

Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage :

4. Modélisation du monde extérieur

école _____
normale _____
supérieure _____
paris – saclay _____

Lionel GENDRE - François LOUF

Edité le 11/01/2013

Dans une simulation par éléments finis, le produit est modélisé par un maillage, c'est-à-dire un ensemble de nœuds et d'éléments. Le choix du maillage détermine notamment les fonctions de base qui représentent les champs de déplacement, et a donc une influence considérable sur les résultats. Dans une simulation par éléments finis, l'interaction du produit avec son environnement est elle aussi modélisée, sous la forme d'efforts et de déplacements nodaux. Pour que la modélisation soit pertinente, la construction du maillage doit donc respecter certains principes et prendre en compte quatre aspects :

1. Adaptation de la géométrie à la simulation, proposée dans la ressource « *Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage : 1. Adaptation de la géométrie à la simulation* » ;
2. Le choix des éléments, proposé dans la ressource « *Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage : 2. Choix des éléments* » ;
3. La génération et le contrôle du maillage, proposé dans la ressource « *Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage : 3. Génération et contrôle du maillage* ».
4. **Le modèle de l'environnement, proposé dans cette ressource.**

Le formalisme du monde extérieur étant peu intuitif, la plupart des logiciels sont munis d'outils capables de traduire des modèles « usuels » sous cette forme. Leur emploi demande néanmoins une bonne compréhension du domaine de validité des modèles proposés et cette étape est, en pratique, la principale source des écarts observés avec la réalité. Cette ressource présente les principaux concepts à connaître pour modéliser l'environnement d'un produit par éléments finis de façon pertinente.

1 - Introduction

La modélisation de l'environnement du produit, ou plus précisément de l'interaction du produit et de son environnement, est une étape particulièrement délicate de la démarche de simulation par éléments finis. En effet, le modèle de l'environnement est souvent à l'origine d'écarts très importants entre les résultats des simulations et la réalité.

Pour comprendre l'origine de ces écarts, il faut tout d'abord savoir que le principe de la discrétisation par éléments finis impose un formalisme particulier pour la modélisation de l'environnement (pour aller plus loin voir la ressource « *Résolution d'un modèle éléments finis : 1. Du modèle aux équations* »). L'effet de celui-ci sur le produit doit être modélisé en termes de quantités nodales, et plus précisément :

- D'efforts nodaux extérieurs exercés sur des nœuds du maillage (figure 1a),

- Et de déplacements nodaux imposés (figure 1b) ou, plus généralement, de contraintes cinématiques liant les déplacements de certains nœuds du maillage (nous y reviendrons).

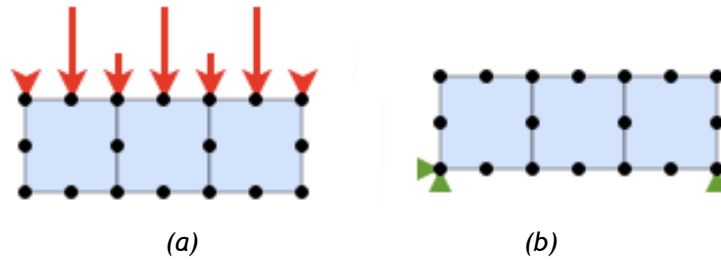


Figure 1 : Modèles élémentaires de l'environnement par éléments finis :
(a) efforts nodaux extérieurs, (b) déplacements nodaux imposés.

Or, ce formalisme est relativement peu intuitif car le lien entre ces quantités et les champs de déplacement et de contrainte n'est pas évident : les définitions des déplacements nodaux et des efforts nodaux montrent que ce lien repose sur les fonctions de base qui, dépendent du maillage et, dans le cas des éléments isoparamétriques, n'ont pas des expressions simples (voir ressource « Résolution d'un modèle éléments finis : 1. Du modèle aux équations »). Il est donc généralement impossible de modéliser l'environnement d'un produit en écrivant directement ces quantités, sauf dans quelques rares cas très simples.

Pour cette raison, la plupart des logiciels de simulation (et particulièrement ceux qui intègrent CAO et éléments finis) sont munis d'outils capables d'assister l'utilisateur en lui permettant de spécifier des modèles d'environnements issus d'autres théories, telles que la MMC (mécanique des milieux continus) ou la mécanique des solides indéformables (figure 2a) ; ces modèles sont ensuite traduits en termes d'efforts ou de déplacements nodaux (figure 2b). Cela permet techniquement de créer des modèles d'environnements relativement sophistiqués en quelques clics de souris, ce qui est d'autant plus utile que les résultats des calculs sont parfois peu intuitifs : par exemple, comme le montre la figure 2, une pression uniforme se traduit généralement par une distribution d'efforts nodaux qui n'est pas du tout uniforme.

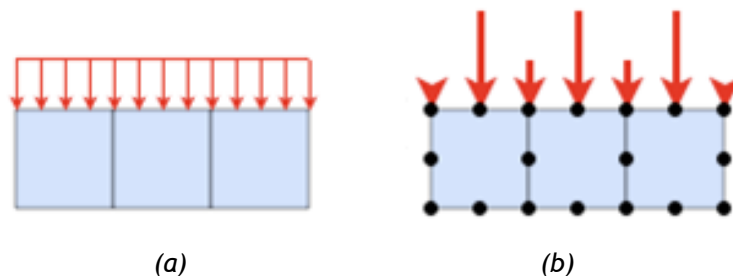


Figure 2 : Modélisation d'une action de contact : (a) effort surfacique, issu de la mécanique des milieux continus ; (b) forces nodales correspondant à cet effort surfacique.

Cependant, cette facilité d'utilisation ne doit pas masquer la véritable difficulté du processus : sans une bonne compréhension du domaine de validité des modèles proposés par les logiciels (que ce soit leur « sens physique » ou leur validité mathématique), il n'est pas possible de modéliser un environnement réel de façon pertinente. Or, certains modèles courants possèdent des domaines de validité très restreints qui sont fréquemment violés par les utilisateurs, et de nombreux écarts importants avec la réalité en résultent.

Cette ressource présente les modèles d'environnements les plus courants et leurs domaines de validité ; cette sélection n'est absolument pas exhaustive et la plupart des logiciels en proposent d'autres, dont le lecteur intéressé trouvera une description dans les manuels d'utilisation.

2 - La modélisation des actions à distance

Dans une simulation de mécanique, les éléments de l'environnement à prendre en compte sont par définition ceux qui exercent des actions mécaniques sur le produit. Ces actions mécaniques peuvent être de deux types : les actions de contact, évoquées au paragraphe suivant, ou les actions à distance, que nous évoquons ici.

Dans le cadre de la mécanique des milieux continus, les actions à distance sont généralement modélisées par des forces volumiques. Les plus courantes sont les actions de pesanteur et les actions d'inertie (pour les référentiels non galiléens). Les logiciels peuvent généralement calculer ces forces volumiques à partir des grandeurs physiques pertinentes (masse volumique, accélération... voir figure 3a) puis en déduire les forces nodales correspondantes (figure 3b) par assemblage de contributions élémentaires. En pratique, la modélisation des actions à distance ne pose guère de problèmes.

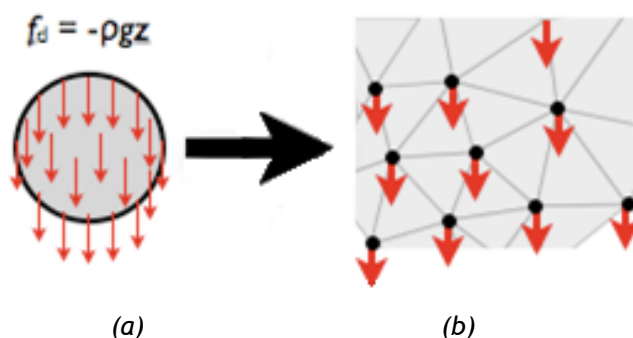


Figure 3 : Modélisation d'une action à distance (ici, la pesanteur) :
(a) effort volumique, (b) traduction en forces nodales.

3 - La modélisation des actions de contact

En revanche, la modélisation des actions de contact est une source d'écarts fréquents. Nous étudions ici deux modèles courants, basés sur des conditions aux limites en effort ; les conditions aux limites en déplacement sont décrites dans la suite de cette ressource.

3.1 - Les forces surfaciques

Tous les logiciels permettent à l'utilisateur de spécifier des forces surfaciques sur une partie du bord du maillage, et calculent ensuite les efforts nodaux correspondants comme expliqué précédemment. Ces forces surfaciques peuvent être normales (pression ou traction) ou parfois tangentielles (cisaillement).

La répartition de ces forces surfaciques doit naturellement être choisie de façon pertinente vis-à-vis du contact à modéliser. Les logiciels proposent généralement plusieurs répartitions empiriques modélisant des contacts dans diverses situations. Par exemple, pour modéliser le contact entre un arbre et un palier lisse, on pourrait choisir d'utiliser :

- Une répartition de pression uniforme (figure 4a),
- Une répartition de pression « en cosinus » (figure 4b),
- Un modèle plus avancé et plus spécifique : par exemple, pour les goupilles ou arbres creux, la répartition « de Genco » (figure 4c).

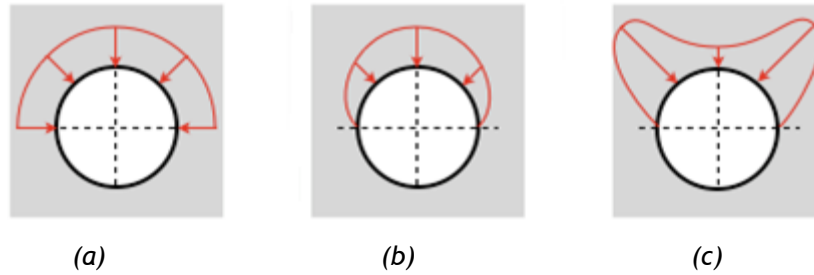


Figure 4 : Quelques modélisations continues de l'action exercée par un arbre sur un palier lisse : (a) pression uniforme, (b) pression en cosinus, (c) pression suivant une répartition "de Gencoz".

La tâche de l'utilisateur est d'examiner les domaines de validité des différents modèles disponibles et de choisir le plus pertinent ; le logiciel se charge ensuite de traduire ces modèles en forces nodales.

Les forces surfaciques peuvent également être utilisées pour modéliser les contacts réputés « ponctuels » ou « linéiques » qui, rappelons-le, sont en réalité eux aussi surfaciques en raison de l'écrasement de la matière. Pour cela, une possibilité est d'utiliser les surfaces de contact et les distributions de pression données par la théorie de Hertz. Par exemple, la figure 5 schématise la modélisation des efforts de contact exercés par un objet cylindrique sur une surface plane.

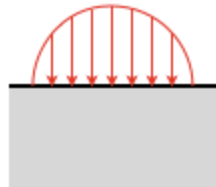


Figure 5 : Répartition de pression modélisant l'action de contact d'un cylindre sur un plan, d'après la théorie de Hertz.

Là encore, l'utilisateur a généralement le choix entre plusieurs modèles et doit sélectionner le plus pertinent : la modélisation de Hertz possède elle aussi ses limites (elle ne prend pas en compte les frottements, par exemple) et d'autres modèles peuvent s'avérer plus adaptés.

En outre, pour que la traduction de ces efforts surfaciques en forces nodales soit possible et pour que ces forces nodales puissent modéliser précisément les sollicitations dues au contact, le maillage ne peut être quelconque. Deux précautions sont en effet nécessaires :

1. Dans la plupart des logiciels, les zones de contact doivent être constituées d'éléments entiers pour que le logiciel puisse y appliquer des efforts surfaciques ;
2. De plus, les gradients des contraintes y sont généralement conséquents, et ce dans toutes les directions : la pression est souvent nulle sur le bord de la zone de contact et maximale au centre tandis que le cisaillement, quant à lui, est nul à la surface si l'on néglige les frottements, mais pas en profondeur. La finesse du maillage doit donc être adaptée en conséquence.

Si ces deux conditions ne sont pas remplies, une modification du maillage pourra s'avérer nécessaire, surtout si l'objectif de la simulation est de calculer des contraintes ou déformations au voisinage du contact.

3.2 - Les forces nodales (abusivement appelées « forces ponctuelles »)

De nombreux logiciels permettent également d'imposer directement des forces nodales sur certains nœuds. Cette fonctionnalité, conçue essentiellement pour les utilisateurs avancés, est

souvent « détournée » par les débutants pour modéliser des contacts réputés ponctuels, sans doute par analogie avec les forces ponctuelles de la RdM ou les glisseurs de la mécanique des solides indéformables. Cela peut sembler très pratique au premier abord car une telle modélisation ne nécessite que peu d'informations sur le contact à modéliser ; malheureusement, il s'agit d'un choix généralement peu judicieux.

En effet, les forces ponctuelles ne font pas partie du domaine de validité de la mécanique des milieux continus (sauf les théories des poutres, plaques et coques) : elles conduisent en effet à des singularités (voir la ressource « *Attention aux singularités !* »), c'est-à-dire des contraintes tendant vers l'infini lorsque l'on se rapproche du point de contact (figure 6a). Dans une simulation par éléments finis, les contraintes restent finies (figure 6b), mais leurs valeurs ne dépendent que de la taille et de la position des éléments : elles tendent vers l'infini lorsque l'on raffine le maillage (figure 6c) et ne sont donc pas pertinentes.

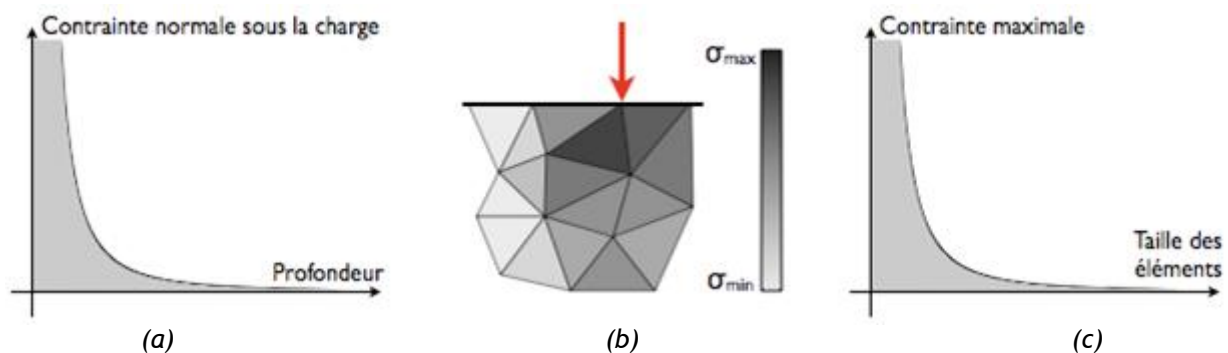


Figure 6 : La problématique des forces ponctuelles : (a) en mécanique des milieux continus, elles conduisent à des "contraintes infinies" en leur point d'application ; (b) en éléments finis, les contraintes restent finies... (c) mais leurs valeurs augmentent indéfiniment lorsque l'on raffine le maillage.

Par conséquent, lorsque l'on modélise une action de contact par une unique force nodale, il faut garder à l'esprit que les résultats ne seront pertinents qu'à une distance suffisante du contact. Si l'on souhaite prévoir les contraintes ou les déformations sous le contact, il est indispensable de modéliser le contact de façon surfacique, par exemple avec les outils du paragraphe précédent.

Or, de nombreux utilisateurs violent cette règle et considèrent comme acceptables des contraintes calculées au voisinage d'un effort ponctuel. Il est donc important de rappeler que si les forces ponctuelles sont effectivement très utilisées en mécanique des solides indéformables ou en RdM, il n'est pas possible pour autant de les utiliser dans une autre théorie (à savoir la mécanique des solides déformables discrétisée par éléments finis) sans réfléchir à leur domaine de validité.

4 - Déplacements imposés et contraintes cinématiques

L'autre grande catégorie de conditions aux limites permise par les éléments finis porte sur les déplacements nodaux, qui peuvent être fixés à des valeurs nulles ou non nulles. Nous allons voir que ces fonctionnalités sont, en pratique, relativement peu utiles pour modéliser l'environnement du produit, mais que leur usage est en revanche rendu nécessaire par la théorie et la méthode de calcul utilisées dans les logiciels.

4.1 - Quand faut-il bloquer des déplacements ?

Tout d'abord, il faut savoir qu'en pratique, la théorie impose la présence de conditions aux limites en déplacement, selon deux règles essentielles.

Premièrement, lorsque l'on utilise des symétries ou invariances pour ne modéliser qu'une partie du problème, alors il faut imposer des conditions aux limites sur le champ de déplacement conformément à ces symétries ou invariances. La nature de ces conditions est dictée par la théorie utilisée. Par exemple, en MMC « générale » (i.e. hors théories des poutres, plaques et coques) :

- Dans le cas d'une symétrie, il faut bloquer les déplacements perpendiculaires au plan de symétrie en 3D ou à l'axe de symétrie en 2D, en fixant leur valeur à zéro (figure 7a),
- Dans le cas d'une invariance par rotation (symétrie cyclique), il faut imposer l'égalité des déplacements axiaux, radiaux et circonférentiels entre les deux extrémités du secteur angulaire (figure 7b).

Ce dernier cas fait appel à des repères locaux ainsi qu'à des contraintes cinématiques ; nous décrivons ces deux outils au paragraphe suivant.

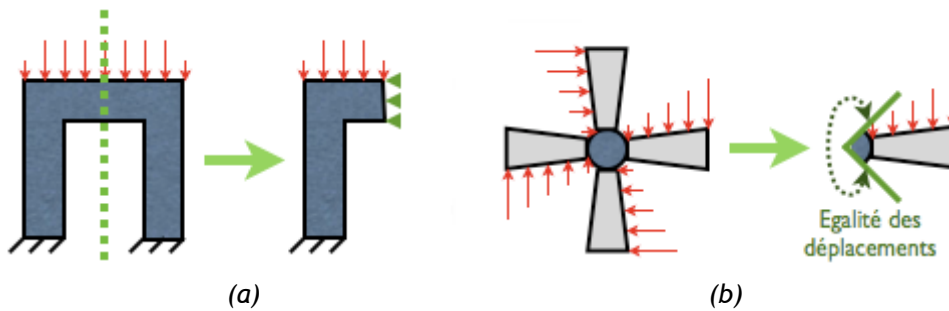


Figure 7 : Conditions aux limites correspondant :
 (a) à une symétrie par rapport à un plan ; (b) à une symétrie cyclique.

Deuxièmement, tous les mouvements de corps rigide du modèle doivent être bloqués, sinon le système d'équations n'est pas inversible et le calcul est donc impossible. Autrement dit, le modèle ne doit pas pouvoir se translater ni tourner sans se déformer, comme l'illustre la figure 8. Ce blocage peut être effectué à l'aide de conditions aux limites nulles ou non nulles.

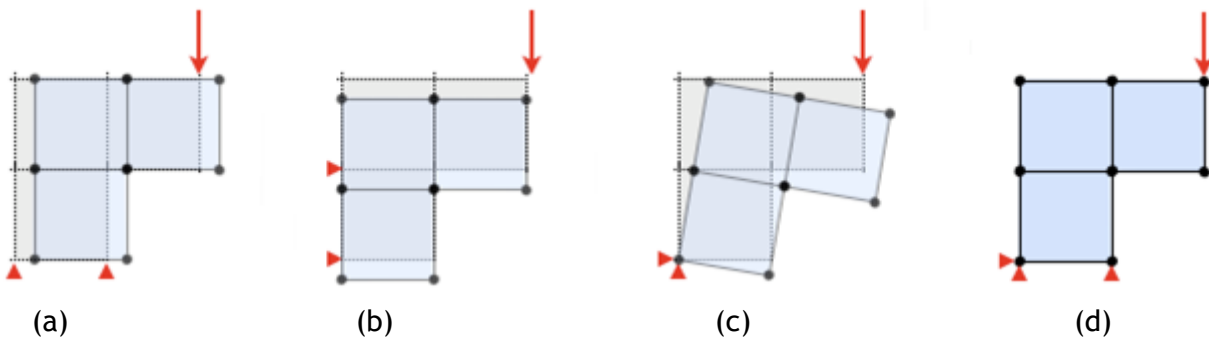


Figure 8 : Influence des déplacements imposés sur les modes rigides d'un maillage :
 (a) le maillage peut se translater horizontalement, (b) le maillage peut se translater verticalement,
 (c) le maillage peut tourner autour de son point d'attache,
 (d) le maillage ne peut pas se déplacer sans se déformer et le calcul est donc possible.

Il existe un lien entre ces deux exigences car les conditions de symétrie réduisent le nombre de modes rigides du modèle. Par exemple, en 3D, la condition correspondant à un plan de symétrie bloque une translation et deux rotations, et il ne reste donc plus que deux translations et une rotation (i.e. les mouvements rigides dans le plan de symétrie) à bloquer. L'identification des modes rigides restants, après prise en compte des conditions de symétrie, est d'une importance capitale : en effet, le blocage d'un mode déjà supprimé peut empêcher certaines déformations du modèle (ou les provoquer, selon que les déplacements imposés sont nuls ou non) sans que cela soit justifié vis-à-vis de la réalité, tandis que l'oubli d'un mode rend le calcul impossible. Certains

logiciels peuvent effectuer cette identification de façon automatique, mais il est important de garder cette problématique à l'esprit.

4.2 - Repères locaux et contraintes cinématiques

La définition des fonctions de base éléments finis montre qu'il est aisé de bloquer le déplacement d'un nœud dans l'une des directions du repère global de la simulation : un tel déplacement fait en effet partie de la liste des inconnues nodales (ou déplacements nodaux) et il suffit donc d'indiquer au logiciel que sa valeur doit être imposée.

Cependant, le blocage d'un déplacement dans une direction quelconque demande davantage de manipulations. Supposons par exemple que dans le repère global de la simulation, nous souhaitons bloquer le déplacement d'un nœud dans la direction (1,1) (figure 9).

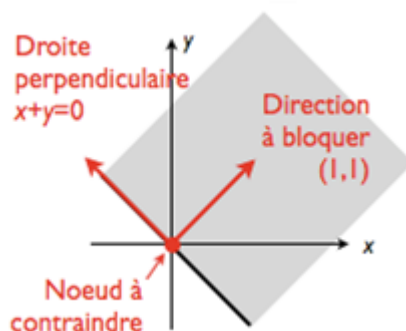


Figure 9 : Repère local et blocage dans une direction quelconque.

Cela revient à forcer le nœud à se déplacer sur une droite perpendiculaire à cette direction et donc, en notant u_x et u_y les composantes de son déplacement dans le repère global, à imposer la relation suivante :

$$u_x + u_y = 0$$

Dès lors que l'on souhaite bloquer un déplacement dans une direction quelconque, il faut spécifier cette direction au logiciel, c'est-à-dire lui donner le repère local de la condition aux limites (en rouge sur la figure 9). Lorsqu'il s'agit d'un blocage perpendiculaire à une surface de la pièce, certains logiciels peuvent parfois reconstruire automatiquement la normale à partir de la géométrie nominale.

En outre, une fois le changement de base effectué, la condition aux limites s'écrit sous la forme d'une équation reliant les différents déplacements nodaux. Une telle équation s'appelle une contrainte cinématique ; elle peut être utilisée, de façon générale, pour imposer des relations entre les différentes composantes des déplacements des différents nœuds. Un exemple typique d'utilisation serait l'écriture des conditions aux limites correspondant à une symétrie cyclique (figure 8b) : on utilise typiquement un repère local pour chaque face ainsi qu'un ensemble de contraintes (une par paire de nœuds) pour lier les déplacements des deux faces.

4.3 - Liaisons usuelles, éléments rigides... et leurs limites

La plupart des logiciels proposent en outre deux fonctionnalités très pratiques au premier abord mais qui, là encore, sont fréquemment détournées hors de leur domaine de validité et conduisent alors à des écarts conséquents avec la réalité.

La première est la possibilité de traduire des liaisons usuelles (encastremements, appuis plans, pivots glissants...) en conditions aux limites en déplacement écrites sur toute une partie de la surface du maillage. Il faut pour cela choisir la liaison, indiquer ses éléments caractéristiques, et

choisir la surface concernée (qui ne peut pas être quelconque : par exemple, un pivot glissant ne peut être traduit que sur une surface cylindrique). Le logiciel construit alors directement un jeu de conditions aux limites en déplacement, écrites sur cette surface et cinématiquement équivalentes à la liaison spécifiée (figure 10).

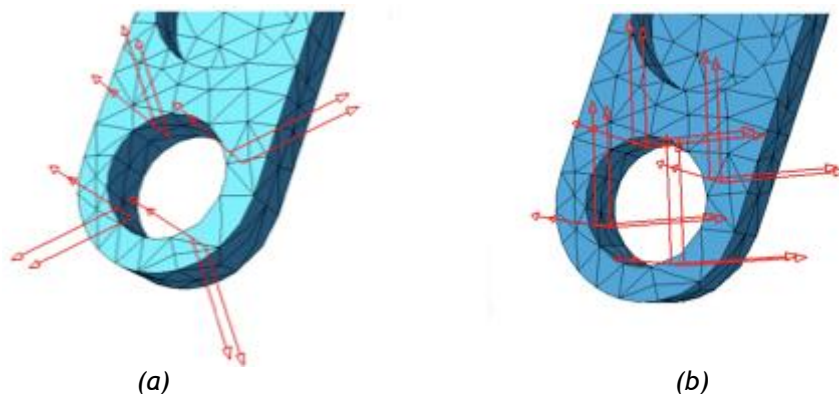


Figure 10 : Traduction de liaisons usuelles en conditions aux limites sur une surface :
(a) liaison pivot, (b) liaison encastrement.

La seconde est la possibilité de créer des éléments rigides liant certains nœuds du maillage choisis arbitrairement : il s'agit en réalité de contraintes cinématiques reliant les déplacements de ces nœuds, formulées de sorte que le groupe de nœuds ait un mouvement de corps rigide. Il est ensuite possible d'appliquer des torseurs d'efforts sur le « solide rigide » ainsi créé, et ces efforts sont répartis automatiquement entre les nœuds concernés (figure 11).



Figure 11 : Un élément rigide liant un ensemble de nœuds, et un glisseur exercé sur cet élément rigide.

Le problème de ces deux fonctionnalités est qu'elles forcent la surface ou le groupe de nœuds auxquels elles s'appliquent à avoir un mouvement de corps rigide (cas des encastrements ou des éléments rigides) ou, du moins, empêchent certaines déformations (par exemple, la traduction d'un pivot glissant consiste à bloquer tous les déplacements radiaux, et celle d'un appui plan à bloquer tous les déplacements normaux).

Or, l'utilisation la plus courante de ces fonctionnalités est la modélisation des contacts surfaciques entre la pièce étudiée et un objet de son environnement. Cela revient à émettre l'hypothèse qu'il n'y a aucun enfoncement, voire, dans le cas des encastrements et éléments rigides, que la surface de contact ne se déforme pas du tout ; malheureusement, la plupart du temps, ces hypothèses sont fausses en pratique, et cela conduit inévitablement à des résultats non pertinents dans les régions concernées. Le domaine de validité de ces modélisations n'est donc globalement pas respecté.

Là encore, cela n'est pas forcément grave : si les résultats recherchés sont situés suffisamment loin de la zone de contact, cette approximation peut parfois être acceptable. En revanche, si l'on s'intéresse aux déplacements, contraintes ou déformations au voisinage du contact, alors il est nécessaire d'abandonner cette approximation et de modéliser le contact d'une façon plus réaliste, par exemple à l'aide d'efforts surfaciques.

5 - Comment respecter les domaines de validité de tous ces modèles ?

Les paragraphes précédents montrent que de nombreux écarts avec la réalité s'expliquent par une modélisation non pertinente de l'environnement, et tout particulièrement des actions de contact : de nombreux modèles sont employés hors de leur domaine de validité physique (cas des contraintes cinématiques ou des déplacements imposés qui rigidifient des parties du maillage) ou mathématique (cas des forces ponctuelles qui sont utilisées dans une théorie où elles ne sont pas valides). Il est donc important d'y prendre garde.

5.1 - Une méthode « propre » pour modéliser l'environnement

Compte tenu des constats ci-dessus, nous proposons une méthode permettant de modéliser l'environnement d'une pièce par éléments finis en respectant les domaines de validité de tous les modèles. Nous supposons ici que les symétries ont été recensées et que le maillage a déjà été réalisé compte tenu de ces symétries.

1. Faire le bilan des actions mécaniques extérieures exercées sur le modèle complet de la pièce (c'est-à-dire incluant les « répétitions » dues aux symétries).
2. Déterminer leurs résultantes et leurs moments (par une étude de statique des solides indéformables, par exemple) et s'assurer que le torseur résultant est bien nul, toujours sur le modèle complet (sinon l'hypothèse de la statique n'est pas pertinente !).
3. Imposer les conditions de symétrie éventuelles.
4. Modéliser les actions mécaniques à distance par des forces volumiques.
5. Modéliser les actions mécaniques de contact. Pour cela, pour chacune d'elles :
 - S'assurer que la zone de contact est constituée d'éléments entiers et maillée suffisamment finement, en surface et en profondeur,
 - Et y appliquer des forces surfaciques selon une répartition bien choisie, c'est-à-dire représentative du contact que l'on souhaite modéliser. Selon les cas, cette répartition pourra être issue de la théorie de Hertz, de modèles empiriques, du résultat d'une simulation précédente...
6. Identifier les éventuels modes rigides du modèle muni des conditions de symétrie, et les éliminer en bloquant un nombre minimal de déplacements nodaux. Afin de ne pas surcontraindre le modèle, ce blocage ne doit pas s'opposer aux mouvements rigides qui sont déjà neutralisés par les conditions de symétrie.
7. Après le calcul, vérifier que les efforts de liaison sont bien nuls dans chacun de ces blocages supplémentaires, ou du moins très faibles devant les autres efforts. Si ce n'est pas le cas, cela signifie que les efforts extérieurs n'étaient pas de résultante et de moment nuls, ou que le modèle est surcontraint : la modélisation est donc à revoir.

Cette méthode présente l'avantage d'éviter deux erreurs de modélisation courantes : l'utilisation de forces nodales « ponctuelles » ou de contraintes cinématiques hors de leur domaine de validité. Sa particularité est que le blocage des modes rigides ne fait pas appel au modèle de l'environnement du produit comme dans les approches « naïves », mais à une liaison supplémentaire ajoutée dans ce but, qui ne correspond à aucune interaction subie par le produit réel. Cela n'est néanmoins pas un problème car si les conditions ci-dessus sont respectées, l'isolement du maillage montre que cette liaison supplémentaire ne transmet aucun effort et n'a donc aucune influence sur les contraintes et les déformations, et ceci quelle que soit la localisation des nœuds utilisés pour réaliser cette liaison.

Il est naturellement important de bien respecter les conditions ci-dessus : bien appliquer des chargements équilibrés sur le modèle complet, bien identifier les modes rigides subsistant après l'application des conditions de symétrie, et bloquer ces modes, et eux seuls, de façon minimale comme l'explique le paragraphe 41 En particulier, s'il n'y a aucune condition de symétrie, il faudra réaliser une liaison complète isostatique, par exemple en effectuant une immobilisation « point-trait-plan » classique sur trois nœuds quelconques non alignés. Inversement, s'il y a suffisamment de conditions de symétrie pour qu'aucun mode rigide ne subsiste, alors aucune liaison supplémentaire ne sera nécessaire.

5.2 - Un exemple simple

A titre d'exemple, la figure 12 représente deux modélisations différentes de l'environnement d'une bielle en contraintes planes, dont on n'a modélisé qu'une moitié en raison de la symétrie du problème. Cette bielle est soumise à des actions de contact avec un piston (au niveau du trou du haut) et un vilebrequin (trou du bas).

- La figure 12a représente une modélisation « naïve » : le contact avec le vilebrequin est modélisé par une « liaison pivot » générée automatiquement et l'effort de contact avec le piston est exercé par l'intermédiaire d'un « élément rigide » ;
- La figure 12b est réalisée selon la méthode ci-dessus : sur la bielle complète, les actions de contact sont modélisées par deux glisseurs verticaux de somme nulle, puis chaque force est traduite en une distribution de pression « en cosinus » que l'on applique sur la demi-bielle ; la condition de symétrie laisse subsister un mode rigide, que l'on supprime en bloquant un nœud quelconque parallèlement à l'axe de symétrie.

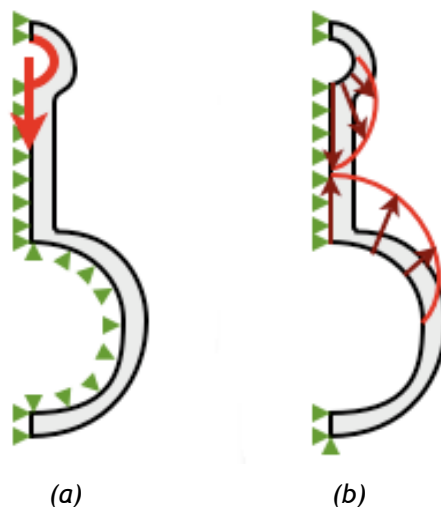


Figure 12 : Deux modélisations de l'environnement d'une bielle : (a) à l'aide de contraintes cinématiques ; (b) sans contraintes cinématiques, en utilisant des distributions d'efforts équilibrées.

Ces deux modélisations correspondent à des hypothèses profondément différentes sur les phénomènes liés au contact : dans le premier cas, on suppose que les surfaces ne se déforment pas et restent circulaires, tandis que dans le deuxième cas, on suppose que les actions de contact sont des pressions réparties « en cosinus ». Bien sûr, ces hypothèses sont toutes deux discutables ; cependant, l'expérience montre que la première est fautive la plupart du temps, tandis que la deuxième possède un domaine de validité plus étendu.

Encore une fois, il est possible d'effectuer quelques entorses aux principes ci-dessus si l'on ne s'intéresse pas aux déplacements, contraintes et déformations au voisinage des zones de contact ; il faudra néanmoins rester prudent vis-à-vis des résultats obtenus.

5.3 - Les limites de cette démarche

Signalons pour finir que cette démarche possède elle aussi ses limites : on ne connaît pas toujours une répartition de pression (ou de cisaillement) représentative du contact que l'on souhaite modéliser ! Cela se produit lorsque l'interaction du produit et de l'objet en contact est mal connue, comme par exemple :

- Lors d'une interaction fluide-structure, c'est-à-dire lorsque le produit est plongé dans un fluide et que ses déformations interagissent avec l'écoulement du fluide de façon réciproque (voir ressource « *La simulation multiphysique* »);
- Lors de contacts non permanents, avec décollements et/ou frottements ; de tels phénomènes sont très courants, par exemple, dans les assemblages boulonnés.

La simulation de tels contacts avec les modèles simples décrits dans cette ressource demande d'effectuer des hypothèses discutables, qui conduisent généralement à des écarts importants avec la réalité. Pour obtenir des résultats pertinents, il est nécessaire d'utiliser des modèles couplés, généralement non-linéaires. Les simulations basées sur ces modèles sont de plus en plus courantes dans les bureaux d'études mais sortent du cadre de cette ressource et, par ailleurs, font encore l'objet de nombreux travaux de recherche.

6 - Bilan

Dans cette ressource, nous avons mis en évidence les points suivants :

1. Dans une simulation par éléments finis, l'action de l'environnement sur le produit est modélisée en termes de quantités nodales : efforts nodaux extérieurs ou déplacements nodaux imposés.
2. Ce formalisme étant peu intuitif, la plupart des logiciels peuvent traduire des modélisations courantes, issues d'autres théories, en quantités nodales.
3. Il est primordial de connaître le domaine de validité des modèles proposés par les logiciels, car leur non-respect peut entraîner des écarts importants avec la réalité : ceci concerne particulièrement les forces nodales « isolées » et les contraintes cinématiques.
4. Pour éviter ces difficultés, en statique, une méthode « sûre » est de modéliser toutes les interactions à l'aide d'efforts extérieurs surfaciques ou volumiques tels que le modèle soit à l'équilibre, et de n'utiliser les déplacements imposés que pour :
 - Imposer les conditions de symétrie éventuelles ;
 - Et supprimer les éventuels mouvements de corps rigide restants sans surcontraindre le modèle.

Les trois autres aspects de la démarche de modélisation sont décrits dans les ressources :

- « *Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage : 1. Adaptation de la géométrie à la simulation* »,
- « *Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage : 2. Choix des éléments* »,
- « *Le modèle en éléments finis du produit dans son environnement ou maillage : 3. Génération et contrôle du maillage* ».

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>