

Jubilé de François Schlosser, ENPC, 11 octobre 2016

ECROUIR LE FLUAGE DES SOLS MOUS PAR REMBLAIS DE PRÉCHARGEMENT

par François Baguelin

« Ecrouir » le fluage d'un sol compressible par remblai de préchargement

Principe d'un préchargement habituel

Applicable à un sol compressible ne présentant pas de fluage significatif.

Mettre une charge de remblai plus grande que le remblai définitif et laisser consolider un temps suffisant de façon à obtenir un tassement de consolidation égal au tassement de consolidation final sous la charge définitive.

Schématiquement : $s_c(q_1) \cdot U(t_1) = s_c(q_0) \cdot 100\%$

s_c = tassement de consolidation (dit primaire)

q_0 = charge définitive (= remblai + charge de circulation)

q_1 = charge du préchargement : $q_1 > q_0$

« Ecrouir » le fluage d'un sol compressible par remblai de préchargement

Préchargement pour écrouir le fluage

Dans le cas de sol sujet à un fluage notable, obtenir sous le préchargement un tassement de consolidation et de fluage égal au tassement de consolidation final et à une partie du tassement de fluage sous la charge définitive.

idée : « consommer » du tassement de fluage

Schématiquement :

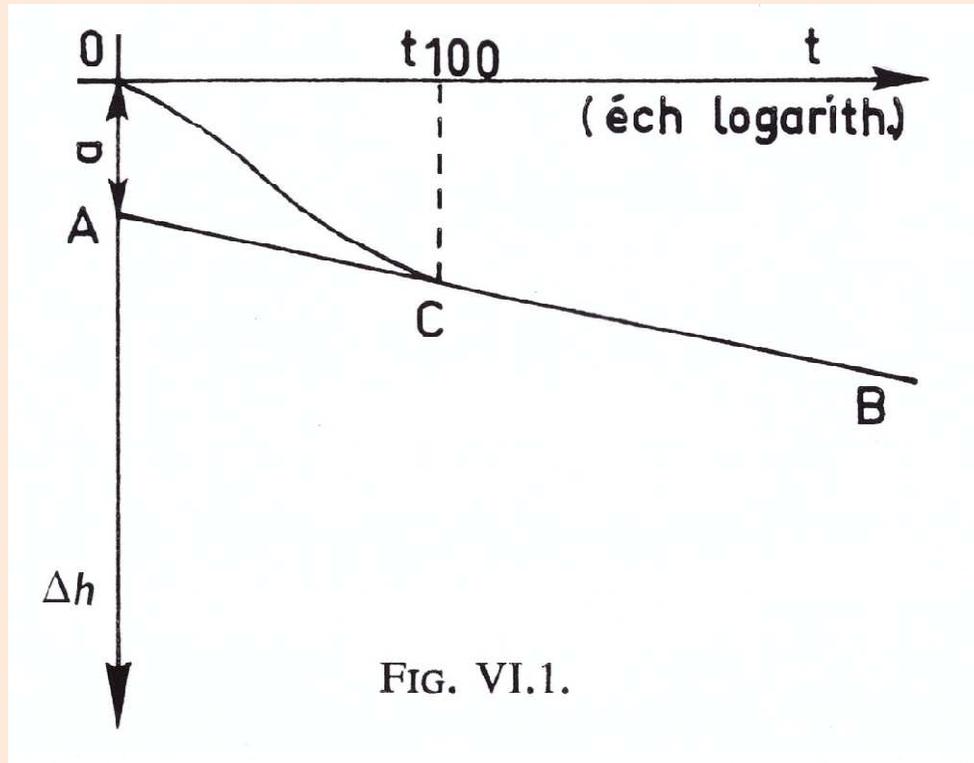
$$s_c(q_1) \cdot U(t_1) + s_f(t_1 - t_c) = s_c(q_0) \cdot 100\% + s_f(t_{10\text{ans}} - t_c)$$

s_f = tassement de fluage

10 ans = valeur indicative de la durée de référence pour le tassement toléré en service

Les modèles de fluage classiques

Buisman (1936)



$$\Delta h = a + b \lg t$$

- succession de la consolidation et du fluage
- $\lg t$: démarrage du fluage à l'application de la charge ($t=0$)
- raccord anguleux à t_{100} : à déterminer ?

Les modèles de fluage classiques

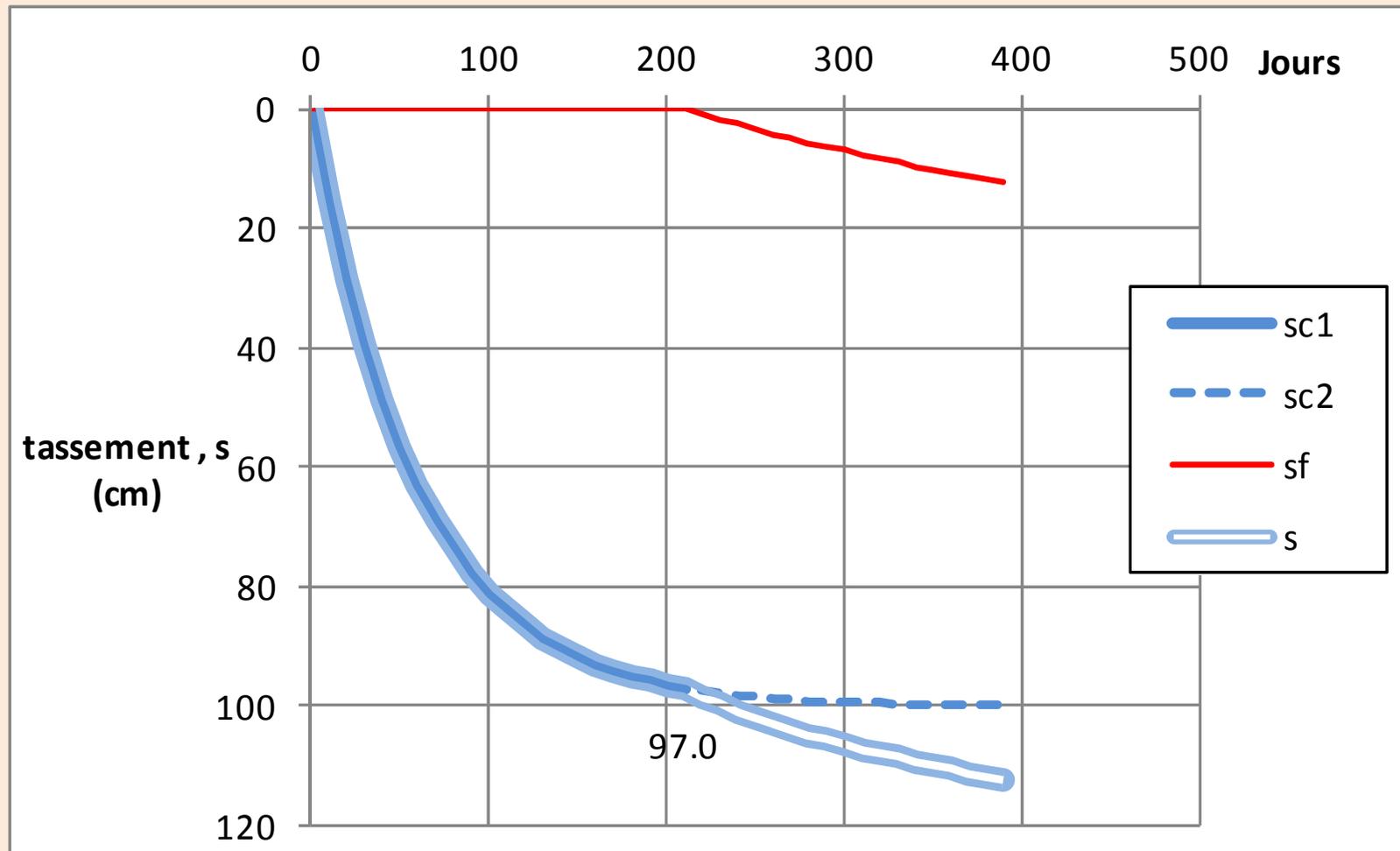
Koppejan (1948)

$$\text{Sol NC} \quad \frac{\Delta h}{h} = 2,3 \left[\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \lg t \right] \lg \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c}$$

$$\text{Sol SC} \quad \frac{\Delta h}{h} = 2,3 \left[\frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{s1}} \lg t \right] \lg \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + 2,3 \left[\frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{s2}} \lg t \right] \lg \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c}$$

- succession de la consolidation et du fluage
- $\lg t$: démarrage du fluage à l'application de la charge ($t=0$)
- raccord (anguleux) quand la consolidation est complète, soit :
 - $\lg t = 0 \Leftrightarrow t = 1$ 1 jour (essai oedométrique)
 - remblai : quel taux de consolidation? >95% ou 99% ?

Les modèles de fluage classiques



Le point de raccord consolidation-fluage est un point anguleux, ce qui n'est pas physique.

Le modèle de Bjerrum (1967)

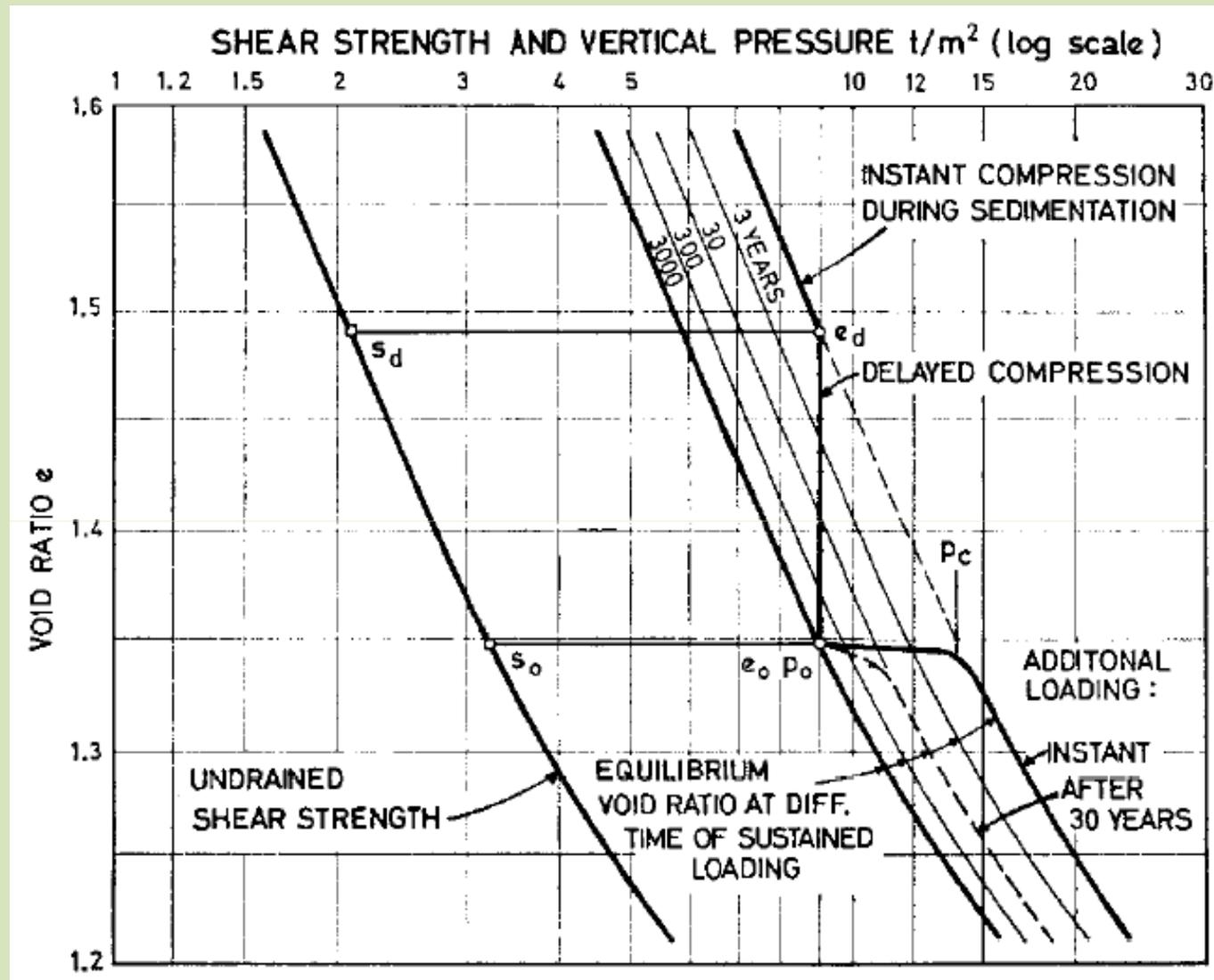


Fig. 14. Compressibility and shear strength of a clay exhibiting delayed consolidation

Adaptation pratique du modèle de Bjerrum

Principes :

- 1) Succession de la consolidation et du fluage.
- 2) Continuité des 2 courbes, pas de point anguleux :
au point de raccord, égalité de la fonction de tassement $s(t)$,
des dérivées première et seconde, $s'(t)$ et $s''(t)$.

Adaptation pratique du modèle de Bjerrum

Application avec les fonctions suivantes :

1) Fonction de consolidation :

$$s_c = b + a \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{c}\right]\right)$$

Cette expression représente :

- la fin de la consolidation verticale d'une couche : $T > 0.2$

cf. Baguelin F. (1999). La détermination des tassements finaux de consolidation : une alternative à la méthode d'Asaoka. Revue Française de Géotechnique n°86, 9 pages.

- la consolidation radiale d'une couche munie de drains verticaux ($b=0$).

Adaptation pratique du modèle de Bjerrum

Application avec les fonctions suivantes :

1) Fonction de consolidation : $s_c = b + a \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{c}\right]\right)$

2) Fonction de fluage :

$$s_f = s_0 + C_\alpha \cdot h \cdot \log\left[\frac{t - t_{00}}{t_0 - t_{00}}\right]$$

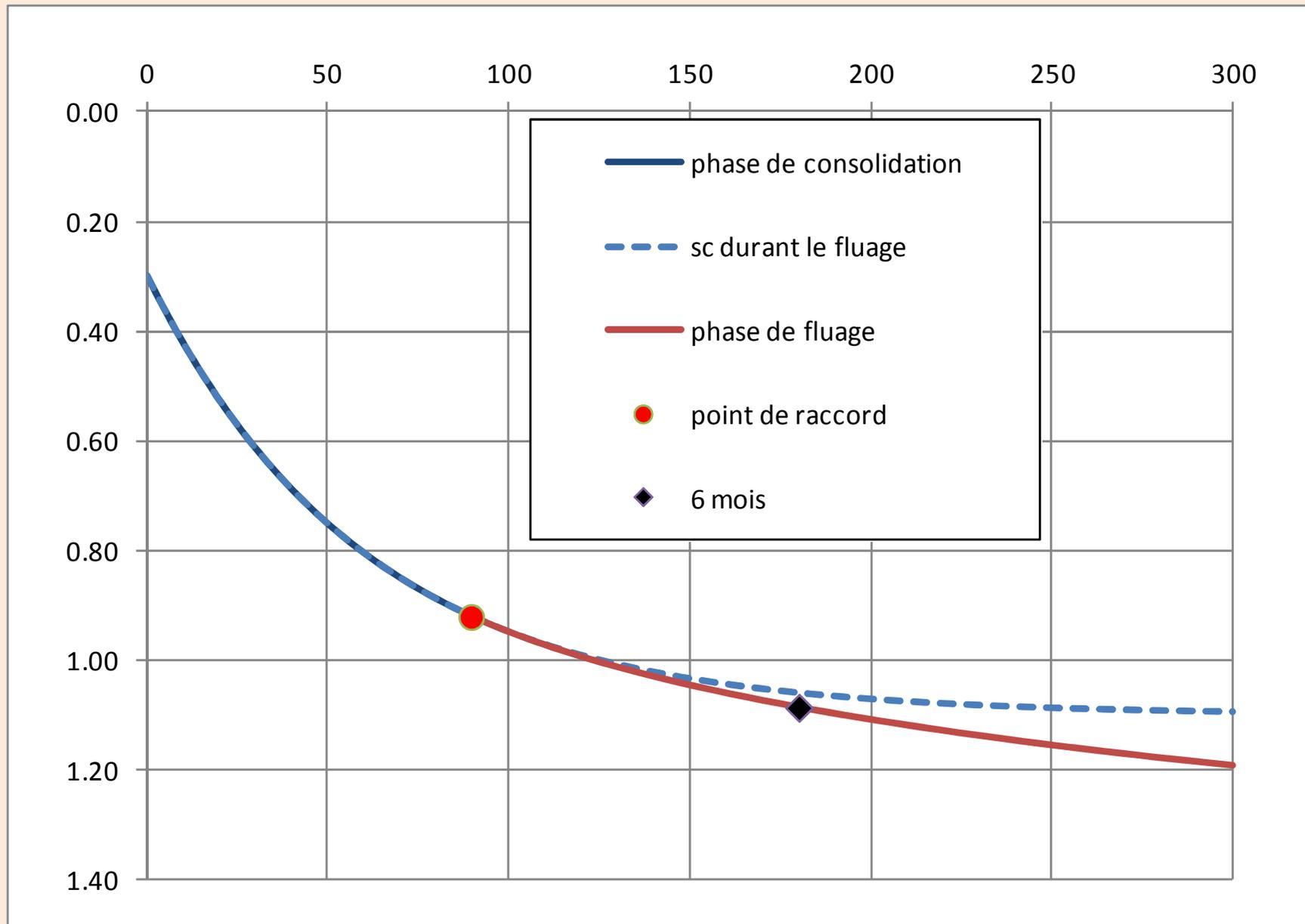
t_{00} est le démarrage du fluage

ou bien, avec le logarithme népérien :

$$C_F = \frac{C_\alpha}{2,3}$$

$$s_f = s_0 + C_F \cdot h \cdot \text{Ln}\left[\frac{t - t_{00}}{t_0 - t_{00}}\right]$$

Exemple de graphique



Application avec les fonctions suivantes

1) Fonction de consolidation : $s_c = b + a \cdot (1 - \exp[-\frac{t}{c}])$

2) Fonction de fluage : $s_f = s_0 + C_F \cdot h \cdot \text{Ln} \left[1 + \frac{t - t_0}{t_{F0}} \right]$

Point de raccord :

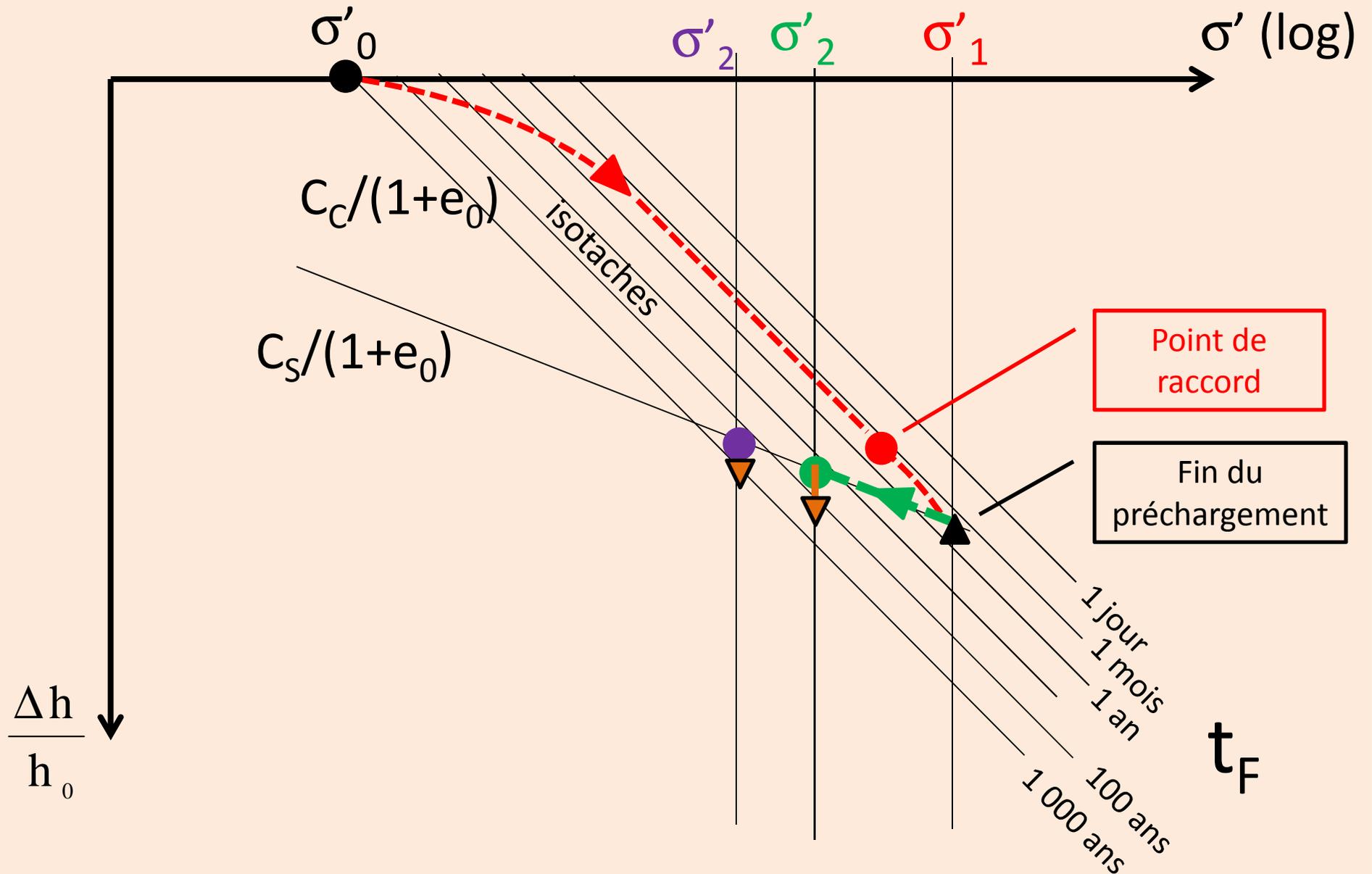
$$t_0 - t_{00} = t_{F0} = c$$

$$t_0 = c \text{Ln} \left(\frac{a}{h \cdot C_F} \right) = c \text{Ln} \left(\frac{\varepsilon_z}{C_F} \right)$$

Après le raccord :

$$s_f = s_0 + C_F \cdot h \cdot \text{Ln} \left[1 + \frac{t - t_0}{t_{F0}} \right]$$

Extension du modèle de Bjerrum : écoulement



Ecrouissage : comportement après déchargement

σ'_1 = contrainte de préchargement - tassement s_1

σ'_2 = contrainte de service après déchargement ($< \sigma'_1$)
tassement s_2 ($< s_1$)

On considère, par simplification, que le déchargement s'effectue en conditions drainées, le long d'une ligne $C_s/(1+e_0)$. En effet, la constante de temps 'c' de la consolidation est divisée par le rapport C_c/C_s , de l'ordre de 10.

Intervient ensuite le fluage, suivant l'isotache t_{F2} :

$$t_{F2} = t_{F1} \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} \right)^m \quad \text{avec :} \quad m = \frac{C_c - C_s}{C_\alpha \cdot (1 + e_0)}$$

Pour une durée de charge Δt , par exemple de 10 ans, on a :

$$\Delta s = s - s_2 + C_F \cdot h \cdot \text{Ln} \left[1 + \frac{\Delta t}{t_{F2}} \right]$$

Ecrouissage : comportement après déchargement

Le calcul du fluage doit s'effectuer par couches élémentaires peu épaisses, car le rapport (σ'_1 / σ'_2) , qui contrôle t_{F2} , varie avec la profondeur.

$$t_{F2} = t_{F1} \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} \right)^m \quad \text{avec :} \quad \frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} = \frac{\sigma'_0 + q_1}{\sigma'_0 + q_2}$$

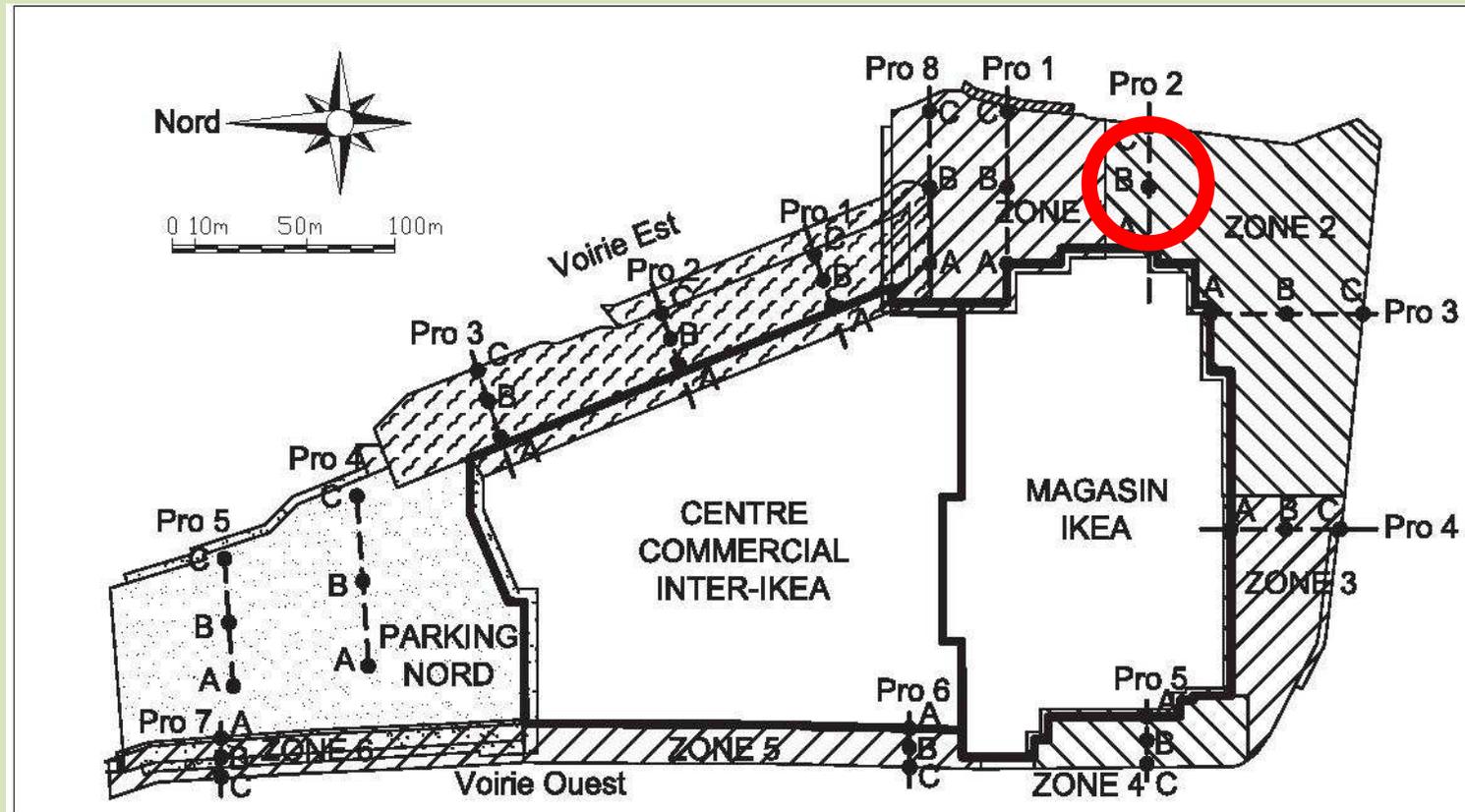
➤ Dans les couches superficielles, σ'_0 est petit, donc le rapport est fort : $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} \approx \frac{q_1}{q_2} \gg 1$, et le fluage est complètement écroui.

➤ Dans les couches profondes, σ'_0 est grand, le rapport se rapproche de 1 : $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2} \approx 1 + \frac{q_1 - q_2}{\sigma'_0}$
et l'écrouissage du fluage est moindre.

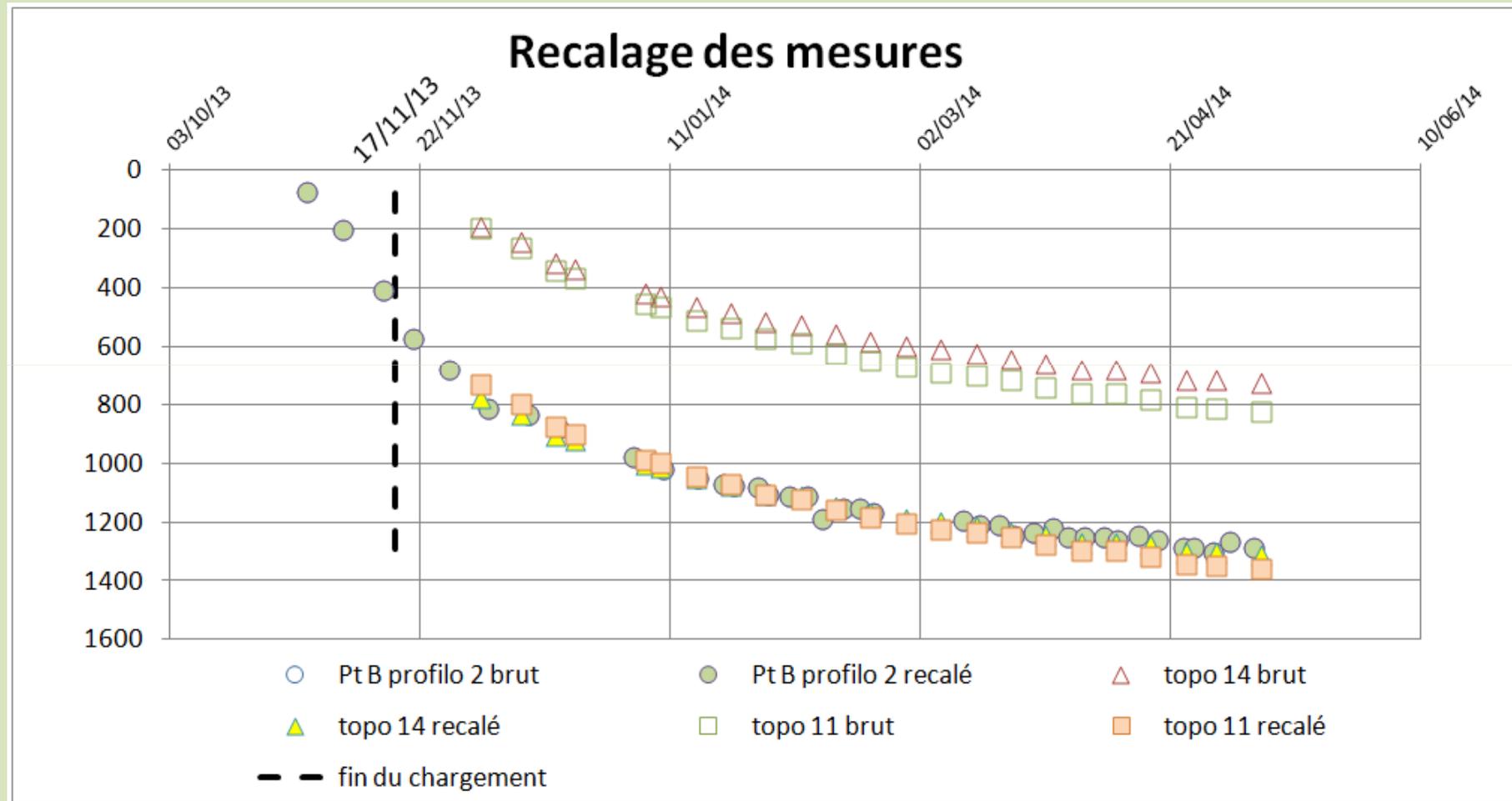
Exemple du chantier IKEA à Bayonne

25 m à 50 m de sols compressibles, de fluage significatif, traités avec drains verticaux et préchargés par environ 4m de remblai.

Zone 2 – Profil 2 – point B



Suivi du tassement au point B - Zone 2 - Profil 2



Interprétation en consolidation sur les 4 premiers mois

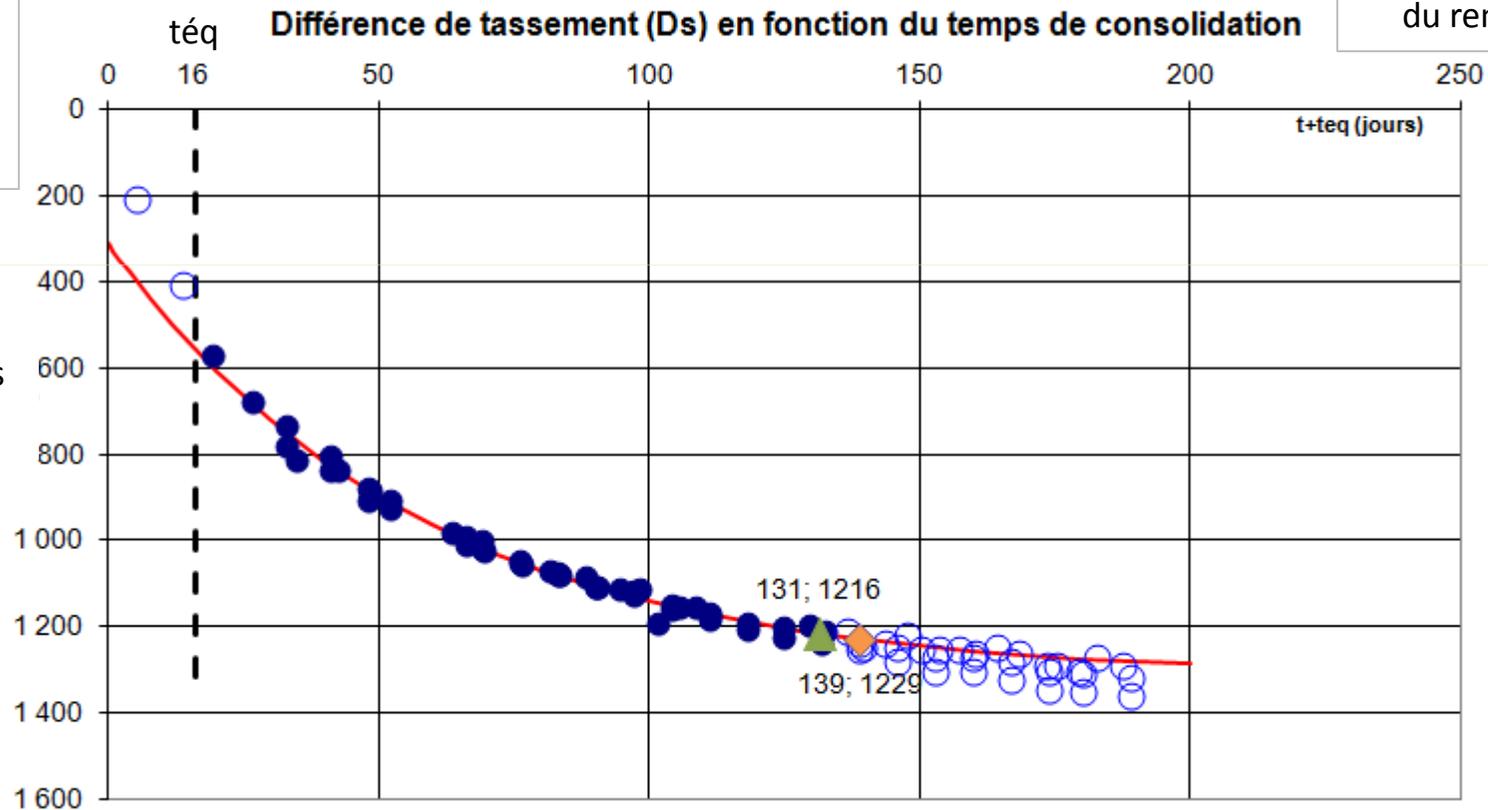
Mieux qu'Asaoka : ajuster une courbe de consolidation à 3 paramètres

$$s = a [1 - \exp(-t / c)] + b$$

téq ou t0
= 16 jours
fin de montée
du remblai

t = temps après
la fin de montée
du remblai

s ou Ds
(mm)



● Ds mes pt B - profil 2 — Ds théo ○ mesure ignorée - - - fin du chargement ▲ point à 90 % de consolidation ◆ point au 20/3/2014

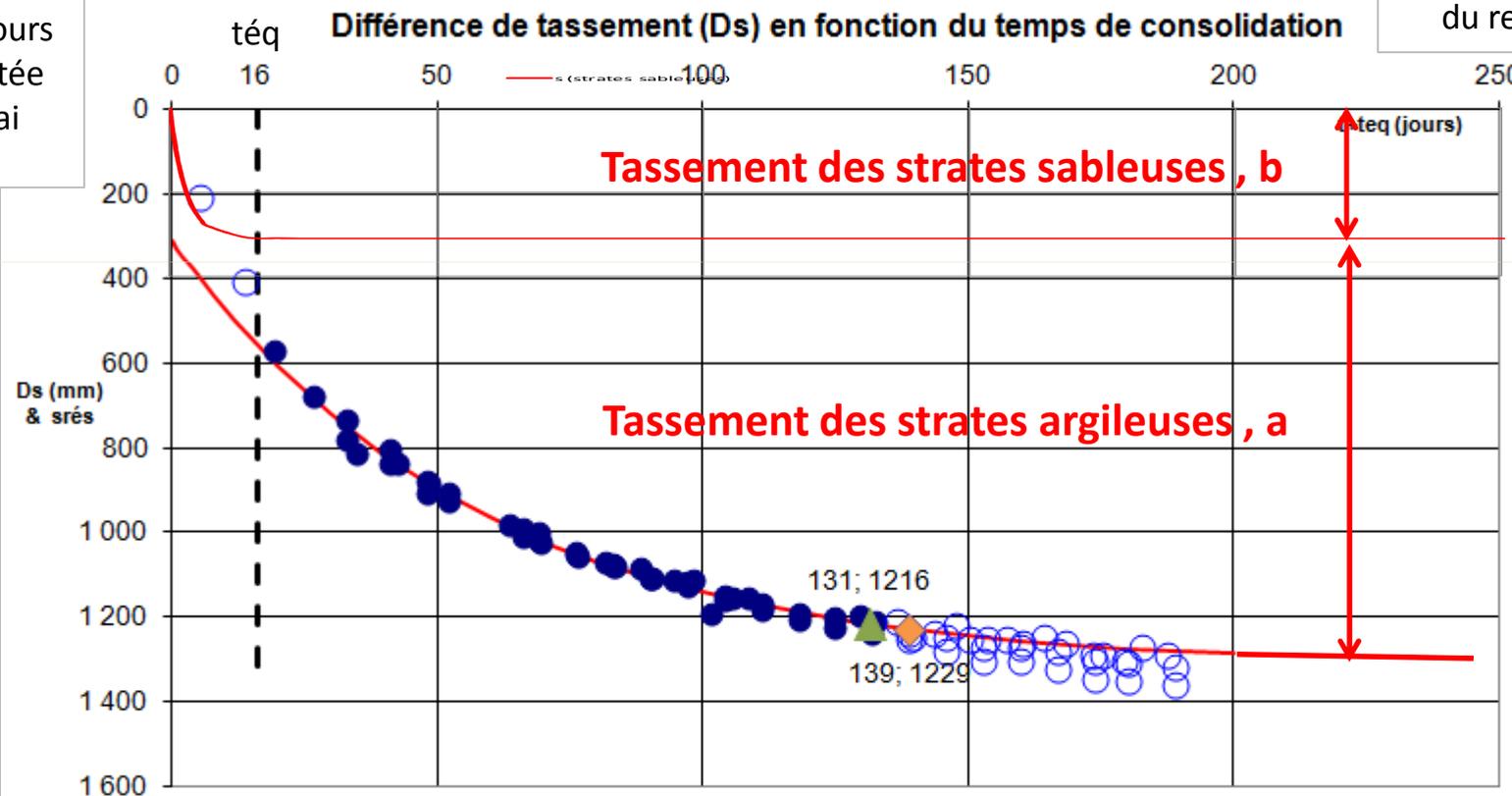
Interprétation en consolidation sur les 4 premiers mois

$a+b = 1317 \text{ mm}$ $a = 1007 \text{ mm}$ $b = 310 \text{ mm}$ $c = 57 \text{ jours}$

$$s = a [1 - \exp(-t/c)] + b$$

téq ou t0
= 16 jours
fin de montée
du remblai

t = temps après
la fin de montée
du remblai



s ou Ds
(mm)

● Ds mes pt B - profil 2 — Ds théo ○ mesure ignorée - - - fin du chargement ▲ point à 90 % de consolidation ◆ point au 20/3/2014

Calcul de fluage

Zone 2 - Profil 2 – point B (40.4 m de sols compressibles)

sol	cote base	Δh	γ'	e_0	C_C	C_S	C_α	σ'_{v0} (base)	σ'_{v0} #	m
TN	2.6	0								
graves	1.6	1	16.7	0.5				16.7	8	
limons 1	0.01	1.59	7.5	1.2	0.348	0.044	0.0039	28.625	23	17.88
limons 2	-2	2.01	7.63	1.17	0.343	0.043	0.0039	44	36	17.65
limons 3	-5	3	7.82	1.13	0.337	0.043	0.0040	67	56	17.29
limons 4	-10	5	8.13	1.05	0.324	0.041	0.0117	108	88	17.69
limons 5	-15	5	8.45	0.98	0.313	0.04	0.0121	150	129	17.06
limons 6	-20	5	8.77	0.9	0.3	0.038	0.0118	194	172	17.47
limons 7	-25	5	9.08	0.83	0.289	0.037	0.0077	240	217	18.00
limons 8	-30	5	9.4	0.75	0.277	0.035	0.0080	287	263	17.29
limons 9	-35	5	9.4	0.75	0.249	0.032	0.0080	334	310	15.50
limons 10	-40	5	9.4	0.75	0.221	0.028	0.0080	381	357	13.79
limons 11	-41	1	9.4	0.75	0.215	0.026	0.0080	390	385	13.50
limons 12	-42	1	9.4	0.75	0.21	0.026	0.0080	399	395	13.14
substratum										

= valeur à mi-couche
 $m = (C_C - C_S) / (1 + e_0) / C_\alpha$

Tableau pris en compte pour l'ensemble du site. Seule la profondeur du substratum a été ajustée pour chaque emplacement.

Calcul de fluage

Zone 2 - Profil 2 – point B (40.4 m de sols compressibles)

Charges

$q_1 = 73.7$ kPa	214 j	surcharge
$q_2 = 22.8$ kPa	336 j	plateforme travaux
$q_3 = 25.8$ kPa	61 j	" +enrobés
$q_4 = 25.8$ kPa	3660 j	service

		durée		durée de calcul (les phases de chargement ou déchargement sont comptées pour moitié)	
phase 1	surcharge	7 mois	214 j		$t_1 = 214$ j
	déchargement	2 semaines	14 j		
phase 2	plateforme travaux	11 mois	336 j	$t_2 - t_1 = 380$ j	$t_2 = 594$ j
	chargement enrobés	2 mois	61 j	$t_3 - t_2 = 31$ j	$t_3 = 624$ j
phase 3	service	10 ans	3660 j	$t_4 - t_3 = 3660$ j	$t_4 = 4284$ j

Calcul de fluage (suite)

Résultats tassuni phase 1

RESULTATS		point 2: B			
Sol	Cote	q_z	$\sigma_{vf}' \#$	$\varepsilon_z' \#$	s
*	2.60	88	*	*	1.469
1	1.60	88	91	0.001	1.468
1	0.01	88	105	0.063	1.368
2	-2.00	88	119	0.047	1.275
3	-5.00	88	138	0.035	1.170
4	-10.00	86	169	0.074	0.798
5	-15.00	83	208	0.054	0.529
6	-20.00	80	248	0.041	0.324
7	-25.00	76	289	0.022	0.217
8	-30.00	72	331	0.017	0.130
9	-31.00	71	357	0.014	0.116
10	-40.00	65	401	0.010	0.024
11	-41.00	64	444	0.008	0.016
12	-43.00	63	458	0.008	0.000

(*) cote du bas de couche

= valeurs à mi-couche

phase de surcharge

isotache

$t_{F0} = 57 \text{ j}$ ensemble des couches (argileuse et sableuses)

enlèvement de la surcharge

$t_1 = 214 \text{ j}$

consolidation en fin de phase

$U_1 = 100.0\%$ ensemble des couches (argileuse et sableuses)

Calcul de fluage (suite et fin)

sol	cote base	σ'_{v1} # (U100%) tassuni	t_0	σ'_{v1} # (U partiel=U1)	t''_{F1}	Δs_{f1} (en t_1)	σ'_{v2} # (U100%) tassuni	t'_{F2}	t''_{F2}	σ'_{v3} # (U100%) tassuni	t'_{F3}	t''_{F3}	$s_f(10ans)$ en service entre t_3 et t_4
TN	2.6												
graves	1.6	91					33			36			
limons 1	0.01	105	206	105	64	0.000	48	91193130	91193510	51	30616205	30616235	0.000
limons 2	-2	119	189	119	82	0.000	61	9760207	9760587	64	4202577	4202608	0.000
limons 3	-5	138	171	138	99	0.000	81	1088666	1089046	84	580624	580655	0.000
limons 4	-10	169	153	169	118	0.000	112	163360	163740	115	103697	103727	0.001
limons 5	-15	208	132	208	138	0.000	153	26932	27312	156	19954	19984	0.004
limons 6	-20	248	118	248	152	0.000	195	10493	10873	197	8546	8576	0.009
limons 7	-25	289	107	289	164	0.001	238	5444	5824	241	4807	4837	0.009
limons 8	-30	331	92	331	179	0.002	283	2788	3168	285	2737	2768	0.015
limons 9	-35	357	79	357	192	0.004	328	711	1091	331	982	1012	0.027
limons 10	-40	401	62	401	209	0.005	374	540	920	376	851	881	0.028
limons 11	-41	444	50	444	220	0.001	402	859	1239	404	1157	1188	0.005
limons 12	-42	458	46	458	225	0.001	416	793	1173	418	1100	1130	0.005

Tassement de fluage $s_f = 0.015$ m
 Tassement de consolidation, $s_c = 1.475$ m
 Tassement total, $s = 1.490$ m
 au temps $t_1 = 214$ j

**Tassement de fluage $s_f = 0.094$ m
 à 10 ans 94 mm**

Durée de préchargement	Tassement de fluage à 10 ans
6 mois	102 mm
7 mois	94 mm
8 mois	87 mm

Ces prévisions de tassement de fluage à 10 ans ont amené à modifier la durée du préchargement en zone 2, qui est passée à 8 mois au lieu des 6 mois initialement prévus.

Complément d'analyse

On peut revenir sur le profil géotechnique unique sur l'ensemble du site et tenir compte de la présence de strates sableuses, mises en évidence à l'emplacement étudié :

- par le calcul 'finconsolrad' (ajustement d'une courbe de consolidation radiale sur les mesures) :

- tassement des strates argileuses, $a = 1007$ mm
- tassement des strates sableuses, $b = 310$ mm

- par le calcul 'tassuni' (amplitude du tassement de consolidation en supposant tout le profil argileux) :

$$s_c = 1469 \text{ mm} \text{ contre : } a+b = 1317 \text{ mm, par finconsolrad}$$

- présence confirmée par les CPT.

Présence de strates sableuses

CPTU15 , à 50m du point B

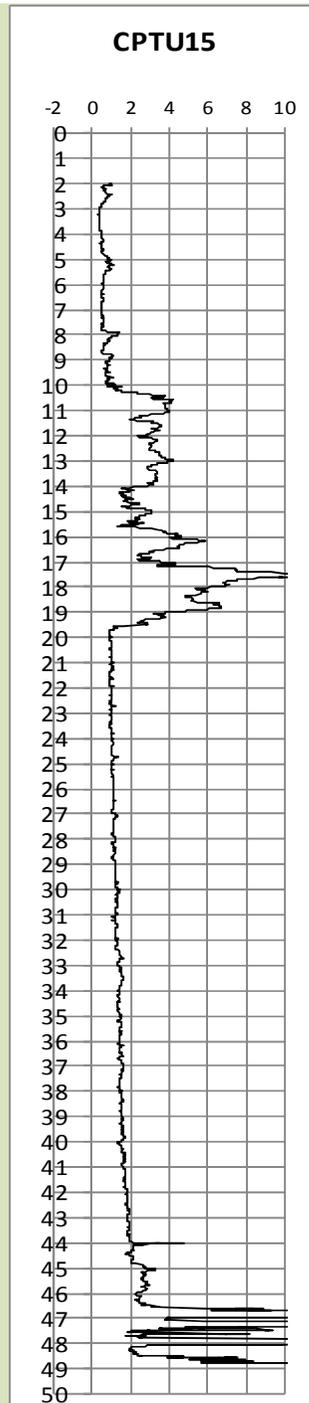
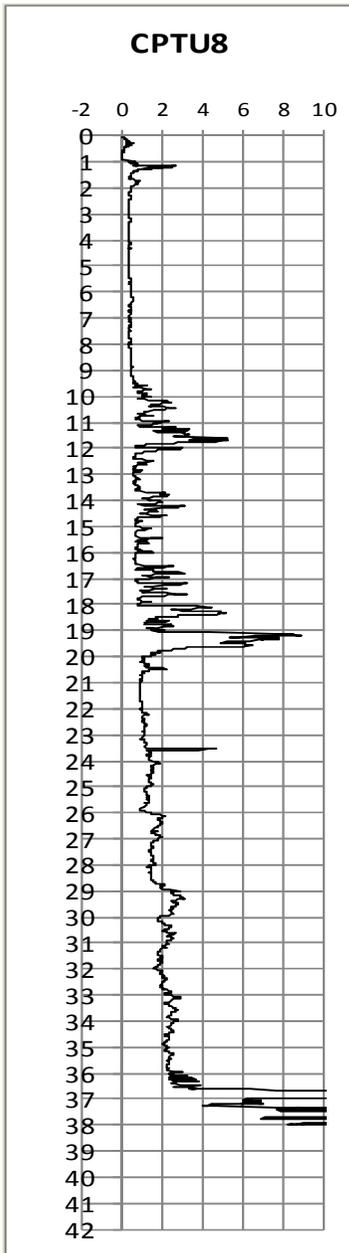
Sables sur 9.5 m , entre les cotes -8 et -17.5

D'où, pour une durée de préchargement de 7 mois, une réduction du fluage à 10 ans de 9mm , soit 85mm au lieu de 94mm.

CPTU8 , proche du point B , à 18m

Sols sableux

- 6.5 m entre les cotes -7.5 et -18
- au-delà de la cote -34 , soit 6 m jusqu'à -42.

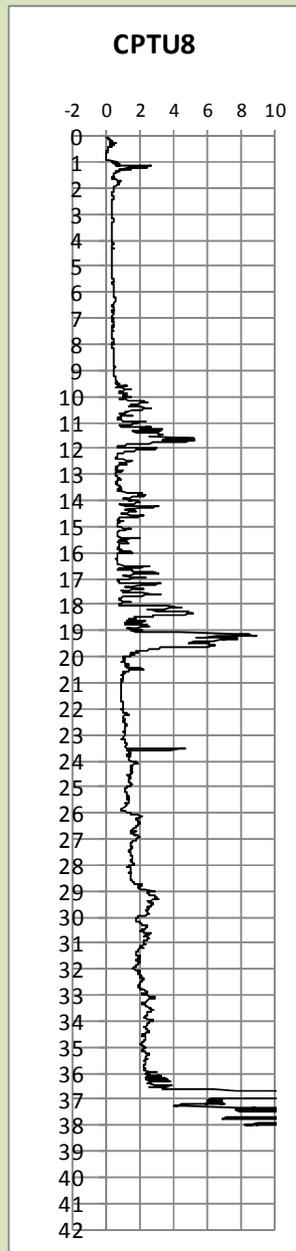


Présence de strates sableuses

CPTU8, proche du point B, à 18m

Sols sableux

- 6.5 m entre les cotes -7.5 et -18
- au-delà de la cote -34, soit 6 m jusqu'à -42.



Ces strates ont été traitées comme sols argileux dans les calculs, et leurs parts ont ainsi été évaluées à :

- 445mm sur s_c , ce qui ramène le tassement de consolidation des « vraies » strates argileuses à 1024mm.
- 39 mm sur $s_f(10 \text{ ans})$, ce qui ramène le fluage des « vraies » strates argileuses à 55 mm, au lieu de 94 mm, pour 7 mois de maintien de la surcharge.

Convertissant ces parts en valeurs de strates sableuses, on obtient des valeurs réduites pour ces horizons, notamment pour le fluage.

Conclusions

La méthode de calcul du fluage proposée, basée sur le modèle de Bjerrum, présente les caractéristiques suivantes :

- elle s'affranchit de l'hypothèse mathématique usuelle, arbitraire, qui est de décrire le fluage par la fonction $\log t$, qui implique un démarrage du fluage au moment de l'application de la charge.
- elle donne une continuité de l'évolution du tassement entre les phases de consolidation et de fluage.
- elle ne fait appel qu'à un seul paramètre de fluage : $C\alpha$, à déterminer sur la partie normalement consolidée (NC) du sol.

- elle est bien adaptée à la prise en compte de la consolidation radiale, liée au préchargement de sols compressibles avec drains verticaux.
- elle permet d'étudier de manière réaliste l'effet d'un déchargement sur le fluage, autrement dit l'écrouissage du fluage par préchargement.
- elle se prête à l'application de la méthode observationnelle, par combinaison avec d'autres outils de calcul, notamment des programmes Excel permettant de prendre en compte la configuration en plan du remblaiement ('tassuni') ou d'ajuster des courbes théoriques sur des mesures de tassement ('finconsolrad').
- il est aussi possible d'introduire des surcharges supplémentaires en cours de préchargement, ce qui permet de corriger le programme du préchargement en fonction des observations.

Merci de votre attention !