F. Comment bien présenter la note de calcul aux éléments finis ?

F. Comment bien présenter la note de calcul aux éléments finis ?

Le présent paragraphe fournit les éléments minimaux qui doivent figurer dans une note, si l'on veut fournir une description claire d'un modèle de calcul aux éléments finis.

Avant toute chose, la note de modélisation ne peut être la première note du projet. Elle est soit précédée soit accompagnée de la note d'hypothèses générales. La note d'hypothèses générales fournit des informations indispensables sur les matériaux, sur les raideurs des fondations, sur les cas de charges et combinaisons et sur l'ensemble des justifications qu'il va falloir mener sur la structure. Idéalement, les deux notes sont rédigées en parallèle.

Trop souvent des points qui auraient toute leur place dans la note d'hypothèse ou dans la note de modélisation sont reportés à une note ultérieure. Cette façon de faire est dommageable dans la mesure où les éclaircissements arrivent ensuite avec une note "pavé" contenant les résultats et parfois même les justifications … générant des tensions avec le Maître d'Oeuvre en charge du VISA (ou le contrôleur) quand ce dernier exigera de compléter voire de refaire et surtout, des pertes de temps pour toutes les parties-prenantes.

Il est fondamental de comprendre qu'il y a un véritable effet de bras de levier en jeu et qu'il vaut mieux passer un peu de temps à détailler et fixer les éléments au départ et se les faire valider. Le déroulé de l'affaire s'en trouve grandement amélioré.

N'oublions pas que dans une mission VISA de base, la note d'hypothèses générales est la seule qui fera l'objet d'un examen approfondi par le Maître d'Oeuvre.

F.1 Introduction de la note - Description de l'objet du calcul

a) La note de calcul EF doit débuter par un bref rappel de l'objet étudié. Des extraits de plans sont toujours bienvenus.

b) Il faut également rappeler la phase d'étude. Si la phase d'étude est avancée, il est intéressant de rappeler comment le sujet a été traité aux phases précédentes. Parfois, un modèle plus simple a été développé à la phase précédente, parfois c'est un calcul à la main qui a été fait. Dans les deux cas, la note doit comparer les résultats du modèle simplifié et du modèle plus complet.

c) Il convient de préciser les objectifs du calcul, c'est-à-dire les justifications qu'on entend mener grâce à ce modèle : stabilité globale, efforts internes, déformations … Le modèle n'est pas un objectif en soi, il n'est qu'un outil pour obtenir un résultat.

d) Il n'est pas obligatoire d'utiliser un seul modèle pour toutes les justifications d'un projet. Préciser ce qui ne sera pas couvert par le modèle présent mais par un autre sous-modèle.

e) La note de modélisation doit déclarer toutes les références documentaires utilisées : les plans avec leur indice, les pièces du marché, les notes de calcul ou géotechniques.

f) En cas de mise à jour de modèle, les modifications apportées doivent être tracées de manière explicite.

g) La note doit décrire le principe d'exploitation des résultats, les sortants directs du logiciel et les éventuels post-traitements qui sont envisagés.

F.2 Description géométrique du modèle

a) Il convient de définir très clairement le périmètre physique de l'étude : les éléments qui sont modélisés et ceux qui ne le sont pas. Certaines structures secondaires n'ont souvent pas besoin d'être modélisées (escaliers ou passerelles de visite, équipements). Certaines structures principales peuvent être simplifiées comme les culées de pont ou les pieux, qui peuvent le cas échéant, être représentés par des appuis avec leur souplesse. En cas de succession d'ouvrages, les limites de modélisation doivent être décrites avec la façon de prendre en compte l'interaction avec les ouvrages adjacents non modélisés.

b) Les hypothèses de simplification de la géométrie, du choix des nœuds et des sections doivent être exposées dans le détail. La fourniture d'un listing complet du fichier de calcul ne peut pas répondre à cette demande. Il faut des schémas. Les croquis à la main, que l'ingénieur utilise quand il code, peuvent avantageusement être fournis. Ils permettent de comprendre la logique de modélisation.

c) S'il y a un échange entre le logiciel de dessin et le logiciel Eléments Finis, il est intéressant de l'indiquer.

d) Il faut expliciter toutes les unités utilisées : distances, efforts, contraintes et masses. Par défaut, on privilégiera le système S.I.

e) Il faut définir le repère global du modèle et rappeler la convention de signes des efforts pour toutes les réactions d'appui.

f) Il en va de même pour les éléments finis: il convient d'indiquer les repères locaux et les conventions de signes adoptées par le logiciel pour les efforts et contraintes. g) Les images et sorties graphiques sont intéressantes pour visualiser le modèle, mais elles doivent être annotées et accompagnées des explications correspondantes. Une note de modélisation constituée d'une série de copies d'écran n'est pas acceptable.

F.3 Description des éléments finis

a) Comme évoqué au chapitre B, le choix du logiciel dépend de nombreux critères. Il faut expliquer, même de manière succincte, pourquoi le logiciel utilisé est approprié. S'il a des limites de calcul, ne pas hésiter à l'écrire et à expliquer comment on va parer à ces limites.

b) Description des propriétés des EF : cette partie est souvent manquante dans la description, or certains logiciels ont une grande variété de types d'éléments qui n'ont pas les mêmes fonctionnalités. En particulier, pour les modélisations en plaque, les éléments prennent ou non en compte les effets membranaires, ce qui peut changer les résultats ; il en est de même en 1D pour la déformation à l'effort tranchant dans les poutres.

c) Il faut décrire le nombre de nœuds, la taille des éléments, le type de mailles. Si un test de raffinement de maillage a été mené (comme conseillé au paragraphe d), le signaler.

d) Pour un modèle à barres, il faut fournir un tableau des caractéristiques mécaniques des barres.

e) Il faut illustrer par des captures d'écran le lien entre le repère global et les repères locaux. La plupart des logiciels ont des modes d'affichage des repères assez explicites. A noter qu'il est souvent possible et utile de forcer les repères pour faciliter l'analyse des résultats.

f) Il est intéressant de donner le nombre d'éléments ainsi que le nombre de degrés de liberté du modèle.

F.4 Description mécanique du modèle

a) Les caractéristiques des matériaux doivent être exposées de manière complète : masse volumique, module de Young, coefficient de Poisson, loi de comportement statique, lois de retrait, de fluage ou de relaxation ...

b) Les conditions aux limites doivent être correctement décrites. Le schéma statique doit être rappelé, avec la façon dont sont modélisés les appuis. Si une matrice de raideur est introduite, expliquer comment elle a été calibrée à partir des paramètres géotechniques.

c) En cas de présence d'appareils d'appui, préciser s'ils sont modélisés par des barres avec des caractéristiques particulières ou par des liaisons spéciales dans le modèle.

d) Il faut lister les éléments non structuraux (équipements) et préciser lesquels sont modélisés ou *a contrario* pris en compte comme des charges. Comme indiqué au c), ce choix dépend de la raideur et de la masse de ces éléments non structuraux.

e) Le mode d'introduction des efforts et des charges ne va pas de soi. Il faut préciser si le logiciel fait du placement automatique des charges, du positionnement incrémental des charges ou si les cas de charges sont rentrés manuellement.

f) En cas d'effort à introduire sur une coupure, il faut illustrer comment cet effort se diffuse dans le modèle (araignée reliant les bords de la coupure).

g) De manière générale, et en particulier pour les calculs sismiques ou dynamiques, il faut détailler comment sont introduites les masses dans le modèle. Si la masse des éléments est générée automatiquement par le logiciel, dans les zones d'assemblage, il y a des volumes comptés en double ; il faut donc pouvoir corriger les masses volumiques. Les éléments non structuraux modélisés par des cas de charge ne sont pas reconnus en tant que masses et doivent être ajoutés. Une vérification à la main de la masse globale du modèle est toujours utile et rassurante.

F.5 Démonstration de la démarche d'autocontrôle

L'autocontrôle est un élément fondamental de la qualité d'une modélisation.

Cette démarche d'autocontrôle doit être visible pour la personne qui va contrôler la note de calcul.

a) Les tests et éléments de vérification sur la validité du maillage doivent être mentionnés.

b) Tous les tests de validation du modèle qui ont été menés concourent à mettre en confiance le contrôleur. Il ne s'agit pas de fournir une grande quantité d'informations et de données, mais juste d'indiquer les tests qui ont été menés.

c) En revanche, les tests de vérification des descentes de charge sont absolument indispensables. Ils doivent a minima comprendre le poids propre structurel, le poids propre des équipements, une charge uniformément répartie et les cas de charges thermiques.

d) Ceci inclut également la vérification globale des masses pour les modèles dynamiques et sismiques.

F.6 Description de la récupération et du post-traitement des efforts

a) Il faut décrire sous quelle forme sont récupérés les efforts ou déplacements du modèle (listings, lecture graphique, affichage à l'écran).

b) Dans le cas où les résultats sont exprimés dans un repère local et qu'un changement de repère est nécessaire *a*

posteriori, le risque d’erreur est fréquent. La validité du changement de base doit être démontrée.

c) De manière générale, il faut décrire le processus de post-traitement des efforts, avec les tests associés.

d) Pour les combinaisons et enveloppes, il faut dire si elles sont faites par post-traitement ou directement par le logiciel. Dans le second cas, il faut indiquer si les combinaisons sont formées à la main ou si elles sont automatiques (source d’erreur). Dans tous les cas, il faut préciser si les combinaisons et enveloppes génèrent des efforts concomitants ou non.

F.7 Présentations des résultats

Les résultats sont souvent présentés sous forme de tableaux, parfois lourds à décrypter.

a) Comme dit précédemment, le système d’unités doit être défini et il faut systématiquement indiquer les unités dans les colonnes de tableaux.

b) Il faut rappeler les descentes de charges pour les cas de charge élémentaires.

c) Il faut mettre en valeur (surligner, entourer ou mettre en gras ou en rouge) les valeurs dimensionnantes des tableaux.

d) Les listings de résultats ne doivent pas être dans le corps du texte. Ils alourdissent la compréhension du document et donnent lieu à des impressions inutiles. Ils seront placés en annexe.

F.8 Compléments spécifiques pour les éléments volumiques

a) Le choix des sections de coupe doit être cohérent avec l’exploitation attendue des résultats et doit coller aux plans critiques de l’ouvrage.

b) De la même manière que pour les éléments surfaciques, les logiciels proposent une grande variété d’éléments volumiques, avec des codes différents. Certains éléments sont très spécifiques à certains matériaux et certains types de calcul. Il faut se référer à la notice du logiciel pour choisir, sauf besoin très particulier, l’élément « le plus simple ».

c) Il convient de privilégier les résultats sous forme de cartographies, en mettant en valeur les points dimensionnants et en précisant si ce sont des valeurs lissées ou aux noeuds par exemple.

d) Dans le cas d’intégration des efforts sur une coupe, il est utile d'expliciter la méthode retenue.

F.9 Compléments spécifiques pour les calculs non-linéaires

a) Il faut fournir la loi de comportement utilisée, qui peut être différente de la loi standard du logiciel.

b) Il est intéressant de présenter, dans la note de calcul, l’évolution d'une grandeur remarquable (déplacement d'un point, effort spécifique, etc.) au cours de l'augmentation du chargement, pour visualiser une plastification.

F.10 Compléments spécifiques pour les calculs dynamiques

a) Si on utilise un spectre automatiquement fourni par le logiciel, il faut démontrer qu’on a vérifié que ce spectre est conforme à celui qu'on attend.

b) Il faut définir les amortissements retenus (qui ne sont pas les mêmes en dynamique et en sismique) et/ou les coefficients de comportement pour les calculs sismiques.

c) Il faut donner les masses participantes, les coefficients de participation des modes, mode par mode et préciser les combinaisons modales retenues ainsi que les signatures modales choisies, s’il y a lieu.

d) Il faut présenter les déformées modales pour les modes les plus représentatifs. La forme des modes est un élément important de vérification du comportement global de la structure.

e) Pour un calcul par pas de temps, comme pour le calcul non-linéaire, il est intéressant de présenter l'évolution temporelle des grandeurs représentatives (déplacements, accélérations)

Révision #1
★Créé 12 December 2023 10:16:05 par Paul Terrasson Duvernon
Mis à jour 12 December 2023 10:18:07 par Paul Terrasson Duvernon