

Chamoia_3D – Chargements et sollicitations

CHaîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d' Art

Octobre 2015



CHAMOA_3D – Chargements et sollicitations

CHaîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d'Art

Calcul des ouvrages de type Pipo/ Picf/ Psida/ Psidp/ Psid étendus

Collection les outils



Document édité par le Céréma dans la collection « les outils ».
Cette collection regroupe les guides, logiciels, supports
pédagogique, catalogue, données documentaires et annuaires.

La CHAîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d'Art (Chamoa) a été développée sous le pilotage du Céréma par :

Jean GUAL
Philippe LEVEQUE
Marie Aurélie CHANUT
Claude SIMON
Florent BACCHUS
Florent BOURHIS
Nicolas VIGNEAUD
Angel-Luis MILLAN
Gaël BONDONET

L'application est désignée sous le sigle "CHAMOA" pour Chaîne Algorithmique Modulaire de calcul des Ouvrages d'Art. Ce nom et ce sigle ont été déposés à l'Institut National de la Propriété industrielle dans les classes suivantes :

9 : logiciels (programmes enregistrés)
42 : programmation pour ordinateur.

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle de cette documentation et/ou du logiciel, faite sans le consentement du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40).

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	7
Chapitre I - Charges permanentes.....	9
I.1 - Phasage de construction.....	9
I.2 - Poids-propre.....	13
I.3 - Remblais techniques.....	13
I.4 - Action de l'eau.....	15
I.5 - Action de l'eau sur le remblais : déjaugage.....	16
I.6 - Cas de charges unitaires.....	17
I.7 - Tassements unitaires d'appui ou de semelle.....	19
I.8 - Précontrainte.....	19
I.9 - Retrait.....	20
Chapitre II - Charges variables fixes.....	21
II.1 - Dilatation thermique unitaire.....	21
II.2 - Gradient thermique unitaire.....	21
II.3 - Vent sur écran - renversement unitaire.....	21
II.4 - Accident sur équipement.....	21
II.5 - Impact sur le remblai dû à une action mobile(PIPO/PICF).....	22
Chapitre III - Charges variables mobiles.....	24
III.1 - Détermination des surfaces d'influence de plaque.....	24
III.2 - Surfaces d'influence de réactions d'appui ponctuel.....	25
III.3 - Surfaces d'influence de moment, efforts tranchants, efforts normaux totaux.....	26
III.4 - Surfaces d'influence de réactions d'appui totales de la ligne d'appui.....	26
III.5 - Surfaces d'influence des composantes du torseur d'efforts en pied de semelle.....	26
III.6 - Surfaces d'influence de pression latérale du sol.....	27
III.7 - Prise en compte du coefficient de Poisson.....	27
III.8 - Déplacement des charges sur la surface d'influence.....	27
Chapitre IV - Combinaisons réglementaires.....	28
IV.1 - Actions de l'eau.....	28
Chapitre V - Calcul des efforts de dimensionnement du ferrailage des plaques.....	29
V.1 - Sans efforts de membrane.....	29
V.2 - Avec efforts de membrane.....	29
Chapitre VI - Calcul des efforts de dimensionnement des ferrillages de renfort.....	31
Chapitre VII - Calcul des efforts de dimensionnement des semelles superficielles.....	33
VII.1 - Détail des calculs des efforts T et M induits par les pressions du sol sous la semelle.....	33
Chapitre VIII - Calcul des efforts de dimensionnement du ferrailage longitudinal des PSIDP sur appuis.....	42

Chapitre I - Charges permanentes

Toutes les charges permanentes sont supposées de longue durée. Elles sont appliquées sur une structure avec des modules d'élasticité et des raideurs de sol différés.

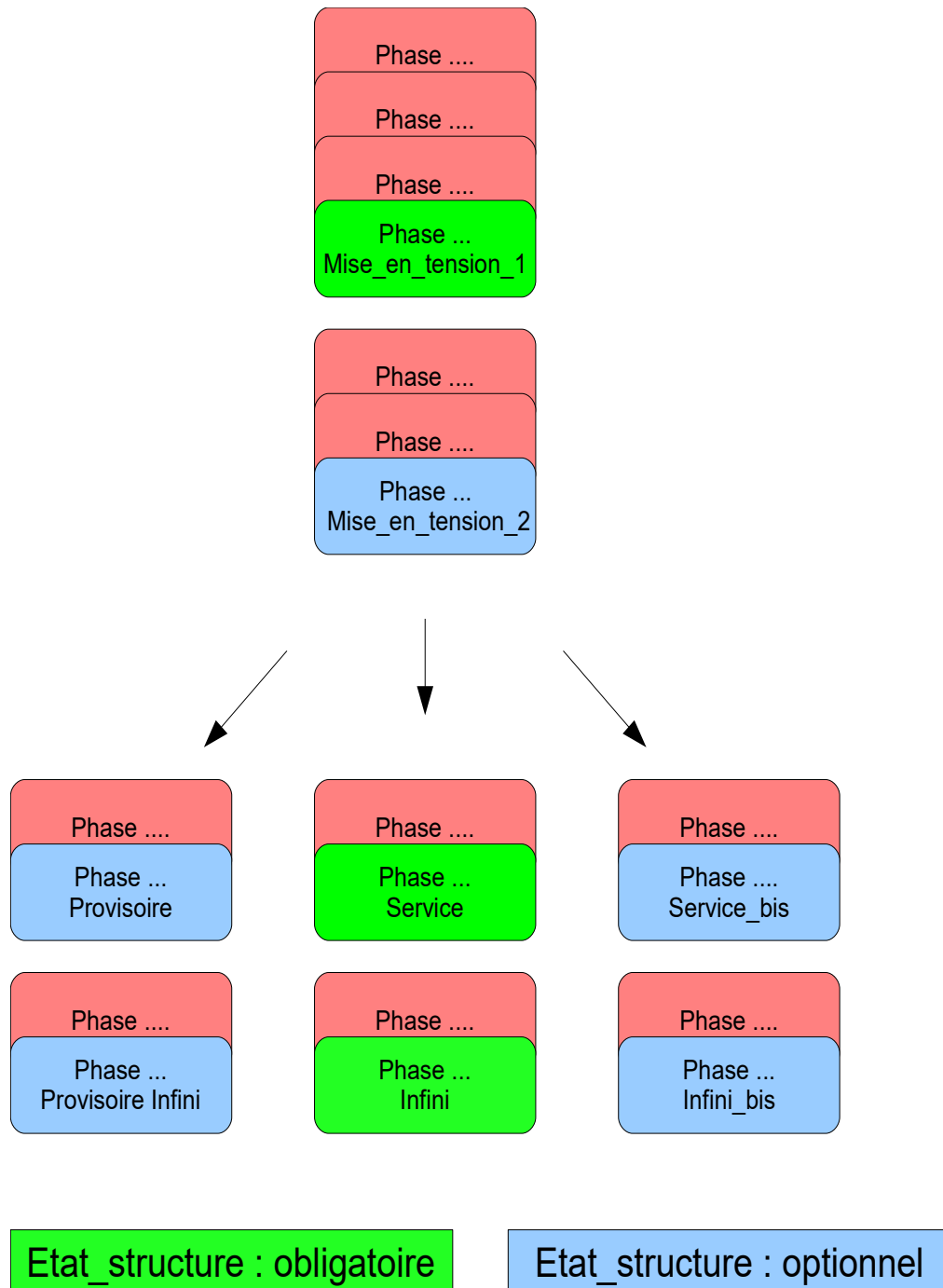
I.1 - Phasage de construction

Le phasage permet d'obtenir les différents états de la structure. Le phasage est défini comme une succession de phases organisées sous forme d'un arbre dont chaque nœud représente une phase. A certains noeuds (phases) correspondent des états de la structure notés *Etat_structure*.

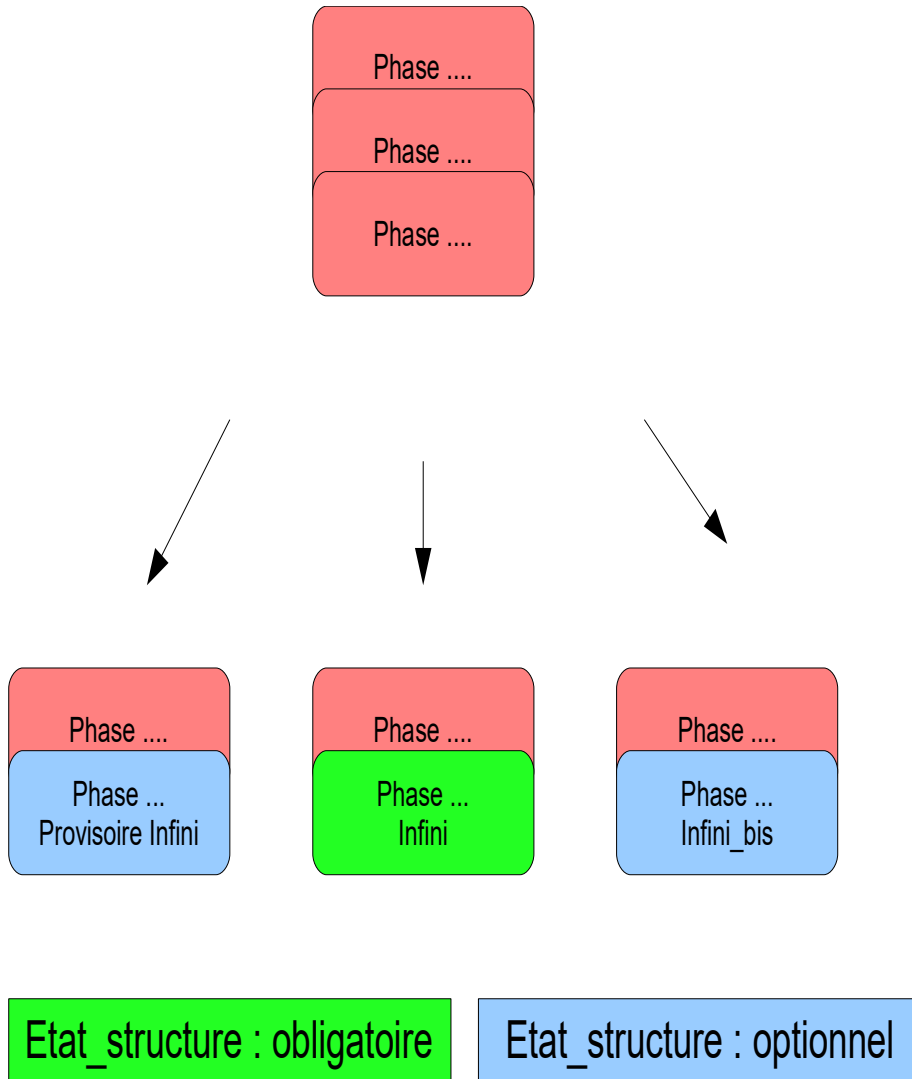
Pour chaque type d'ouvrage, les différents *Etat_structure* prévus sont les suivants :

<i>Etat_structure</i>	PSIDP	PSIDA	PIPO	PICF
Mise_en_tension_1	X			
Mise_en_tension_2	X			
En_construction			X	X
Provisoire	X			
Infini_provisoire	X	X	X	X
Service	X			
Infini	X	X	X	X
Service_bis	X			
Infini_bis	X	X	X	X

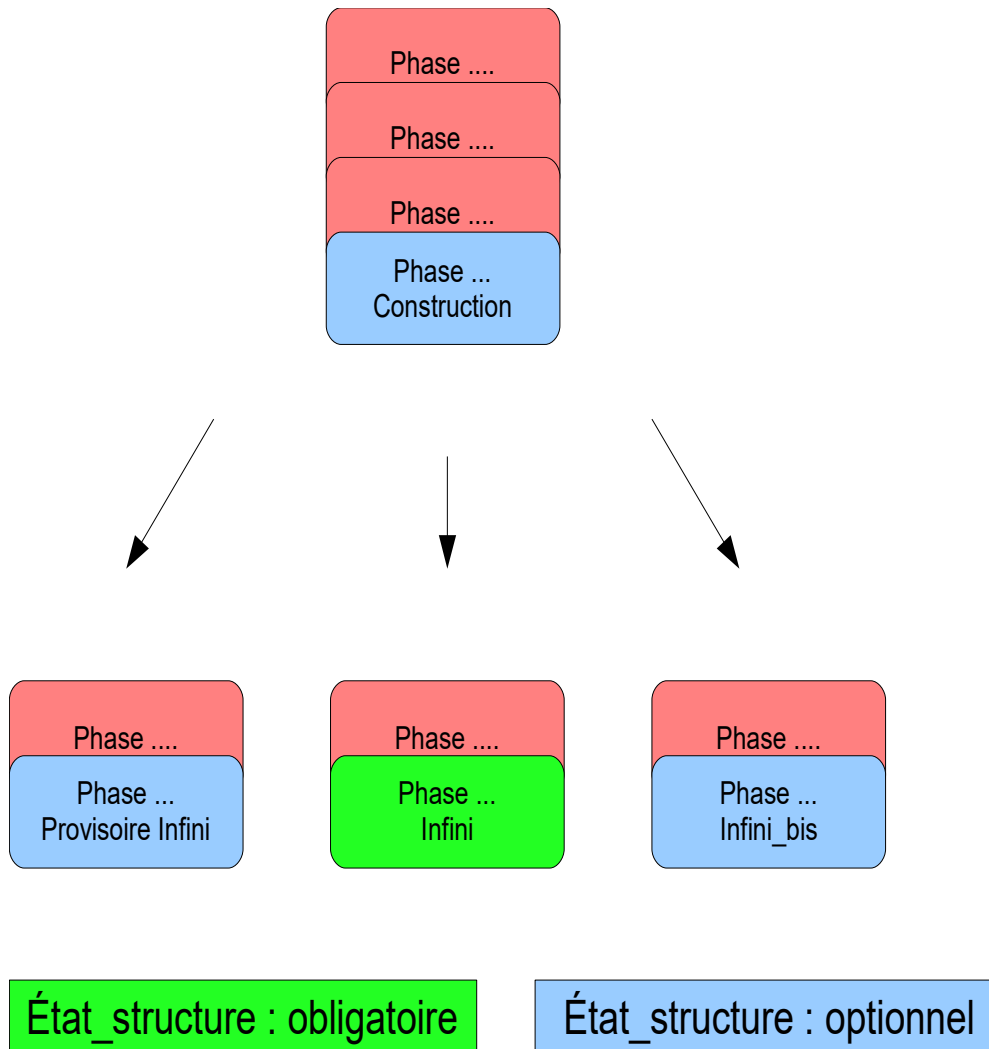
Dans le cas du PSIDP, l'arbre de phasage est le suivant :



Dans le cas du PSIDA, l'arbre de phasage est le suivant :



Dans le cas du PIPO/PICF, l'arbre de phasage est le suivant :



Aucun phasage, au sens de l'activation progressive d'éléments de structure, n'est mis en oeuvre par Chamoa_3D : toute la structure est activée en une seule fois. Par suite, chaque action élémentaire est appliquée sur la structure autant de fois qu'elle intervient dans un *Etat_structure* et les effets des actions sont obtenus par le cumul des effets des phases situées entre la racine de l'arbre et le nœud considéré.

Le calcul des effets relatifs à un *Etat_structure* s'effectue en appliquant les différentes actions élémentaires constitutives de l'action sur une structure dont les matériaux ont les caractéristiques suivantes :

- $E_d(t)$: module d'Young différé du béton,
- $K_d(t)$: module de réaction différé du sol,

pour le béton, on a :

$$\frac{1}{E_d(t, t_o)} = \frac{1}{E_i(t_o)} (1 + \phi(t - t_o))$$

où :

t : correspond à l'âge du béton à la date de l' *Etat_structure* considéré ;

t_o : correspond soit à l'âge du béton à la 1ère mise en tension pour les PSIDP, soit à 28 jours pour les PSIDA/PIPO/PICF ;

Pour le sol, on prend la valeur différée pour l' *Etat_structure* au temps infini, et la valeur instantanée pour les autres actions.

Dans le cas du PSIDP, on prend en compte les tensions dans les câbles résultant d'un calcul de pertes par une méthode « scientifique ». Le chargement équivalent à la précontrainte initiale et aux pertes instantanées et différées : listes de densités linéiques de forces verticales, de forces horizontales et de couple, fait l'objet d'un calcul de répartition aux nœuds du maillage Aster concernés par les câbles.

I.2 - Poids-propre

I.2.1 - Poids des éléments de l'ouvrage

Le poids de l'ensemble des éléments de l'ouvrage est pris en compte dans les charges permanentes sauf le poids des pieux et des barrettes. Le coefficient de variabilité des différents éléments est pris en compte. Dans le cas du tablier, le poids du bombement éventuel est pris en compte.

I.2.2 - Poids des remblais sur profil

Le poids des remblais sur le profil de circulation est appliqué sur toute la largeur de la zone concernée. Dans le cas des PIPO/PICF le coefficient de Marston est pris en compte.

I.2.3 - Poids des superstructures

Le poids des superstructures est appliqué en prenant en compte un coefficient de variabilité moyen global.

I.3 - Remblais techniques

Dans tous les cas les remblais techniques sont supposés mis en place simultanément de part et d'autre de la traverse. Les coefficients de Rankine max sont appliqués simultanément aux deux extrémités de la traverse. Il en va de même pour les coefficients de Rankine min.

Poussée

En présence d'une dalle de transition et donc en l'absence de remblai sur le tablier, la poussée comporte 2 diagrammes triangulaires :

- entre la cote supérieure de la traverse et la cote supérieure de la dalle de transition,

- entre la cote inférieure de la dalle de transition et la cote inférieure de la semelle/radier.

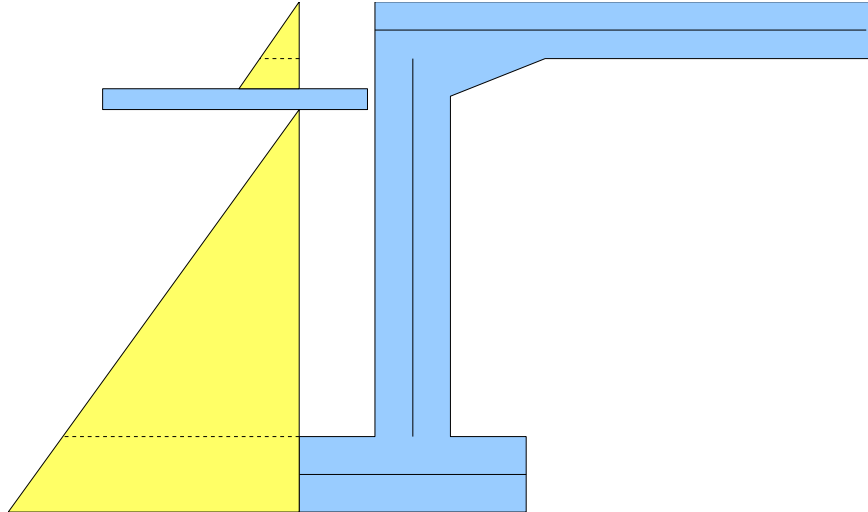


Figure 18 :Poussée en présence de dalle de transition

En l'absence de dalle de transition, la poussée comporte un seul diagramme trapézoïdal, triangulaire en l'absence de remblai sur le tablier, situé entre la cote supérieure de la traverse et la cote inférieure de la semelle/radier.

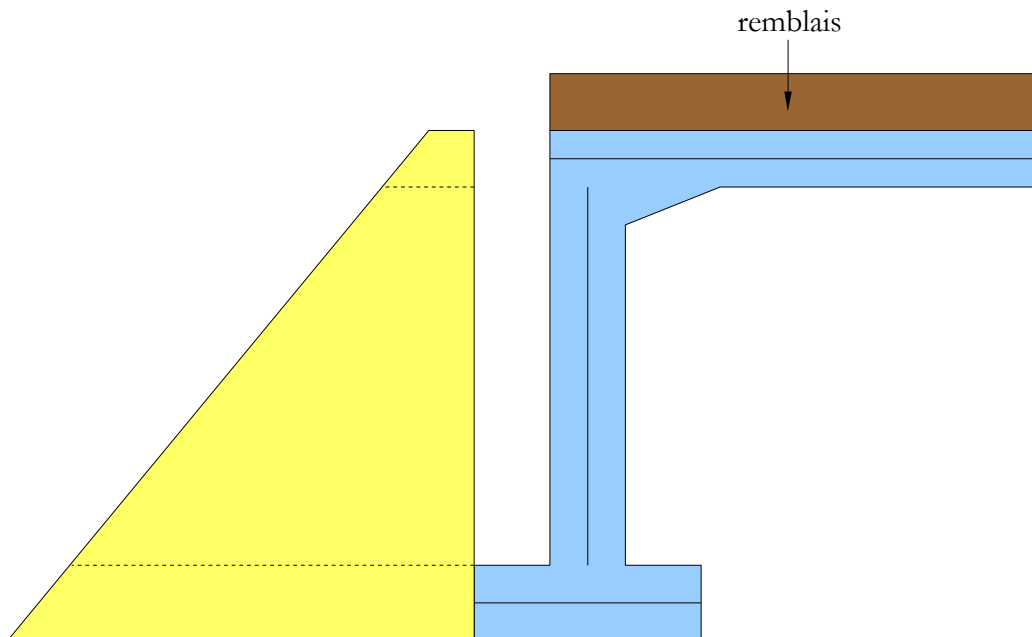


Figure 19 :Poussée en l'absence de dalle de transition

Poids

Une densité surfacique constante de forces verticales est appliquée sur le talon.

Charge uniforme sur le remblai

On considère la poussée et le poids dus à une éventuelle charge uniforme sur le remblai en phase de construction seulement.

En présence d'une dalle de transition et donc en l'absence de remblai sur le tablier, la poussée comporte un diagramme rectangulaire entre la cote supérieure de la traverse et la cote supérieure de la dalle de transition

En l'absence de dalle de transition, la poussée comporte un seul diagramme rectangulaire entre la cote supérieure de la traverse et la cote inférieure de la semelle/radier.

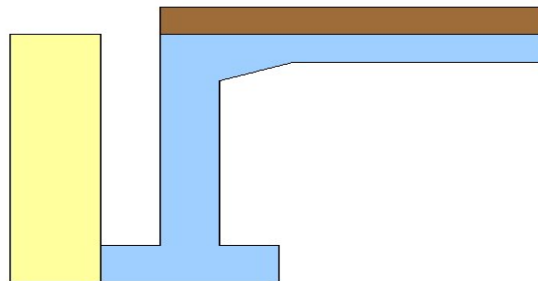


Figure 20 :Poussée due à une charge uniforme sur le remblais

I.4 - Action de l'eau

Poussée

On considère deux parties :

- Partie s'exerçant sur le piedroit : Une densité surfacique variable (triangulaire) de forces horizontales est appliquée sur une partie du piedroit (côté extérieur et/ou intérieur).
- Partie s'exerçant sur la semelle : Une densité linéique constante de force horizontale et de couple représentant la poussée est appliquée sur toute la hauteur de la semelle.

Poids

Une densité surfacique constante de forces verticales est appliquée sur le patin et/ou le talon.

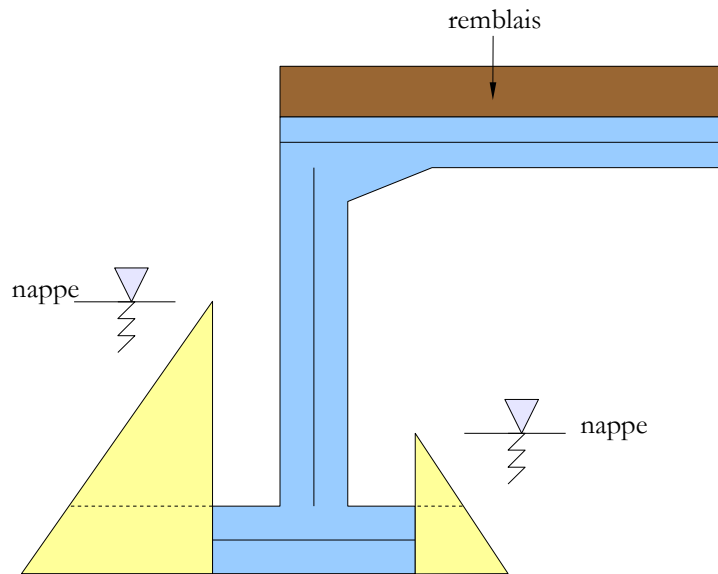


Figure 21 : Poussée de l'eau

I.5 - Action de l'eau sur les remblais : déjaugage

La présence d'eau dans un sol conduit à le « déjauger », c'est à dire à réduire son poids volumique, d'où une réduction de la poussée (partie en jaune). Cette réduction est prise en compte comme une action spécifique (« négative ») de l'eau.

Partie s'exerçant sur le piédroit

Une densité surfacique variable de forces horizontales est appliquée sur une partie du piédroit : côté extérieur et/ou intérieur.

Partie s'exerçant sur la semelle

Une densité linéique constante de force horizontale et de couple représentant la poussée est appliquée sur toute la hauteur de la semelle.

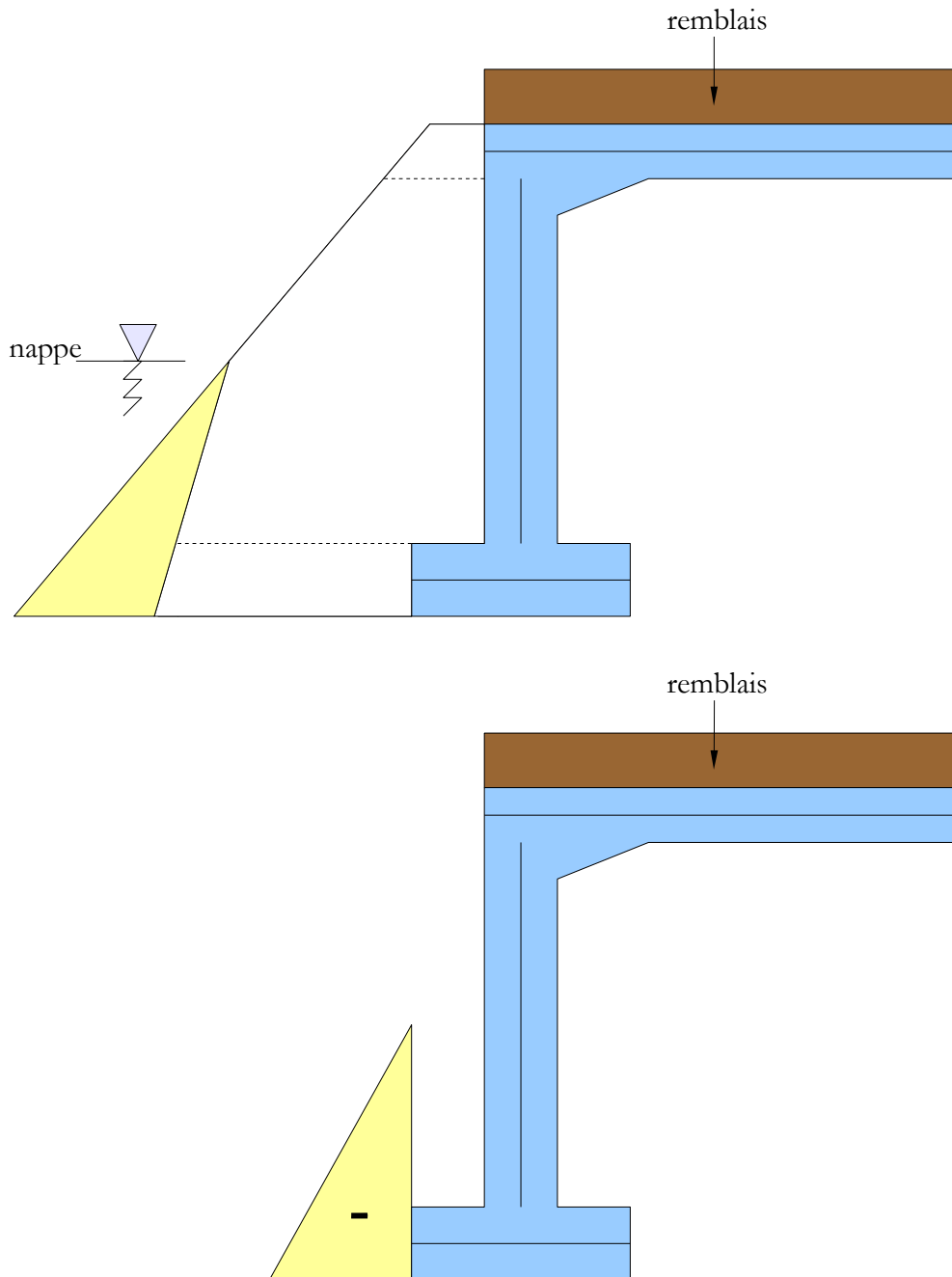


Figure 22 : Déjaugeage du sol

I.6 - Cas de charges unitaires

Ce sont des cas de charges utilisés dans les combinaisons.

I.6.1 - Poids remblai talon uniforme unitaire (PIPO)

C'est une densité surfacique unitaire de forces verticales sur le talon.

I.6.2 - Poids remblai patin uniforme unitaire (PIPO)

C'est une densité surfacique unitaire de forces verticales sur le patin.

I.6.3 - Poussee remblai uniforme unitaire (PIPO/PICF)

C'est un diagramme en « rectangle » s'appliquant sur le piédroit et la semelle :

Partie s'exerçant sur la traverse

C'est une densité linéique constante de force horizontale représentant la résultante, sur la hauteur de la traverse.

Partie s'exerçant sur le piédroit

C'est une densité surfacique unitaire de forces horizontales sur la hauteur concernée du piédroit (rappel : la modélisation du piédroit s'étend entre le nu inférieur de l'élément Traverse et le nu supérieur de l'élément Semelle).

Partie s'exerçant sur la semelle

C'est une densité linéique constante de force horizontale représentant la résultante, sur la hauteur de semelle.

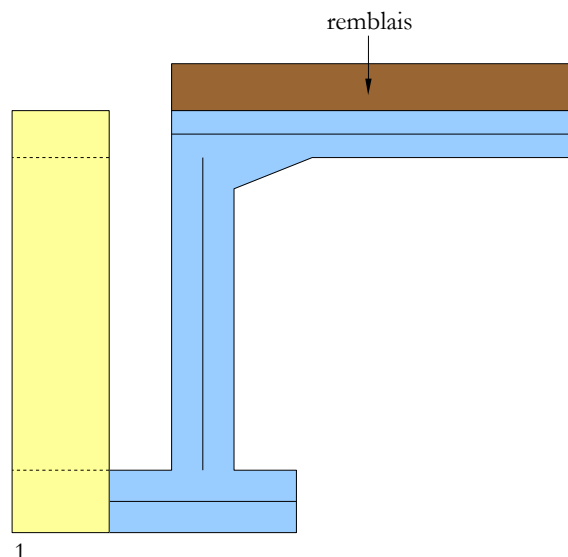


Figure 23 : Poussee unitaire

I.6.4 - Poussee du remblai - linéaire unitaire (PIPO/PICF)

Il s'agit d'un diagramme en « triangle » s'appliquant sur le piédroit et la semelle :

Partie s'exerçant sur la traverse

C'est une densité linéique constante de force horizontale et de couple représentant la résultante, sur la hauteur de la traverse.

Partie s'exerçant sur le piédroit

C'est une densité surfacique variable (trapézoïdale) de forces horizontales sur la hauteur concernée du piédroit (rappel : la modélisation du piédroit s'étend entre le nu inférieur de l'élément Traverse et le nu supérieur de l'élément Semelle).

Partie s'exerçant sur la semelle

C'est une densité linéique constante de force horizontale et de couple représentant la résultante sur la hauteur de semelle.

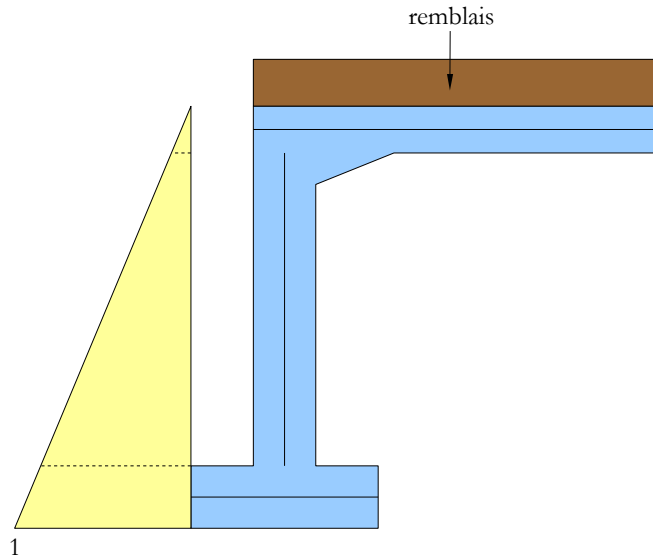


Figure 24 : Poussée triangulaire unitaire

I.7 - Tassements unitaires d'appui ou de semelle

Un tassement unitaire correspond à une dénivellation de valeur -1 selon l'axe Z global de l'ouvrage. Les tassements sont appliqués aux éléments suivants :

- Ligne d'appuis d'un PSID,
- Semelle superficielle d'un PIPO,
- Semelle de pieux/barrettes d'un PIPO.

I.8 - Précontrainte

Moyennant l'hypothèse d'une seule famille de câbles, les données relatives à la géométrie de la précontrainte fournies par l'utilisateur de CHAMOA se réduisent à :

- un seul tracé de câble pour une position transversale donnée,
- une liste d'ordonnées positionnant les différents câbles transversalement.

Le tracé de câble fourni est celui d'un câble dit de référence. Il correspond à un des câbles réels, celui le plus proche de l'axe de l'ouvrage.

Dans le cas des PSIDP de biais variable, le tracé du câble de référence permet, à l'aide de la listes des ordonnées des câbles réels ainsi que de la géométrie de la dalle, de déterminer le tracé des différents câbles réels

La précontrainte est prise en compte dans Aster sous forme externe c'est à dire comme un chargement. Ce chargement doit prendre en compte les pertes de précontrainte :

Dans Aster, il y a donc autant de chargements de précontrainte que de phases pour lesquelles on souhaite connaître l'action de la précontrainte.

Le calcul des pertes est effectué sur la base du tracé du câble moyen et des actions de poutre calculées sur ce câble moyen. Les effets sur chaque câble sont ensuite calculés par une simple division par le nombre total de câbles.

La méthode externe consiste pour chaque intervalle du maillage à déterminer des densités linéiques constantes de forces généralisées : forces verticales, forces horizontales, couples compatibles avec les torseurs d'efforts isostatiques déduits des pertes de précontrainte et de la tension initiale. Ensuite une répartition nodale du chargement ainsi obtenu est réalisée aux nœuds du maillage Aster concernés par le câble considéré.

I.9 - Retrait

Le retrait est appliqué exclusivement sur la traverse ou sur la dalle. Il s'agit d'un retrait global : transversal et longitudinal. Dans le cas d'un PI, le retrait est aussi appliqué partiellement aux piédroits pour que le retrait transversal ne soit pas exagérément bloqué. Dans le cas d'un PICF seul le retrait différentiel entre le radier et la traverse est appliqué.

Chapitre II - Charges variables fixes

Toutes les charges variables sont des charges appliquées sur une structure dont les modules d'élasticité sont les modules instantanés.

II.1 - Dilatation thermique unitaire

Un champ de déformation de membrane isotrope unitaire est appliqué à toute la dalle ou à la traverse. Dans le cas d'un PI une dilatation graduelle est appliquée au piédroit de haut en bas pour prendre en compte un continuum de température entre la traverse et le piédroit. Par ailleurs, toujours pour les PI, la dilatation est limitée à la valeur maximale d'écart de température entre éléments d'ouvrages fixée par l'Eurocode. En effet, seule la dilatation différentielle entre éléments est susceptible de créer des efforts.

II.2 - Gradient thermique unitaire

Un champ de courbure isotrope unitaire est appliqué à toute la dalle ou à la traverse. Il s'agit donc d'un gradient longitudinal et transversal.

II.3 - Vent sur écran - renversement unitaire

Une densité surfacique variable de forces verticales modélisant l'action de couple du vent et une densité surfacique constante de force horizontale sont appliqués, sur une bande longitudinale définie par 2 ordonnées définissant la largeur de longrine.

II.4 - Accident sur équipement

Cas d'un choc réparti

Une densité surfacique variable trapézoïdale de forces verticales prenant en compte l'action verticale et l'action de couple du choc et une densité surfacique constante de force horizontale sont appliqués sur une bande longitudinale définie par deux ordonnées définissant la largeur de longrine, une longueur de répartition longitudinale et une abscisse de positionnement longitudinal.

Ce chargement est appliqué successivement pour différentes abscisses de positionnement, tous les 1/4 de travée, par exemple. Un calcul de post-traitement détermine les effets enveloppes dus aux différents chargements.

Cas d'un choc ponctuel

Le point d'application du choc est défini par deux ordonnées définissant la largeur de longrine, une longueur de répartition longitudinale, par exemple la dimension longitudinale d'une roue, et une abscisse de positionnement longitudinal, une densité linéique variable de forces verticales prenant en compte l'action verticale et l'action de couple du choc et une densité linéique constante de force horizontale.

Ce chargement est appliqué successivement pour différentes abscisses de positionnement, tous les 1/4 de travée par exemple. Un calcul de post-traitement détermine les effets enveloppes dus aux différents chargements.

II.5 - Impact sur le remblai dû à une action mobile(PIPO/PICF)

Il s'agit du calcul de la poussée et du poids provoqués par l'impact d'un véhicule disposé immédiatement derrière le piédroit. Ce cas de charge ne s'applique qu'en l'absence de la dalle de transition. Il est appliqué indépendamment du chargement correspondant du tablier. Les deux effets celui de l'impact sur le remblai et du véhicule sur le tablier sont donc cumulés indépendamment l'un de l'autre.

La zone géométrique d'application de la poussée sur le piédroit en considérant une diffusion longitudinale et transversale de l'impact avec la profondeur est déterminée à partir de la largeur de l'impact et de sa position transversale.

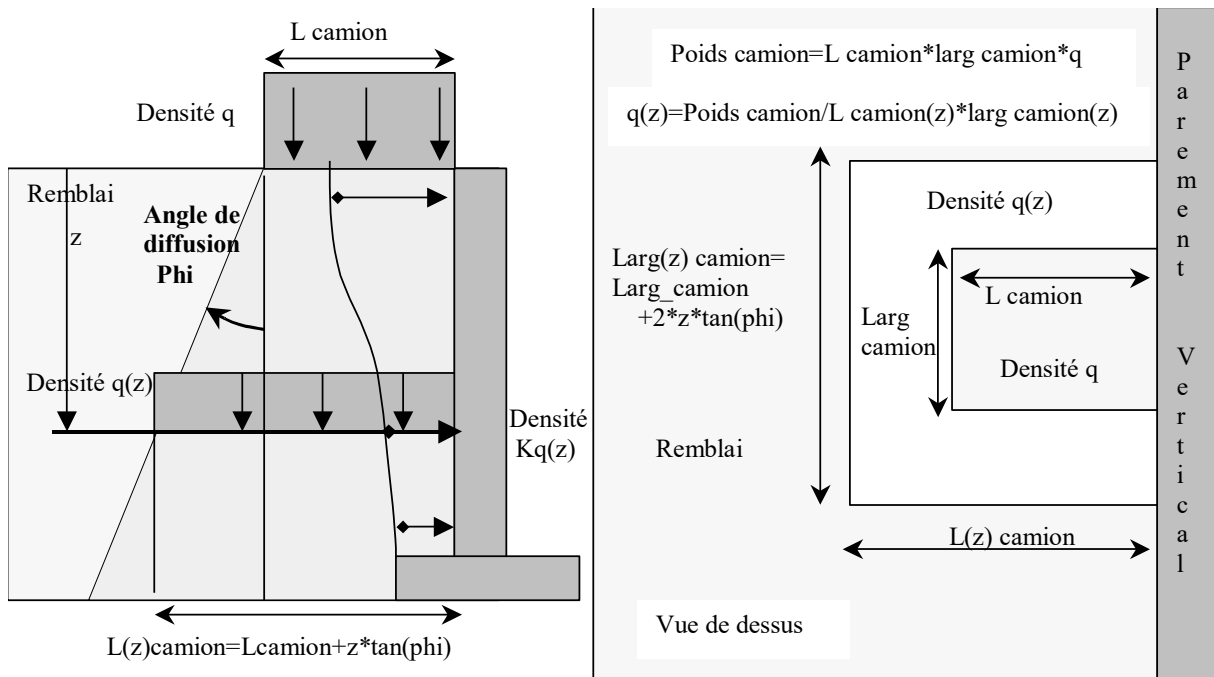


Figure 25 – Diffusion d'un impact dans le remblai selon l'EN1991-2§4.9

Transversalement

La position transversale de l'impact est déterminée par rapport à la voie chargée. Trois positions sont considérées : calé à droite, calé à gauche et centrée. Pour plusieurs charges mobiles, chaque impact de chaque véhicule est considéré séparément puis cumulé avec les autres impacts.

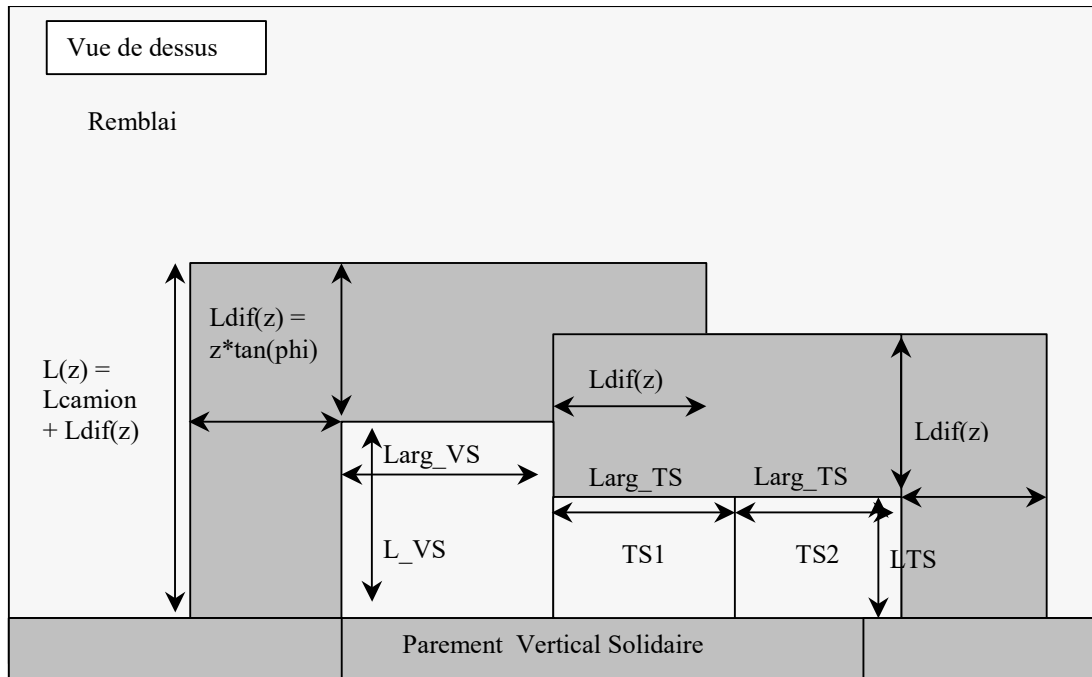


Figure 26 – Diffusion de plusieurs impacts dans le remblai selon l'EN1991-2.

Longitudinalement

On considère que le chargement est appliqué alors que la traverse est bloquée longitudinalement. Cela revient à supposer que le remblais technique opposé empêche les déplacements de la traverse.

Verticalement

Les poussées verticales concomitantes s'exerçant sur le talon sont appliquées.

Chapitre III - Charges variables mobiles

Il s'agit des charges d'exploitation s'exerçant sur le tablier. Les effets enveloppes sont calculés par déplacement des charges sur une surface d'influence définie sur le tablier et sur les dalles de transition éventuelles.

III.1 - Détermination des surfaces d'influence de plaque

Ce calcul s'appuie sur les principes suivants :

- les surfaces d'influences des efforts de plaque (moments, tranchants, normaux) s'obtiennent par combinaisons linéaires des surfaces d'influences des déplacements de plaques (flèche, rotations),
- les surfaces d'influence des déplacements de plaque (flèches, rotations) s'obtiennent par application du principe de réciprocité (Maxwell-Betti).

Les éléments finis utilisés par Chamoa_3D sont basés sur une formulation « en déplacement » c'est à dire que le résultat d'un calcul est constitué par le champ de déplacement aux noeuds du maillage. Le principe de la discrétisation par éléments finis permet alors d'obtenir la valeur d'un effet (déplacement ou effort) en un point d'étude quelconque, par interpolation des valeurs des déplacements aux 4 noeuds (éléments quadrangulaires) de la maille contenant le point d'étude. Les coefficients de l'interpolation dépendent de l'effet considéré ainsi que de la formulation de l'élément utilisé.

Dans le cas de CHAMOA_3D, on utilise un élément de plaque (DST) basé sur une cinématique de Reissner, les inconnues sont les déplacements membranaires et les déplacements de flexion : $w_i, \beta_{xi}, \beta_{yi}$.

La formulation de DST conduit à interpoler les déplacements sous la forme suivante :

- cas de la flèche :

$$\langle Fleche \rangle = \langle 4 \text{ Coefficients} \rangle \langle w_{1,2,3,4} \rangle^t$$

- cas des 2 rotations :

$$\langle Rotation \rangle = \langle 12 \text{ Coefficients} \rangle \langle w_1, \beta_{x1}, \beta_{y1}, w_4, \beta_{x4}, \beta_{y4} \rangle^t$$

Ceci conduit ensuite à interpoler les efforts de la façon suivante moyennant l'hypothèse d'isotropie du matériau qui permet de découpler effet de membrane et effet de flexion :

- cas des 3 moments et des 2 efforts tranchants :

$$\langle Effort \rangle = \langle 12 \text{ Coefficients} \rangle \langle w_1, \beta_{x1}, \beta_{y1}, w_4, \beta_{x4}, \beta_{y4} \rangle^t$$

- cas des 3 efforts normaux :

$$\langle Effort \rangle = \langle 8 \text{ Coefficients} \rangle \langle u_1, v_1, u_4, v_4 \rangle^t$$

L'application du principe de réciprocité permet de déterminer simplement le cas de charge générant la surface d'influence d'un déplacement en un nœud du maillage. Il suffit d'imposer

l'effort nodal « dual » du déplacement considéré au nœud considéré, la déformée sous ce cas de charge constituant alors la surface d'influence cherchée.

- l'effort dual de la flèche est la force verticale correspondante,
- l'effort dual de la rotation est le couple correspondant,
- l'effort dual du déplacement membranaire est la force horizontale correspondant.

Par linéarité de l'interpolation, la surface d'influence d'un effet (déplacement ou effort) en un point d'étude quelconque, s'obtient par combinaison linéaire des surfaces d'influence des déplacements adéquats : ceux intervenant dans l'interpolation de l'effet, aux 4 nœuds de la maille contenant le point d'étude. Ceci revient donc à appliquer un chargement constitué d'efforts nodaux adéquats : les efforts duaux des déplacements adéquats, aux 4 nœuds de la maille contenant le point d'étude. Par exploration du maillage, on associe une maille à chaque point d'étude même si le point d'étude est un nœud ou est situé sur une frontière entre 2 mailles.

Par exemple, dans le cas des moments on détermine la matrice IM (3x12) reliant les 12 déplacements de flexion des 4 nœuds de la maille contenant le point d'étude aux 3 moments.

$$\langle M_x \quad M_y \quad M_{xy} \rangle = \langle w_1, \beta_{x1}, \beta_{y1}, w_4, \beta_{x4}, \beta_{y4} \rangle IM^t$$

Puis on obtient les coefficients relatifs à un moment par une projection adéquate.

Par exemple pour M_x on obtient :

$$\langle \text{Coefs de } M_x \rangle = \langle 1, 0, 0 \rangle IM$$

$$M_x = \langle \text{Coefs de } M_x \rangle \langle w_1, \beta_{x1}, \beta_{y1}, w_4, \beta_{x4}, \beta_{y4} \rangle^t$$

Dans le cas des flèches, les coefficients résultent directement de la formulation de l'élément i.e. :

$$w = \langle \text{Coefs de } w \rangle \langle w_1, w_4 \rangle^t = \langle N_1, N_2, N_3, N_4 \rangle \langle w_1, w_4 \rangle^t$$

où N_i représente la valeur de la fonction d'interpolation définie dans l'espace paramétrique.

Dans le cas des surfaces d'influence de moments et de tranchants, lorsque le point d'étude est un appui, le pic de la surface d'influence générée selon la procédure décrite ci-dessus comporte un terme infini dû au caractère ponctuel de l'appui. On convient d'éliminer au mieux ce terme en assimilant la surface recherchée à une moyenne des surfaces en des points voisins de l'appui.

III.2 - Surfaces d'influence de réactions d'appui ponctuel

Le point d'étude est un appui et constitue donc un nœud du maillage. Le principe de réciprocité permet alors de déterminer simplement le cas de charge générant la surface d'influence. Il suffit d'imposer une valeur unitaire de l'effet « dual » (i.e. la flèche) au nœud considéré, la déformée sous ce cas de charge constituant alors la surface d'influence cherchée.

On modifie donc les conditions aux limites d'appui en imposant un déplacement vertical unitaire à l'appui (ponctuel) considéré.

III.3 - Surfaces d'influence de moment, efforts tranchants, efforts normaux totaux

On s'intéresse à une quantité de la forme :

$$E_{total} = \int_{coupe} E(s) ds$$

où E est l'effet considéré (moment, effort tranchant ou effort normal).

Cette quantité s'évalue numériquement par une formule de quadrature du type :

$$E_{total} = \sum_i \lambda_i E(s_i)$$

où les s_i sont les points d'intégration et λ_i les poids associés. La surface d'influence peut donc s'obtenir en appliquant une combinaison linéaire des chargements générant les surfaces d'influence des s_i .

III.4 - Surfaces d'influence de réactions d'appui totales de la ligne d'appui

On s'intéresse à une quantité de la forme :

$$R_{total} = \sum_i R(A_i)$$

où les A_i sont des appuis ponctuels.

La surface d'influence peut donc s'obtenir :

- soit en appliquant la somme des chargements générant les surfaces d'influence des réactions ponctuelles,
- soit en sommant les surfaces d'influence des différentes réactions ponctuelles.

III.5 - Surfaces d'influence des composantes du torseur d'efforts en pied de semelle

Chacune des 3 composantes de ce torseur (moment, effort vertical, effort horizontal) s'obtient par intégration des pressions normales ou tangentiels du sol sous la semelle. On peut se ramener à une combinaison linéaire des réactions d'appui verticales ou horizontales au droit des différents appuis ponctuels sous la semelle ressorts.

Les surfaces d'influence peuvent donc s'obtenir comme combinaisons linéaires des surfaces d'influence élémentaires.

III.6 - Surfaces d'influence de pression latérale du sol

La pression latérale du sol est reliée au déplacement latéral du pieu par la relation :

$$r(s) = K\delta(s)$$

où s est l'abscisse curviligne le long d'un pieu et K le module de réaction linéique du sol.

La surface d'influence de r peut donc se déduire directement de la surface d'influence de δ .

III.7 - Prise en compte du coefficient de Poisson

Deux calculs structuraux Code_Aster sont nécessaires :

- un calcul avec un coefficient de poisson non nul, qui servira de base à l'étude aux ELS.
- un calcul avec un coefficient de poisson nul, qui servira de base à l'étude aux ELU.

III.8 - Déplacement des charges sur la surface d'influence

Le déplacement des charges sur les surfaces d'influence est automatiquement réalisé par le composant Trafic.

Chapitre IV - Combinaisons réglementaires

Les combinaisons sont celles indiquées dans l'annexe de Chamoa_P.

A chaque Etat de structure calculé par Chamoa_3D correspondra un ensemble de combinaisons finales pour chaque état limite.

IV.1 - Actions de l'eau

Aux actions présentées dans l'annexe de Chamoa_P, s'ajoutent les actions de l'eau qui sont définies comme suit :

$$\gamma_{gw} \cdot \left(\sum_i (W_{wi} + P(W_{wi})) + P_{warchim} \right)$$

avec :

- γ_{gw} : coefficient de pondération appliqué aux effets de l'eau ;
- W_w : poids de l'eau ;
- $P(W_w)$: pression de l'eau sur les piédroits ;
- $P_{warchim}$: pression de l'eau sous la fondation.

Ces actions de l'eau s'intègrent dans les enveloppes des situations dont il est fait mention dans les définitions des différentes combinaisons d'actions données dans l'annexe Chamoa_P.

Chapitre V - Calcul des efforts de dimensionnement du ferrailage des plaques

V.1 - Sans efforts de membrane

Les moments de calcul et de justification des plaques sont calculés conformément à la généralisation de la méthode de Johansen aux ferrailages non orthogonaux (Cf « Chamoa3D - Ferrailage des plaques aux ELU »). Les résultats de cette généralisation sont très proches de ceux de l'annexe 12A du BPEL.

V.2 - Avec efforts de membrane

En ce qui concerne la prise en compte de l'effort de membrane dans les PSIDP, il s'agit de calculer des efforts qui conduisent à un ferrailage respectant les conditions de PSIDP-EL à savoir que les quantités d'acier obtenus longitudinalement et transversalement assurent l'équilibre selon les directions principales de sollicitation et perpendiculairement aux efforts longitudinaux (cf BPEL-EL page 81).

V.2.1 - Aciers orthogonaux

La démonstration du dernier paragraphe de l'annexe 12A assure que la condition d'équilibre est vérifiée quelle que soit la facette considérée en prenant comme moments ceux de l'annexe 12 - donc de « Johansen enveloppe » - et comme efforts de membrane les efforts de membrane élastiques concomitants.

V.2.2 - Aciers non orthogonaux

Aciers longitudinaux

Il est nécessaire que leur projection tensorielle selon l'axe principal de flexion longitudinale donne une quantité supérieure à celle nécessaire dans cette direction : $A_i \sin^2 \psi > A_x$.

Cette inéquation est vérifiée si les aciers sont orthogonaux (cf annexe 12 A), or le fait de les rendre non orthogonaux augmente la quantité d'acier A_i nécessaire. En effet les moments appliqués sont augmentés dans les directions de ferrailage du fait des formules de Johansen, comme par ailleurs l'effort normal reste constant, la condition ci-dessus est donc toujours vérifiée toutes choses égales par ailleurs.

Aciers transversaux

L'annexe 12A démontre que pour que la condition d'équilibre soit vérifiée il suffit que la projection tensorielle des aciers transversaux sur l'axe y_0 perpendiculaire à l'axe longitudinal donne une quantité supérieure à celle que l'on obtiendrait dans cette direction : $A_i \sin^2 \psi > A_{y_0}$. A_{y_0} est évalué avec un effort normal nul car la précontrainte s'exerce selon l'axe longitudinal.

Pour que cette condition soit vérifiée **il suffit que l'effort normal concomitant de calcul de A_t soit annulé** car alors A_t et A_{y_0} ne dépendent que du moment. La condition est donc nécessairement vérifiée puisque sous les moments l'équilibre est vérifié quelle que soit la facette considérée.

La 3^{ème} condition de PSIDP-EL relative à la projection des aciers sur l'axe principal de flexion transversale est également vérifiée puisque pour cet axe l'effort normal élastique concomitant est non nul et donc est favorable par rapport à un calcul sans sollicitation normale pour lequel l'équilibre est assuré (Cf. méthode « Johansen enveloppe » dans « Ferrailage des plaques aux ELU »).

Chapitre VI - Calcul des efforts de dimensionnement des ferraillements de renfort

Les aciers de renfort peuvent apparaître en 1ère ou 2ème nappe s'ils sont dirigés selon une des deux directions principales de ferraillement. C'est en particulier le cas des renforts d'angles pour les ferraillements « *parallele_parallele* » ou « *treillis_bord* » des PSID et des PIPO. C'est aussi le cas des renforts des chevêtres pour les ferraillements « *parallele_parallele* » des PSID et aussi le ferraillement des poutres de bord libre avec le ferraillement « *parallele_parallele* » ou « *treillis_bord* ».

Les aciers de renfort peuvent apparaître en troisième nappe. C'est le cas des chevêtres d'about pour un ferraillement « *treillis_bord* » et pour les renforts d'angle des traverses pour le ferraillement « *treillis_appuis* ». C'est également le cas des aciers de poutre de bord libre pour les ferraillements « *treillis_appuis* »

Ces configurations sont présentées en détail dans le document de Chamoa3D : principes de ferraillement.

Aciers de renfort en nappe 1 ou 2

Les sollicitations des points de la zone courante situés également dans la zone de renfort sont annulées et seules les sollicitations de la zone de renfort sont conservées. De ce fait les quantités d'acier calculées par Chamoa3D pour les points de la zone de renfort sont les quantités d'acier à la fois de renfort et courantes. Donc l'utilisateur doit prolonger les aciers courants - hors zone de renfort - dans les zones de renfort et compléter par des aciers de renfort le différentiel avec la quantité d'acier demandé par Chamoa3D.

Par exemple, soit Asc/ml la quantité d'acier transversal parallèle à la ligne d'appui en zone courante et la quantité Asr/ml la quantité correspondante du chevêtre d'about calculée par Chamoa3D. La quantité de renfort à placer dans le sera chevêtre sera $Asr-Asc$.

Aciers de renfort en nappe 3

Dans ce cas là, la zone comporte trois directions de ferraillement. Les sollicitations sont alors calculées de telle manière que la somme des moments projetés dans les directions principales soit supérieure aux moments principaux. Ces inéquations exprimées ici en moment sont en réalité des inéquations exprimées sur les quantités d'acier. Néanmoins en l'absence d'effort normal les deux formulations sont équivalentes.

Soient M_x et M_y les moments principaux appliqués. Après avoir calculé les sollicitations élastiques dans les directions des aciers 1, 2 et 3: M_1 , M_2 et M_3 , Chamoa3D projette ces sollicitations dans le repère principal de flexion x et y .

On obtient :

$$\begin{aligned} M_{px} &= M_1 \cos^2(\text{teta}_1) + M_2 \cos^2(\text{teta}_2) + M_3 \cos^2(\text{teta}_3) \\ M_{py} &= M_1 \sin^2(\text{teta}_1) + M_2 \sin^2(\text{teta}_2) + M_3 \sin^2(\text{teta}_3) \end{aligned}$$

où teta_i est l'angle que fait l'axe x principal avec l'acier i .

Pour que l'équilibre soit assuré il faut que $M_{px} > M_x$ et que $M_{py} > M_y$. Si ce n'est pas le cas il faut que les moments élastiques soient augmentés de $(M_x - M_{px})/\cos^2(\text{teta}_i)$ et $(M_y - M_{py})/\sin^2(\text{teta}_i)$.

On choisit dans chamoa3D de minimiser cette augmentation en choisissant les aciers i qui minimisent cet accroissement ce qui conduit à prendre un acier différent pour M_x et pour M_y . On se place en sécurité car une augmentation est prévue pour chaque acier traité alors qu'en tout seules deux augmentations sont nécessaires.

En présence d'effort normal, c'est l'effort normal élastique concomitant qui est appliqué pour le calcul du ferrailage. L'annulation de l'effort normal prévue pour les PSIDP avec 2 nappes d'acier, n'est pas nécessaire ici car au moins une des deux directions transversales est orthogonale à la précontrainte donc avec un effort normal nul.

Aciers de torsion des bords libres

Les aciers de torsion longitudinaux des bords libres sont calculés par Chamoa_3D séparément. Ils sont à placer en plus des aciers de flexion.

Chapitre VII - Calcul des efforts de dimensionnement des semelles superficielles

Ce chapitre présente le calcul spécifique des efforts RdM (N , T_y , M_z) dans les sections d'encastrement des patins et des talons sur les piédroits. Ces sections correspondent aux sections P/P' et T/T' représentées ci-dessus (cf. figure 26).

Ces efforts résultent du cumul :

- d'une part, des efforts directement fournis par Aster dans les sections d'étude particulières P/P' et T/T' suite au calcul général de la structure.
- d'autre part, des efforts supplémentaires induits par les pressions du sol sous la semelle, ces pressions générant un effort tranchant et un moment fléchissant dans les sections P/P' et T/T'. Ce sont précisément ces efforts dont le détail du calcul est fourni ci-après.

VII.1 - Détail des calculs des efforts T et M induits par les pressions du sol sous la semelle

Il convient de distinguer deux cas de figure :

- absence de décompression du sol sous la semelle ;
- décompression partielle du sol sous la semelle.

VII.1.1 - Absence de décompression du sol sous la semelle

Dans ce cas, le schéma de répartition des pressions du sol sous la semelle est semblable à celui-ci (par exemple) :

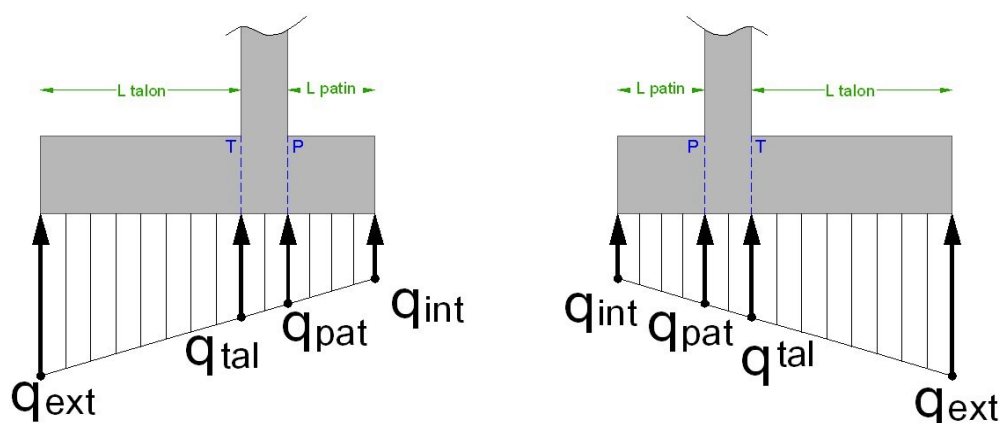


Figure 27 – Exemple de répartition des pressions du sol sous la semelle (gauche / droite) dans le cas d'une absence de décompression du sol

On peut alors déterminer les valeurs des contraintes extrêmes q_{ext} et q_{min} de la manière suivante :

Semelle gauche

$$q_{ext,g} = \frac{N_g}{B_g \cdot Larg_b} \left(1 - 6 \frac{e_g}{B_g} \right) \qquad q_{int,g} = \frac{N_g}{B_g \cdot Larg_b} \left(1 + 6 \frac{e_g}{B_g} \right)$$

Semelle droite

$$q_{ext,d} = \frac{N_d}{B_d \cdot Larg_b} \left(1 + 6 \frac{e_d}{B_d} \right) \qquad q_{int,d} = \frac{N_d}{B_d \cdot Larg_b} \left(1 - 6 \frac{e_d}{B_d} \right)$$

Semelle gauche ou droite

$$q_{pat} = q_{ext} + (q_{int} - q_{ext}) \left(1 - \frac{L_{patin}}{B} \right)$$

$$T_{2,tal} = \frac{Larg_b \cdot L_{talon}}{2} (q_{tal} + q_{ext})$$

$$M_{2,tal} = \pm \frac{Larg_b \cdot L_{talon}^2}{6} (q_{tal} + 2q_{ext}) \qquad M_{2,pat} = \pm \frac{Larg_b \cdot L_{patin}^2}{6} (q_{pat} + 2q_{int})$$

(- à gauche, + à droite)

(+ à gauche, - à droite)

VII.1.2 - Décompression partielle du sol sous la semelle

Dans ce cas, le schéma de répartition des pressions du sol sous la semelle est semblable à celui-ci :

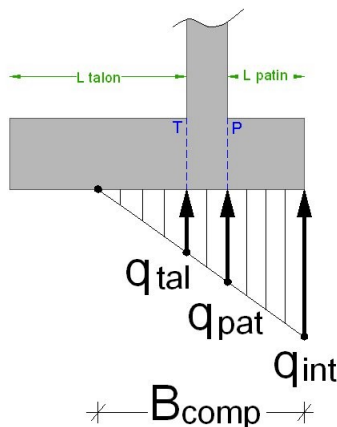


Figure 28 – Exemple de répartition des pressions du sol sous la semelle dans le cas d'une décompression partielle du sol

On peut déterminer les valeurs des contraintes extrêmes q_{ext} et q_{min} de la manière suivante :

*** Si l'excentrement $e = M/N$ est positif ($e > 0$) ***

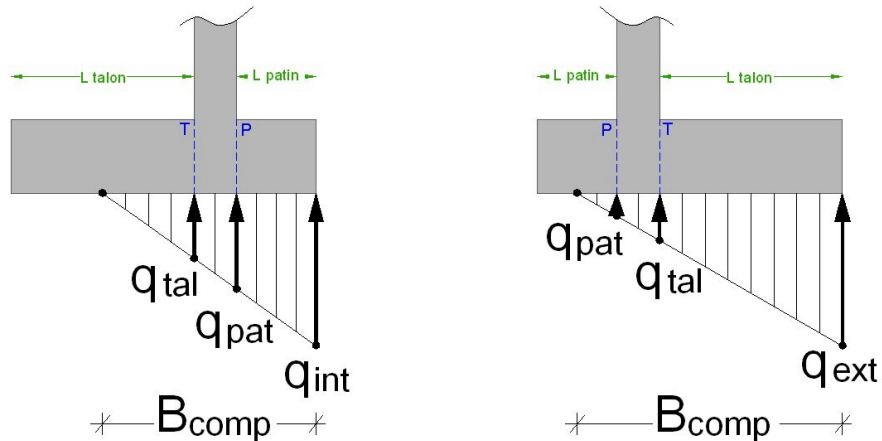


Figure 29 – Exemple de répartition des pressions du sol sous la semelle dans le cas d'une décompression partielle du sol, avec excentrement e positif (soit $M_z > 0$)

– semelle de gauche : $q_{int,g} = \frac{4}{3} \frac{N_g}{Larg_b (B_g - 2|e_g|)}$ et $q_{ext,g} = 0$

– semelle de droite : $q_{int,d} = 0$ et $q_{ext,d} = \frac{4}{3} \frac{N_d}{Larg_b (B_d - 2|e_d|)}$

Semelle de gauche

Si $B_{comp,g} > B_g - L_{talon,g}$:

$$q_{tal,g} = q_{int,g} \left(\frac{L_{talon,g} - B_g + B_{comp,g}}{B_{comp,g}} \right)$$

$$T_{2,tal,g} = \frac{q_{tal,g}}{2} (L_{talon,g} - B_g + B_{comp,g}) Larg_b$$

$$M_{2,tal,g} = -\frac{q_{tal,g}}{6} (L_{talon,g} - B_g + B_{comp,g})^2 Larg_b$$

Si $B_{comp,g} < B_g - L_{talon,g}$:

$$q_{tal,g} = 0 \quad T_{2,tal,g} = 0 \quad M_{2,tal,g} = 0$$

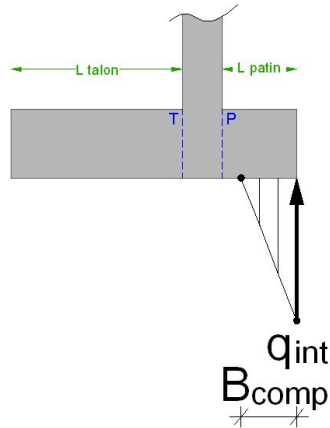
Si $B_{comp,g} > L_{patin,g}$:

$$q_{pat,g} = q_{int,g} \left(1 - \frac{L_{patin,g}}{B_{comp,g}} \right)$$

$$T_{2,pat,g} = \frac{Larg_b \cdot L_{patin,g}}{2} (q_{pat,g} + q_{int,g})$$

$$M_{2,pat,g} = \frac{Larg_b \cdot L_{patin,g}^2}{6} (q_{pat,g} + 2q_{int,g})$$

Si $B_{comp,g} < L_{patin,g}$:



$$q_{pat,g} = 0$$

$$T_{2,pat,g} = Larg_b \cdot B_{comp,g} \frac{q_{int,g}}{2}$$

$$M_{2,pat,g} = B_{comp,g} Larg_b \frac{q_{int,g}}{6} (3L_{patin,g} - B_{comp,g})$$

Semelle de droite

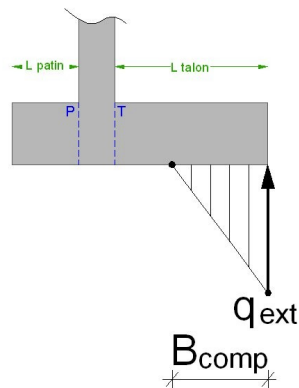
Si $B_{comp,d} > L_{talon,d}$:

$$q_{tal,d} = q_{ext,d} \left(1 - \frac{L_{talon,d}}{B_{comp,d}} \right)$$

$$T_{2,tal,d} = \frac{Larg_b \cdot L_{talon,d}}{2} (q_{tal,d} + q_{ext,d})$$

$$M_{2,tal,d} = \frac{Larg_b \cdot L_{talon,d}^2}{6} (q_{tal,d} + 2q_{ext,d})$$

Si $B_{comp,d} < L_{talon,d}$:



$$q_{tal,d} = 0$$

$$T_{2,tal,d} = Larg_b \cdot B_{comp,d} \frac{q_{ext,d}}{2}$$

$$M_{2,tal,d} = B_{comp,d} Larg_b \frac{q_{ext,d}}{6} (3L_{talon,d} - B_{comp,d})$$

Si $B_{comp,d} > B_d - L_{patin,d}$:

$$q_{pat,d} = q_{ext,d} \left(\frac{L_{patin,d} - B + B_{comp,d}}{B_{comp,d}} \right)$$

$$T_{2,pat,d} = \frac{q_{pat,d}}{2} (L_{patin,d} - B_d + B_{comp,d}) Larg_b$$

$$M_{2,pat,d} = -\frac{q_{pat,d}}{6} (L_{patin,d} - B_d + B_{comp,d})^2 Larg_b$$

Si $B_{comp,d} < B_d - L_{patin,d}$:

$$q_{pat,d} = 0 \quad T_{2,pat,d} = 0 \quad M_{2,pat,d} = 0$$

*** Si l'excentrement $e = M/N$ est négatif ($e < 0$) ***

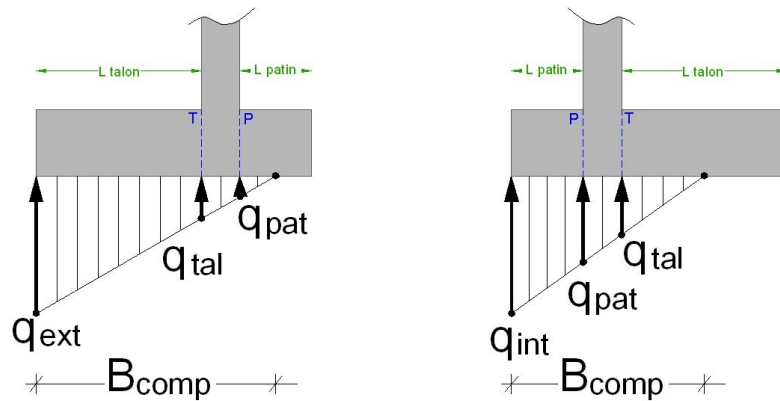


Figure 29 – Exemple de répartition des pressions du sol sous la semelle dans le cas d'une décompression partielle du sol, avec excentrement e négatif (soit $M_z < 0$)

- semelle de gauche : $q_{int,g} = 0$ et $q_{ext,g} = \frac{4}{3} \frac{N_g}{Larg_b (B_g - 2|e_g|)}$
- semelle de droite : $q_{int,d} = \frac{4}{3} \frac{N_d}{Larg_b (B_d - 2|e_d|)}$ et $q_{ext,d} = 0$

Semelle de gauche

Si $B_{comp,g} > L_{talon,g}$:

$$q_{tal,g} = q_{ext,g} \left(1 - \frac{L_{talon,g}}{B_{comp,g}} \right)$$

$$T_{2,tal,g} = \frac{Larg_b \cdot L_{talon,g}}{2} (q_{tal,g} + q_{ext,g})$$

$$M_{2,tal,g} = -\frac{Larg_b \cdot L_{talon,g}^2}{6} (q_{tal,g} + 2q_{ext,g})$$

Si $B_{comp,g} < L_{talon,g}$:

$$q_{tal,g} = 0$$

$$T_{2,tal,g} = Larg_b \cdot B_{comp,g} \frac{q_{ext,g}}{2}$$

$$M_{2,tal,g} = -Larg_b \frac{q_{ext,g}}{6} B_{comp,g} (3L_{talon,g} - B_{comp,g})$$

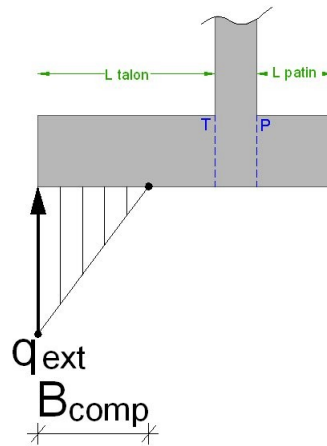
Si $B_{comp,g} > B_g - L_{patin,g}$:

$$q_{pat,g} = q_{ext,g} \left(\frac{L_{patin,g} - B_g + B_{comp,g}}{B_{comp,g}} \right)$$

$$T_{2,pat,g} = \frac{q_{pat,g}}{2} (L_{patin,g} - B_g + B_{comp,g}) Larg_b$$

$$M_{2,pat,g} = \frac{q_{pat,g}}{6} (L_{patin,g} - B_g + B_{comp,g})^2 \text{Larg}_b$$

Si $B_{comp,g} < B_g - L_{patin,g}$:



$$q_{pat,g} = 0 \quad T_{2,pat,g} = 0 \quad M_{2,pat,g} = 0$$

Semelle de droite

Si $B_{comp,d} > B_d - L_{talon,d}$:

$$q_{tal,d} = q_{int,d} \left(\frac{L_{talon,d} - B_d + B_{comp,d}}{B_{comp,d}} \right)$$

$$T_{2,tal,d} = \frac{q_{tal,d}}{2} (L_{talon,d} - B_d + B_{comp,d}) \text{Larg}_b$$

$$M_{2,tal,d} = \frac{q_{tal,d}}{6} (L_{talon,d} - B_d + B_{comp,d})^2 \text{Larg}_b$$

Si $B_{comp,d} < B_d - L_{talon,d}$:

$$q_{tal,d} = 0 \quad T_{2,tal,d} = 0 \quad M_{2,tal,d} = 0$$

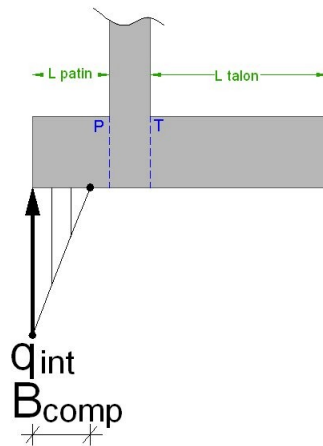
Si $B_{comp,d} > L_{patin,d}$:

$$q_{pat,d} = q_{int,d} \left(1 - \frac{L_{patin,d}}{B_{comp,d}} \right)$$

$$T_{2,pat,d} = \frac{\text{Larg}_b \cdot L_{patin,d}}{2} (q_{pat,d} + q_{int,d})$$

$$M_{2,pat,d} = -\frac{\text{Larg}_b \cdot L_{patin,d}^2}{6} (q_{pat,d} + 2q_{int,d})$$

Si $B_{comp,d} < L_{patin,d}$:



$$q_{pat,d} = 0$$

$$T_{2,pat,d} = Larg_b \cdot B_{comp,d} \frac{q_{int,d}}{2}$$

$$M_{2,pat,d} = -Larg_b B_{comp,d} \frac{q_{int,d}}{6} (3L_{patin,d} - B_{comp,d})$$

L'écriture de ces équations nous permet de vérifier que l'on a un parallèle total entre la semelle de gauche sous excentrement positif (resp. négatif) avec la semelle de droite sous excentrement négatif (resp. positif). Ainsi, nous pouvons écrire les formules plus synthétiques suivantes.

- **Semelle de gauche avec $e > 0$ ou semelle de droite avec $e < 0$**

Si $B_{comp} > B - L_{talon}$:

$$q_{tal} = q_{int} \left(\frac{L_{talon} - B + B_{comp}}{B_{comp}} \right)$$

$$T_{2,tal} = \frac{q_{tal}}{2} (L_{talon} - B + B_{comp}) Larg_b$$

$$M_{2,tal} = \pm \frac{q_{tal}}{6} (L_{talon} - B + B_{comp})^2 Larg_b \quad (- \text{ à gauche, } + \text{ à droite})$$

Si $B_{comp} < B - L_{talon}$:

$$q_{tal} = 0 \quad T_{2,tal} = 0 \quad M_{2,tal} = 0$$

Si $B_{comp} > L_{patin}$:

$$q_{pat} = q_{int} \left(1 - \frac{L_{patin}}{B_{comp}} \right)$$

$$T_{2,pat} = \frac{Larg_b \cdot L_{patin}}{2} (q_{pat} + q_{int})$$

$$M_{2,pat} = \pm \frac{Larg_b \cdot L_{patin}^2}{6} (q_{pat} + 2q_{int}) \quad (+ \text{ à gauche, } - \text{ à droite})$$

Si $B_{comp} < L_{patin}$:

$$q_{pat} = 0$$

$$T_{2,pat} = Larg_b \cdot B_{comp} \frac{q_{int}}{2}$$

$$M_{2,pat} = \pm B_{comp} Larg_b \frac{q_{int}}{6} (3L_{patin} - B_{comp}) \quad (+ \text{ à gauche, } - \text{ à droite})$$

Semelle de gauche avec $e < 0$ ou semelle de droite avec $e > 0$

Si $B_{comp} > L_{talon}$:

$$q_{tal} = q_{ext} \left(1 - \frac{L_{talon}}{B_{comp}} \right)$$

$$T_{2,tal} = \frac{Larg_b \cdot L_{talon}}{2} (q_{tal} + q_{ext})$$

$$M_{2,tal} = \pm \frac{Larg_b \cdot L_{talon}^2}{6} (q_{tal} + 2q_{ext}) \quad (- \text{ à gauche, } + \text{ à droite})$$

Si $B_{comp} < L_{talon}$:

$$q_{tal} = 0$$

$$T_{2,tal} = Larg_b \cdot B_{comp} \frac{q_{ext}}{2}$$

$$M_{2,tal} = \pm Larg_b \frac{q_{ext}}{6} B_{comp} (3L_{talon} - B_{comp}) \quad (- \text{ à gauche, } + \text{ à droite})$$

Si $B_{comp} > B - L_{patin}$:

$$q_{pat} = q_{ext} \left(\frac{L_{patin} - B + B_{comp}}{B_{comp}} \right)$$

$$T_{2,pat} = \frac{q_{pat}}{2} (L_{patin} - B + B_{comp}) Larg_b$$

$$M_{2,pat} = \pm \frac{q_{pat}}{6} (L_{patin} - B + B_{comp})^2 Larg_b \quad (+ \text{ à gauche, } - \text{ à droite})$$

Si $B_{comp} < B - L_{patin}$:

$$q_{pat} = 0 \quad T_{2,pat} = 0 \quad M_{2,pat} = 0$$

Chapitre VIII - Calcul des efforts de dimensionnement du ferrailage longitudinal des PSIDP sur appuis

Les efforts longitudinaux bruts calculés par Chamoa_3D sur appuis présentent des variations incompatibles avec une justification de non fissuration en BP. C'est pourquoi les points d'études correspondants sont dédoublés. Les points dédoublés sont justifiés en B.A.. Les points non dédoublés sont lissés transversalement pour une justification en BP. Bien entendu les aciers calculés en BA sont à mettre en place sur toute la largeur de la dalle.