

Abaques de pré-dimensionnement de ponts courants à partir de CHAMOA-P

Avril 2024



Outils Ouvrage d'Art

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
Hypothèses de construction des abaqes	3
Analyses sur les Ouvrages en béton	5
Abaques des épaisseurs des parties d'ouvrage	6
Dimensionnement des largeurs de semelles de PIPO	10
Prédimensionnement des Ponts à Poutrelles Enrobées par CHAMOA	18

Hypothèses de construction des abaques

Hypothèses communes à tous les types de structures :

- Ouvrage droit (100 grades) ;
- Deux profils en travers type pour les ouvrages :
 - Profil urbain : 7.50 m de chaussée et deux trottoirs de 1.25 m (charges d'exploitation éloignées des bords libres)
 - Profil autoroutier : glissière 0.50 m - 11.00 m chaussée - BN4 0.80 m (charges d'exploitation proches des bords libres)
- Dimensionnement aux charges routières Eurocodes LM1, LM2, en classe de trafic 2, sans charges d'exploitation à caractère particulier de type convoi exceptionnel ou charge militaire ;
- Classe de résistance du béton : C35/45 pour les OA en béton armé (PIPO / PICF / PSIDA), abaques restant valables pour la classe C30/37
- Classe d'environnement XC3 ou XC4
- Maîtrise de la fissuration : Ouverture de fissure 0,3 mm sous combinaisons fréquentes de charges, pour tous les types de structures BA; et 0,2 mm sous combinaisons fréquentes de charges pour les structures BP (classes XC).
- Prise en compte des gradients thermiques positif (10°) et négatif (-6°).

Hypothèses spécifiques aux PICF :

- ouverture de 4 à 10 m
- module du sol $E_{sol} = 2 - 10 - 25 - 50$ MPa
- hauteur du piédroit : 6.60 m pour 5.10 m de hauteur libre (1.50 m de remblai intérieur)
- pas de remblai sur la traverse
- présence de dalle de transition

Hypothèses spécifiques aux PIPO :

- ouverture de 10 à 20 m
- contrainte à la rupture du sol sous charge verticale centrée $q_u = 0.60 - 0.75 - 1.00 - 1.50$ MPa
- fiche $D = 1.50$ m, $k_p = 0$ (pas de butée du remblai intérieur) → hauteur de piédroit 6.00 m pour hauteur libre 5.10 m
- fiche $D = 2.50$ m, $k_p = 1$ (butée du remblai intérieur) → hauteur de piédroit 7.00 m pour hauteur libre 5.10 m
- pas de remblai sur la traverse
- présence de dalle de transition

Hypothèses spécifiques aux PSIDA (1 à 4 travées) :

- Portée principale :
 - de 8 à 15 m pour les 1 et 2 travée(s)
 - de 8 à 18 m pour les 3 et 4 travées
 - balancement de 0.60 à 0.90

Hypothèses spécifiques aux PSIDP (1 à 4 travées) :

- Deux types de dalle :
 - dalle rectangulaire : portée principale de 14 à 22 m
 - dalle à larges encorbellements : portée principale de 18 à 26 m
 - classe de résistance du béton : C35/45 pour les PSIDP en dalle rectangulaire, C40/50 pour les PSIDP en dalle à larges encorbellements ;
 - Balancement de 0.60 à 0.90

Taux de ferrailage cibles retenus.

Partie d'ouvrage	PICF	PIPO
Encastrement piédroit-traverse (nappe sup traverse, nappe ext piédroit)	50 kg/m ³	70-75 kg/m ³
Mi-traverse, nappe inf	60 kg/m ³	65-70 kg/m ³
Encastrement piédroit-radier (nappe inf radier, nappe ext piédroit)	75 kg/m ³	/
Mi-radier, nappe sup	70 kg/m ³	

Partie d'ouvrage	PSIDA			
	1 TRAVEE	2 TRAVEES	3 TRAVEES	4 TRAVEES
Sur piles, nappe sup	/	70 kg/m ³	70-75 kg/m ³	70-75 kg/m ³
Mi-travée, nappe inf	70-75 kg/m ³	60 kg/m ³	60-65 kg/m ³	60 kg/m ³

Pour les PSIDP, le ratio de précontrainte cible est de 35 kg/m³.

Analyses sur les Ouvrages en béton

Le niveau de charge de l'Eurocode est significatif pour les ouvrages courants par rapport aux charges de l'ex- règlement français (BAEL-BPEL), par contre les matériaux sont plus sollicités pour les ouvrages en béton armé, et de façon équivalente en béton précontraint :

- Pour les ouvrages en béton armé, si le niveau de charge augmente (charge mobile), il est compensé partiellement par le fait que les ouvrages sont maintenant dimensionnés par le critère de fatigue forfaitaire à l'ELS caractéristique (c'est à dire pratiquement à l'ELU), au lieu de l'ELS en tenant compte de la fissuration. Les épaisseurs sont légèrement supérieures à celles des règles françaises.
- Pour les ouvrages en béton précontraint, si le niveau de charge augmente (charge mobile et effet thermique à l'ELS), le dimensionnement final résulte essentiellement du calcul à l'ELS fréquent et des critères de fatigue, les Eurocodes conduisent soit à une augmentation du nombre de câbles de précontrainte, soit à une augmentation de l'épaisseur de la nervure, soit à utiliser un béton avec une résistance de compression « f_{ck} » plus élevée.

Abaques des épaisseurs des parties d'ouvrage

Type d'ouvrage	Élément à dimensionner	Esol	Profil Autoroutier	Profil urbain	
PICF	Traverse		$e = \frac{l}{23} + 0.08 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{26} + 0.08 \geq 0.30m$	
	Piédroit		$e = \frac{l}{45.5} + 0.21 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{45.5} + 0.18 \geq 0.30m$	
	Radier	2 MPa		$e = \frac{l}{25} + 0.12 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{25} + 0.10 \geq 0.30m$
		10 MPa		$e = \frac{l}{27} + 0.13 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{32} + 0.15 \geq 0.30m$
		25 MPa		$e = \frac{l}{46.5} + 0.21 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{69} + 0.23 \geq 0.30m$
		50 MPa		$e = \frac{l}{66.5} + 0.22 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{74} + 0.22 \geq 0.30m$

Type d'ouvrage	Élément à dimensionner	$q'_u = 0.6$ à 1.0 MPa	Profil Autoroutier	Profil urbain
PIPO	Traverse et Piédroits	D=1.50m $k_p=0$	$e = \frac{l}{33} + 0.17 \geq 0.30m$	$e = \frac{l}{33} + 0.13 \geq 0.30m$
		D=2.50m $k_p=1$		

Pour l'instant aucune re-calibration n'a été faite pour les prédimensionnement avec remblais sur traverse, en attendant, on peut reconduire les règles passées : les valeurs d'épaisseurs E0 sans remblai sur la traverse sont à augmenter dans le cas d'un remblai sur la traverse selon la formule suivante qui fourni l'épaisseur E modifiée :

$$E = E0 \cdot \sqrt{1 + \frac{H \cdot d^2}{2000 \cdot E0^2}}$$

Avec « H » hauteur de remblai et « d » ouverture biaisée de l'ouvrage.

Type d'ouvrage	Nombre travées	Balancement	Profil Autoroutier	Profil urbain
PSIDA	1	Sans objet	$e = \frac{l}{23.5} + 0.12$	$e = \frac{l}{23.5} + 0.09$
	2	0.6 – 1.0	$e = \frac{l}{28} + 0.18$	$e = \frac{l}{28} + 0.15$
	3	0.6	$e = \frac{l}{32} + 0.17$	$e = \frac{l}{32} + 0.13$
		0.7	$e = \frac{l}{33} + 0.18$	$e = \frac{l}{33} + 0.13$
		0.8	$e = \frac{l}{34} + 0.17$	$e = \frac{l}{34} + 0.14$
		0.9	$e = \frac{l}{30.5} + 0.16$	$e = \frac{l}{30.5} + 0.13$
	4	0,6	$e = \frac{l}{34} + 0.18$	$e = \frac{l}{34} + 0.15$
		0.7	$e = \frac{l}{34.5} + 0.18$	$e = \frac{l}{34.5} + 0.15$
		0.8	$e = \frac{l}{35} + 0.18$	$e = \frac{l}{35} + 0.15$
		0.9	$e = \frac{l}{29.5} + 0.15$	$e = \frac{l}{29.5} + 0.12$

Type d'ouvrage	Nombre travées	Balancement	Profil Autoroutier	Profil urbain
PSIDP dalle rectangulaire	1	Sans objet	$e = \frac{l}{25} + 0.06$	$e = \frac{l}{25} + 0.05$
	2	0.6 – 1.0	$e = \frac{l}{28} + 0.02$	$e = \frac{l}{28} + 0.01$
	3	0.6-0.7	$e = \frac{l}{38} + 0.11$	$e = \frac{l}{38} + 0.10$
		0.8	$e = \frac{l}{38} + 0.13$	$e = \frac{l}{38} + 0.10$
		0.9	$e = \frac{l}{34} + 0.10$	$e = \frac{l}{34} + 0.07$
	4	0.6-0.7	$e = \frac{l}{35} + 0.09$	$e = \frac{l}{35} + 0.07$
		0.8	$e = \frac{l}{32} + 0.05$	$e = \frac{l}{32} + 0.03$
		0.9	$e = \frac{l}{30} + 0.05$	$e = \frac{l}{30} + 0.03$

Type d'ouvrage	Nombre travées	Balancement	Profil Autoroutier	Profil urbain
PSIDP larges encorbellements	1	Sans objet	$e = \frac{l}{21.5} - 0.05$	$e = \frac{l}{21.5} - 0.05$
	2	0,6 – 1,0	$e = \frac{l}{25} + 0.01$	$e = \frac{l}{25} - 0.01$
	3	0.6	$e = \frac{l}{32.5} + 0.08$	$e = \frac{l}{32.5} + 0.05$
		0.7	$e = \frac{l}{36} + 0.18$	$e = \frac{l}{36} + 0.13$
		0.8	$e = \frac{l}{30} + 0.08$	$e = \frac{l}{30} + 0.05$
		0.9	$e = \frac{l}{27.5} + 0.06$	$e = \frac{l}{27.5} + 0.03$
	4	0,6	$e = \frac{l}{31} + 0.12$	$e = \frac{l}{31} + 0.08$
		0.7	$e = \frac{l}{31} + 0.13$	$e = \frac{l}{31} + 0.08$
		0.8	$e = \frac{l}{31} + 0.14$	$e = \frac{l}{31} + 0.09$
		0.9	$e = \frac{l}{25} + 0.01$	$e = \frac{l}{25} - 0.03$

Dimensionnement des largeurs de semelles de PIPO

Hypothèses de calibration

Les hypothèses retenues pour la construction des nouveaux abaques sont les suivantes :

- ouvrage droit (100 grades),
- deux profils en travers type pour les ouvrages (identiques à ceux retenus pour les abaques relatifs aux épaisseurs structurales) :
- profil urbain : 7.50 m de chaussée et deux trottoirs de 1.25 m
- profil autoroutier : glissière 0.50 m - 11.00 m chaussée - BN4 0.80 m
- dimensionnement aux charges routières Eurocodes LM1, LM2, en classe de trafic 2, sans charges d'exploitation à caractère particulier de type convoi exceptionnel ou militaire ;
- hauteur libre constante, égale à 5.50 m,
- pas de couverture de remblai sur la traverse ;
- remblai de caractéristiques « normales » (poids volumique de 20 kN/m³, coefficients de poussée de 0.25 à 0.50) ;
- contrainte de rupture q'_u du sol sous charge verticale centrée, comprise entre 0.60 et 1.50 MPa ;
- cas avec non prise en compte de la butée du remblai intérieur ($k_p = 0$) et cas avec prise en compte de la butée du remblai intérieur ($k_p = 1$) ;
- fiche D de la semelle dans le sol :
- D = 1.50 et 2.00 m pour cas $k_p = 0$
- D = 1.00, 2.00 et 3.00 m pour cas $k_p = 1$.
- module du sol ESOL = 10 MPa.

La largeur « B » et l'excentrement « e » de la semelle sont fonction de différents paramètres :

- l'ouverture d du portique ;
- la contrainte de rupture q'_u du sol ;
- la fiche D de la semelle dans le sol.

La hauteur libre HL, constante et égale à 5.50 m : étant donné que $H_p = HL + D - E_s$ et que E_s a été systématiquement pris égal à 0.60 m, on devait adapter H_p en fonction de D par :

$$H_p = 5.50 - 0.60 + D = 4.90 + D .$$

La détermination de H_p (hauteur du piédroit, variable) se déduit donc en fonction de D (fiche, variable) et de HL (gabarit, constant).

Les largeurs des patins et talons étaient initialement définies avec une valeur faible égale à 0.25 m, avec l'option MINIMUM qui laisse alors le soin au logiciel CHAMOA d'optimiser ces dimensions jusqu'à parvenir à la vérification de la stabilité externe des semelles.

Les résultats des abaques relatifs aux épaisseurs structurelles ont été utilisés afin de pré-dimensionner les épaisseurs des piédroits et de la traverse en fonction de l'ouverture, et ce en vue de disposer de charges réalistes pour les efforts permanents induits à la base de la semelle.

NB: Les abaques sont réalisés sur la portance seule, le critère de glissement n'est pas systématiquement vérifié car il est lié à la hauteur de piédroit.

Abaques des dimensions de semelles

Tous les abaques présentés dans ce paragraphe ont été calculés avec un coefficient de butée de 1.

Profil autoroutier - D = 3.00 m
Largeur semelle

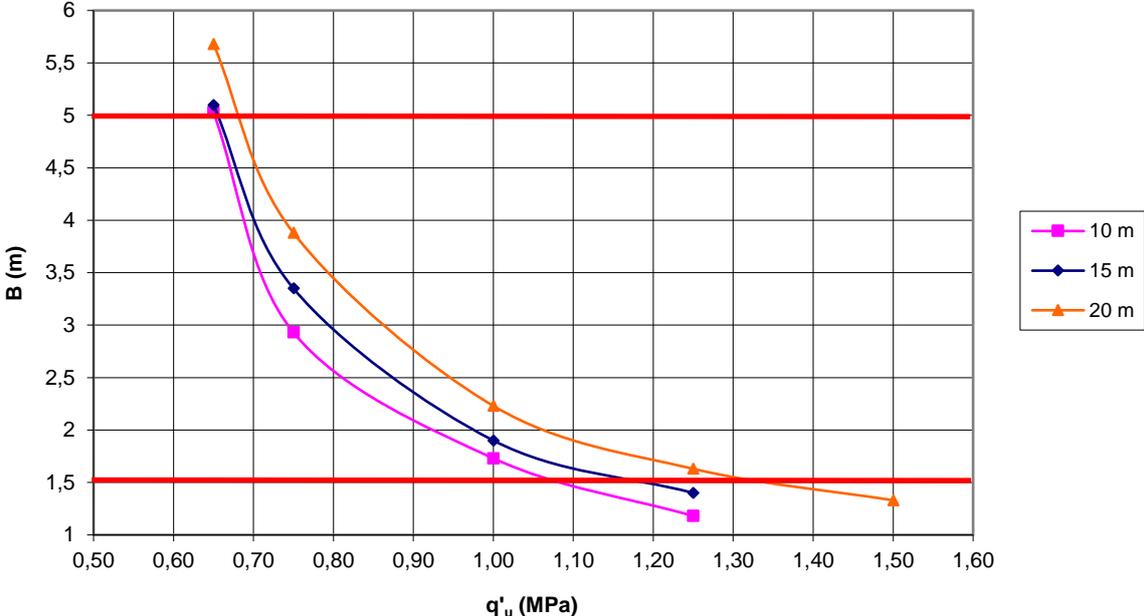


Figure 1 : Profil autoroutier - D=3.00m Largeur semelle

Profil autoroutier - D = 3.00 m
Largeur talon

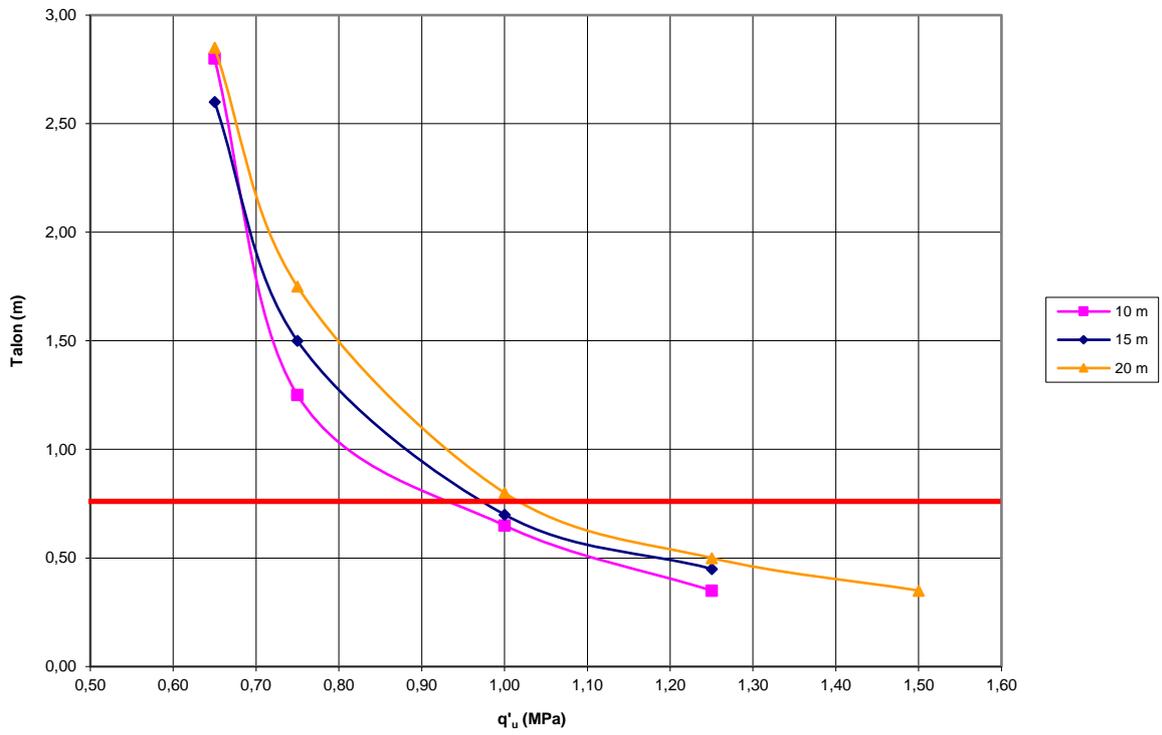


Figure 2 : Profil autoroutier - D=3.00m Largeur talon

Profil autoroutier - D = 2.00 m
Largeur semelle

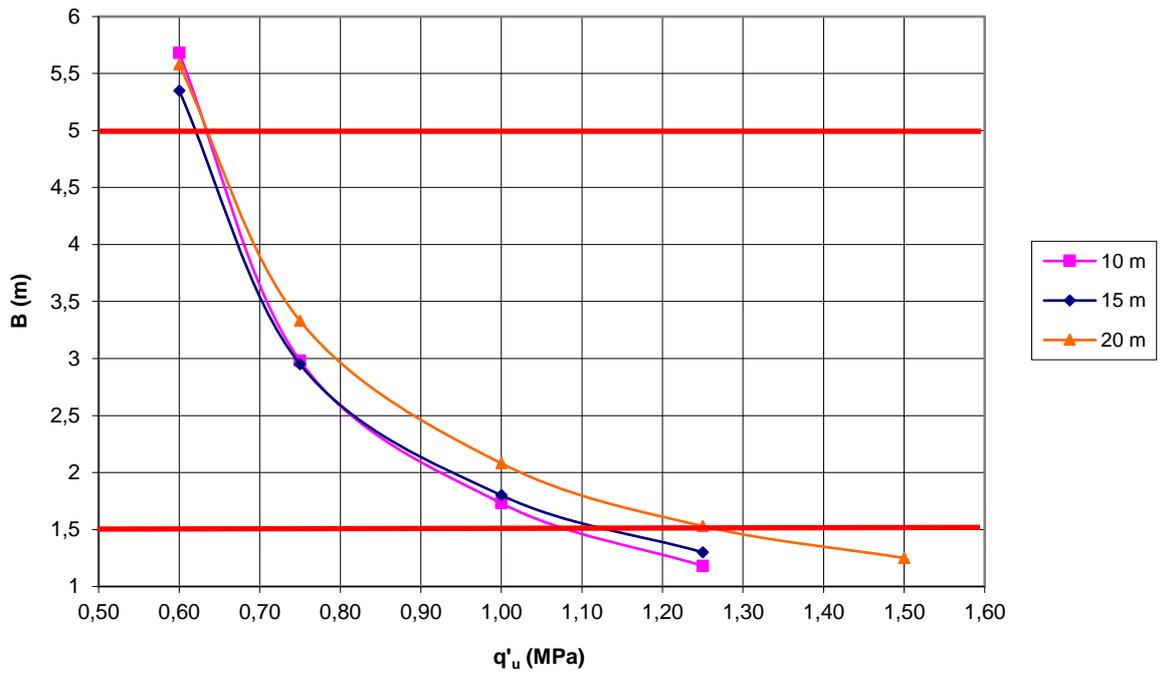


Figure 3 : Profil autoroutier - D=2.00m Largeur semelle

Profil autoroutier - D = 2.00 m
Largeur talon

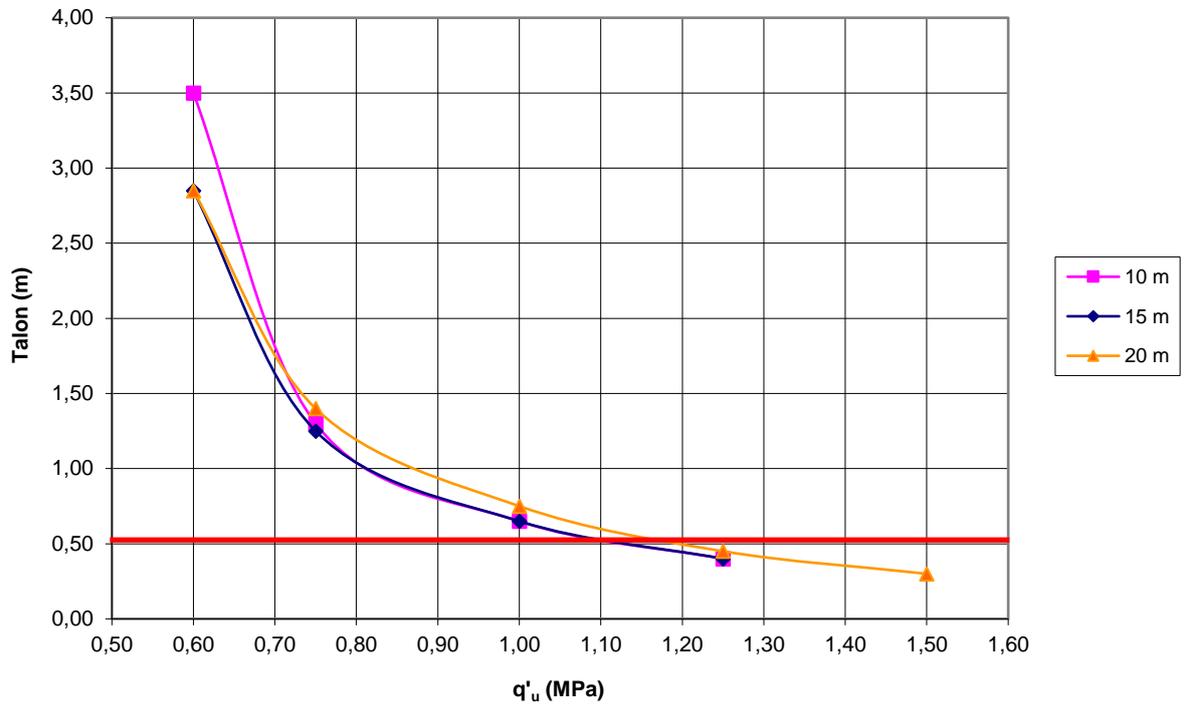


Figure 4 : Profil autoroutier - D=2.00m Largeur talon

Profil autoroutier - D = 1.00 m
Largeur semelle

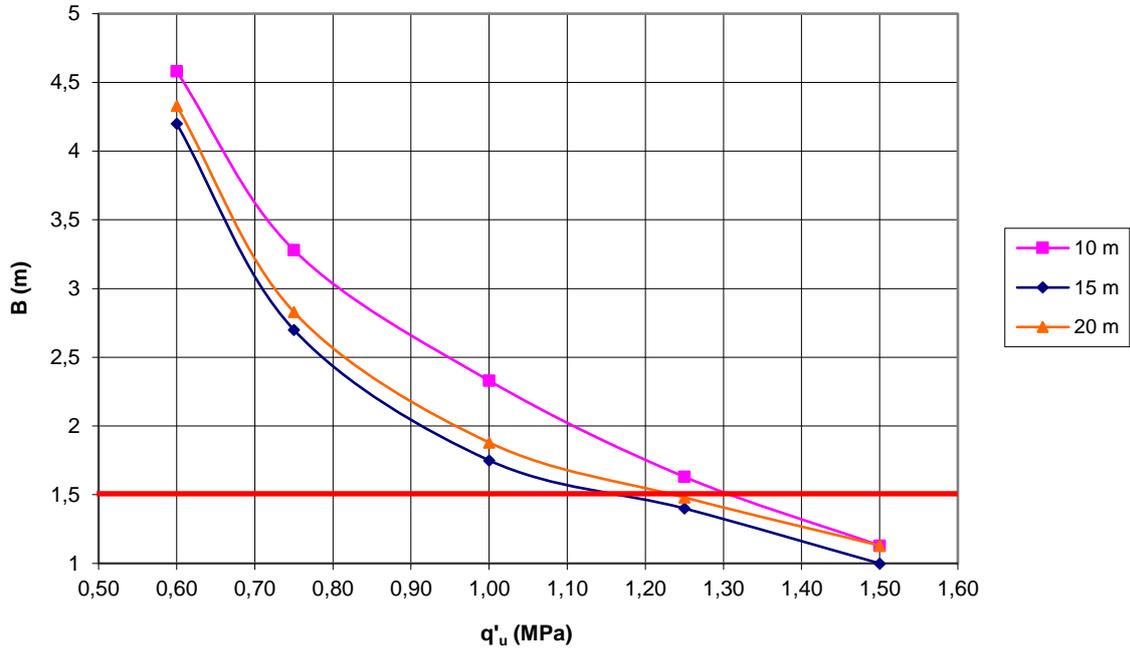


Figure 5 : Profil autoroutier - D=1.00m Largeur semelle

Profil autoroutier - D = 1.00 m
Largeur talon

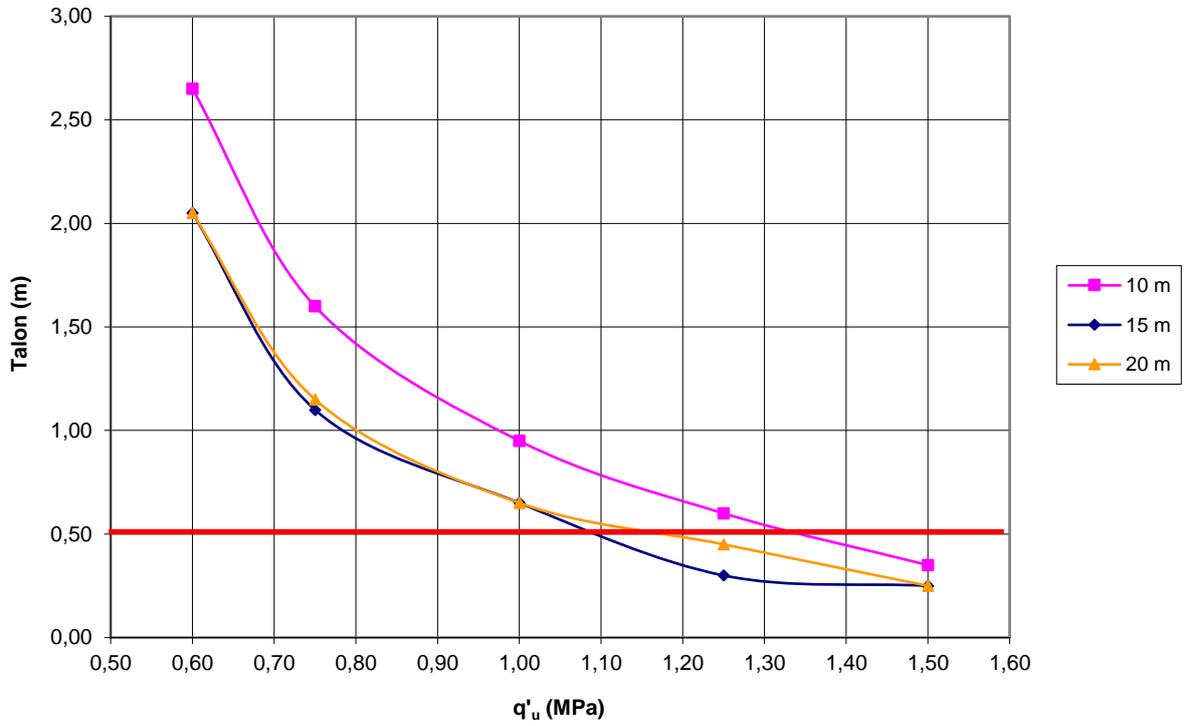


Figure 6 : Profil autoroutier - D=1.00m Largeur talon

Résultats obtenus sur les largeurs de semelles

Domaine de validité des abaques

Les résultats des calculs effectués avec le profil urbain sont proches de ceux obtenus avec le profil autoroutier, ils sont simplement légèrement moins défavorables. On ne présente donc que les résultats du profil autoroutier, que l'on peut généraliser de manière légèrement sécuritaire au cas du profil urbain.

Pour des caractéristiques de sol élevées (contrainte q_u élevée), si l'abaque indique une largeur de semelle inférieure à 1.5 m, il est indispensable de porter son attention sur la stabilité des piédroits en phase de construction, lorsque la traverse n'est pas encore réalisée.

A contrario, pour des caractéristiques de sol faibles (contrainte q_u faible), il convient d'être prudent sur les résultats aboutissant à des largeurs de semelle très importantes. Le dimensionnement de la semelle est très sensible à la valeur de q_u donnée par l'utilisateur.

Ainsi pour les très faibles portées, les dimensions cumulées de semelle deviennent supérieures aux dimensions de l'ouvrage... Dans ce cas, il faut s'interroger sur la pertinence du choix de fondations superficielles pour l'ouvrage si les dimensions sont trop grandes (passage en PICF pour les petits ouvrages, nécessité d'une purge du sol et d'une substitution, passage en fondations profondes, ...).

De manière générale, il faut rester dans des dimensions de fondations raisonnables, c'est-à-dire « proportionnées » à l'ouvrage.

Influence de la prise en compte de la butée du remblai intérieur

La prise en compte de la butée est évidemment bénéfique pour l'ouvrage au niveau de la stabilité de la semelle de fondation. Le gain sur la largeur de semelle requise est notable. Si la fiche est faible, il est raisonnable de ne pas prendre en compte la butée, par contre si la fiche est importante, il est raisonnable de la prendre en compte (sauf conditions particulières). La valeur recommandée est alors de ne pas dépasser la valeur de 1 (au delà, le coefficient serait peu réaliste car il signifierait un déplacement horizontal important du piédroit, ce qui n'est évidemment pas souhaitable).

Autre effet du coefficient i_δ du fascicule 62 titre V pour les ouvrages avec fiches d'encastrement des piédroits de faible profondeur

En dehors du fait qu'un coefficient i_δ modifié a été implémenté (voir annexes de CHAMOA), sa prise en compte a une incidence supplémentaire sur les calculs. Sur les fiches d'encastrement des piédroits « De » de faibles profondeurs, on constate que les dimensions de semelles sont plus faibles pour les plus grandes portées. Il s'agit ici d'un effet de l'application de la formule du i_δ du fascicule 62 titre V : en effet lorsque la fiche est faible, les charges dues au remblai intérieur sont faibles et donc pour limiter l'inclinaison delta des charges sur la semelle, il faut augmenter la descente de charge sur la semelle ; par conséquent, les ouvrages de plus grande portée ont des semelles plus faibles car les charges issues du tablier y sont plus importantes. Lorsque la fiche est plus importante, cet effet disparaît à cause du poids des terres aval et éventuellement de leur butée et on retrouve bien le fait que la semelle augmente avec la portée de l'ouvrage.

Coefficient de butée = 0

Profil autoroutier - D = 1.50 m
Largeur semelle

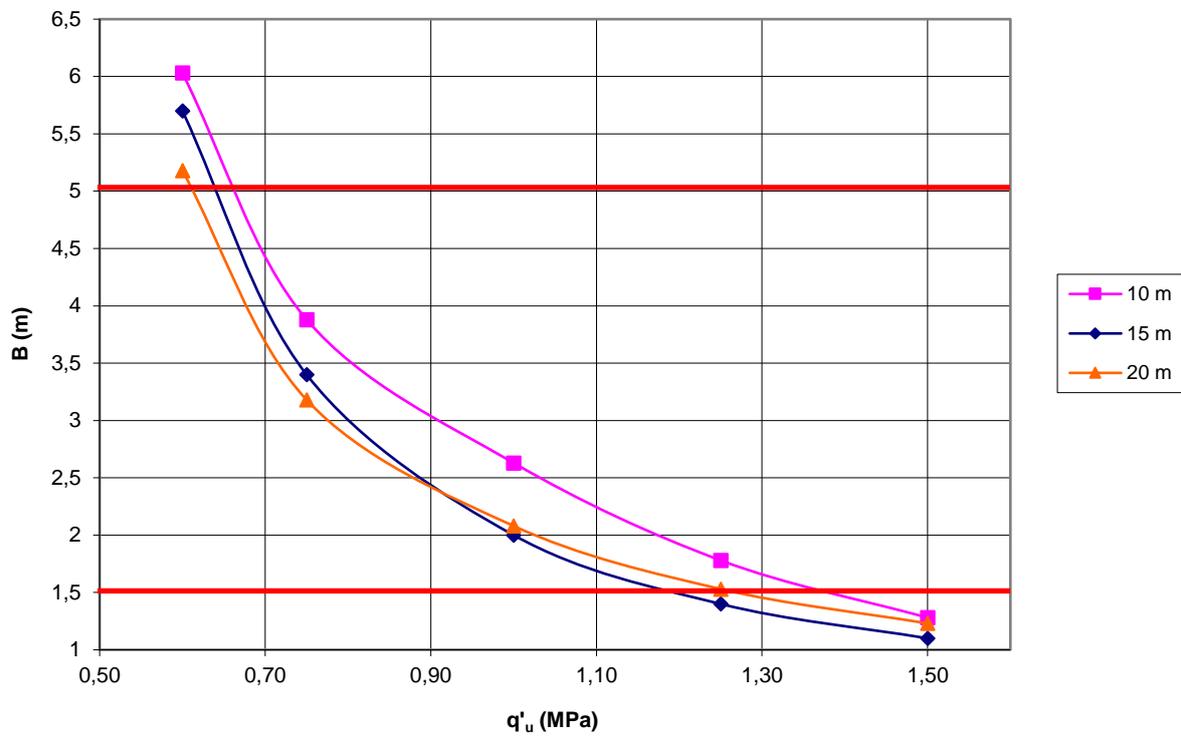


Figure 7 : Profil autoroutier - D=1.50m Largeur semelle

Profil autoroutier - D = 1.50 m
Largeur talon

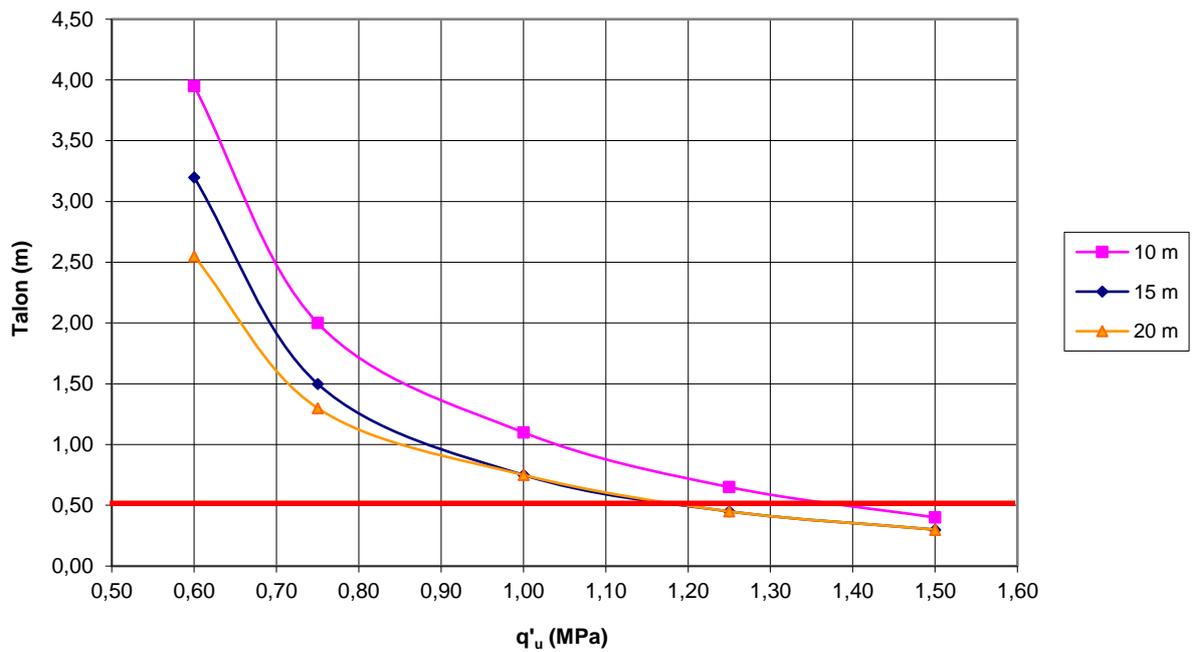


Figure 8 : Profil autoroutier - D=1.50m Largeur talon

Prédimensionnement des Ponts à Poutrelles Enrobées par CHAMOA

Dans cette partie nous proposons une aide au dimensionnement de la charpente pour les ouvrages type Ponts à Poutrelles enrobées (PPE).

Hypothèses de construction des abaques

Ces hypothèses sont communes aux autres ouvrages types :

- Ouvrage droit (100 grades)
- Profil autoroutier :
 - Trottoir gauche 0.5m
 - Chaussée 11m
 - Trottoir droit 1m
- Dimensionnement aux charges routières Eurocodes LM1, LM2, en classe de trafic 2 sans charges d'exploitation à caractère particulier de type convoi exceptionnel ou charge militaire
- Acier de charpente S355
- Classe résistante du béton C35/45 pour les OA en béton armé
- Classe d'environnement XC3 ou XC4
- Maîtrise de la fissuration : Ouverture de fissure 0.3mm sous combinaisons fréquentes de charges
- Prise en compte des gradients thermiques positif (10°C) et négatif (-6°C)

Hypothèses spécifiques aux PPE :

- Portées de 15m, 20m et 25m pour une ouvrage isostatique ; 15m, 20m, 25m, 30m et 35m pour les ouvrages multi travées (de 2 à 4)
- Balancement de 0.6-1 pour 2 travées et de 0.6 à 0.9 pour 3/4 travées
- 2 calculs réalisés :
 - Nombre minimal de poutrelles (ie espacement maximal) soit 18 files
 - Nombre maximal de poutrelles (ie espacement minimal), soit 26 files
- Les profilés utilisés sont les profilés usinés HEAA, HEA, HEB et HEM

Les résultats de l'étude sont issus du dimensionnement automatique de la charpente en cas de dépassement ELS (cf documentation des PPE).

Résultats

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous. Pour chaque nombre de travée et balancement, on obtient une valeur de l'élancement des poutrelles pour les hypothèses min et max du nombres de poutrelles.

Dans la plupart des cas, augmenter Le nombre de poutrelles dans un ouvrage permet de réduire l'élancement sauf pour les travées indépendantes où cela n'a aucun impact.

Le profilé a également son importance, plus la semelle du profilé est épaisse plus l'élancement peut-être petit. Ainsi l'élancement le plus grand est obtenu pour les HEAA alors que les plus petits sont atteints pour les HEM.

L'élancement des travées indépendantes est assez important, entre 1/29 et 1/35 selon le profilé. Il se réduit pour les ouvrages à deux travées, entre 1/29 et 1/44 selon le profilé et le nombre de poutrelles. A partir de 3 travées l'élancement devient plus petit, entre 1/36 et 1/48 sans réelle influence du balancement des travées.

Nombre de travées	Balancement	Nombre de poutrelles sur la largeur tablier	élançement des poutrelles*			
			HEAA	HEA	HEB	HEM
1	-	min	1/29	1/31	1/33	1/35
		max				
2	0,6	min	1/34	1/38	1/38	1/42
		max	1/40		1/42	
	1	min	1/29	1/34	1/35	1/44
		max	1/34	1/38	1/42	
3	0,6	min	1/39	1/43	1/44	1/44 - 1/48
		max	1/44		-	
	0,7	min	1/36	1/44	1/47	
		max	1/40			
	0,8	min	1/36	1/38	1/42	
		max	1/40		1/44	
	0,9	min	1/34	1/44	1/38	
		max	1/40		1/44	
4	0,6-0,9	Min	1/34	1/38	1/38	1/44
		Max	1/40	1/44	1/44	1/48

Les élançements donnés dans ce tableau sont ceux des poutrelles. Il faut donc prévoir une épaisseur totale de tablier:

$$H_{\text{tablier}} = H_{\text{poutre}} + c \text{ avec } 0.07 \leq c \leq \min\left(\frac{H_{\text{poutre}}}{3}, 0.15\right)$$

Direction technique infrastructures de transport et matériaux
110 rue de Paris - BP 214 - 77487 Provins Cedex - Tél : +33 (0)1 60 52 31 31

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement www.cerema.fr
Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30