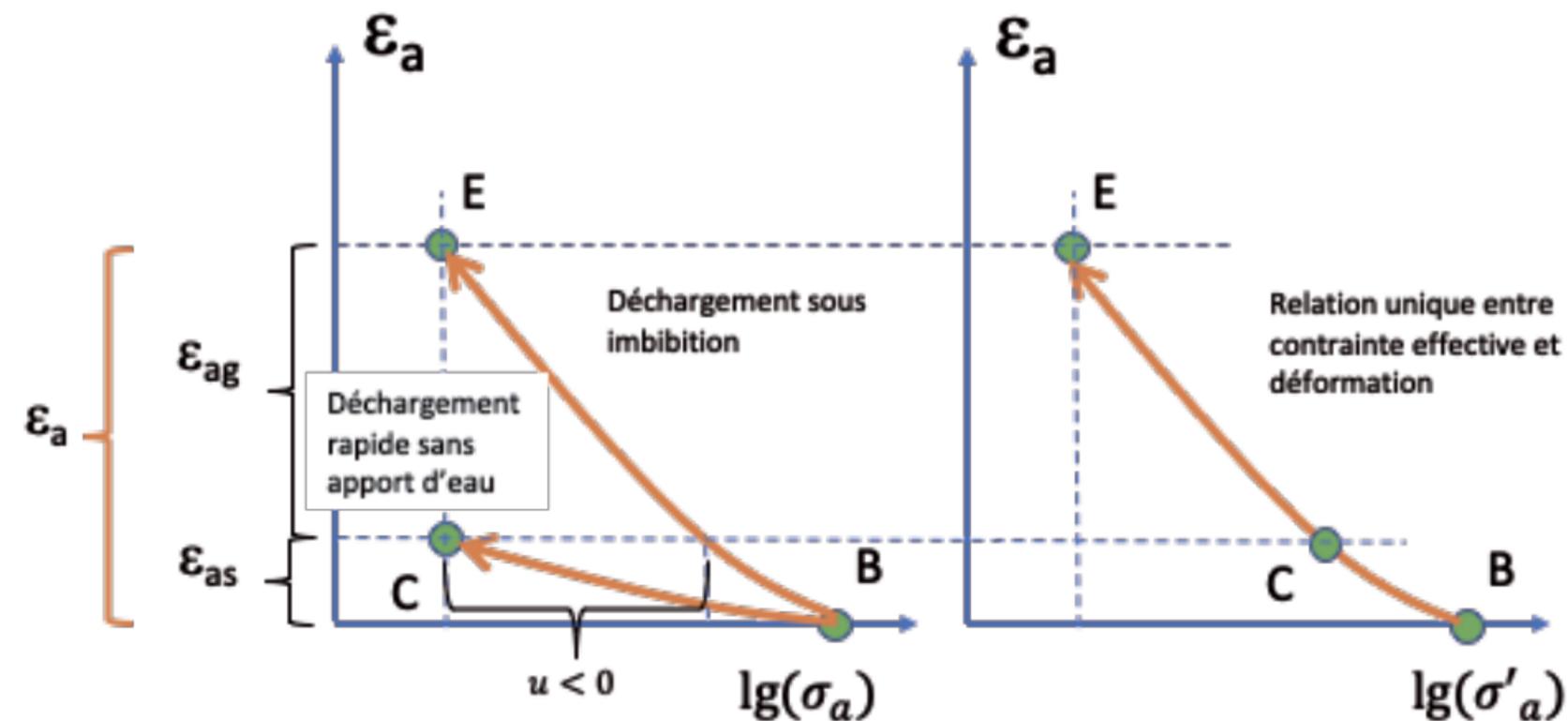
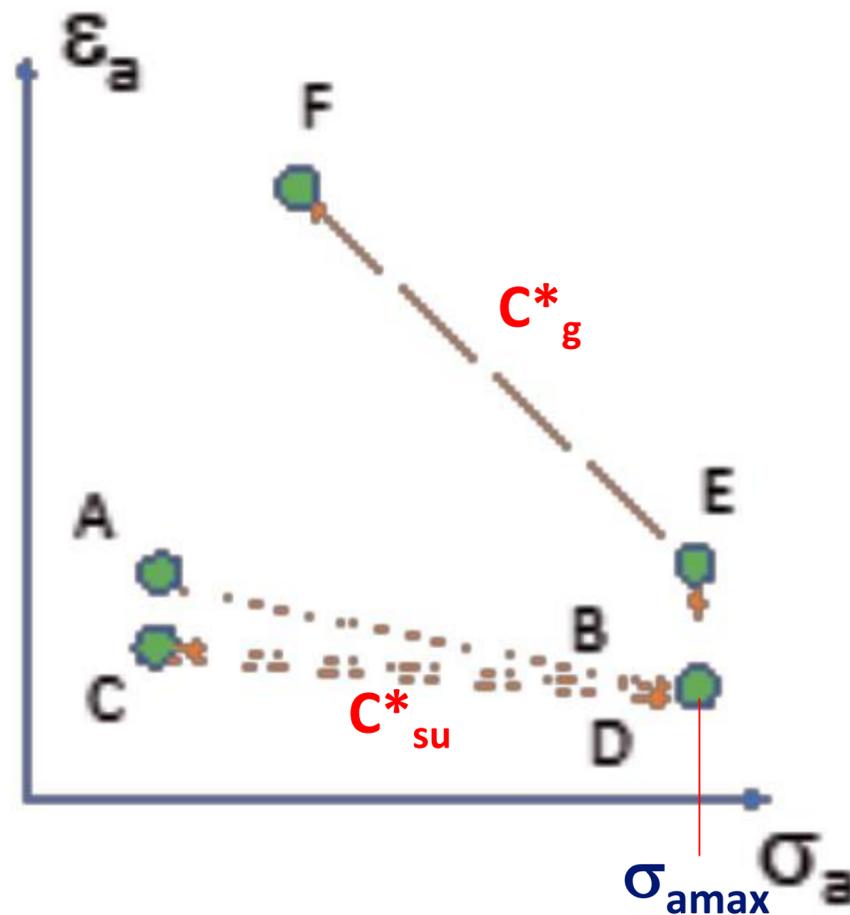


Figure 9. Relation contrainte/déformations en contrainte totale et en contrainte effective lors du déchargement d'un sol gonflant saturé. Sur la figure (a),  $C^*_g$  est relié à la « pente » du chemin BE,  $C^*_{su}$  est relié la « pente » BC. Les contraintes totales et effectives sur le chemin BE sont égales car après stabilisation les pressions interstitielles sont nulles.

## LES ESSAIS

### Commentaires sur l'essai de chargement par paliers successifs



$\sigma_{amax}$  égal à  $\sigma'_{vo}$

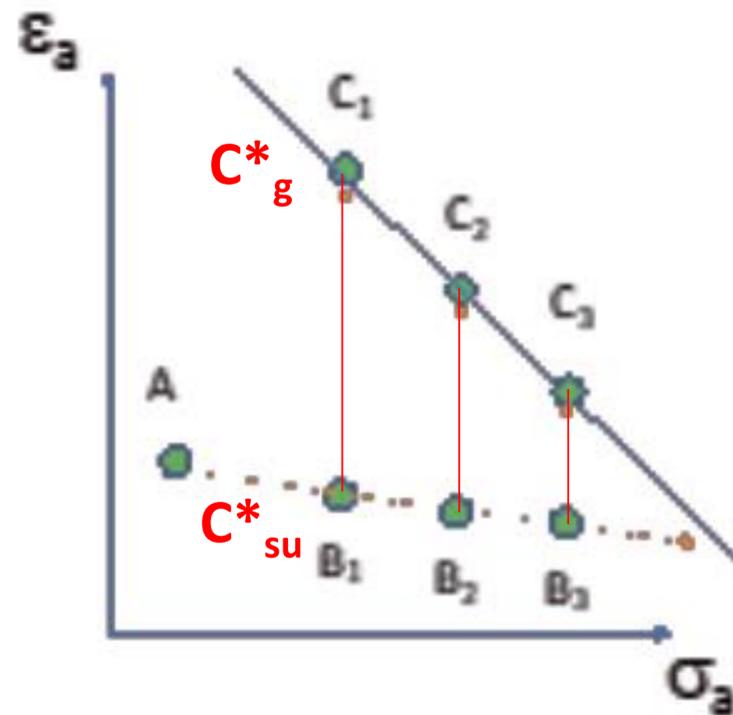
Les pentes  $C^*_g$  et  $C^*_{su}$  obtenues par cette méthode sont fiables et peuvent être utilisées directement dans les calculs.

Si la relation entre la déformation axiale et le logarithme de la contrainte axiale pendant le déchargement sous imbibition est linéaire, la « pression de gonflement » doit être prise égale à la contrainte effective en place. Un gonflement (ou tassement) pendant l'imbibition sous contrainte en place, qui différenciera ces deux valeurs, serait dû à la qualité de l'éprouvette (altération liée au prélèvement, séchage lié à la conservation, etc.).

La « pression de gonflement » mesurée par cette méthode peut être prise en compte dans le dimensionnement seulement dans le cas où la relation entre la déformation axiale et le logarithme de la contrainte axiale est non linéaire, donnant une pression de gonflement plus faible que la contrainte effective en place.

## LES ESSAIS

### Commentaires sur l'essai de gonflement en parallèle

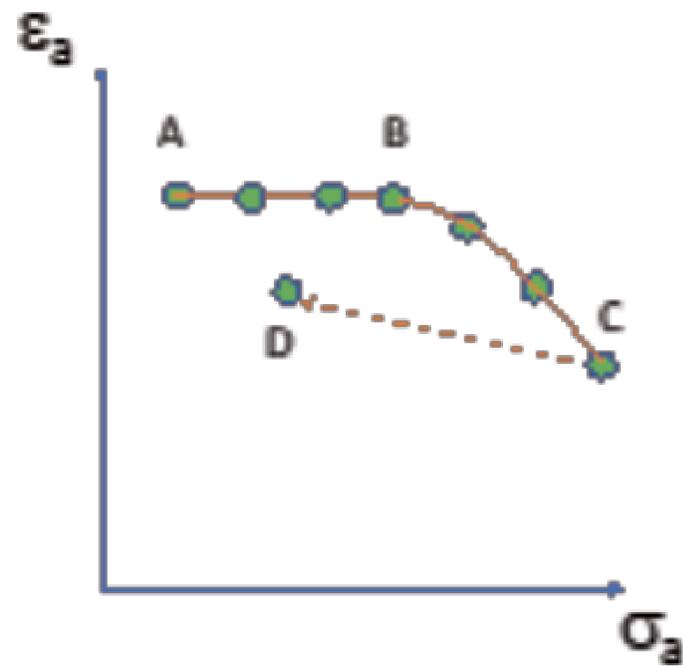


- Sans cycle de chargement-déchargement préalable à teneur en eau naturelle : les résultats ne sont pas fiables. Seule la pente  $C^*_g$  est utilisable à condition que les résultats obtenus pendant les phases de chargement initial et imbibition soient fournis.
- Avec cycle de chargement-déchargement préalable à teneur en eau naturelle et résultats complets (procédure préconisée) : les pentes  $C^*_g$  et  $C^*_{su}$  obtenues sont fiables et peuvent être utilisées directement dans les calculs.

Cycle préalable, avec chargement jusqu'à  $\sigma_{amax} = \sigma'_{v0}$ ,  
déchargement sous contrainte au moins égale à 25 kPa  
et rechargement sous la contrainte sous laquelle sera  
réalisée l'imbibition

## LES ESSAIS

### ➤ Commentaires sur l'essai œdométrique standard



- La norme de cet essai indique une « pression de gonflement ». Pourtant cette pression correspondrait théoriquement à la contrainte effective du point C dans la figure 9 dans le cas idéal, et elle serait significativement réduite si l'éprouvette est altérée. Donc, il ne faut pas tenir compte de la « pression de gonflement » fournie par cet essai dans les dimensionnements de gonflement.

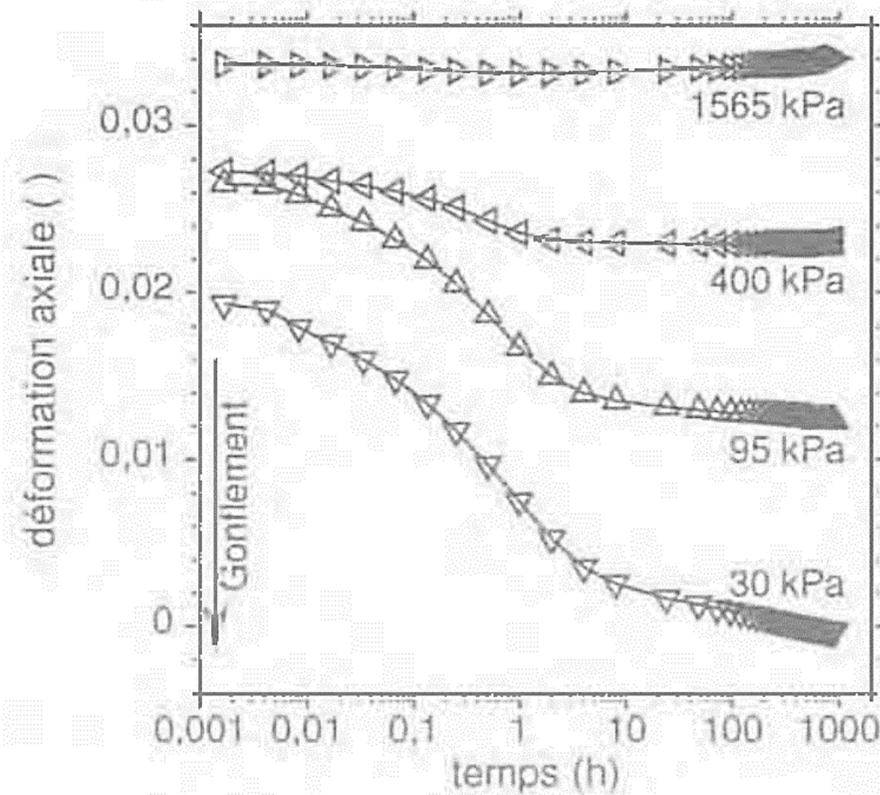
La pente  $C_s$  fournie par cet essai est proche de la pente  $C_g$  fournie par les autres méthodes. En revanche, il faudra faire attention à une potentielle non linéarité de la pente de déchargement ( $C_s$  doit être déterminée dans la gamme proche de la contrainte en place, et pas dans la gamme de forte contrainte).

## LES ESSAIS

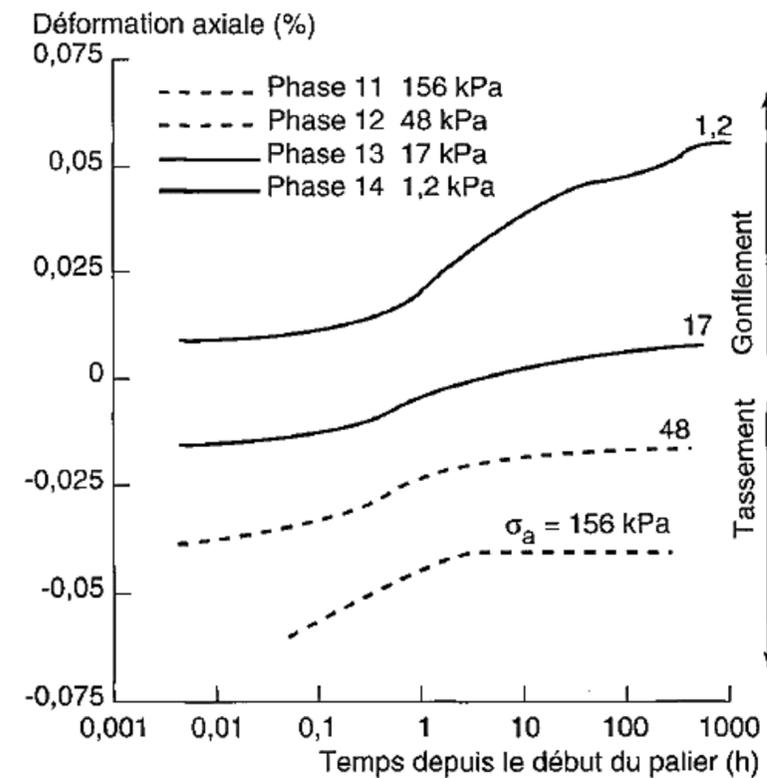
### ➤ Déformations secondaires de fluage

- Les déformations enregistrées sous chaque palier de chargement se développent au cours du temps et il faut choisir un critère de fin d'essai, donc la durée des essais.
- Toutes les analyses d'amplitudes négligent les déformations secondaires, qui sont importantes sous les faibles charges.

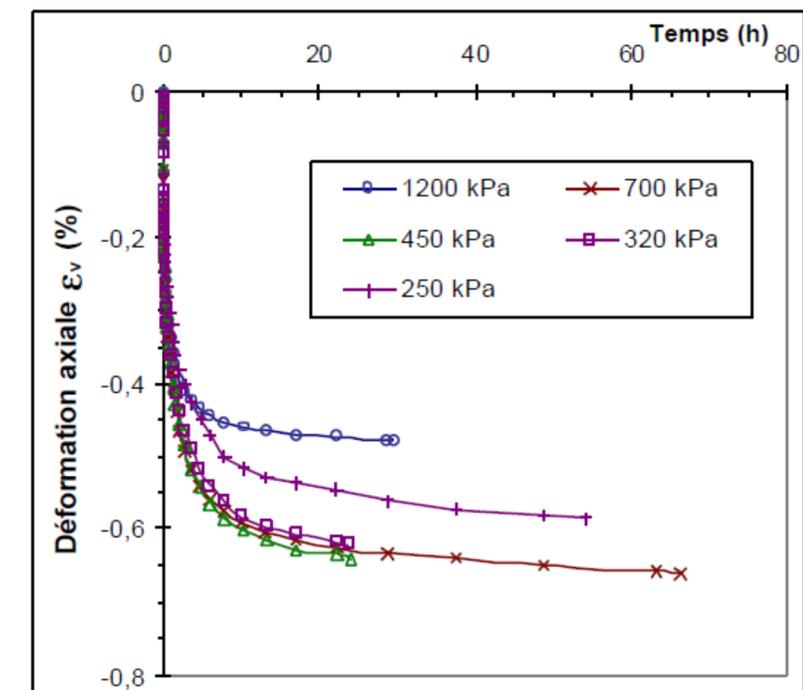
Serratrice 2007. Arbus



Serratrice & Soyez 1996. Stampien Marseille



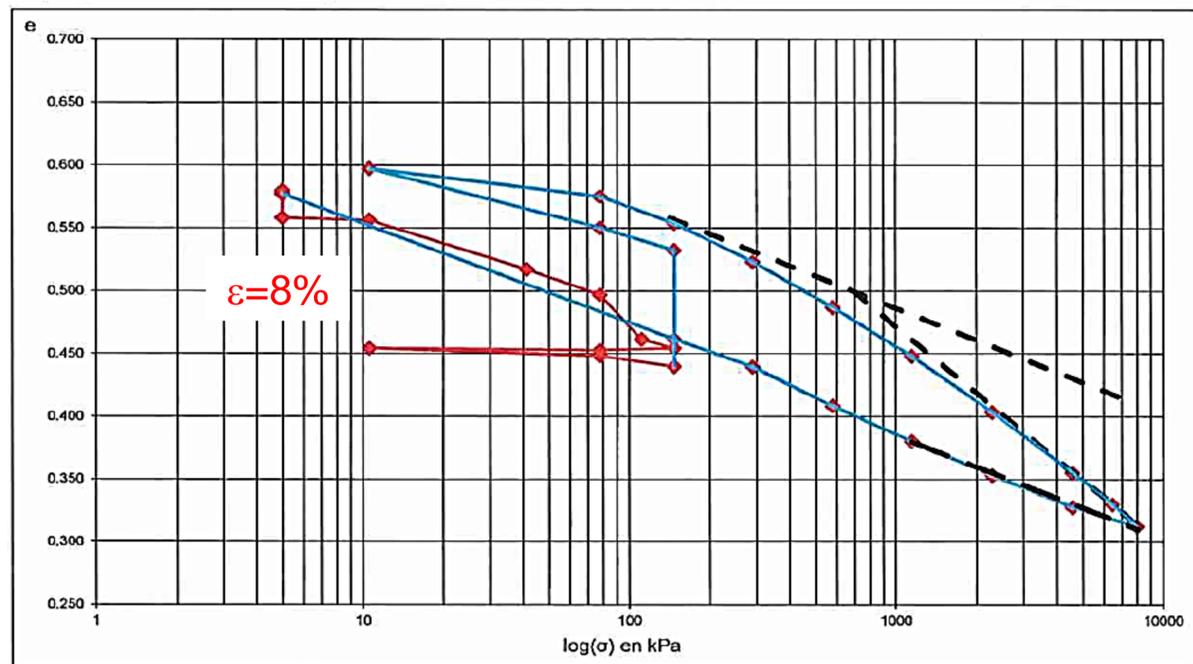
Bultel 2001. Marne Tartaiguille



## QUALITÉ DES ÉCHANTILLONS TESTÉS

- Le rapport du GT contient de nombreux conseils pour prélever les sols le plus intacts possible.
- Les causes des anomalies notées dans les résultats des essais sont en priorité :
  - la décompression du sol lors du prélèvement (une forme de remaniement avec fissuration),
  - la désaturation des éprouvettes lors de la préparation des essais et lors de leur déroulement (exposition à l'air, désaturation lors des cycles de chargement et rechargement où la compression expulse de l'eau qui ne revient pas).

### Effet de la décompression lors du prélèvement



### Notes sur les essais (JFS)

La majorité des essais par paliers (Huder et Amberg) est inexploitable. Pressions appliquées inférieures à  $\sigma'_{vo}$ . Pressions de gonflement extrapolées. Déformations trop fortes (parfois plus de 5%) lors des cycles préliminaires de chargement-déchargement-rechargement en dessous de  $\sigma'_{vo}$ . Explication avancée = retrait de l'argile pendant les paliers du cycle préliminaire (24h). La mise en eau sous des contraintes faibles a provoqué des gonflements spectaculaires.

Un essai de retrait montre une déformation axiale de plus de 7% en 60 heures, avec réduction de la teneur en eau de 10% et de l'indice des vides de 0,35 en conservant le sol en état quasi-saturé (JF Serratrice, Terrains gonflants. Essais de gonflements en laboratoire. Recueil d'exemples Suite 4, janvier 2021).

## PARAMÈTRES POUR LE CALCUL

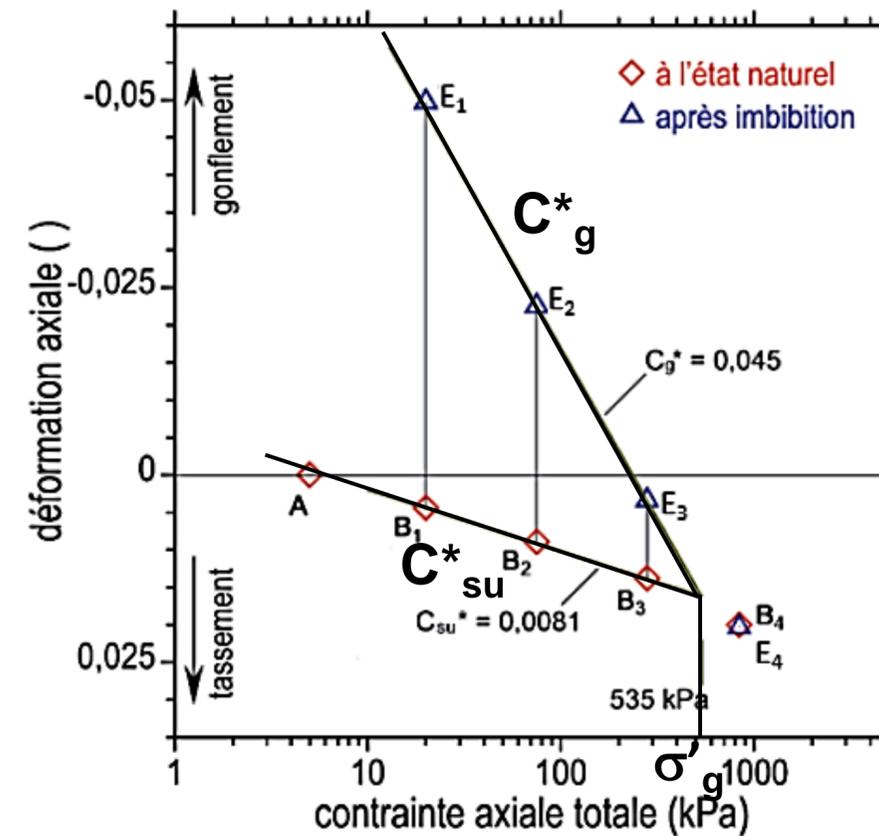
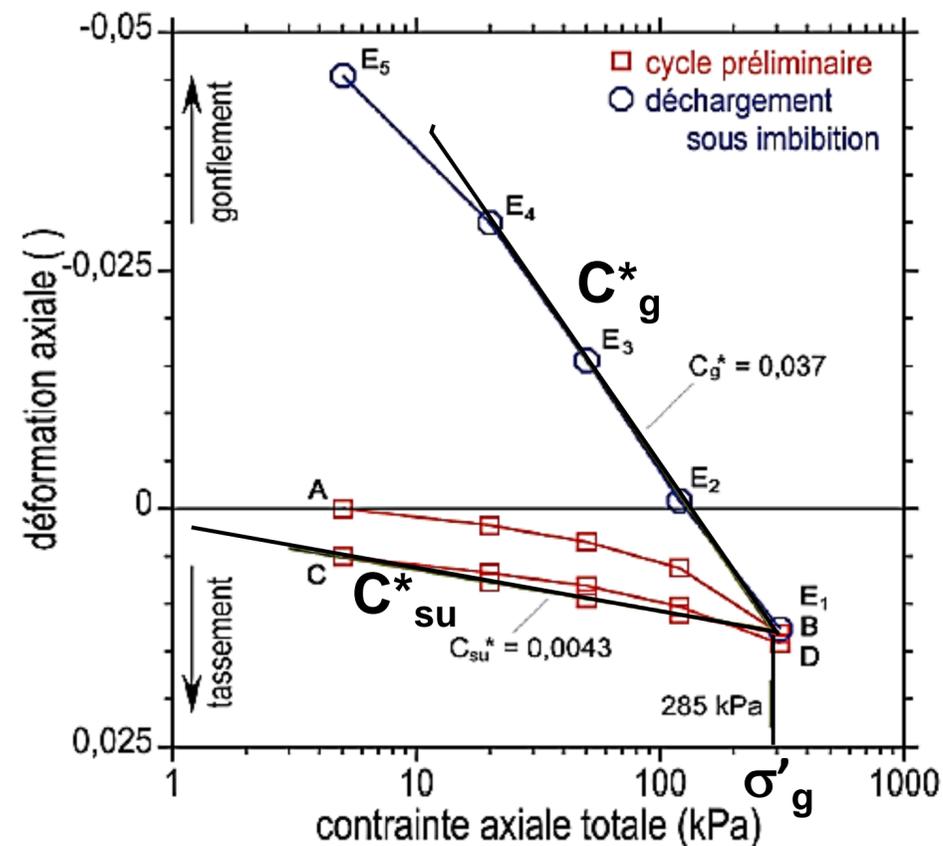
➤ De nombreux paramètres ont été définis pour les déformations et la pression de gonflement.

$C_g$	Coefficient de gonflement (lié au déchargement mécanique et à la mise en présence d'eau)
$C_g^*$	Coefficient de gonflement divisé par $(1 + e_0)$
$C_s$	Indice de gonflement
$C_s^*$	Indice de décompression-recompression divisé par $(1 + e_0)$
$C_{su}$	Pente de déchargement-rechargement à teneur en eau constante
$C_{su}^*$	Pente de déchargement-rechargement à teneur en eau constante divisée par $(1 + e_0)$
$K_g$	Facteur de gonflement (uniquement lié à la mise en présence d'eau)
$K_g^*$	Facteur de gonflement divisé par $(1 + e_0)$
$R_g$	Rapport de gonflement (selon norme XP P94-091)
$\sigma'_g, \sigma'_{ag}$ ou $\sigma'_{vg}$	Contrainte effective de gonflement (générique, axiale, verticale)

➤ Les valeurs avec astérisque sont définies sur les déformations et les autres sur l'indice des vides.

## PARAMÈTRES POUR LE CALCUL

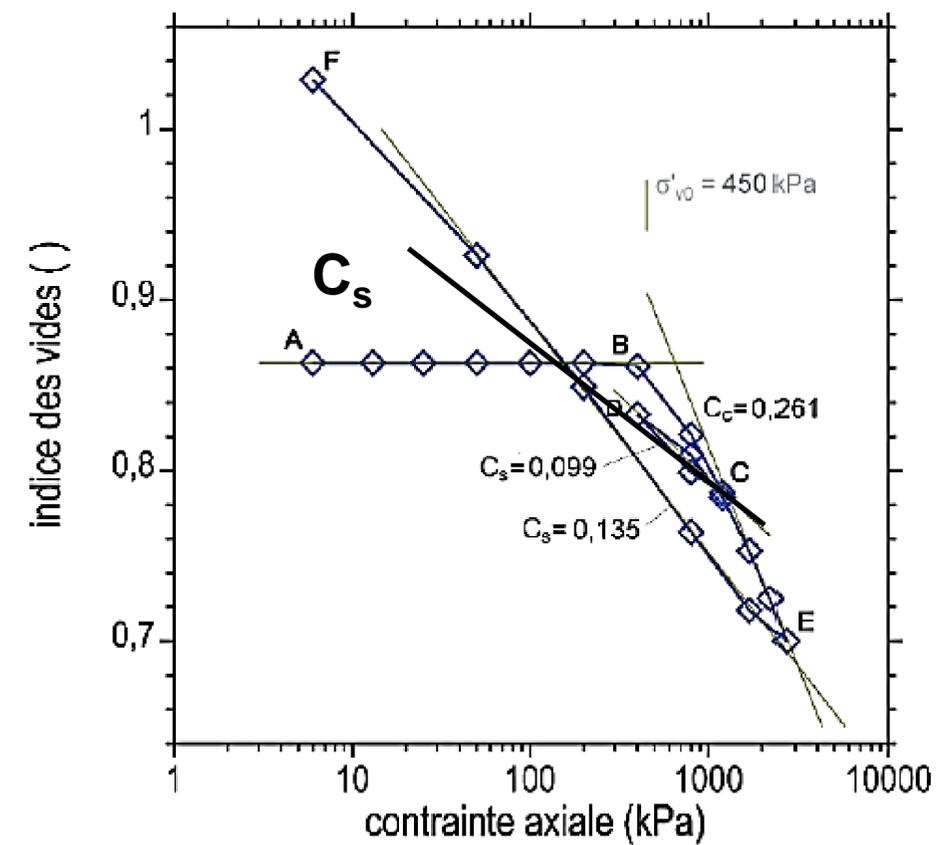
- $C_g$  Coefficient de gonflement (lié au déchargement mécanique et à la mise en présence d'eau)
- $C_g^*$  Coefficient de gonflement divisé par  $(1 + e_0)$
- $C_{su}$  Pente de déchargement-rechargement à teneur en eau constante
- $C_{su}^*$  Pente de déchargement-rechargement à teneur en eau constante divisée par  $(1 + e_0)$
- $\sigma'_g$  Contrainte effective de gonflement



## PARAMÈTRES POUR LE CALCUL

$C_s$  Indice de gonflement

$C_s^*$  Indice de décompression-recompression divisé par  $(1 + e_0)$



## PARAMÈTRES POUR LE CALCUL

- $K_g$  Facteur de gonflement (uniquement lié à l'eau)
- $K_g^*$  Facteur de gonflement divisé par  $(1 + e_0)$  égal à  $R_g$

Si l'on interprète l'essai en calculant la différence de déformation axiale  $\Delta\varepsilon_a$  entre les deux courbes de déchargement de pente  $C_g^*$  et  $C_{su}^*$ , on peut définir un coefficient  $K_g^*$  :

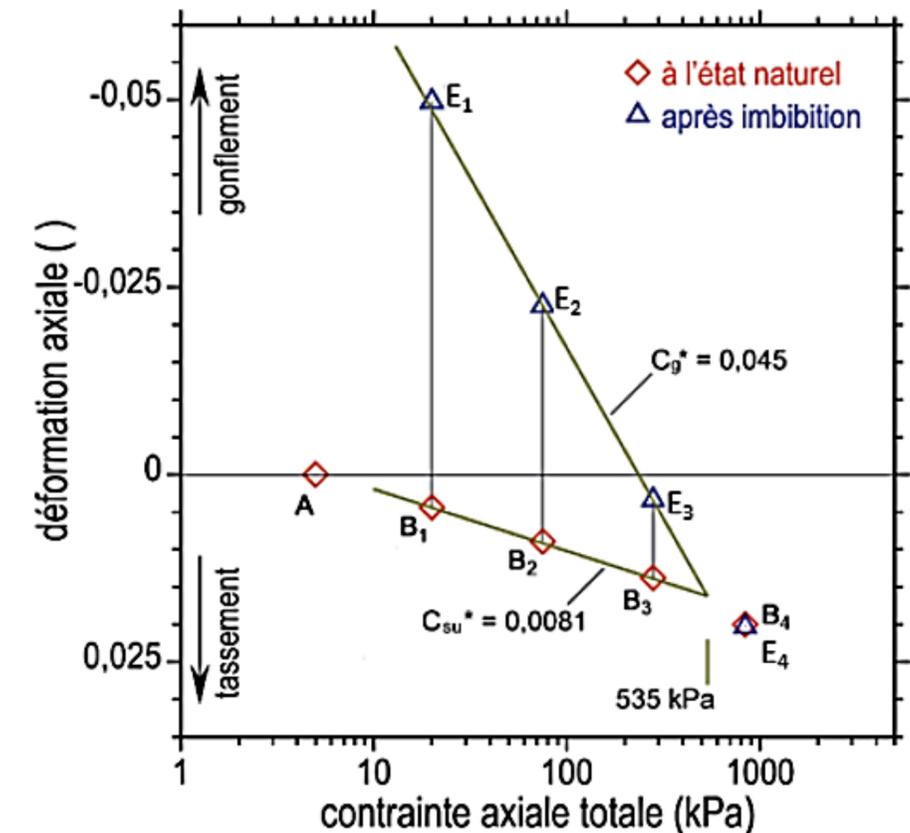
$$\Delta\varepsilon_a = K_g^* \lg(\sigma_a/\sigma_{ag}) \quad \text{pour} \quad \sigma_a \leq \sigma_{ag}$$

$$K_g^* = C_g^* - C_{su}^*$$

Cette différence  $\Delta\varepsilon_a$  et la pente  $K_g^*$  représentent la part des déformations dues au gonflement du sol alimenté en eau.

La pente  $K_g$  en termes d'indices des vides peut être définie par

$$K_g = (1 + e_0) K_g^*$$



# CARACTÉRISATION ET ESSAIS

## PARAMÈTRES POUR LE CALCUL

Localisation	Nature du terrain	Profondeur (m)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$w_0$ (%)	$e_0$ ( )	$S_0$ (%)	$w_L$ ( )	$I_p$ ( )	Type d'essai	$C_{su}^*$ ( )	$C_g^*$ ( )	$K_g^*$ ( )	$\sigma'_{ag}$ (kPa)	$C_c^*$ ( )	$\sigma'_{ap}$ (kPa)
Marseille	Marnes du Stampien	17 à 30	200 à 450	9	0,24	100	39	20	//	-	-	0,005	350		
Marseille	Marnes du Stampien			10	0,30	99	42	20				0,019	220		
Marseille	Marnes du Stampien			17	0,45	100	52	32				0,035	390		
Dunkerque	Argile des Flandres	42	450	35	0,994	97	81	56	++	0,024	0,051	0,027	222	0,195	918
Dunkerque	Argile des Flandres	61	650	30	0,821	100	80	54	++	0,013	0,038	0,025	392	0,174	982
Ligne 11 RATP	Argile verte de Romainville	5	96	28	0,740	100	65	37	++	0,005	0,055	0,050	260	0,110	639
Ligne 11 RATP	Marnes d'Argenteuil	17	300	25	0,666	100	58	33	++	0,002	0,013	0,011	600	0,157	2128
Ligne 11 RATP	Marnes d'Argenteuil	18	310	34	0,899	100	93	74	++	0,004	0,037	0,033	285	0,251	1293
Ligne 11 RATP	Marnes d'Argenteuil	22	350	33	0,883	98	33	50	++	0,003	0,027	0,024	360	0,202	2378
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	22	460	24	0,676	98	73	51	++	0,004	0,030	0,026	590		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	38	450	29	0,800	100	87	60	//	0,012	0,047	0,035	236		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	38	747	34	0,635	99	72	49	//	0,057	0,118	0,061	342		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	36	423	27	0,715	100	-	-	++	0,030	0,044	0,013	458		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	39	442	19	0,500	99	51	33	//	0,012	0,021	0,009	155		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	30	335	20	0,525	99	64	43	//	0,013	0,029	0,016	470		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	35	418	21	0,543	100	62	41	//	0,012	0,031	0,019	510		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	42	483	19	0,517	99	-	-	//	0,011	0,021	0,010	700		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	30	379	31	0,824	100	126	88	//	0,015	0,034	0,019	470		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	24	340	31	0,884	100	82	53	//	0,017	0,024	0,007	350		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	18	261	25	0,656	100	68	44	//	0,013	0,024	0,011	439		
Ligne 15 SGP	Argiles de l'Yprésien	44	595	31	0,812	100	103	65	//	0,008	0,045	0,037	534		

**Merci de votre attention.**