

Chamoa_3D - Modélisation

CHaîne Algorithmique Modulaire Ouvrages d'Art

Octobre 2015



CHAMOA_3D - Modélisation

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 - Principes généraux de modélisation.....	9
Chapitre II - Prise en compte des liaisons.....	11
Chapitre III - Maillage des éléments surfaciques.....	12
III.1 - Élément dalle.....	12
III.2 - Élément traverse.....	17
III.3 - Autres éléments.....	20
Chapitre IV - Eléments de type poutre.....	28
IV.1 - Élément Pieu.....	28
IV.2 - Élément barrette.....	30
Chapitre V - Logique de maillage d'un ouvrage.....	31
V.1 - Ordre de maillage des éléments d'ouvrage.....	31
V.2 - Désignation des entités du maillage.....	31
V.3 - Nœuds et mailles.....	32
V.4 - Groupes de nœuds et groupes de mailles.....	32
V.5 - Les points d'étude.....	33

Chapitre I - Principes généraux de modélisation

Les calculs mettent en oeuvre la méthode des éléments finis et le logiciel utilisé est le code Aster d'EDF.

Tous les éléments de l'ouvrage sont modélisés sous la forme de structures minces avec prise en compte du cisaillement transversal. Aucune zone ne fait l'objet d'un modèle massif de type milieu continu. On utilise ainsi des éléments finis de structures :

- éléments de poutres tridimensionnels pour les éléments d'ouvrage linéiques (pieu/barrette),
- éléments de plaques épaisses pour les éléments d'ouvrage surfaciques.

Les liaisons externes de type sol sont modélisées à l'aide d'éléments finis « discrets » c'est à dire des éléments sans géométrie auxquels on affecte directement des matrices de rigidité :

- éléments discrets nodaux pour le sol latéral des pieux/barrettes,
- éléments discrets linéiques pour le sol sous semelle/radier et pour les appuis aux extrémités des dalles de transition.

La matrice de rigidité affectée à ces éléments correspond aux degrés de liberté en translation et éventuellement - cas des semelles uniquement - en rotation.

Les liaisons externes de type appareil d'appui sous dalle sont modélisées sous la forme d'éléments de poutre verticaux - un élément par appareil d'appui - de hauteur très petite dont le nœud inférieur est bloqué et le nœud supérieur est connecté à une zone surfacique du maillage de la dalle par une technique spécifique ayant vocation à réduire l'effet de pic sur les efforts dans la dalle au voisinage de la connexion.

Les liaisons internes entre éléments d'ouvrage sont modélisées en imposant des relations linéaires entre les degrés de libertés de nœuds voisins appartenant à des éléments d'ouvrage distincts à connecter. En pratique, ces relations représentent :

- soit des liaisons de solide rigide telles que des liaisons piédroit/traverse, piédroit/semelle, piédroit/radier, semelle/pieux, semelle/barrettes, corbeau/traverse ;
- soit une liaison articulation telle que la liaison dalle de transition/corbeau.

La surface moyenne des éléments d'ouvrage surfaciques présente toujours une forme trapézoïdale dont la direction des bases est dite longitudinale qui permet d'en réaliser le maillage sous la forme d'une grille. Cette grille n'est pas uniforme et présente des resserrements dans certaines zones spécifiques de l'élément d'ouvrage : abouts de dalle, lignes d'appui, bords libres, naissances de goussets,... En dehors de ces zones spécifiques, la grille présente une forme régulière dont la taille caractéristique - côté d'une maille - est paramétrée en fonction d'une épaisseur de référence de l'élément d'ouvrage : épaisseur de la nervure pour une dalle. Par exemple, on peut rechercher des mailles de côté égal à $\frac{1}{2}$ fois l'épaisseur de référence.

Le plan de maillage correspond en général au plan moyen des éléments d'ouvrage. Il y a cependant des cas particuliers :

- lorsque l'épaisseur de l'élément varie, le plan de maillage correspond à celui de la zone « principale » de l'élément :

- nervure d'une dalle
- nervure de la partie centrale (entre les goussets) d'une traverse
- dans le cas d'un élément semelle : semelle superficielle ou semelle de pieux/barrettes ou radier, le plan de maillage correspond à la face inférieure de l'élément qui est la zone de contact sol / structure.

Dans tous les cas, sauf pour le cas marginal de l'élément semelle de pieux/barrettes, lorsque le plan de maillage d'un élément ne correspond pas au plan moyen d'une zone de l'élément, les éléments finis associés à cette zone sont munis d'un excentrement correspondant à l'écart plan moyen/plan de maillage.

Chapitre II - Prise en compte des liaisons

Au sens de Chamoa_3D, un ouvrage est composé :

- d'éléments d'ouvrage : dalle, traverse, piédroit, ddt, semelle superficielle, radier, pieu, barrette, semelle pieu, semelle barrette,
- d'un élément de fixation : corbeau,
- de liaisons explicites : sol/semelle superficielle, sol/radier, sol latéral/pieu, sol latéral/barrette, sol/pied pieu, sol/pied barrette, ddt/corbeau,
- de liaisons implicites : traverse/piédroit, piédroit/semelle, piédroit/radier, semelle pieu/pieu, semelle barrette/barrette).

Les entités suivantes font l'objet d'éléments spécifiques dans le maillage :

- l'élément de fixation (corbeau), associé à la traverse
- la liaison explicite sol/semelle superficielle, associée à la semelle superficielle
- la liaison explicite sol/radier, associée au radier

Les liaisons suivantes ne font l'objet d'aucun élément spécifique dans le maillage :

- la liaison explicite sol latéral/pieu,
- la liaison explicite sol latéral/barrette,
- la liaison explicite sol/pied pieu,
- la liaison explicite sol/pied barrette,
- la liaison explicite ddt/corbeau,
- la liaison implicite traverse/piédroit,
- la liaison implicite piédroit/semelle,
- la liaison implicite piédroit/radier,
- la liaison implicite semelle pieu/pieu,
- la liaison implicite semelle barrette/barrette.

Néanmoins, les choix de prise en compte de certaines de ces liaisons dans la modélisation Aster - i.e. les choix des opérateurs Aster à utiliser dans le fichier de commandes - génèrent des contraintes sur le maillage :

- La modélisation de la liaison traverse/piédroit à l'aide de l'option LIAISON_COQUE impose la présence en vis à vis de 2 files de nœuds : 1 appartenant à la traverse, 1 appartenant au piédroit, dont les nœuds se correspondent 2 à 2.
- Même chose pour les liaisons piédroit/semelle et piédroit/radier.
- La modélisation de la liaison du type articulation ddt/corbeau - cas des PIPO/PICF - à l'aide de l'option LIAISON_GROUP impose la présence en vis à vis de 2 files de nœuds : 1 appartenant au corbeau, 1 appartenant à la ddt, dont les nœuds se correspondent 2 à 2. Ces 2 files sont en fait confondues géométriquement.
- La modélisation des liaisons sol latéral/pieu et sol latéral/barrette à l'aide d'éléments discrets nodaux : modélisation DIS_T avec des matrices de rigidité nodales K_T_D_N, impose la présence, au droit de chaque couche de sol, d'un nombre suffisant de nœuds dans le maillage du pieu afin de rendre compte au mieux de la présence du sol.

Chapitre III - Maillage des éléments surfaciques

Le maillage des éléments surfaciques ; dalle, traverse, piedroit, semelle superficielle, semelle pieu, semelle barrette, radier, ddt, est « régulier » au sens où les nœuds résultent d'un quadrillage constitué de lignes longitudinales toutes parallèles à l'axe de l'ouvrage et de lignes transversales de direction éventuellement variable.

Le caractère variable des lignes transversales ne concerne en réalité que la dalle et la traverse. Il résulte de la nécessité de prendre en compte un biais variable d'une ligne d'appui à l'autre, ou d'un piedroit à l'autre. Ainsi, la forme la plus générale des éléments finis plans est le trapèze de bases parallèles à l'axe de l'ouvrage.

Hormis certaines zones spécifiques bénéficiant d'un affinage, la finesse recherchée du maillage est telle que les côtés des mailles présentent une fraction de l'épaisseur de la dalle. Les valeurs les plus courantes sont $\frac{1}{2}$, 1 ou 2 fois l'épaisseur de la dalle selon la finesse recherchée .

III.1 - Élément dalle

Le bombement transversal de la dalle n'est pas pris en compte dans le maillage : celui-ci est intégré au chargement poids propre.

III.1.1 - Prise en compte des appareils d'appuis

Les appareils d'appui sont modélisés de façon simplifiée sous la forme d'éléments 1D dont la raideur est calculée à partir des caractéristiques des appuis.

Afin de préserver la régularité du maillage, le quadrillage comporte nécessairement des lignes longitudinales correspondant aux positions transversales distinctes des appareils d'appui.

Les positions des appareils d'appui étant des données fournies par l'utilisateur, elles peuvent conduire à des configurations inadmissibles : certaines lignes longitudinales associées à ces positions peuvent être extrêmement proches les unes des autres et conduire à des tailles d'éléments finis exagérément petites.

On prend alors la convention suivante : si la distance entre 2 lignes longitudinales est inférieure à $\frac{1}{5}$ de l'épaisseur de la nervure de la dalle - les appuis sont toujours positionnés sous la nervure - on les confond en les disposant sur une ligne longitudinale moyenne.

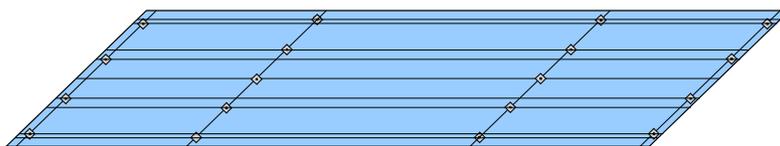


Figure 1 –Dalle de biais constant

III.1.2 - Prise en compte des joues/encorbellements et des chanfreins

Les coupes transversales des dalles sont typifiées :

- dalle rectangulaire,
- dalle avec encorbellements (non nécessairement symétriques),
- dalle avec chanfreins (non nécessairement symétriques).

Hormis pour le type « dalle rectangulaire », les coupes présentent des zones latérales spécifiques :

- joue et encorbellement pour le type dalle avec encorbellement,
- chanfrein pour le type dalle avec chanfrein.

De façon à pouvoir traiter spécifiquement les mailles et éléments finis modélisant ces zones latérales, leurs limites transversales constituent des lignes longitudinales du maillage.

La coupe transversale de chacune de ces zones latérales présente une forme de trapèze. On les transforme en rectangle « équivalent » au sens suivant :

- le rectangle à la même largeur et la même section, ce qui détermine son épaisseur,
- le rectangle a même inertie par rapport au plan de la surface moyenne de la nervure, ce qui détermine un excentrement par rapport à ce même plan.

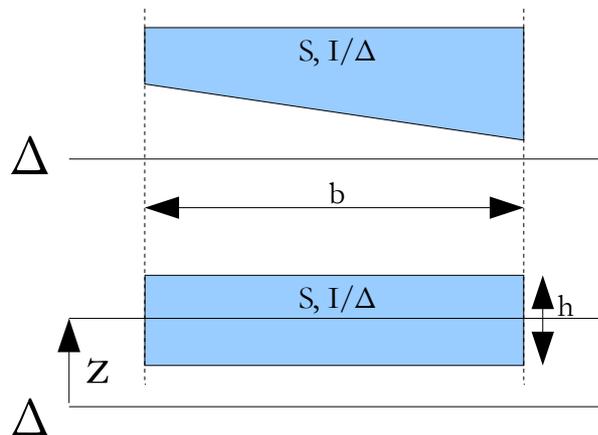


Figure 2 – Encorbellements

Equivalence en aire :

$$bh = S$$

Equivalence en inertie :

$$\frac{bh^3}{12} + bh.z^2 = I/\Delta$$

En général, ces zones sont donc maillées :

- en suivant la règle générale fixée plus haut (1/2 épaisseur), mais en considérant l'épaisseur équivalente ; on impose néanmoins un minimum de 2 files longitudinales de mailles afin d'obtenir une file de nœuds à l'intérieur de la zone ;
- en les excentrant géométriquement par rapport au plan de la surface moyenne de la nervure.

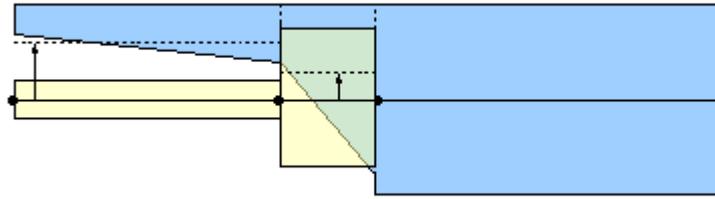


Figure 3 : Dalle avec encorbellement

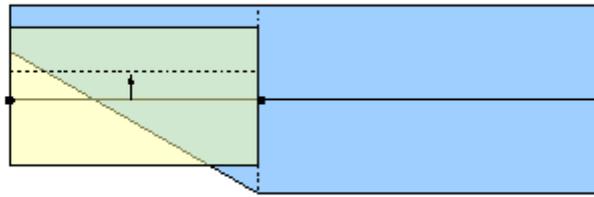


Figure 4 :Dalle avec chanfrein

Dans le cas du type dalle avec chanfreins, lorsque la largeur du chanfrein est faible, on applique une disposition particulière, notamment afin de prendre en compte les phénomènes de bords libres.

La mise en oeuvre des excentrement se fait de la façon suivante :

- au niveau du maillage : au droit du « saut » géométrique, on a 2 files de nœuds dont les projections sur le plan moyen de la nervure sont confondues
- au niveau de la modélisation Aster, on utilise l'opérateur LIAISON_GROUP permettant d'introduire une relation de solide rigide pour chaque couple de nœuds en vis à vis, en invoquant les 2 files de nœuds précédentes.

Remarques :

- L'utilisation de mailles non excentrées géométriquement, auxquelles on applique une formulation de plaque excentrée est possible dans Aster mais :
 - cette possibilité n'existe que pour les éléments DST mais pas pour COQUE_3D,
 - la formulation de l'élément DST excentré est lourde (couplage membrane/flexion) ce qui complexifie les calculs d'efforts ou de chargements générateurs des SI de façon significative.
- les relations de solide rigide peuvent aussi être introduites en créant des mailles spécifiques auxquelles on applique l'opérateur AFFE_CHAR_MECA / LIAISON_SOLIDE.

III.1.3 - Prise en compte des goussets des Psid généralisés

Longitudinalement, on considère que la dalle comporte 3 types de zones :

- zone centrale,
- zone gousset,
- zone sur appuis.

On adopte les conventions suivantes :

- la zone de gousset est considérée comme une plaque d'épaisseur constante : moyenne des épaisseurs réelles aux sections extrémités du gousset.
- la zone sur appuis est considérée comme une plaque d'épaisseur constante : l'épaisseur du gousset à sa section d'appuis.
- les 3 zones sont maillées dans le même plan, celui de la surface moyenne de la zone courante. On néglige donc l'effet de voûte apporté par l'inclinaison de la surface moyenne réelle du gousset.

Longitudinalement, les principes de maillage sont les suivants :

- la zone d'appuis comporte 2 files transversale de mailles de façon à faire apparaître une file transversale (centrale) de nœuds positionnée dans le plan de la surface moyenne de la ligne d'appuis.
- la zone de gousset se divise longitudinalement en 2 zones symétriques. Chacune de ces 2 zones est constituée d'un maillage s'affinant aux approches respectives de la section d'encastrement et de la section de naissance du gousset : ce maillage comporte 3 files transversales de mailles de largeur (en fraction de l'épaisseur équivalente du gousset) : $3/6$, $2/6$, $1/6$.
- la zone courante comporte à chacune de ses extrémités une zone de longueur 1 épaisseur, constituée d'un maillage s'affinant à l'approche de la section de naissance du gousset : ce maillage comporte 3 files transversales de mailles de largeur (en fraction de l'épaisseur de la zone courante) : $3/6$, $2/6$, $1/6$.
- le reste de la zone courante respecte au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée.

Transversalement, le chanfrein du gousset est ignoré au niveau du maillage.

III.1.4 - Prise en compte des dalles courbes

On considère des lignes de maillage longitudinales parallèles à l'axe de l'ouvrage. Les principes de maillage vus ci-dessus s'appliquent dans l'espace curviligne défini par l'axe de l'ouvrage.

III.1.5 - Prise en compte des phénomènes de bords libres

Certains efforts de plaque tels que l'effort tranchant, moment de torsion peuvent présenter de fortes valeurs au voisinage des bords libres de la dalle sur une zone s'étendant sur une longueur d'environ 1 à 2 épaisseurs de dalle. Afin de rendre compte au mieux de ce phénomène, on peut convenir d'affiner le maillage de la dalle au droit de ces zones : compte-tenu de la « régularité » du maillage, cet affinage revient à densifier progressivement les lignes longitudinales à l'approche des bords libres.

La nécessité d'affiner ou pas le maillage au voisinage des bords libres se discute suivant le type de la coupe transversale de la dalle.

Pour le type dalle rectangulaire, on procède à un affinage.

Pour le type dalle avec encorbellements, il ne paraît pas utile de procéder à un affinage, le passage de la matière au vide s'effectuant progressivement.

Pour le type dalle avec chanfreins, on prend la convention suivante :

- si la largeur du chanfrein est « petite » ($D \leq E-H$), on assimile le type de coupe transversale au type « dalle rectangulaire » :
 - on considère que la nervure s'étend jusqu'à l'extrémité du chanfrein (mais on fait l'ajustement nécessaire au niveau du chargement de poids propre)
 - on affine le maillage au voisinage du bord libre
- sinon, on n'affine pas le maillage.

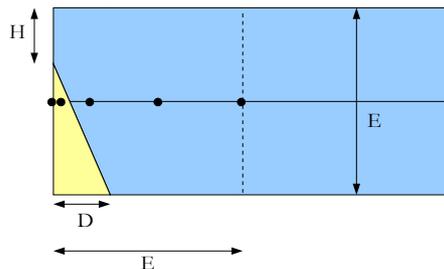


Figure 5 : Traverse avec chanfrein étroit

On convient de réaliser l'affinage transversal du maillage sur une largeur de l'ordre de l'épaisseur. La règle d'affinage suivante est appliquée : on crée 4 files longitudinales de mailles de largeurs successives (en fraction de l'épaisseur de nervure) : 4/10, 3/10, 2/10, 1/10.

III.1.6 - Conséquences sur le maillage des autres éléments

Dans le cas des PSID, le corbeau n'est pas modélisé car la culée n'est pas modélisée. Par suite, le maillage de la dalle de transition est indépendant de celui de la dalle.

III.1.7 - Sous ensembles du maillage

Certains sous-ensembles du maillage font l'objet de groupes de mailles GM et/ou de groupes de nœuds GN. Ces regroupements permettent d'invoquer simplement (par le numéro du GM ou du GN) ces sous-ensembles dans le fichier de commandes Aster.

On prévoit les groupes suivants :

- GM de toute la dalle
- GM des joues
- GM des encorbellements
- GM des chanfreins
- GM de la nervure
- GN de toute la dalle
- GN de la liaison nervure/joue
- GN de la liaison joue/nervure
- Gnde la liaison joue/encorbellement

- GN de la liaison encorbellement/joue
- GN de la liaison nervure/chanfrein
- GN de la liaison chanfrein/nervure
- GN de tous les appuis
- GN des lignes d'appui
- GN des appuis.

III.2 - Élément traverse

Le bombement transversal de la traverse n'est pas pris en compte dans le maillage : celui-ci est intégré au chargement poids propre.

Le dévers transversal de la traverse est négligé

III.2.1 - Prise en compte des chanfreins

Les coupes transversales des traverses sont typifiées :

- dalle rectangulaire
- dalle avec chanfreins (non nécessairement symétriques)
- Les chanfreins sont toujours modérés ($D \leq E-H$ cf. §4.1.3.3).

Remarque : Seule la zone centrale de la traverse (nervure) s'épaissit à l'approche des piédroits (goussets). La face latérale correspondant à l'épaississement de la nervure peut être soit verticale soit inclinée en prolongeant l'inclinaison des chanfreins. Par suite, l'ajustement de poids propre à effectuer doit prendre en compte cette spécificité.

On applique les principes donnés dans le cas de l'élément Dalle pour les types correspondants.

III.2.2 - Prise en compte des goussets et des piédroits

Longitudinalement, on considère que la traverse comporte 3 zones :

- zone courante,
- zone des goussets,
- zone des piédroits.

On adopte les conventions suivantes :

- la totalité de la surface en plan de la traverse est maillée, c'est à dire entre les nus arrière des 2 piédroits, ce qui facilite la mise en oeuvre des charges sur le tablier.
- la zone de gousset est considérée comme une plaque d'épaisseur constante : moyenne des épaisseurs réelles aux sections extrémités du gousset.
- la zone de piédroit est considérée comme une plaque d'épaisseur constante : l'épaisseur du gousset à sa section d'encastrement sur le piédroit.
- les 3 zones sont maillées dans le même plan, celui de la surface moyenne de la zone courante. On néglige donc l'effet de voûte apporté par l'inclinaison de la surface moyenne réelle du gousset.

Longitudinalement, les principes de maillage sont les suivants :

- la zone de piédroit comporte 2 files transversales de mailles de façon à faire apparaître une file transversale (centrale) de nœuds positionnée dans le plan de la surface moyenne du piédroit.
- la zone de gousset se divise longitudinalement en 2 zones symétriques. Chacune de ces 2 zones est constituée d'un maillage s'affinant aux approches respectives de la section d'encastrement avec le piédroit et de la section de naissance du gousset : ce maillage comporte 3 files transversales de mailles de largeur (en fraction de l'épaisseur équivalente du gousset) : 3/6, 2/6, 1/6.
- la zone courante comporte à chacune de ses extrémités une zone de longueur 1 épaisseur, constituée d'un maillage s'affinant à l'approche de la section de naissance du gousset : ce maillage comporte 3 files transversales de mailles de largeur (en fraction de l'épaisseur de la zone courante) : 3/6, 2/6, 1/6.
- le reste de la zone courante respecte au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée.

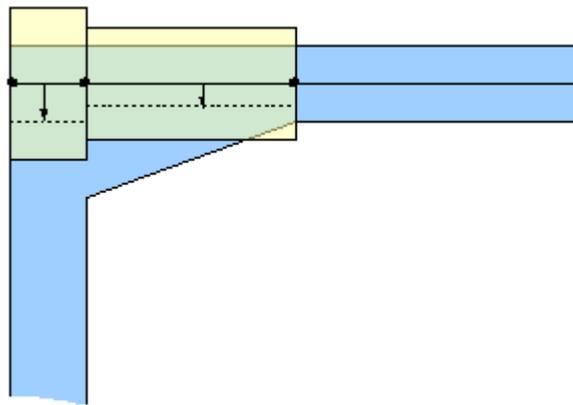


Figure 6 : Maillage longitudinal d'une traverse

III.2.3 - Prise en compte des corbeaux

On considère que la traverse située dans la zone de piédroit se prolonge par une zone rigide, représentant l'élément de fixation corbeau, de façon excentrée dans le plan de maillage de la traverse. Ce prolongement s'étend :

- longitudinalement, du nu arrière du piédroit jusqu'à la position de l'axe de fixation de la ddt sur le corbeau ;
- transversalement, sur une partie de la largeur de la traverse c'est à dire sur la largeur de la dalle de transition associée.

Au niveau du maillage, ce prolongement est matérialisé simplement par une file de nœuds disposée :

- au droit de l'articulation ddt/corbeau,
- sur la largeur de la dalle de transition,

et compatible avec la 1ère file de nœuds de la zone piédroit du maillage de la traverse (c'est à dire qu'il y a correspondance des nœuds 2 à 2), de façon à modéliser la liaison rigide à l'aide de l'option LIAISON_GROUP.

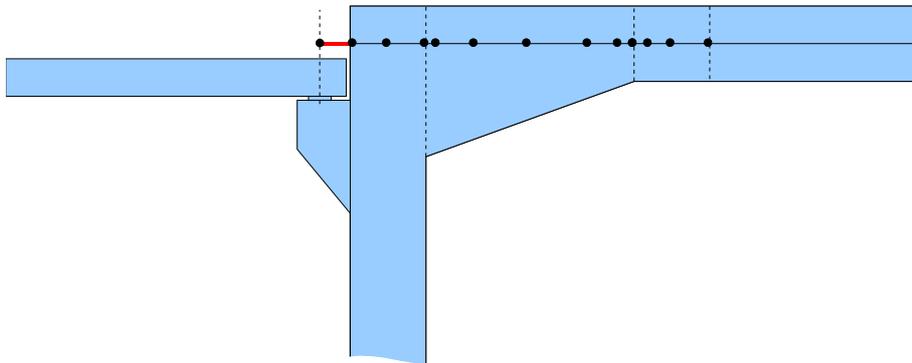


Figure 7 : Extension de la traverse par un corbeau (coupe longitudinale)

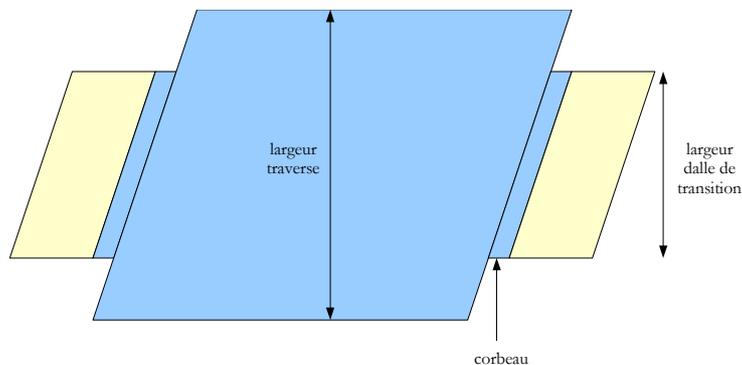


Figure 8 : Extension de la traverse par un corbeau (vue en plan)

III.2.4 - Prise en compte des dalles de transition

La présence ou non de dalles de transition est précisée par le profil de l'ouvrage.

La largeur des dalles de transition est déterminée en fonction du profil en travers de la chaussée portée. Cette largeur peut donc être différente de celle de la traverse. Les 2 positions transversales limites de la dalle de transition imposent donc la présence de 2 lignes longitudinales dans le quadrillage de la traverse de la même manière que les appareils d'appui imposent des lignes longitudinales pour le quadrillage de la dalle.

Longitudinalement, seule la zone de la dalle de transition s'étendant entre sa fixation (articulation) sur le corbeau et son extrémité simplement appuyée est maillée.

III.2.5 - Prise en compte des phénomènes de bords libres

Les coupes transversales des traverses sont typifiées dans le Modèle de données de ponts types de Chamoa :

- dalle rectangulaire,
- dalle avec chanfreins (non nécessairement symétriques).

On applique les principes donnés dans le cas de l'élément Dalle pour les types correspondants.

III.2.6 - Impact sur le maillage des autres éléments

Le maillage transversal de la traverse impacte le maillage transversal des éléments suivants : dalle de transition, piédroit, semelle superficielle, semelle pieu, semelle barrette, radier.

En effet, comme signalé plus haut, certaines liaisons sont modélisées à l'aide des options LIAISON_COQUE (traverse/piédroit, piédroit/semelle, piédroit/radier) et LIAISON_GROUP (ddt/corbeau), ce qui conduit, au niveau du maillage, à disposer en vis à vis 2 files de nœuds (appartenant chacun à un élément d'ouvrage) dont les nœuds se correspondent 2 à 2. Parfois, ces nœuds sont géométriquement confondus. Par conséquent, le maillage transversal de la traverse se répercute sur le maillage des éléments suivants :

- dalle de transition,
- piédroit,
- semelle superficielle,
- semelle pieu,
- semelle barrette,
- radier.

III.2.7 - Sous ensembles du maillage

On prévoit les groupes suivants :

- GM de toute la traverse,
- GM des chanfreins dans les zones goussets,
- GM des chanfreins dans la zone courante,
- GM de la nervure dans les zones goussets,
- GM de la nervure dans la zone courante,
- GM des zones piédroits,
- GN de toute la traverse,
- GN de la liaison nervure/chanfrein,
- GN de la liaison chanfrein/nervure,
- GN des liaisons implicites traverse/piédroit,
- GN des liaisons implicites corbeau/ddt,
- GN des extrémités traverse.

III.3 - Autres éléments

III.3.1 - Elément dalle de transition

Les dalles de transition peuvent être prises en compte, les charges d'exploitation appliquées sur l'ouvrage sont alors appliquées aux dalles de transition, celles-ci sont donc

dimensionnées en conséquence et le ferrailage peut être plus important que le ferrailage type des anciens dossiers pilotes qui correspondait à un dimensionnement sous charge civiles A et B. Puisque les dalles de transition sont dimensionnées en fonction du niveau de charges, il n'y a pas lieu dans ce cas de faire un calcul avec une dalle de transition fissurée, comme c'est le cas habituellement pour les culées de ponts.

Les dalles de transition sont excentrées par rapport à l'axe du piédroit en tenant compte de la position d'appui de la dalle de transition sur le corbeau d'appui fixé sur le piédroit. Cela induit un moment de flexion accru en tête de piédroit et un effort de traction dans la traverse non négligeable, mais par contre diminue le moment en travée. Il n'est pas souhaitable de dimensionner la dalle de transition pour soulager la traverse. Par ailleurs, si la dalle de transition est bien appuyée ponctuellement sur un côté, elle repose sur la terre à son autre extrémité sur une certaine longueur difficile à estimer précisément. **C'est pourquoi la dalle de transition a été modélisée avec une longueur réduite dans un rapport de 0,80 pour ne pas surestimer son effet et être plus proche de son comportement réel**

Dans le cas d'un PSID, le maillage de la dalle de transition est indépendant de celui de la dalle et respecte au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée.

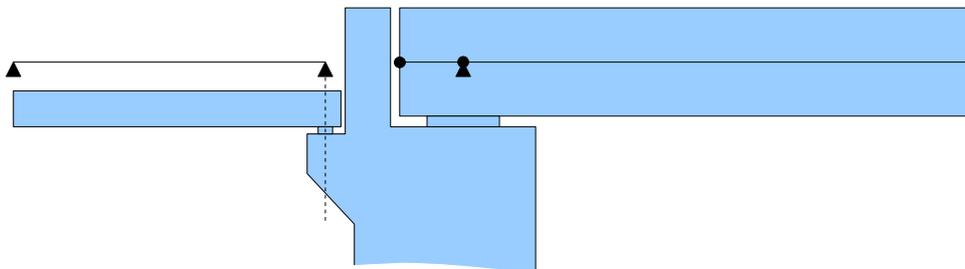


Figure 9 :Dalle de transition d'un PSID

Dans le cas d'un PIPO/PICF, le maillage transversal de la dalle de transition a été décrit plus haut. Le maillage longitudinal respecte au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée.

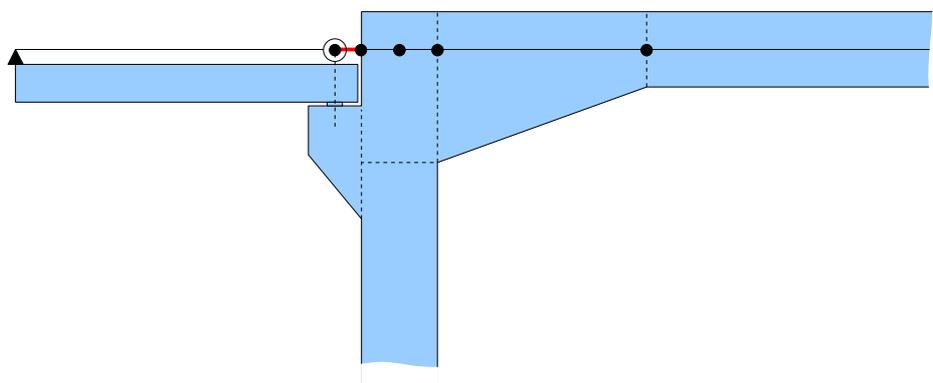


Figure 10 :Dalle de transition d'un PIPO/PICF

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de toute la dalle de transition,

- GN de toute la dalle de transition,
- Si PSID : GN des lignes d'appui simple,
- Si PIPO/PICF :
 - GN de la ligne d'appui simple,
 - GN de la liaison implicite ddt/corbeau.

III.3.2 - Élément piédroit

Le piédroit ne prend pas en compte le dévers transversal de la traverse, celui-ci étant négligé.

Dans le cas d'un PICF, seule la zone de piédroit s'étendant entre les sections de naissance des goussets supérieur et inférieur est maillée.

Dans le cas d'un PIPO, seule la zone de piédroit s'étendant entre la section de naissance du gousset supérieur et la face supérieure de la semelle superficielle (resp. semelle pieu) est maillée.

En effet :

- la zone de piédroit située au niveau du gousset supérieur est prise en compte dans le maillage de la traverse.
- la zone de piédroit située au niveau du gousset inférieur est prise en compte dans le maillage du radier.
- la zone de piédroit située au niveau de la semelle superficielle (resp. semelle pieu ou semelle barrette) est prise en compte dans le maillage de la semelle superficielle (resp. semelle pieu ou semelle barrette).

Le maillage transversal du piédroit a été décrit plus haut.

Le maillage longitudinal respecte au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée.

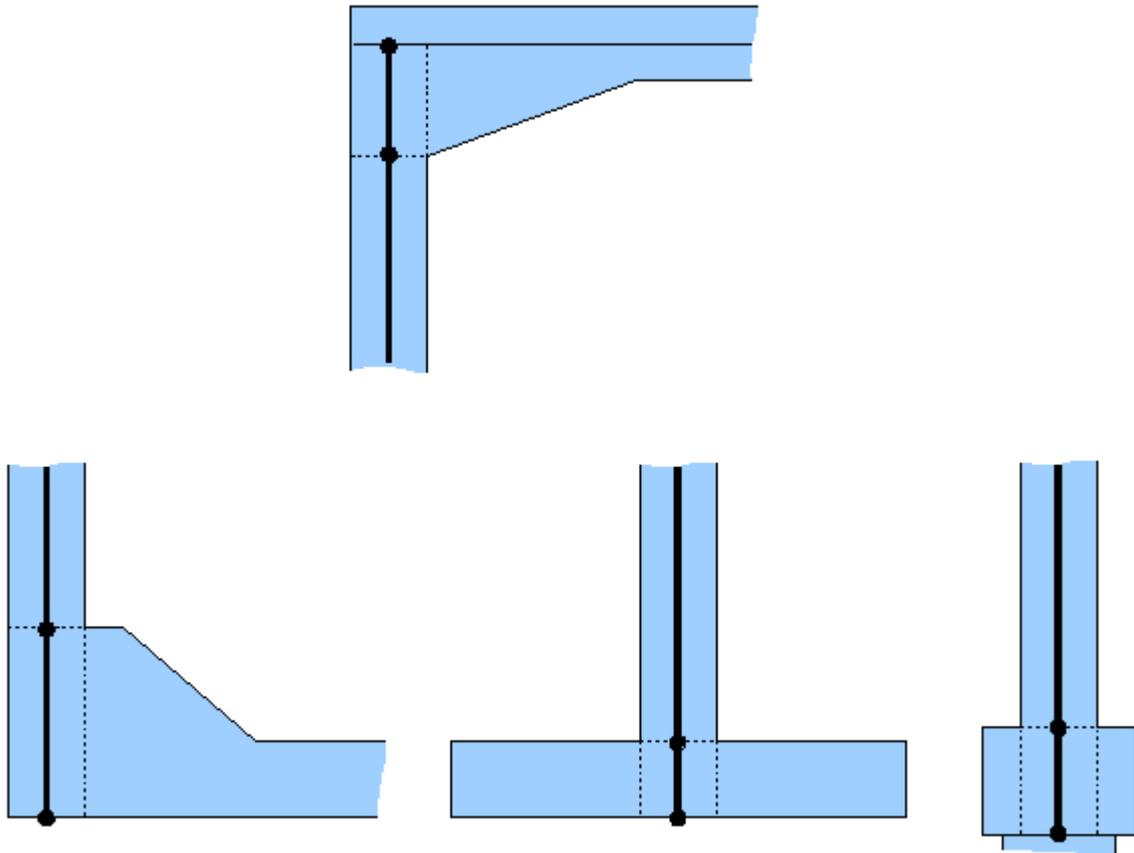


Figure 11:Piédroits

Remarque : le maillage du piédroit est orthogonal (mailles rectangulaires)

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de tout le piédroit,
- GN de la liaison implicite piédroit/traverse,
- GN de la liaison implicite piédroit/semelle ou piédroit/radier.

III.3.3 - Élément semelle superficielle

Le maillage transversal de la semelle superficielle a été décrit plus haut.

Le maillage longitudinal comporte 3 zones : zone de talon, zone de piédroit, zone de patin.

La zone de talon et la zone de patin sont maillées de façon à respecter au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée, et comporte chacune au moins 2 files transversales de mailles.

La zone de piédroit est constituée de 2 files transversales de mailles de façon à introduire une file transversale (centrale) de nœuds positionnée dans le plan de la surface moyenne du piédroit.

La prise en compte de la liaison avec le sol s'effectue de la façon suivante :

Une seule file d'éléments discrets est disposée sous la semelle au niveau de l'axe du piedroit. Ainsi, la modélisation complète de la semelle n'est utile que pour la modélisation de charges de type poids des terres ou autres. Les éléments discrets utilisés possèdent des degrés de liberté en translation et en rotation.

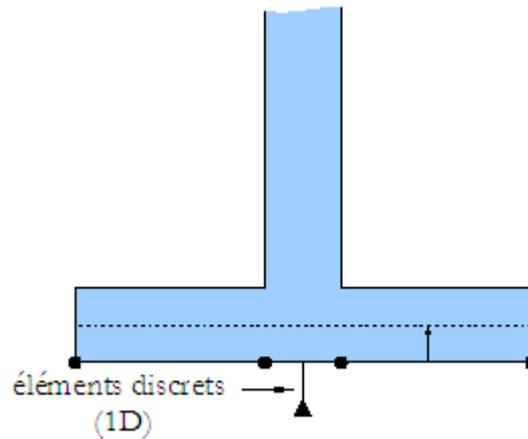


Figure 12: Semelle superficielle

Remarque : le maillage de la semelle superficielle orthogonal (mailles rectangulaires).

La matrice de rigidité affectée à ces éléments prend en compte l'excentrement possible entre l'axe de la semelle et l'axe du piedroit :

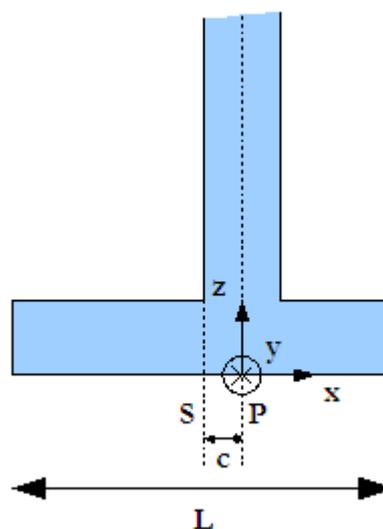


Figure 13: Excentrement de l'axe de la semelle par rapport à l'axe du piedroit

Dans le repère ci-dessus, la matrice de rigidité à la forme suivante :

où k_t est la raideur en translation.

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de toute la semelle superficielle,
- GM des ressorts (mailles 1D),
- GN de toute la semelle superficielle,
- GN de la liaison implicite semelle/piédroit,
- GN des têtes de ressorts,
- GN des pieds de ressorts.

III.3.4 - Élément semelle pieu

Le maillage transversal de la semelle pieu a été décrit plus haut.

Le maillage longitudinal est constitué de 2 files transversales de mailles de façon à introduire une file transversale (centrale) de nœuds positionnée dans le plan de la surface moyenne du piédroit. Les axes des pieux auxquels la semelle pieu est liée sont également dans ce plan vertical.

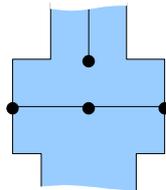


Figure 14 :Semelle pieu

Remarque : le maillage de la semelle pieu est orthogonal (mailles rectangulaires).

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de toute la semelle pieu,
- GN de toute la semelle pieu,
- GN de la liaison implicite semelle/piédroit.

III.3.5 - Élément semelle barrette

Idem semelle pieu.

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de toute la semelle barrette,
- GN de toute la semelle barrette,
- GN de la liaison implicite semelle/piédroit.

III.3.6 - Élément radier

Le maillage transversal du radier a été décrit plus haut.

Le maillage longitudinal comporte 3 zones :

- zone courante,
- zone des goussets,
- zone des piédroits.

La totalité de la surface moyenne du radier est maillée (i.e. jusqu'aux nus extérieurs des piédroits).

La zone de piédroit comporte 2 files transversales de mailles de façon à faire apparaître une file transversale (centrale) de nœuds positionnée dans le plan de la surface moyenne du piédroit.

La zone de gousset est constituée d'un maillage s'affinant à l'approche de la section de naissance du gousset : ce maillage comporte 3 files transversales de mailles de largeur (en fraction de l'épaisseur équivalente du gousset) : $3/6$, $2/6$, $1/6$.

La zone courante comporte à chacune de ses extrémités une zone de longueur 1 épaisseur, constituée d'un maillage s'affinant à l'approche de la section de naissance du gousset : ce maillage comporte 3 files transversales de mailles de largeur (en fraction de l'épaisseur de la zone courante) : $3/6$, $2/6$, $1/6$.

Le reste de la zone courante respecte au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée.

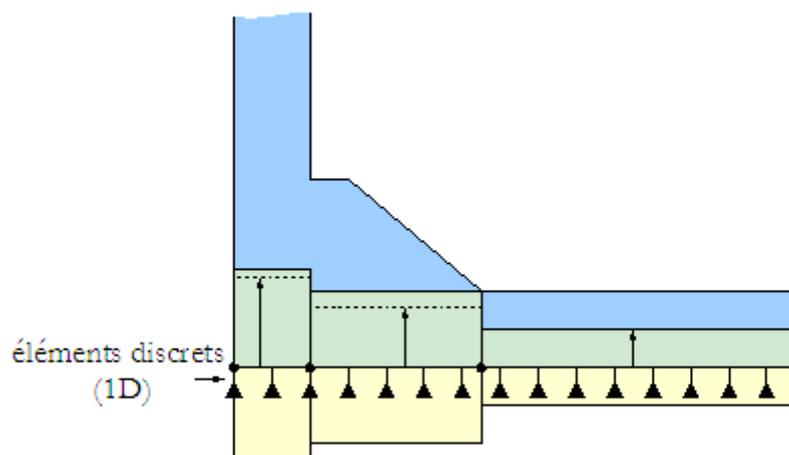


Figure 15 : Maillage longitudinal d'un radier

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de tout le radier,
- GM des zones piédroits,
- GM des zones goussets,
- GM de la zone courante,
- GM de l'excentrement rigide (mailles 1D),
- GM des ressorts (mailles 1D),
- GN de tout le radier,
- GN de la liaison implicite radier/piédroit,
- GN des têtes de ressorts,
- GN des pieds de ressorts.

Chapitre IV - Eléments de type poutre

IV.1 - Elément Pieu

Le pieu constitue avec la barrette le seul élément linéique d'un ouvrage.

Le poids propre du pieu est négligé.

Son maillage doit prendre en compte le fait qu'il peut traverser plusieurs couches de sol. On convient de « découper » chaque couche de sol traversée en tranches de longueur environ 1/2 diamètre de pieu et de disposer 1 nœud au milieu de chacune de ces tranches. De cette façon, chaque nœud d'une même couche de sol est affecté (dans la modélisation Aster, à l'aide de la formulation DIS_T, et des matrices de rigidités nodales K_T_D_N) de la même rigidité.

Les matrices K_T_D_N :

- ne font intervenir que les déplacements de translation (matrices diagonales 3x3), conformément à l'utilisation de la formulation DIS_T ;
- ont leur composante z-z (i.e. suivant l'axe du pieu) nulle car on néglige le frottement le long du pieu ;
- sont affectées directement aux différents nœuds par utilisation de l'option DISCRET de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM.

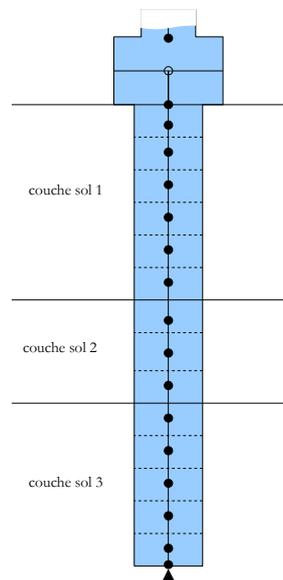


Figure 16 :Pieu dans 3 couches de sol

Sa liaison avec la semelle pieu s'effectue à l'aide de 3 nœuds :

- le nœud correspondant à la tête du pieu,
- les 2 nœuds du maillage de la semelle encadrant le nœud fictif situé en vis à vis du nœud tête de pieu dans le maillage de la semelle.

La liaison rigide entre le pieu et la semelle peut alors être réalisée dans la modélisation Aster à l'aide de l'opérateur LIAISON_DDL en invoquant ces 3 nœuds. Cet opérateur permet d'introduire la relation de solide rigide entre le nœud tête de pieu et le nœud fictif, en exprimant les ddl de ce dernier linéairement en fonction des ddl des 2 nœuds l'encadrant.

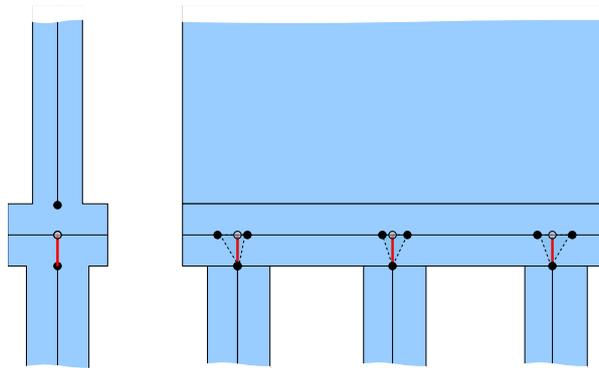


Figure 17 : Liaison semelle pieu / pieu

Le maillage d'un pieu intégrant sa liaison avec la semelle pieu, il ne peut donc être réalisé qu'une fois le maillage de la semelle pieu connu. Le nœud pied de pieu est considéré comme bloqué par un appui ponctuel rigide : on lui impose donc un déplacement vertical nul.

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de tout le pieu,
- GN de tout le pieu,
- pour chaque pieu, GN pour chacun des 3 nœuds de la liaison :
 - GN du nœud tête de pieu,
 - GN du nœud intermédiaire 1,
 - GN du nœud intermédiaire 2,
- GN des couches de sol,
- GN du pied de pieu.

IV.2 - Élément barrette

Idem pieu.

Sous-ensembles du maillage (groupes de nœuds GN et groupes de mailles GM) :

- GM de toute la barrette,
- GN de toute la barrette,
- pour chaque pieu, GN pour chacun des 3 nœuds de la liaison :
 - GN du nœud fictif,
 - GN du nœud intermédiaire 1,
 - GN du nœud intermédiaire 2,
- GN des couches de sol,
- GN du pied de barrette.

Chapitre V - Logique de maillage d'un ouvrage

V.1 - Ordre de maillage des éléments d'ouvrage

Dans le cas d'un PSID : les maillages des éléments (dalle et dalles de transition) sont indépendants.

Dans le cas d'un PIPO/PICF, les maillages des différents éléments ne sont pas indépendants :

- il convient de traiter en premier lieu le maillage de la traverse,
- ce n'est qu'ensuite qu'on peut traiter dans un ordre quelconque le maillage des ddt et des piédroits
- puis le maillage des semelles superficielles ou des semelles pieu ou des semelles barrettes,
- enfin, on traite le maillage des pieux ou des barrettes.

Le maillage de la dalle ou de la traverse s'effectue de façon analogue selon le principe suivant :

- la surface de la traverse ou de la dalle est partitionnée en zones trapézoïdales en tenant compte des diverses contraintes signalées plus haut :
 - prise en compte des positions des appareils d'appui (cas d'une dalle),
 - prise en compte des zones latérales de joues, d'encorbellement (cas d'une dalle), ou de chanfreins (cas d'une dalle ou d'une traverse),
 - prise en compte des dalles de transition (cas d'une traverse),
 - prise en compte des phénomènes de bord libre en créant une zone latérale destinée à l'affinage transversal du maillage (cas d'une dalle ou d'une traverse).
- Ensuite, chaque zone trapézoïdale est maillée en respectant au mieux la règle générale de la fraction d'épaisseur demandée, et en prenant en compte les dispositions particulières signalées dans les paragraphes précédents : affinage au voisinage des bords libres, des sections origine et extrémité des goussets.

V.2 - Désignation des entités du maillage

Il s'agit de fixer un principe de désignation des entités du maillage (nœuds, mailles, GM, GN) qui :

- apparaîtra dans le fichier de maillage Aster (où ces entités sont nommées),
- permettra de les désigner dans le fichier de commandes Aster.

Remarque : le nommage des entités dans le fichier de maillage Aster est distinct de la numérotation interne utilisées dans le code d'Aster.

V.3 - Nœuds et mailles

Dans le cas des nœuds et les mailles, on envisage une numérotation pour chacun des types d'entités :

- nœud N_i (nœud de numéro i),
- maille M_j (maille de numéro j).

On considère que le maillage d'un ouvrage est constitué d'un ensemble de « grilles » :

- des grilles 2D : dalle, traverse, dalle de transition, piedroit, semelle superficielle, semelle pieu, semelle barrette,
- des grilles 1D : pieu, barrette, ressort sous semelle, ressort sous radier.

On peut considérer le corbeau (file de nœuds) comme une grille 1D sans mailles.

Pour chaque grille, on peut définir une indexation :

- Cette indexation permet de définir une numérotation locale continue des nœuds et des mailles de la grille.
- Pour un modèle comportant des grilles de tailles (nœuds longitudinalement et nœuds transversalement), on obtient une numérotation globale des nœuds et des mailles de la façon suivante : à l'entité (nœud ou maille) appartenant à la grille et possédant un numéro local correspond le numéro global.

V.4 - Groupes de nœuds et groupes de mailles

Dans le cas des groupes de nœuds et des groupes de mailles, il paraît plus adapté de les nommer « explicitement » avec les contraintes suivantes du fichier de maillage Aster pour le nommage :

- 8 caractères maximum,
- minuscules confondues aux majuscules.

Par exemple :

- pour le GM de toute la traverse : MTRA (M pour groupe de Mailles).
- pour le GN de toute la traverse : NTRA (N pour groupe de Nœuds).
- pour les GN de la liaison implicite radier/piedroit :
 - NRADPIEO (O pour Origine),
 - NRADPIEE (E pour extrémité).
- pour les GM de la nervure dans les zones goussets :
 - MNERGOUO,
 - MNERGOUE.

V.5 - Les points d'étude

Les points d'étude sont des nœuds du modèle pour les quels des justifications sont demandées. Il existe trois options pour le choix des points d'étude :

- Minimal : Seuls les points d'étude essentiels sont sélectionnés.
- Normal : Les points d'étude sont définis de façon régulière transversalement et longitudinalement avec une cardinalité de l'ordre de 10 par travée. Les zones de ferrailage spécifiques tels que les angles, les chevêtres et les zones de bord libre sont privilégiées.
- Maximal : Tous les nœuds du maillage sont considérés comme des points d'étude.