

# NOUVELLE APPROCHE D'INTERPRETATION DES ESSAIS DE PLAQUES REALISÉS SUR LES DALLAGES NON ROUTIER.

## *New approach to interpreting plate tests performed on off-road paving.*

Hamid Hosseini-Sadrabadi<sup>1,2</sup>, Maryame Nour<sup>1</sup>, Christophe Dano<sup>1</sup>, Pierre Riegel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR F-38000 Grenoble, France

<sup>2</sup> Equaterre, Bureau d'étude ingénierie 74960 Meythet, France

**RÉSUMÉ** – Cette article présente un retour d'expérience sur 380 essais de plaque réalisés sur des plateformes non-routières. Nous présentons les difficultés rencontrées pour la validation des plateformes ainsi qu'une nouvelle approche d'interprétation des données selon le DTU 13.3 et l'essai de Westergaard. La pertinence du troisième cycle et la mesure de EV3 pour vérifier la portance des plateformes seront aussi présentées.

**ABSTRACT** – This article presents a feedback on the 380 plate tests carried out on non-road paving. We present difficulties encountered in platform validations and a new approach to data interpretation according to the DTU 13.3 and Westergaard's test. The relevance of the third cycle and the EV3 measurement to verify the bearing capacity of platforms will also be exposed.

## 1. Introduction

Tout projet de structures (route, voie ferrée, fondations d'ouvrage ou d'un bâtiment industriel) nécessite la préparation d'un sol support apte à les recevoir (Cerema, 2018). La valeur de portance, à court terme, est souvent le critère principal pour réceptionner des plateformes supports. L'exigence de compacité du support du dallage est décrite dans la norme NF P 94-117-1. De même trois types de dallages sont exposés dans le DTU13.3 : 1) Dallages à usage industriel ou assimilés, 2) Dallages à usage autre qu'industriels ou assimilés et 3) Dallages de maisons individuelles.

Le rapport entre les modules  $Ev2/Ev1$  est contractuel, une valeur seuil de 2 est généralement considérée pour valider ou non la plateforme. La faible valeur du module  $Ev1$  qui correspond au premier chargement de 0.25 MPa est assimilée à une mise en charge préalable du massif (Combarieu, 2006). Depuis quelques années le Groupe Equaterre a développé un troisième cycle de chargement de 0.2 MPa pour obtenir un module  $Ev3$ . Ce module a permis de débloquent des chantiers, arrêtés à la suite de conflits sur le compactage, entre les entreprises et les bureaux de contrôles. Ce développement du module  $Ev3$  est également basée sur l'idée que la valeur du rapport  $Ev2/Ev1$  supérieure à 2 et les charges d'exploitation d'un projet de dallage sont loin des exigences des travaux routiers.

On analyse les données de 380 chantiers et on présente une approche complémentaire sur le module, ainsi que la déformation acceptable pour différents types de dallages. Nous avons pu identifier 15 cas de comportement sous charge avec une démarche pour les comprendre et trouver une solution adaptée pour chaque cas.

## 2. Essai de plaque NF 94-117-1

L'essai à la plaque est un essai permettant de contrôler les raideurs d'une plateforme. Il est décrit dans la partie « essai à la plaque » du L.C.P.C. (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) selon la norme NF P 94-117-1 à travers le chargement d'une plaque circulaire rigide. Il permet de déterminer les « modules sous chargement statique à la plaque », EV1 et EV2 (NF P 94-117).

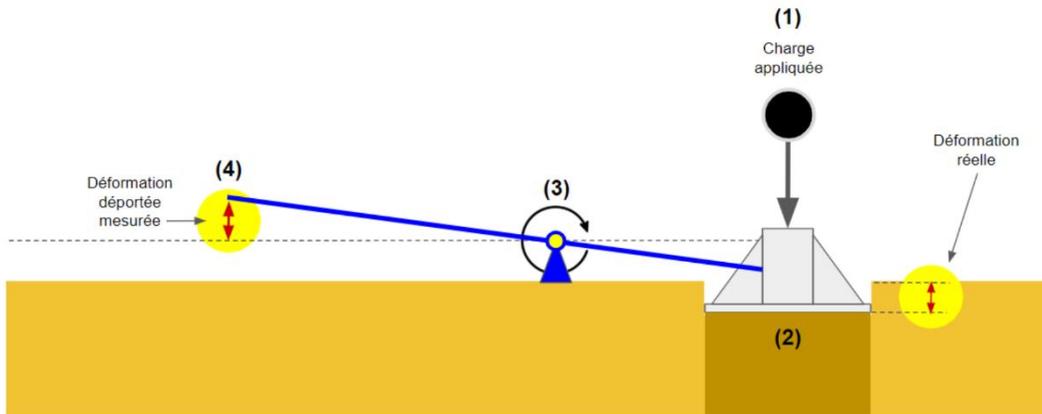


Figure 1. Schéma mise en place de l'essai de plaque. (photo :www.wikip.fr)

Deux cycles de chargement, séparés par une phase de déchargement, sont appliqués par l'intermédiaire d'une plaque de diamètre et de rigidité normalisés. Le chargement est maintenu pour les deux cycles jusqu'à la stabilisation de l'enfoncement de la plaque. Le premier chargement se fait à 0,25 MPa, permettant ainsi d'obtenir le module EV1 et le second à 0,20 MPa, permettant d'obtenir le module EV2. L'essai à la plaque peut être représenté graphiquement de la manière suivante :

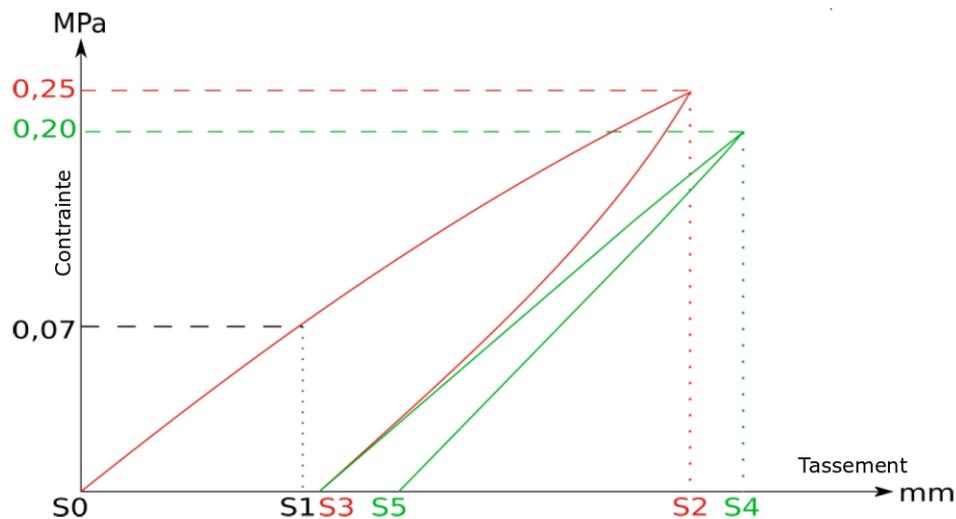


Figure 2. Courbe de chargement original

La partie rouge de la courbe représente le cycle permettant de calculer EV1 et la partie verte de la courbe représente le deuxième cycle permettant de calculer EV2. EV2 est déterminé à partir de la formule suivante :

$$EV2 = \frac{\pi}{4} [1 - \nu^2] \frac{pd}{z_2} \quad (1)$$

Avec :

$z_2$  : l'enfoncement de la plaque produit par le second chargement ;  $z_2 = S_4 - S_3$ , mm

$\nu$  : le coefficient de Poisson du matériau constituant la plateforme considéré égal à 0,25

$p$  : la pression moyenne sous la plaque

$d$  : le diamètre de la plaque

EV1 est déterminé de la même manière avec  $z_1 = S_2 - S_0$  (généralement,  $S_0 = 0$ ).

Le rapport  $k = EV2 / EV1$  est ensuite calculé pour estimer la qualité de compactage de la plateforme. Pour confirmer que celle-ci est bien compactée, la valeur de  $k$  ne doit pas dépasser 2,2 en général.

L'équation (1) peut être simplifiée de la manière suivante : ( $p = 0.2$  et  $0.25$  MPa) et ( $d = 0.6$  m)

$$EV1 = \frac{112.5}{2 \times S_2} \quad (2)$$

Et

$$EV2 = \frac{90}{2 \times (S_4 - S_3)} \quad (3)$$

Le coefficient 2 dans la formule vient de la déportation du point de mesure. Le déplacement mesuré expérimentalement est, en réalité, deux fois plus important que le tassement sous la plaque à cause de la forme du dispositif, comme le point de rotation (l'élément 3 sur la figure 1) se trouve à 1/3 de la poutre.

### **2.1. Troisième cycle de chargement**

Le Groupe Equaterre, avec les retours d'expérience obtenus sur différentes plateformes, a réalisé un troisième cycle de chargement pour s'affranchir du problème de mise en charge de massif, évoqué en introduction (Combarieu, 2006). Ce troisième cycle, similaire au deuxième cycle, est appliqué pour obtenir un module EV3, avec  $z_3 = S_6 - S_5$ ,  $S_6$  correspondant au tassement lors du chargement (Fig. 3).

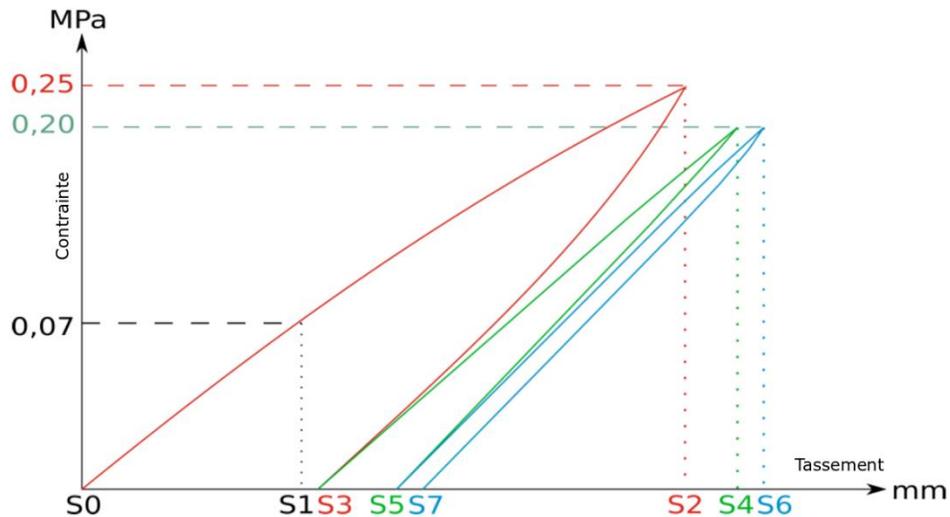


Figure 3. Courbe de chargement avec EV3 (Stabilisation de EV3)

### 3. Cas expérimental

Pour montrer les difficultés et les conséquences sur les projets de génie civil dues à la mauvaise interprétation ou la mauvaise compréhension de l'essai de plaque voici le déroulé d'un chantier qui a été bloqué pendant 58 jours à la suite des résultats des essais de plaque. La Figure 4 montre un historique du déroulement du chantier.

03/07	Réalisation des essais à la plaque
05/07	Rapport du bureau d'étude disant « essais 4, 5, 6, 7, 9, 10 montrent des déficits de compactage »
18/07	Résultats non-acceptables Demande d'intervenir en urgence pour reprendre la plateforme Proposition d'Equaterre de refaire les essais en recompactant avec un rouleau statique « sans vibration » et en réalisant des essais complémentaires « EV3 »
25/07	Réalisation des essais à la plaque dans la zone 1
26/07	Rapport du bureau d'étude avec le nouveau cycle EV3
01/08	Résultats toujours non-acceptables mais les résultats EV3 pourraient être proposés
21/08	Détails des résultats d'autres essais à la plaque d'Equaterre Note de présentation sur EV3
23/08	Confirmation de la conformité des essais avec le calcul de EV3
29/08	Validation avant dallage

Figure 4. Chronologie du chantier

Cet arrêt de chantier provient de la mise en œuvre des essais de plaque réalisés, dont les résultats sont présentés en Figure 5. Les cases, montrent les valeurs de k supérieures à 2.2 suggérant une mauvaise portance de plateforme, alors que les valeurs de EV2 sont bien au-delà des attentes. (Fig. 5)

n° essai	EV1 (MPa)	EV2 (MPa)	k (EV2/Ev1)
1	80,3	150,0	1,8
2	59,2	112,5	1,9
3	48,9	95,7	1,9
4	102,2	236,8	2,4
5	48,9	125,0	2,5
6	86,5	214,2	2,4
7	59,8	180,0	3,0
8	62,5	128,5	2,0
9	79,2	166,6	2,4
10	67,0	195,6	2,9
11	56,8	107,1	1,8
12	59,2	128,5	2,2

Figure 5. Résultats de premier essai de plaque

À la suite de ces résultats et de l'arrêt du chantier, la solution de l'EV3 a été proposée. Celle-ci a permis de requalifier la plateforme afin de permettre sa validation et de débloquent la situation. La Figure 6 montre les résultats des essais de plaque avec la solution EV3. La valeur de k'(EV3/EV2) proche de 1 montre qu'une fois la mise en charge du massif obtenue, il n'y a plus de tassement significatif.

n° essai	EV1 (MPa)	EV2 (MPa)	k (EV2/Ev1)	EV3 (MPa)	k' (EV3/EV2)
1	40,7	160,7	3,9	150,0	0,93
2	46,5	180,0	3,9	187,5	1,04
3	42,3	84,9	2,0	91,8	1,08
4	56,2	121,6	2,2	132,3	1,09
5	67,7	180,0	2,6	187,5	1,04
6	47,2	121,6	2,6	128,6	1,006
7	47,3	180,0	3,8	180,0	1,00
8	33,9	150,0	4,4	160,7	1,07
9	67,7	150,0	2,2	173,1	1,15
10	56,8	187,5	3,3	225,0	1,20
11	69,9	160,7	2,3	173,1	1,08
12	67,7	225,0	3,3	236,8	1,05
13	56,2	187,5	3,3	204,5	1,08
14	58,0	180,0	3,1	187,5	1,04
15	48,5	155,2	3,3	173,0	1,11
16	49,3	140,6	2,8	155,2	1,10

Figure 6. Résultat d'essai avec solution EV3

#### 4. Approche déformation : Calcul du tassement acceptable avec DTU 13.3

Il reste à connaître l'importance de la valeur du tassement pendant l'essai de plaque et son rapport avec le cahier des charges (CDC) du projet. Nous avons mené une recherche de valeurs de déformations acceptables pour différents types de projet. En revanche, il n'y a aucune valeur de tassement acceptable présentée dans les normes, mais seulement une valeur du coefficient de réaction de WESTERGAARD  $k_w$ . Sa détermination se fait

par le chargement d'une plaque circulaire, décrite dans la norme NF P 94-117-3.  $k_w$  est déterminé à partir de la formule suivante :

$$k_w = \frac{P}{S_1} \times \frac{\phi}{762} \quad (4)$$

Avec :

$P$  : La pression moyenne exercée sous la plaque chargée  $P = 70 \text{ kPa}$

$S_1$  : L'enfoncement provoqué par le chargement de la plaque  $\text{mm}$

$\phi$  : Le diamètre de la plaque utilisée pour l'essai  $\text{mm}$

Le DTU 13.3 indique :

- Pour les dallages à usage industriel ou assimilés et les dallages à usage autre qu'industriels ou assimilés :  $k_w = 50 \text{ MPa} / \text{m}$  (DTU 13.3 partie 1 et 2)
- Pour les dallages de maisons individuelles :  $k_w = 30 \text{ MPa} / \text{m}$  (DTU 13.3 partie 3)

Il existe des corrélations entre ce module et EV1. Si on simplifie la loi de comportement du sol, en admettant l'élasticité (Combarieu, 2006), nous pouvons donc, à partir des valeurs précédentes, en déduire un tassement S2 maximum :

$EV1 = 0,55 k_w$ , en kPa et m ce qui donne :

$$EV1 = 550 k_w, \text{ en MPa et mm} \quad (5)$$

La valeur S2 peut être trouvée à partir des équations (2) et (5) :

$$S_2 = \frac{112.5}{2 \times 550 \times K_w} \quad (6)$$

Ainsi :

- Pour les dallages à usage industriel ou assimilés et les dallages à usage autre qu'industriels ou assimilés :  $S_2 = 2,05 \text{ mm}$
- Pour les dallages de maisons individuelles :  $S_2 = 3,41 \text{ mm}$

Les courbes de tassements peuvent maintenant être tracées pour repérer si elles dépassent, ou non, la limite posée par le DTU 13.3.

Un exemple peut être pris afin d'illustrer ce qui vient d'être présenté. Lors de la vérification d'un dallage industriel, nous avons obtenu les valeurs suivantes :

EV1 MPa	EV2 MPa	K21 = EV2/EV1	S2 mm	S3 mm	S4 mm
57,99	214,29	3,695	1,94	1,50	1,92

Figure 7. Données d'un essai de plaque

Pour un module  $k > 2,2$ , la plateforme n'est donc pas acceptée suivant la norme NF P 93-117-1 malgré le fait que la valeur de EV2 soit très importante. Le DTU 13.3 demande un tassement maximum de  $S = 2,05 \text{ mm}$  et la plateforme respecte bien ce critère.

Un troisième cycle a aussi été effectué, voici les valeurs obtenues :

EV3 MPa	K32 = EV3/EV2	S5 mm	S6 mm
214,29	1,00	1,54	1,96

Figure 8. Données du troisième cycle

Les tassements ne dépassent jamais la valeur limite fixée par le DTU 13.3 et l'accumulation des cycles de chargement semble stabiliser le tassement. Cette plateforme pourrait donc être validée.

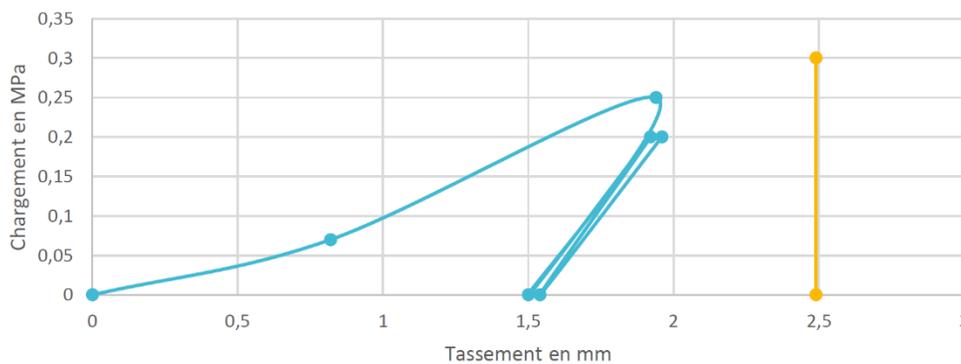


Figure 9. Courbe de tassements avec limite DTU 13.3

## 5. Analyse des données

Selon les modules de portances ( $k$ ), les valeurs de tassement et les déformations limites (DL) obtenus sur les différents projets du Groupe Equaterre, 15 cas différents peuvent être envisagés selon la réponse des plateformes.

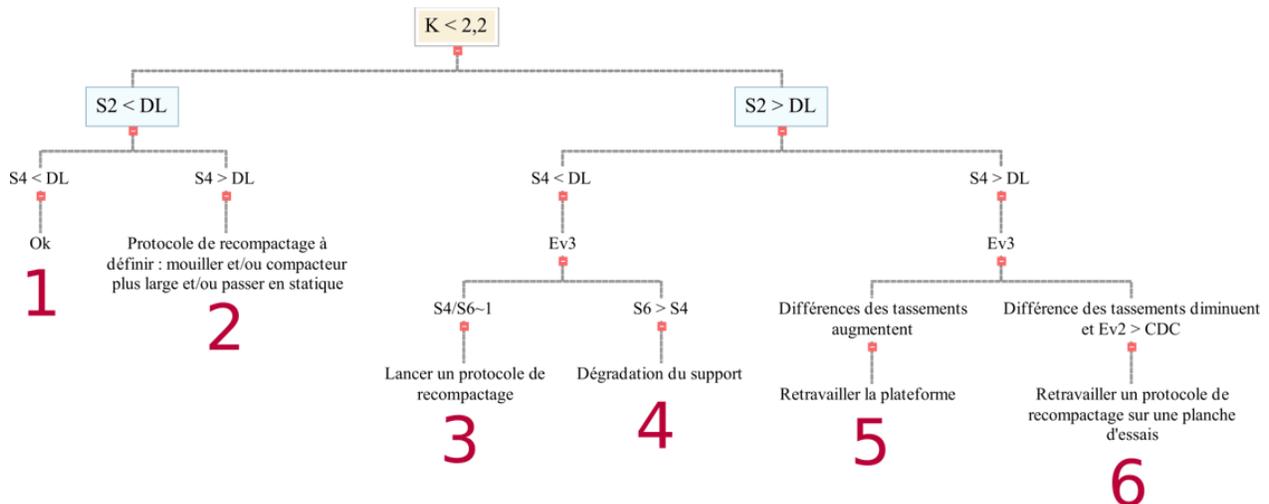


Figure 10. Proposition d'analyse –  $K < 2,2$

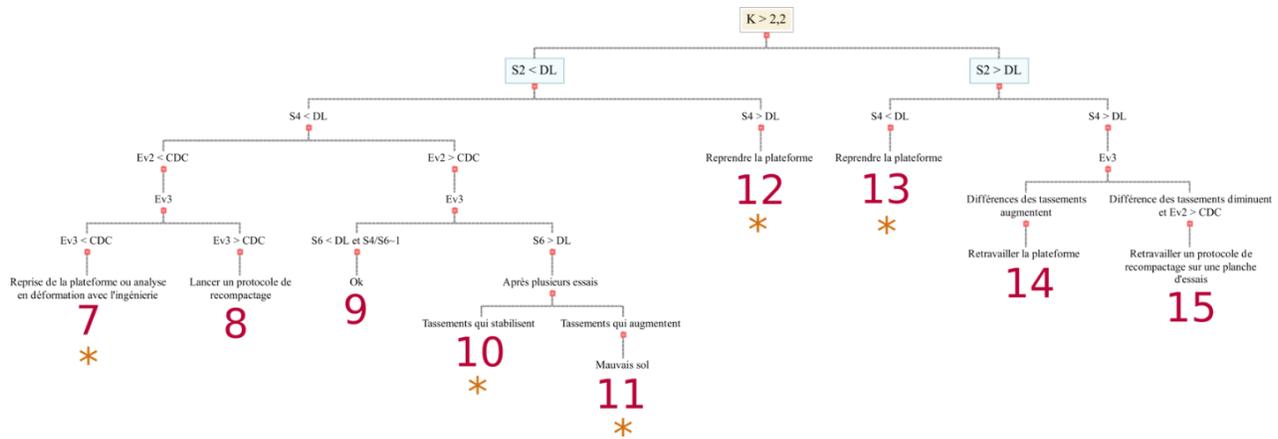


Figure 11. Proposition d'analyse -  $K > 2,2$

## 6. Conclusion

Ce manuscrit a essayé de se focaliser sur le problème de portance des plateformes et sur la difficulté d'évaluation de ce phénomène vis-à-vis des ingénieurs et des normes actuelles. L'interprétation des résultats de l'essai de plaque pourrait avoir des conséquences sur l'avancement des projets en génie civil. Les retours d'expériences sur 380 chantiers ont permis de définir une approche innovante, basée sur le module EV3 ainsi que sur la déformation acceptable par rapport aux différents types de projets et leurs cahiers des charges. 15 cas selon les réponses de l'essais de plaque ont pu être différenciés. Cette démarche peut aider à mieux comprendre les pathologies liées aux plateformes et également être complétée par des essais complémentaires, comme par exemple, l'ajout des paliers d'enregistrements lors d'une première phase de chargement et déchargement.

## 7. Références

- Cerema, Méthodologie de mesure de la portance des plates-formes, Note n° 01, Mars 2018.
- DTU 13.3 Dallages - Conception, calcul et exécution - Partie 1 : cahier des clauses techniques des dallages à usage industriel ou assimilés (norme NF P 11-213-1) » Mars 2015.
- DTU 13.3 Dallages - Conception, calcul et exécution - Partie 2 : cahier des clauses techniques des dallages à usage autre qu'industriel ou assimilés (norme NF P 11-213-2) » Mars 2015.
- DTU 13.3 Dallages - Conception, calcul et exécution - Partie 3 : cahier des clauses techniques des dallages de maisons individuelles (norme NF P 11-213-3) » Mars 2015.
- Norme Française NF P 94-117 - Sols : reconnaissance et essais - Portance des plateformes - Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2) ».
- Norme Française NF P 94-117 - Sols : reconnaissance et essais - Portance des plateformes - Partie 3 : Coefficient de réaction de WESTERGAARD sous chargement statique d'une plaque.
- O. COMBARIEU, « L'usage des modules de déformation en géotechnique » 2006. <https://www.geotechniquejournal.org/articles/geotech/pdf/2006/01/geotec2006114p3.pdf>