



# Formule de Palmer et Barber: calcul d'un module équivalent $M_{1,eq}$ d'une structure avec sous-fondation / fondation

La structure traditionnelle d'une route consiste en un fond de coffre, une sous-fondation et une fondation, chacun(e) devant présenter une portance minimale mesurée à la plaque statique belge. Ainsi, la portance  $M_1$  minimale doit être pour le fond de coffre de 17 MPa, pour la sous-fondation de 35 MPa et pour la fondation de 110 MPa.

Ces valeurs de portance sont imposées pour chaque couche afin de permettre une bonne mise en œuvre et un bon compactage de la couche supérieure et que cette dernière puisse elle-même atteindre la portance exigée. Une portance de 17 MPa sur le fond de coffre est ainsi considérée comme nécessaire pour atteindre une portance de 35 MPa sur la sous-fondation par la mise en œuvre et le compactage d'une sous-fondation d'une épaisseur «raisonnable» et constituée d'un matériau prescrit dans le cahier des charges en utilisant des moyens «normaux». De même, une portance de 35 MPa est considérée comme nécessaire pour compacter efficacement la fondation et obtenir la portance de 110 MPa. Cette portance est finalement jugée nécessaire afin de bien mettre en œuvre le revêtement et de supporter les charges de trafic pendant toute la durée de vie.

Mais quid d'une situation dans laquelle une épaisseur de ces couches est anormalement mince, par exemple dans le cas où celle-ci est imposée dans un cahier spécial des charges? Ou si la portance du sous-sol est plus basse que demandé/prévu?

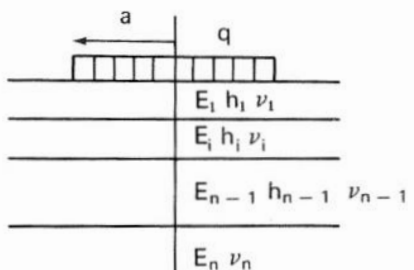
Pour des raisons constructives, ou afin de réduire les déblais, il arrive en effet qu'aucune sous-fondation ne soit prévue, ou que son épaisseur soit inférieure à 20 cm. En pareil cas, il sera difficile d'atteindre des portances de 35 MPa sur la sous-fondation ou de 110 MPa sur la fondation.

Afin de pouvoir estimer, dans ces quelques situations exceptionnelles (limitées par le cahier des charges au cas de terre-plein ou zones d'immobilisation en dehors de la chaussée, mais parfois réalisées dans le cas d'une voirie), la portance qui pourrait raisonnablement être exigée, le CCT Qualiroutes prévoit l'utilisation de la formule de Palmer et Barber (Service Public de Wallonie [SPW], Mobilité & Infrastructures, §F.3.2.1.3.2. et §F.4.2.3.), sans toutefois l'explicitier.

Cette formule analytique permet de déterminer la déformation sous le centre d'une charge circulaire appliquée sur un complexe de plusieurs couches élastiques, lui-même posé sur un milieu élastique semi-infini. Ainsi est-il possible de facilement modéliser le chargement d'un essai à la plaque sur les couches de fondation et le sol.

Elle est référencée dans plusieurs publications. Une de ces publications est «Mécanique des chaussées – Quelques formules utiles pour le calcul des chaussées sur petites calculatrices programmables», parue dans le Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées datant de mai-juin 1983 (Marchand et al., 1983).

Un extrait de cette publication se trouve ci-dessous:

<p><b>Formule de Palmer et Barber généralisée [4]</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ La charge sur la chaussée est schématisée par une pression uniforme <math>q</math> appliquée sur une aire circulaire de rayon <math>a</math>.</li> <li>□ La chaussée est composée de <math>n - 1</math> couches horizontales d'épaisseur <math>h_i</math>, de module d'Young <math>E_i</math> et de coefficient de Poisson <math>\nu_i</math>, tous égaux à <math>\nu</math> qui surmontent un massif semi-infini de caractéristiques mécaniques <math>E_n</math> et <math>\nu</math>.</li> </ul> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>	<p>La déflexion au centre de la charge est donnée par :</p> $w_0 = \frac{2qa(1 - \nu^2)}{E_n} \left[ \frac{1 - E_n/\tilde{E}}{\left(1 + \left[\frac{h_1 + \dots + h_{n-1}}{a}\right]^2 \cdot \left[\frac{\tilde{E}}{E_n}\right]^{2/3}\right)^{1/2}} + \frac{E_n}{\tilde{E}} \right] \quad (4)$ <p>avec :</p> $\tilde{E} = E_1 \left[ \frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (4a)$
---	---

© (Marchand et al., 1983)

Cette formule, bien que de prime abord compliquée, se limite dans les cas de voiries classiques à maximum deux couches (fondation et sous-fondation) en plus du sol. Elle est donc assez simple à programmer, dans une feuille de calcul Excel par exemple. Il est à noter que le coefficient de Poisson doit être le même pour toutes les couches et pour le sol; une valeur moyenne de 0.30 nous semble à préconiser. Une fois la déformation centrale due à la charge circulaire ainsi calculée et en considérant l'intervalle de charge  $q$  utilisé pour la détermination de M1 étant égal à 0.1 MPa (1 bar), on peut simplement calculer ce module M1:

M1 = diamètre de la plaque (cm) x 1 bar / déflexion de la plaque (mm)

Le CRR met à disposition une **application web** permettant d'utiliser cette formule. Celle-ci est disponible sur notre site internet.

## Comment utiliser cette feuille de calcul?

Il est conseillé de commencer chaque calcul par le fond de coffre et de calculer successivement les couches supérieures. Pour ne pas considérer les couches supérieures dans le calcul du fond de coffre, les épaisseurs de la fondation et la sous-fondation sont fixées à 0.001 m.

Si l'on ne dispose pas d'informations particulières par rapport aux matériaux ou au fond de coffre (par exemple, de résultats d'essais à la plaque), les modules de rigidité repris au tableau 1 peuvent être utilisés pour les calculs.

Couche	Module statique (MPa)	Coefficient de Poisson
Sol conforme (M1 = 17 MPa)	15.5	0.3
Sous-fondation	100 - 150	0.3
Fondation	200 - 250	0.3

**Tableau 1**

Les modules utilisés ici sont des modules statiques et présentent donc des valeurs plus faibles que les modules dynamiques utilisés, par exemple, dans des calculs de dimensionnement de structure routière. Selon notre expérience, les valeurs de module pour la sous-fondation et la fondation proposées au tableau 1 correspondent assez bien à celles qui peuvent généralement être observées en réalité (déduites des valeurs de portance M1 réellement mesurées sur le terrain en utilisant la formule de Palmer et Barber). Il est aussi à noter que ces valeurs sont valables pour des matériaux convenablement compactés. Sur un sol de faible portance ( $M1 < 11$  MPa) par exemple, il sera difficile d'atteindre les valeurs de 100 à 150 MPa pour la sous-fondation.

Les données de l'essai à la plaque sont ensuite introduites: le rayon de la plaque à 0.08 m ou 0.155 m (la grande plaque de rayon 0.155 m est prescrite dans le CCT Qualiroutes (SPW, Mobilité & Infrastructures, 2021) pour le fond de coffre et la sous-fondation) et l'intervalle de charge à 0.1 MPa.

Sur la base de ces données, on constate qu'avec les épaisseurs classiquement posées en structure routière, on retrouve des portances qui satisfont aux exigences du CCT Qualiroutes (SPW, Mobilité & Infrastructures, 2021):

- Pour le sol seul (avec un module d'élasticité de 15.5 MPa et un coefficient de Poisson de 0.30), un module M1 de 17 MPa est obtenu.
- Pour le sol et une sous-fondation de 20 cm d'épaisseur, le module M1 est estimé à 35 et 42 MPa (respectivement pour des modules d'élasticité de 100 et 150 MPa).
- Pour un ensemble sol – sous-fondation (30 cm) – fondation (20 cm), le module M1 (à la petite plaque) est estimé entre 93 et 115 MPa (respectivement pour des modules d'élasticité de 200 et 250 MPa pour la fondation).

## Exemples d'application

### Exemple 1: absence de sous-fondation pour un trottoir

Le cahier des charges d'un trottoir ne prévoit pas de sous-fondation. Quelle portance pourra-t-on espérer atteindre au sommet de la fondation?

Si l'on considère un sol conforme ( $M1=17$  MPa), la formule de Palmer et Barber permet de calculer que la portance qui peut être atteinte sur les 20 cm de fondation ne pourra ainsi s'élever qu'à 73 à 82 MPa. En effet, il faut un sol avec une portance M1 d'au moins 35 MPa pour pouvoir obtenir une portance de 110 MPa sur une fondation de 20 cm d'épaisseur.

## Exemple 2: portance insuffisante de la sous-fondation

Un essai à la plaque réalisé sur une sous-fondation de 20 cm donne une portance de 25 MPa. Quelle portance pourra-t-on espérer atteindre au sommet de la fondation?

Si l'on considère un sol conforme ( $M_1=17$  MPa), la formule de Palmer et Barber permet de calculer le module d'élasticité de la sous-fondation. Le module d'élasticité doit être réduit à une valeur de 40 MPa pour retrouver une portance de 25 MPa au sommet de la sous-fondation. La valeur extrêmement basse de 40 MPa semble indiquer que le sol n'avait probablement pas la portance nécessaire de 17 MPa. On peut donc refaire le calcul avec, par exemple, un module de sol de 10 MPa et un module de 100 MPa pour la sous-fondation, ce qui résulte en un  $M_1$  de 27 MPa. Un module de sol de 9 MPa donne un  $M_1$  de 25 MPa. En considérant des modules d'élasticité de 9 MPa pour le sol, de 100 MPa pour la sous-fondation et de 200 MPa pour la fondation, nous obtenons finalement une portance de 72 MPa au moyen de la formule.

Ces quelques exemples montrent bien l'influence des épaisseurs (ou de l'absence) des différentes couches, de leur degré de compaction (exprimé par la valeur de module d'élasticité) et de la portance du sol. Ils montrent aussi que des calculs avec cette formule de Palmer et Barber ne sont qu'une approche modélisée de la réalité et ne donnent donc que des ordres de grandeur de la portance que l'on pourrait atteindre sur les différentes couches d'une structure routière.



**Mohamed Oualmakran**

E m.oualmakran@brrc.be

T +32 2 766 03 18



**Frank Theys**

E fr.theys@brrc.be

T +32 2 766 03 20



**Audrey Van der Wielen**

E a.vanderwielen@brrc.be

T +32 2 766 03 87

## Références

Marchand, J.-P., Dazats, M., Lichtenstein, H. & Kobisch, R. (1983). Mécanique des chaussées. Thème 1: Modèles de chaussées. 1: Quelques formules utiles pour le calcul des chaussées sur petites calculatrices programmables. *Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, (125), 53-67.

Service Public de Wallonie, Mobilité & Infrastructures. (2021). CCT Qualiroutes: Cahier des charges-type (version 2021 consolidée). [http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/frame.jsp?index\\_cctquali.html](http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/frame.jsp?index_cctquali.html)