Tassement des ouvrages au cours du temps: méthode d'interprétation des mesures

Autor(en): **Recordon, Edouard**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **114 (1988)**

Heft 7

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-76796

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Tassement des ouvrages au cours du temps

Méthode d'interprétation des mesures

PAR EDOUARD RECORDON, LAUSANNE

1. Introduction

Le contrôle du comportement d'un ouvrage consiste le plus souvent à mesurer des longueurs à diverses époques et à en déduire les déplacements. La mesure peut être celle d'une altitude (nivellement, tassomètre), d'une largeur de fissure (déformètre), d'une distance de direction quelconque (inclinomètre, extensomètre, distomètre par exemple).

L'interprétation de la courbe des déplacements en fonction du temps revêt une importance particulière pour l'ingénieur responsable du comportement de l'ouvrage. Son avis consistera à dire si la construction se stabilisera par elle-même avec le temps ou si, au contraire, une intervention par travaux confortatifs est nécessaire.

S'il y a stabilisation, c'est que le potentiel d'énergie à l'origine des déplacements se dissipe progressivement, comme c'est le cas par exemple lors de la consolidation primaire des sols. Dans ce cas, le déplacement suit une loi exponentielle en fonction du temps et atteindra, après une durée plus ou moins longue, une valeur limite $\Delta H\infty$ pratiquement égale à la valeur théorique d'une durée infinie.

La courbe déplacement-temps traduit une loi physique dont les paramètres peuvent être déterminés si l'on connaît par des mesures un certain nombre de points de cette courbe.

L'objet de cet article est de montrer comment on peut calculer la valeur des paramètres de la loi $\Delta H = f(t)$ pour pouvoir faire des prévisions à long terme. Cela ne sera possible que si le potentiel énergétique, origine des déplacements, reste constant. En principe, aucune variation de charge, du régime des eaux souterraines, de température, etc., ne doit intervenir durant la période d'observation et de prévision.

2. Loi d'évolution exponentielle des déplacements

Ecrivons cette loi sous la forme :

$$\Delta H = \Delta H\infty \ (1 - Be^{-Ct}) \qquad (1)$$

et appelons $U = \dfrac{\Delta H}{\Delta H\infty}$ le degré de stabilisation de l'ouvrage.

L'équation (1) s'écrit alors :

$$U = 1 - Be^{-Ct} \qquad (2)$$

Les trois paramètres à déterminer sont :

$\Delta H\infty$, le déplacement final

B et C, caractéristiques de la position de la courbe selon l'axe des temps et de sa courbure (B est sans dimension, alors que C est égal à l'inverse d'un temps).

La figure 1 représente en traits pleins quatre courbes pour lesquelles $B = 1$ (pour cette valeur de B, les courbes passent par l'origine) et C varie. Plus C est grand, plus la courbe se rapproche des axes de coordonnées. Si $C = \infty$, elle est confondue avec les deux axes.

Si l'on pose comme condition $U = 0{,}99$, on obtient, avec $B = 1$, $e^{-Ct} = 0{,}01$ ou $Ct = 4{,}6$. Le degré de stabilisation de 99 % sera donc atteint après une durée de 0,46 [année] pour $C = 10$ [1/année] et après 46 ans pour $C = 0{,}1$ [1/année]. Si $Ct = 7$, $U = 0{,}999$.

Les deux courbes en traitillés montrent l'influence de B dans le cas $C = 0{,}3$. L'équation (2) montre que :

$$t = \frac{\ell nB - \ell n(1-U)}{C} \qquad (3)$$

Ce qui donne, pour $C = 0{,}3$ et $U = 0$:

$$t_0 = \frac{\ell nB}{0{,}3}$$

$B = 0{,}8$	$t_0 = -0{,}744$ [année]
$B = 1$	$t_0 = 0$
$B = 1{,}2$	$t_0 = +0{,}608$ [année]

L'équation (3) peut s'écrire :

$$t = \frac{\ell n(1-U)}{C} + t_0 \qquad (4)$$

Ce qui signifie que le rôle de B n'est que de décaler les courbes parallèlement à elles-mêmes dans la direction de t.

3. Méthode de détermination des paramètres

Une courbe expérimentale $\Delta H = f(t)$ peut correspondre ou non à un phénomène exponentiel. Si ce n'est pas le cas, les calculs qui suivent ne permettront pas de trouver une valeur unique des paramètres. Mais admettons que l'on soit en présence d'un tel phénomène exponentiel et que la courbe expérimentale soit connue par des mesures faites à des époques t_0 à t_n (fig. 2).

Rappelons l'équation (1) :

$$\Delta H = \Delta H\infty \ (1 - Be^{-Ct})$$

La vitesse de déplacement s'obtient par dérivation :

$$v = \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = \Delta H\infty \ B \ C \ e^{-Ct} \qquad (5)$$

En différences finies cela peut s'écrire (fig. 2) :

$$\left.\begin{aligned} v_i &= \frac{\Delta h_i}{\Delta t_i} = \frac{\Delta H_{i+1} - \Delta H_i}{t_{i+1} - t_i} = \\ &= \Delta H\infty \ B \ C \ e^{-Ct_{im}} \\ \text{avec } t_{im} &= \frac{t_{i+1} - t_i}{2} \\ v_{i+1} &= \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta t_{i+1}} = \\ &= \frac{\Delta H_{i+2} - \Delta H_{i+1}}{t_{i+2} - t_{i+1}} = \\ &= \Delta H\infty \ B \ C \ e^{-Ct_{(i+1)m}} \\ \text{avec } t_{(i+1)m} &= \frac{t_{i+2} - t_{i+1}}{2} \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

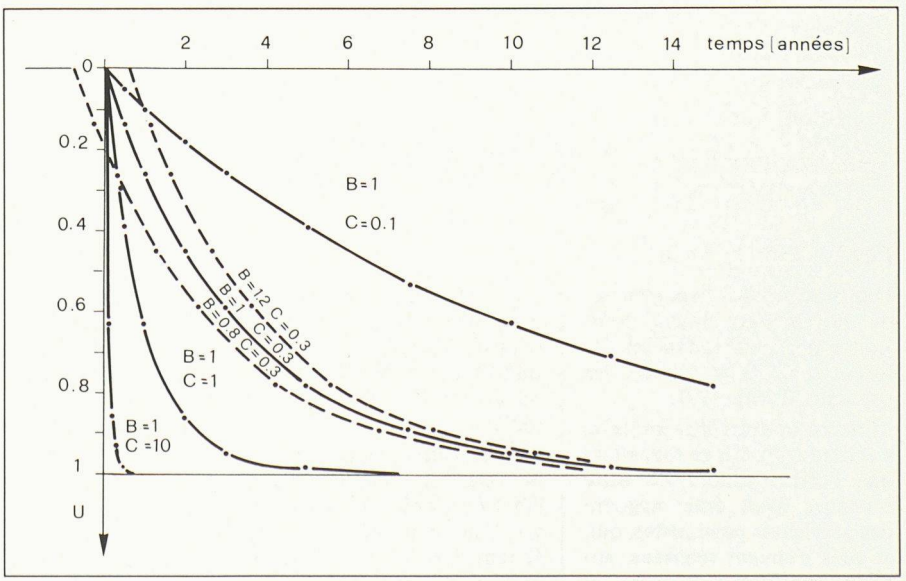

Fig. 1. – Loi exponentielle déplacement-temps – équation (2).

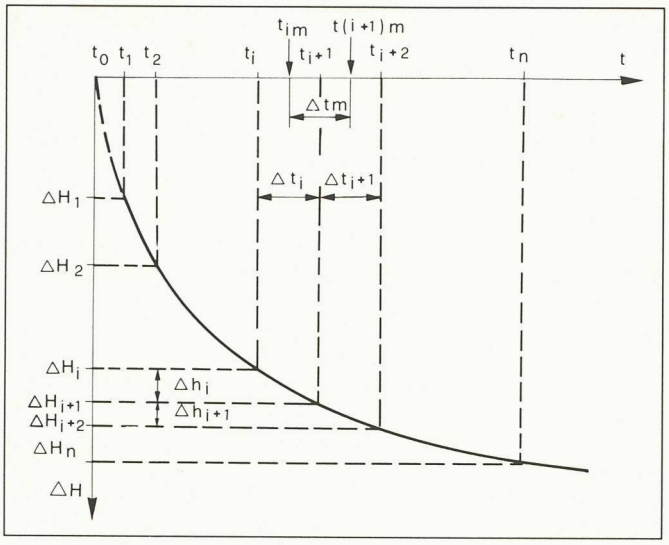

Fig. 2. – Notations utilisées dans les équations (6) à (8).

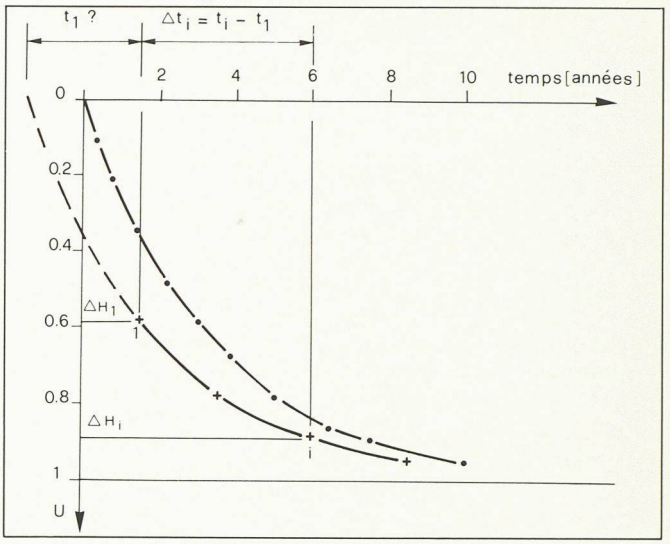

Fig. 3. – Notations utilisées dans les équations (9) et (10).

Par division et en prenant les logarithmes, on obtient :

$$\ln v_i/v_{i+1} = C\,\Delta t_m$$

$$\text{avec } \Delta t_m = \frac{t_i - 2t_{i+1} + t_{i+2}}{2}$$

$$C = \frac{\ln v_i/v_{i+1}}{\Delta t_m} \qquad (7)$$

Une valeur de C peut être obtenue de toute paire d'intervalles i, i+1. Si les valeurs de C sont peu différentes, il s'agit bien d'un phénomène exponentiel et l'on peut adopter la moyenne des valeurs de C.

N.B. : La détermination des vitesses v_i doit se faire à partir d'une courbe « lissée ». Les imprécisions de mesures pourraient conduire à avoir $v_{i+1} > v_i$, ce qui n'est pas possible car alors C serait négatif ; cela ne peut pas être le cas.

Le calcul de $\Delta H\infty$ à l'aide de l'équation (8)

$$\Delta H\infty = \frac{\Delta H_i}{1 - Be^{-Ct_i}} \qquad (8)$$

nécessite la connaissance de l'origine des temps t_i, par exemple le temps t_1 correspondant à la date de la première mesure. Pour le calculer, il faut repartir de l'équation (1) :

$$\Delta H = \Delta H\infty\,(1 - B\,e^{-Ct})$$

Posons $t_i = t_1 + \Delta t_i$ (fig. 3). Nous pouvons écrire :

$$\Delta H_1 = \Delta H\infty\,(1 - B\,e^{-Ct_1})$$

$$\text{et } \Delta H_i = \Delta H\infty\,(1 - B\,e^{-C(t_1 + \Delta t_i)})$$

Par division membre à membre et en passant aux logarithmes naturels, on trouve :

$$t_1 = \frac{\ln B + \ln\left(\frac{\Delta H_i}{\Delta H_1} - e^{-C\Delta t_i}\right) - \ln\left(\frac{\Delta H_i}{\Delta H_1} - 1\right)}{C} \qquad (9)$$

Dans cette équation, ΔH_1, ΔH_i, Δt_i et C sont des grandeurs connues. Pour calculer t_1, il suffit de connaître B. La valeur de t_1 change avec $\frac{\ln B}{C}$.

Nous avons vu plus haut que la courbe exponentielle ne passe par l'origine que pour $B = 1$. Dans l'équation (9), le premier terme est nul. Le temps t_1 est obtenu par

$$t_1 = \frac{1}{C}\left[\ln\left(\frac{\Delta H_i}{\Delta H_1} - e^{-C\Delta t_i}\right) - \ln\left(\frac{\Delta H_i}{\Delta H_1} - 1\right)\right] \qquad (10)$$

t_1 étant déterminé, les t_i peuvent être calculés pour tous les points de mesure. Chaque paire de valeurs mesurées t_i, ΔH_i donne une valeur de $\Delta H\infty$ par l'équation (8). Les degrés de stabilisation de l'ouvrage $\frac{\Delta H_i}{\Delta H\infty}$ sont connus pour toute époque i.

4. Cas de la consolidation primaire des sols

Le problème de la diffusion des surpressions dans une couche de sol en consolidation est le même que celui de la diffusion de la chaleur dans un mur.

La solution de l'équation de la chaleur

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{D}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (11)$$

T : température en un point de cote z par rapport à l'une des faces de la plaque
t : temps
D : coefficient de diffusion thermique [m² · s⁻¹]

est la même que celle de la consolidation primaire unidimensionnelle.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{C_v}\frac{\partial u}{\partial t} \qquad (12)$$

u : surpression en un point de cote z au-dessous de la face drainante de la couche
t : temps
C_v : coefficient de consolidation [m² · s⁻¹]

Dans son ouvrage, C. Blanc [1][1] donne la solution de l'équation de la chaleur, alors que celle de l'équation de la consolidation est donnée dans de nombreux traités de mécanique des sols (par exemple R. D. Holtz et W. D. Kovacs, [5]) ; elles sont les mêmes et s'écrivent :

$$U = \frac{\Delta H}{\Delta H\infty} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2}\,e^{-M^2 T}$$

$$\text{avec } M = \frac{\pi}{2}(2m + 1) \qquad (13)$$

U : degré de consolidation [–]
ΔH : tassement de la couche d'épaisseur $2H$ [m] à l'époque t
$\Delta H\infty$: tassement de la même couche pour $t = \infty$
T : $\frac{C_v}{H^2}t$: facteur de temps [–]
C_v : coefficient de consolidation [m² · s⁻¹]
t : durée entre l'époque t et le début de la consolidation [s]
m : série des nombres entiers entre zéro et l'∞

Si l'on explicite les trois premiers termes de la série, on trouve :

[1] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

TABLEAU 1

T	Valeur des termes de la série				U [%]
	N° 1 ($m = 0$)	N° 2 ($m = 1$)	N° 3 ($m = 2$)	Σ	
0	0,8106	0,0901	0,0324	0,9331	0
0,1	0,6333	0,0098	0,0001	0,6432	35,7
0,2	0,4949	0,0011	10^{-7}	0,4960	50,4
0,3	0,3866	0,0001	10^{-10}	0,3867	61,3

N.B. : pour $T = 0$, les termes de rang supérieur au 3e ne sont pas nuls, c'est pourquoi la somme n'est pas égale à 1.

$$\Delta H = \Delta H\infty \left[1 - \left(\frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T} + \frac{8}{9\,\pi^2} e^{-\frac{9\,\pi^2}{4} T} + \frac{8}{25\,\pi^2} e^{-\frac{25\,\pi^2}{4} T} + \ldots \right) \right] \quad (14)$$

Le tableau 1 montre que si l'on ne tient compte que du seul premier terme de la série, on fait une erreur sur

$U = \dfrac{\Delta H}{\Delta H\infty}$ de 1,5% pour $T = 0{,}1$ ($U = 35{,}7\%$) et de 0,2% pour $T = 0{,}2$ ($U = 50{,}4\%$).

Si l'on ne tient compte que du seul premier terme de la série, on obtient l'équation

$$\Delta H = \Delta H\infty \, (1 - B\, e^{-Ct}) \quad (1)$$

dans laquelle

$$B = 0{,}8106 = \frac{8}{\pi^2}, \text{ et}$$

$$C = 2{,}4674 \, \frac{C_v}{H^2}$$

car

$$T = \frac{C_v}{H^2}\, t, \text{ et}$$

$$\frac{\pi^2}{4} = 2{,}4674$$

Le domaine de validité de cette équation est le suivant : $T \geq 0{,}1$ ou $U \geq 35\%$ avec une erreur inférieure à 1,5% sur U. Dans la pratique, la première partie de la courbe de consolidation ($U < 35\%$) ne nous intéresse pas. Elle correspond à la période de construction de l'ouvrage durant laquelle les charges sont modifiées. Dans l'essai œdométrique, elle correspond à une période de trois ou quatre minutes sitôt après application de la charge. Au contraire, lorsque $U > 35\%$, on entre dans le domaine où le phénomène de consolidation primaire a atteint son régime normal. C'est donc dans ce domaine qu'il faut choisir les points expérimentaux pour déterminer B, C et $\Delta H\infty$. La méthode décrite au chapitre précédent est donc applicable.

Cette méthode est applicable en l'absence de toute connaissance de la nature et de l'épaisseur des couches d'assise des fondations. La seule courbe déplacement-temps permet de déterminer $\Delta H\infty$ et par conséquent le degré de stabilisation de l'ouvrage U à toute époque (degré de consolidation). Si l'on connaît l'épaisseur H de la couche, siège de la consolidation primaire, ce qui est toujours le cas dans l'essai œdométrique et parfois pour un ouvrage contrôlé, il est alors possible de calculer le coefficient de consolidation et le coefficient de perméabilité :

$$C_v = \frac{H^2 C}{2{,}4674} \quad (15)$$

$$K = C_v \, m_v \, \gamma_w \quad (16)$$

($\gamma_w = 10$ [kN · m^{-3}], poids volumique de l'eau et m_v, le coefficient de compressibilité, est donné par la courbe œdométrique

$$m_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma' \, (1+e_0)} \text{ [m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}\text{]}).$$

5. Exemples

5.1. Remblai

Examinons tout d'abord le cas du remblai d'accès à un pont dont la culée repose sur le remblai. L'ensemble de cet ouvrage repose sur des sols compressibles, dont le tassement a été contrôlé par nivellement pendant de nombreuses années. Les questions qui se posent aux responsables de la voie de circulation sont du type suivant :

- Les déformations sont-elles du type « consolidation » ou du type « fluage » ?
- S'il s'agit d'une consolidation, quel sera le tassement maximal ?
- Quelle durée sera nécessaire pour atteindre un degré de consolidation de 98% par exemple ?

La figure 4 donne la courbe des tassements mesurés.

Le remblai n'a que 4 m de hauteur et 17 m de largeur à sa base. Les sols d'assise sont constitués pour l'essentiel de graviers et de sables propres *GW* et *SW* jusqu'à 30 m environ, limite inférieure du sondage le plus profond. Une couche de sable limoneux *SM-ML* est intercalée entre 13 m et 17 m. La perméabilité, assez grande ou très grande de ces sols, ne permet pas d'expliquer que des tassements se produisent encore six ans après l'achèvement de l'ouvrage, dont la construction a duré du milieu de l'année 1978 au milieu de 1980. Il faut donc admettre que des sols plus fins, plus compressibles et moins perméables se trouvent à plus grande profondeur.

Si l'on se pose uniquement les questions énoncées plus haut, il n'est pas indispensable de connaître les sols en profondeur. Les prévisions seront fondées uniquement sur le comportement de l'ouvrage, c'est-à-dire sur la courbe $\Delta H = f(t)$ mesurée.

Le tableau 2 donne les ΔH mesurés et les résultats du calcul de C, t_1 et $\Delta H\infty$ par les équations (7), (10) et (8).

Les valeurs moyennes tirées du tableau 2 sont les suivantes :

C = 0,000414 [d^{-1}] = 0,151 [année^{-1}]

t_1 = 1775 [d] = 4 ans et 315 jours avant le 1er janvier 1981, soit le 20 février 1976

$\Delta H\infty$ = 25,1 [cm]

La courbe déplacement-temps théorique peut dès lors être calculée (1) :

TABLEAU 2

Date	ΔH [cm]	Δh [cm]	Δt_m [d]	v [cm/d]	$t_{(i+1)m} - t_{im}$ [d]	C [d^{-1}]	t_1 [d]	$\Delta H\infty$ [cm]
				(6)	(6)	(7)	(10)	(8)
1.1.81	13,1							25,2
		1,7	365	0,00466				
1.1.82	14,8				365	0,000439	1770	25,2
		1,45	365	0,00397				
1.1.83	16,25				365	0,000515	1774	25,2
		1,2	365	0,00329				
1.1.84	17,45				365	0,000374	1789	25,1
		1,05	365	0,00287				
1.1.85	18,5				365	0,000271	1793	25,1
		0,95	365	0,00260				
1.1.86	19,4				365	0,000470	1741	25,0
		0,8	365	0,00219				
1.1.87	20,25						1784	25,1

$$\Delta H = 25{,}1\ (1 - e^{-0{,}000414t})\ \text{[cm]}$$

avec t en jours dès le 20 février 1976.
Les résultats du calcul sont donnés par le tableau 3.
L'excellente correspondance entre valeurs calculées et mesurées montre qu'il s'agit bien d'un phénomène de consolildation primaire.
La vitesse de tassement est donnée par (6)

$$v = \frac{\partial \Delta H}{\partial t} = 0{,}0104\ e^{-0{,}000414t}$$

pour $t = 0$
$v = 0{,}0104$ [cm/d] $= 3{,}80$ [cm/année]
pour $t = 1775$ [d] (1.1.81)
$v = 0{,}00499$ [cm/d] $= 1{,}82$ [cm/année]
pour $t = 3965$ [d] (1.1.87)
$v = 0{,}00201$ [cm/d] $= 0{,}74$ [cm/année]
pour $t = 9449$ [d] (9.1.2002)
$v = 0{,}00021$ [cm/d] $= 0{,}08$ [cm/année]
La méthode proposée permet donc par des calculs simples et rapides de trouver, à partir des valeurs mesurées du tableau 2 :

- le tassement maximal $\Delta H\infty$
- le degré de consolidation à toute époque, par exemple, pour le 1er janvier 1987 :

$$U = \frac{20{,}25}{25{,}1} = 0{,}807$$

- la durée nécessaire pour atteindre tout autre degré de consolidation.

Tableau 3

Date	t [d]	ΔH calculé [cm]	ΔH mesuré [cm]	U [%]
20.2.76	0	0		
1.1.77	315	3,1		
1.1.78	680	6,2		
1.1.79	1045	8,8		
1.1.80	1410	11,1		
1.1.81	1775	13,1	13,1	52,2
1.1.82	2140	14,8	14,8	59,0
1.1.83	2505	16,2	16,25	64,5
1.1.84	2870	17,5	17,45	69,7
1.1.85	3285	18,5	18,5	73,7
1.1.86	3600	19,4	19,4	77,3
1.1.87	3965	20,2	20,25	80,5
9.1.2002	9449	24,7		98,4

5.2. Essai œdométrique

Les méthodes traditionnelles pour le calcul de C_v à partir des résultats d'un palier de charge d'un essai œdométrique sont :

- le procédé graphique de A. Casagrande [2], qui consiste à tracer la courbe $\Delta H = f(t)$ en reportant le temps en échelle logarithmique ; les valeurs de U_0 et U_{100} sont obtenues par un procédé graphique arbitraire ;
- le procédé graphique de D. W. Taylor [3], qui a le même inconvénient, consiste à reporter en abscisse la racine carrée du temps ;
- la méthode de R. F. Scott [4] qui est rationnelle, mais l'auteur n'étend pas sa méthode à l'interprétation des courbes de contrôle d'ouvrages.

La méthode proposée dans cet article est purement analytique et utilise les valeurs brutes des mesures, en évitant celles qui concernent la période initiale des très grands tassements pour lesquels les mesures sont imprécises, ainsi que la période finale où le tassement secondaire influence les résultats.
La zone intermédiaire comprise entre 8 minutes et 240 minutes pour un essai œdométrique habituel est celle de la consolidation primaire. Le tableau 4 donne les valeurs R mesurées sur le comparateur, lors d'un essai œdométrique. Il donne également les résultats des calculs de C, C_v et $\Delta H\infty$.
Dans cet essai œdométrique, l'épaisseur de l'échantillon est :

$$2H = 21{,}37\ \text{[mm]}$$

Les valeurs à admettre sont donc les suivantes :

$$C_{moy} = 0{,}0228\ [\text{min}^{-1}] = 11983\ [\text{année}^{-1}]$$
$$C_{vmoy} = 1{,}8 \cdot 10^{-8}\ [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$
$$\Delta H\infty = 2{,}279\ \text{[mm]}$$

Ces valeurs permettent de calculer la courbe théorique dans le domaine 8 min $< t <$ 240 min à l'aide de (1) (fig. 5).

$$\Delta H = 2{,}279\ (1 - 0{,}8106\ e^{-0{,}0228t})\ \text{[mm]}$$

où t intervient en minutes.

L'exemple présenté est tiré de l'ouvrage de R. D. Holtz et W. D. Kovacs [5]. Les auteurs indiquent que les méthodes graphiques ont donné pour C_v les valeurs suivantes :
Casagrande (logarithme)
$C_v = 2{,}6 \cdot 10^{-4}\ [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] =$
$= 2{,}6 \cdot 10^{-8}\ [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Taylor (racine carrée)
$C_v = 2{,}9 \cdot 10^{-4}\ [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] =$
$= 2{,}9 \cdot 10^{-8}\ [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Ces valeurs sont très voisines de celle trouvée par la méthode proposée $C_v = 1{,}8 \cdot 10^{-4}\ [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$.

Tableau 4

t [min]	R [mm]	ΔH [mm]	Δh [mm]	Δt [min]	v [mm/min]	Δt_m [min]	C [min^{-1}]	C_v [cm^2 · s^{-1}]	$\Delta H\infty$ [mm]
					(6)	(6)	(7)	(8)	(9)
0	6,627	0							
			0,099	0,10	0,9900				
0,1	6,528	0,099				0,125	9,035	0,2787	
			0,048	0,15	0,3200				
0,25	6,480	0,147				0,200	1,522	0,0470	
			0,059	0,25	0,2360				
0,5	6,421	0,206				0,375	0,9063	0,0280	
			0,084	0,50	0,1680				
1	6,337	0,290				0,750	0,4938	0,0152	
			0,116	1	0,1160				
2	6,218	0,409				1,5	0,1766	0,00545	
			0,178	2	0,0890				
4	6,040	0,587				3	0,1485	0,00458	
			0,228	4	0,0570				
8	5,812	0,815				5,5	0,0386	0,000298	2,511
			0,323	7	0,0461				
15	5,489	1,138				11	(0,0542)	(0,000418)	2,683
			0,381	15	0,0254				
30	5,108	1,519				22,5	0,0368	0,000284	2,570
			0,333	30	0,0111				
60	4,775	1,852				45	0,0226	0,000174	2,334
			0,241	60	0,00402				
120	4,534	2,093				90	0,0111	0,0000856	2,209
			0,178	120	0,00148				
240	4,356	2,271				180	0,00492	0,0000379	2,279
			0,147	240	0,00061				
480	4,209	2,418				571	0,00204	0,0000157	2,418
			0,168	902	0,00019				
1382	4,041	2,586					C_{moy} = 0,0228	C_{vmoy} = 0,000176	2,586

TABLEAU 5

$t =$ [min]	8	15	30	60	120	240	
$\Delta H =$ [mm]	0,740	0,967	1,347	1,809	2,131	2,271	*(Calcul)*
$\Delta H =$ [mm]	0,815	1,138	1,519	1,852	2,093	2,271	*(Mesures)*

Dans les méthodes graphiques, le choix de t_{90} ou de t_{100} (t_{90} et t_{100} sont les durées en minutes nécessaires pour atteindre un degré de consolidation $U = 90\%$ ou $U = 100\%$) a quelque chose d'arbitraire, ce qui n'est pas le cas dans la méthode proposée, qui donne $U = 100\%$ par la valeur de $\Delta H\infty$ (8).

Remarquons finalement que le tableau 1 met en évidence la décroissance de C et C_v avec le temps. Cela ne peut être dû qu'à la diminution de la perméabilité K puisque

$$C_v = \frac{K}{\gamma_w \, m_v}.$$

Pour un palier de charge donné, le coefficient de compressibilité m_v est constant.

6. Conclusions

La méthode d'interprétation des tassements en fonction du temps, proposée dans cet article, permet d'interpréter les courbes résultant des mesures faites aussi bien lors d'un essai œdométrique en laboratoire que lors du contrôle des déplacements d'un ouvrage. Elle est fondée sur les relations analytiques de la théorie de la consolidation unidimensionnelle. Les équations (7), (8) et (10) permettent de déterminer les caractéristiques du phénomène de consolidation sans construction graphique.

Remarquons encore l'importance, dans le cas du contrôle d'un ouvrage, de la mesure des tassements dès la première application de la charge. Dans l'exemple 5.1 de la culée avec son remblai, des balises ont été posées avant tout remblayage. Il importe en effet de mesurer la totalité des déplacements. La courbe théorique s'écarte fortement de la courbe expérimentale (fig. 4) dans le domaine des faibles degrés de consolidation. Il y a à cela plusieurs raisons, dont les quatre principales sont :

- les tassements instantanés initiaux ne sont pas des phénomènes de consolidation ;
- l'application des charges pendant la construction n'est pas instantanée ; elle nécessite un certain temps ;
- la perméabilité des sols fins peut décroître durant la consolidation ; la valeur de C_v, donc C, serait alors plus grande ce qui déplacerait l'origine des temps t_0 vers la droite ;
- des tassements initiaux peuvent ne pas avoir été pris en compte (influence de charges voisines par exemple).

La méthode proposée est particulièrement intéressante car la valeur de C est obtenue de la seule valeur du rapport des vitesses v_i / v_{i+1} (7) ; les vitesses sont choisies dans la zone de consolidation primaire. Il va sans dire que si les valeurs de C obtenues pour divers i sont trop dispersées, on pourrait être amené à conclure que l'on n'est pas en présence d'un phénomène de consolidation primaire. Cela peut être alors une déformation par fluage ou par consolidation secondaire. Le fait de savoir cela est en lui-même intéressant pour l'ingénieur responsable.

Bibliographie

[1] BLANC, C. : *Equations différentielles de la technique*, Dunod, 1947.

[2] CASAGRANDE, A. : *Notes on Soil mechanics - First semester*, Harvard University, (unpublished), 1938, 129 p.

[3] TAYLOR, D. W. : *Fundamentals of soil mechanics*, John Wiley and sons Inc., New York, 1948, 700 p.

[4] SCOTT, R. F. : « New method of consolidation coefficient evaluation », *Journal of the soil mechanics and foundations division*, ASCE, février 1961, pp. 29-39.

[5] HOLTZ, R. D. ; KOVACS, W. D. : *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New York, 1981, 733 p.

Adresse de l'auteur :
Edouard Recordon, professeur
Laboratoire de mécanique des sols
EPFL
1015 Lausanne

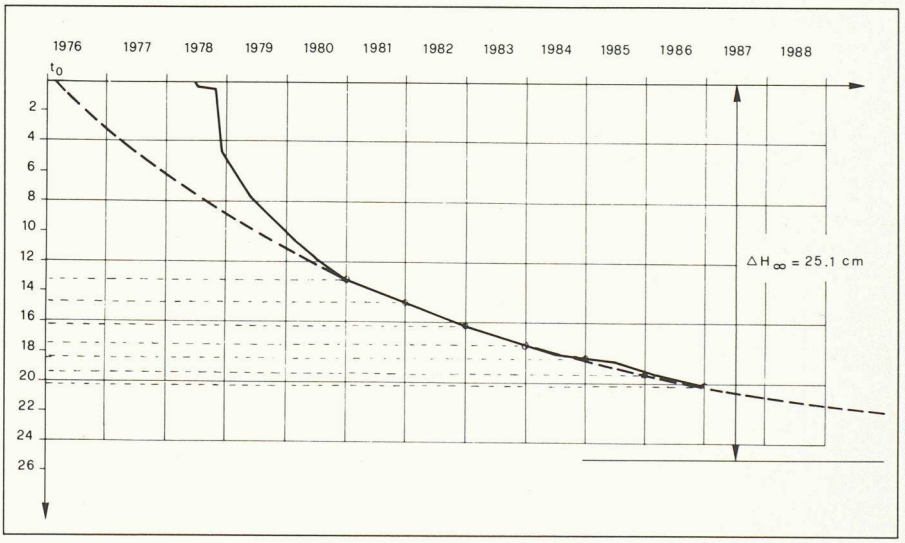

Fig. 4. – Courbe $\Delta H = f(t)$ d'une culée de pont avec son remblai d'accès.
——— Mesures – – – – Calculs

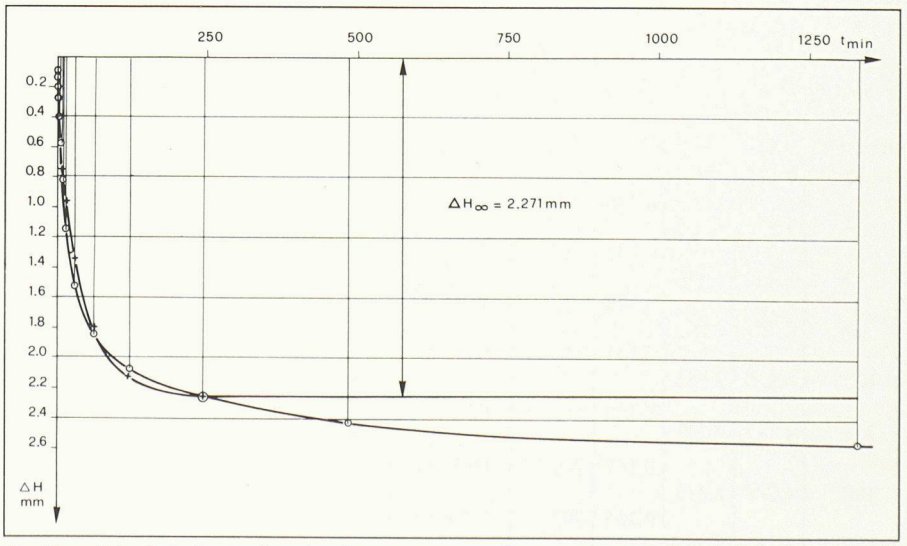

Fig. 5. – Résultat d'un palier de charge σ = cte d'un essai œdométrique.
o ΔH mesurés + ΔH calculés