

EBAUCHE DE REFLEXION SUR LES PRE-PROCESSEURS, LES LIMITES DES PRODUITS ET LES POST-PROCESSEURS

Par

Mohammed SEGHIR

Ingénieur Aéronautique (ENAC Paris) - Directeur du bureau d'études "Gestion Plus"

Résumé

La M.E.F. implique des questions de taille des problèmes à résoudre, de représentation numérique et de la résolution associée à chaque mode, d'organisation de la mémoire centrale des ordinateurs utilisés enfin. Après un rappel succinct des fondements de la M.E.F., l'article développe ces différents aspects avant de lister et de commenter brièvement les principales fonctionnalités que l'utilisateur d'un logiciel M.E.F. serait en droit d'attendre des pré et post-processeurs de la génération des années 90. Il conclut par l'affirmation que si les matériels et logiciels sont de plus en plus performants et de moins en moins onéreux, leur exploitation rationnelle passe de plus en plus obligatoirement par la réunion de compétences variées.

Mots clés : méthode des éléments finis (MEF) - pré-processeur - post-processeur.

sols... D'autres domaines d'application moins connus comprennent notamment les sciences biologiques où la méthode aux éléments finis est utilisée pour évaluer les contraintes auxquelles sont soumis le globe oculaire et les os, pour étudier la lubrification des articulations et le mouvement de cellules sanguines dans les vaisseaux capillaires...

D'une manière générale, nous pouvons dire que la méthode des éléments finis est un outil particulièrement adapté pour résoudre les difficultés posées à l'ingénieur ou au scientifique confronté à trois catégories de problème :

- a) - Analyse des équilibres, tel que la solution statique des charges et déformations d'une structure ;
- b) - Analyse des valeurs propres, telles que celles qu'on utilise pour déterminer les fréquences naturelles d'une structure ;
- c) - Analyses transitoires telles que celles rencontrées dans la dynamique des structures.

Dans cet article, on s'intéressera particulièrement aux interfaces suivantes :

- (i) ingénieur-software,
- (ii) software-machine,
- (iii) ingénieur-machine.

Pour faciliter la compréhension de l'exposé, nous rappelons brièvement les principales caractéristiques de la méthode de calcul aux éléments finis.

Les différentes interfaces impliquées dans l'utilisation des outils, que sont les logiciels de calcul selon la méthode aux éléments finis, ne peuvent être correctement expliquées que par référence aux fondements de cette méthode.

1 INTRODUCTION

Les méthodes de calcul numérique basées sur l'analyse des éléments finis existent depuis longtemps ; elles n'ont, cependant, commencé à être utilisées dans la vie pratique que depuis l'avènement des ordinateurs. D'abord implantés sur les grosses machines, elles sont devenues de plus en plus des outils de travail quotidien de l'ingénieur au fur et à mesure de la disponibilité des micro-ordinateurs et du développement des performances de ceux-ci.

Les premières applications de calcul selon la méthode aux éléments finis (M.E.F.) sont apparues dans le domaine de la construction aéronautique. Par la suite, cette utilisation s'est étendue à d'autres domaines de l'ingénierie : dynamique des fluides, transfert de chaleur, mécanique des

Par conséquent, dans cet exposé, nous ferons l'abord un rapide survol des fondements de la M.E.F. et nous nous excusons d'avance auprès des spécialistes de ce sujet auxquels je demande d'être indulgents si le rappel est trop simplifié.

2 LES FONDEMENTS DE LA M.E.F.

La M.E.F. est une des méthodes scientifiques utilisées pour réduire un problème complexe à des proportions plus facilement gérables afin de pouvoir analyser le problème en termes plus simples.

L'objet des différentes méthodes numériques est de trouver la solution d'un problème complexe par la résolution d'un autre plus simple qui représente le premier de manière suffisamment proche.

Par exemple, pour mesurer le périmètre d'un cercle, on peut trouver une première solution approchée en utilisant un carré inscrit dans ce cercle, puis un polygone au nombre de côtés de plus en plus grand. Plus le polygone a de côtés et plus le périmètre mesuré approche le vrai périmètre du cercle.

La M.E.F. effectue cette simplification physique puisqu'elle remplace la structure physique à étudier par un modèle composé d'un nombre fini de composants discrets appelés éléments-similaires aux côtés du polygone de l'exemple. Ces éléments sont liés entre eux en un nombre fini de points appelés noeuds. Le comportement du modèle ainsi défini donne une approximation du comportement de la structure en tant qu'objet continu.

Naturellement, la simplification de la réalité d'un phénomène implique, en retour, une perte de précision du résultat. En effet, la solution d'un modèle résultant d'une approximation ne peut être qu'approximative.

La M.E.F. est une technique de calcul numérique utilisée pour la résolution d'équations différentielles partielles en les convertissant en un ensemble d'équations linéaires simultanées et leur appliquant des conditions aux limites correctes.

Le concept de base repose sur le fait que toute quantité continue (le périmètre d'un cercle, la température ou le déplacement) peut être approchée par un modèle discret composé d'un ensemble de fonctions continues. Ces fonctions sont définies en utilisant les valeurs de la quantité continue en un nombre fini de points dans le domaine et qu'on appelle noeuds.

L'avantage premier de la M.E.F. sur les autres méthodes numériques réside dans le fait qu'une fois le programme écrit pour une catégorie de problèmes, tous les problèmes de cette classe peuvent être résolus sans plus de programmation. De ce fait cette technique est virtuellement indépendante des conditions particulières de géométrie et de chargement.

La M.E.F. possède l'avantage complémentaire de

pouvoir résoudre des problèmes de classes différentes en ayant recours à des programmes très similaires.

Ainsi, généralement on commence par concevoir un système de résolution pour un modèle à deux dimensions qui est ensuite étendu de manière à pouvoir traiter des structures planes, axi-symétriques ou à trois dimensions.

Dans la modélisation de la structure, l'ensemble des éléments et des noeuds forme un maillage. Plus la maille est serrée, plus les éléments sont petits, plus grande sera la précision des résultats.

Les différents éléments d'un modèle inter-agissent les uns sur les autres par l'intermédiaire d'un nombre limité (et souvent réduit) de noeuds. Ces multiples interactions nodales sont représentées mathématiquement par un système d'équations simultanées. Dans le cas d'un calcul de structure, le système exprime les relations entre :

- ▲ les charges et contraintes d'un côté,
- ▲ les déformations de la structure de l'autre.

Un système d'équations simultanées est représenté sous forme matricielle par :

$$\{F\} = [K] \{u\}$$

où $\{F\}$ est un vecteur représentant les forces appliquées et les réactions, $[K]$ est une matrice de coefficients appelée aussi *matrice de rigidité* et $\{u\}$ est un vecteur représentant les déplacements de tous les noeuds du modèle.

La matrice de rigidité représente les effets des charges et contraintes appliquées au modèle à chaque noeud individuel sur l'ensemble des autres noeuds du modèle. Les charges et les contraintes ou déplacements interviennent à chaque noeud dans différentes directions appelées *degrés de liberté*.

Les valeurs de la matrice de rigidité dépendent uniquement de la géométrie du modèle et des hypothèses retenues pour le comportement de l'élément. Le but visé est de déterminer l'état déformé $\{u\}$ du modèle.

$$\{u\} = [K]^{-1} \{F\}$$

La détermination de l'inverse d'une matrice (ici $[K]^{-1}$) implique une grosse somme de calculs.

3 LES EXIGENCES EN CAPACITE DE MEMOIRE CENTRALE

La difficulté majeure rencontrée dans l'informatisation des calculs selon la M.E.F. réside dans les exigences en mémoire vive disponible.

L'analyse des modèles impliquant des systèmes d'équations simultanées requière que les coefficients soient tous présents en mémoire centrale tout au long du processus de résolution des équations.

Il y a une équation pour chaque déplacement indépendant du modèle que l'on appelle degré de liberté.

Dans les modèles à deux dimensions, il y a trois degrés de liberté par noeud car chaque noeud peut effectuer une translation indépendante dans deux directions orthogonales dans le plan du modèle ainsi qu'une rotation dans le plan. Dans les modèles à trois dimensions, il y a six degrés de liberté c'est-à-dire trois translations et trois rotations.

Si l'on prend un modèle comprenant 100 noeuds par exemple, le système d'équations simultanées à résoudre contiendra $3 \times 100 = 300$ équations pour un modèle à deux dimensions ou $6 \times 100 = 600$ équations pour un modèle à trois dimensions.

Le problème de la mémoire intervient quand on se rend compte que la matrice $\{K\}$ du modèle à 100 noeuds contient :

- $300 \times 300 = 90\,000$ termes dans l'exemple à deux dimensions ou,
- $600 \times 600 = 360\,000$ termes dans l'exemple à trois dimensions.

Si chaque terme était représenté par 8 octets (cas d'une machine équipée d'un processeur à 16 bits), la mémoire nécessaire pour stocker la matrice $\{K\}$ devrait être de 720 Ko pour le cas à deux dimensions et de près de 3 Mo (2 880 Ko) pour l'exemple à trois dimensions.

Heureusement, la situation réelle n'est pas aussi dramatique. En effet, la théorie montre que la matrice $\{K\}$ est toujours symétrique ; c'est-à-dire que tous ses termes situés au-dessus de la principale diagonale (depuis le haut à gauche à en bas à droite) constituent une image miroir de ceux situés en dessous de cette même diagonale. De ce fait, la suppression de cette redondance diminue les exigences de mémoire par un facteur proche de deux.

En plus de cette forte réduction, le besoin en mémoire peut encore être diminué du fait que la matrice est généralement fortement bandée. C'est à dire que les termes non nuls de la matrice sont agglutinés dans une bande le long de la diagonale principale. En dehors de cette bande, tous les termes sont nuls et peuvent donc être ignorés.

La matrice est bandée car chacun des noeuds n'est relié qu'à un nombre relativement réduit d'autres noeuds du modèle. Si tous les noeuds du modèle étaient numérotés de manière à ce que les liaisons entre noeuds aient des numéros très voisins, les termes non nuls de la matrice $\{K\}$ formeront une bande réduite en largeur.

Dans un modèle bien ordonné la bande de rigidité ne représente plus que 25 à 30% du nombre total de degrés de liberté, réduisant ainsi de façon très significative les

besoins en mémoire. Dans l'exemple du modèle de 100 noeuds pris à trois dimensions une demi-bande de 16 noeuds contient approximativement 57 000 termes non nuls et non redondants, aboutissant à une réduction de 84% du nombre original de 360 000 termes.

Une fois réduite à son minimum possible, la matrice de rigidité doit pouvoir être logée dans la mémoire centrale de la machine de la manière la plus adaptée à l'utilisation que le programme de calcul doit en faire.

Ainsi, dans l'exemple précédent d'une matrice de 57 000 termes correspondant à une demi-largeur de bande de 16 noeuds, si l'on adopte le format simple précision à 32 bits la mémoire nécessaire pour stocker cette matrice serait de 912 Ko et de 1.824 Ko pour la double précision à 64 bits.

Comme la largeur de bande est variable suivant les modèles, les programmes utilisent un vecteur unidimensionnel pour identifier les termes de la matrice de rigidité. Pour déterminer le terme "i" correspondant à la ligne "l" et à la colonne "c", nous calculons :

$$i = (l-1) \times b + c \quad \text{où } b \text{ est la largeur de bande.}$$

4 REPRESENTATION NUMERIQUE

Souvent les résultats donnés par les ordinateurs ne sont pas exacts au sens mathématique du terme. Si tout un chacun connaît la signification de $y = 2/3$, un ordinateur qui emploie l'arithmétique à base 10 ou 2 n'a pas de nombre exactement égal à $2/3$.

Voyons comment les ordinateurs représentent les nombres.

Pour pouvoir manipuler un large éventail de nombres, des plus petits aux plus grands, les ordinateurs utilisent la représentation dite de la "virgule flottante". Il s'agit d'une notation scientifique telle que le nombre 0,8752002458E3 qui signifie 875,2002458. Dans la représentation en virgule flottante on trouve un exposant, qui est le chiffre 3 dans cet exemple, et une mantisse qui est le nombre 0,8752002458. Le nombre de chiffres significatif dans un nombre d'ordinateur est généralement fixe. Cela limite la précision des opérations arithmétiques.

On appelle "résolution" d'un ordinateur la précision relative des opérations arithmétiques qu'il effectue. Ainsi, pour un nombre comprenant six chiffres significatifs, cette résolution sera, au mieux, d'une part sur 999 999 soit $1E-6$.

Aujourd'hui, rares sont les ordinateurs qui utilisent la notation décimale ordinaire. La plupart représentent l'exposant et la mantisse par des nombres binaires. Les formats de virgule flottante les plus couramment utilisés sont indiqués dans le tableau ci-après.

Les valeurs de la résolution données dans ce tableau indiquent le plus petit nombre qui, ajouté à 1,0

Format	Exposant	Mantisse	Résolution
Simple précision (32-bits)	8 bits	24bits	5,9E-8
Double précision (64-bits) IBM/DEC	8 bits	56 bits	1,38E-17
Double précision (64-bit) IEEE	11 bits	53 bits	1,11E-16

donne un résultat calculé par l'ordinateur différent de 1,0.

L'erreur d'arrondi est la différence entre une valeur infiniment précise et sa représentation dans le format de l'ordinateur qui a une longueur finie. C'est la limite irréductible de la précision d'un ordinateur donné.

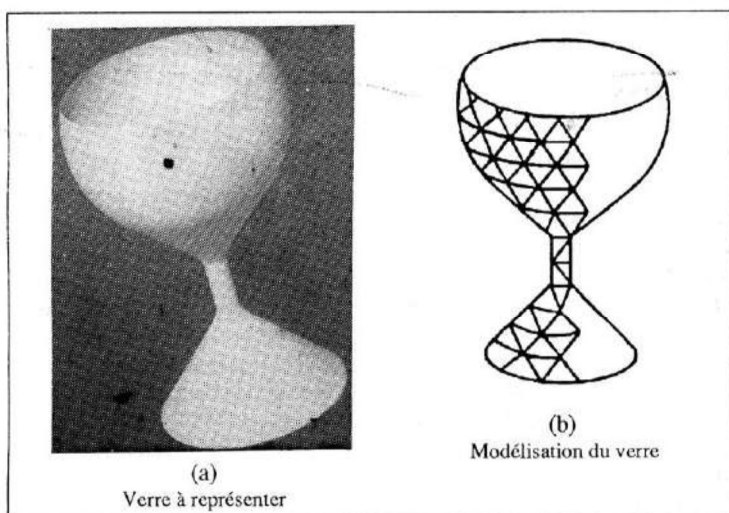
Dans un calcul en chaîne, l'erreur d'arrondi relative est estimée de façon conservatoire en comptant le nombre total des opérations et en le multipliant par la "résolution" indiquée par le tableau.

L'erreur d'arrondi relative n'est pas l'erreur maximum possible du résultat, car outre l'erreur d'arrondi, il y a d'autres sources d'erreurs inhérentes aux différentes méthodes de calcul numérique utilisées.

Les processeurs ordinaires (non spécialisés pour le calcul numérique) bien que présentant des performances (3 à 4 millions d'opérations par seconde - MIPS), ne peuvent effectuer que quelques milliers d'opérations de virgule flottante par seconde.

La raison en revient au fait que les processeurs généraux tel que le 80386 d'Intel ou le 68020 de Motorola ne peuvent représenter les nombres que sous la forme d'entiers. Les opérations de virgule flottante y sont effectuées grâce au recours à des routines de software.

Considérons les besoins en nombre d'opérations nécessaires pour représenter à l'écran une figure à trois dimensions telle qu'un verre à pied par exemple [1].



La première action consiste à modéliser la structure. Le verre est défini en termes de fonctions quadratiques représentant des formes simples : une sphère, un cylindre et deux surfaces hyperboliques, toutes tronquées par un ou plusieurs plans. Par exemple, l'équation quadratique de la sphère s'écrit : $X^2 + Y^2 + Z^2 = K^2$.

De telles équations doivent être résolues pour diverses valeurs de X et de Y. Il en résulte un ensemble de coordonnées de points représentant la surface du verre. Dans un processus appelé "tessellation", chaque point est traité comme étant le sommet d'un triangle. La totalité de la surface est ainsi représentée par un grand nombre de tels triangles comme les facettes d'un diamant.

Si l'on compte une image constituée de 12 000 points, cette tessellation aura nécessité 120 000 opérations en virgule flottante.

Pour que la surface générée puisse subir des rotations, translations et variation d'échelle, il est nécessaire de multiplier les coordonnées de chaque sommet par une matrice carrée de transformation (4x4). Chaque point nécessitera alors 28 opérations à virgule flottante et la figure globale nécessitera encore 330 000 opérations.

L'image générée doit encore être débarrassée des lignes et surfaces cachées ; ce qui nécessitera encore six calculs par point soit, au total, encore 72 000 opérations supplémentaires.

S'il faut encore donner un effet de perspective, il y a lieu de projeter le volume en trois dimensions sur le plan de l'écran ; ce qui nécessitera encore 130 000 calculs.

Pour donner un effet de relief en représentant les ombres, il est nécessaire, d'abord de calculer les effets des sources de lumière soit 360 000 opérations, puis marquer les nombres soit 300 000 autres opérations en supposant que l'objet ne prend que 30% de la surface de l'écran.

Au total, cette représentation nécessite 1,5 million d'opérations en virgule flottante.

Un processeur ordinaire n'est capable d'effectuer une opération en virgule flottante qu'à la vitesse de 1,5 micro-seconde. Pour afficher l'image du verre, il nécessiterait théoriquement plus de 2,25 secondes.

Avec les co-processeurs arithmétiques, cette vitesse est accrue dans un facteur de huit à dix.

Ces co-processeurs travaillent en parallèle avec le processeur principal en se chargeant automatiquement des opérations arithmétiques qu'elles effectuent systématiquement en virgule flottante dans un format à 64-bits.

5 L'ORGANISATION DE LA MEMOIRE CENTRALE

Lorsque l'on se réfère à la mémoire centrale d'un micro-ordinateur, il y a lieu de prendre en considération trois types de mémoire :

- ▲ mémoire conventionnelle,
- ▲ mémoire étendue par prolongement (extended memory),
- ▲ mémoire étendue par élargissement (expanded memory).

Les mémoires sont diversifiées en fonction de leur localisation et du type de processeur utilisé.

La figure 5.1 [2] reproduit la répartition de la mémoire centrale d'un processeur Intel 80286. Le processeur 80386 présente la même configuration sauf que la mémoire totale atteint 4 giga-octets.

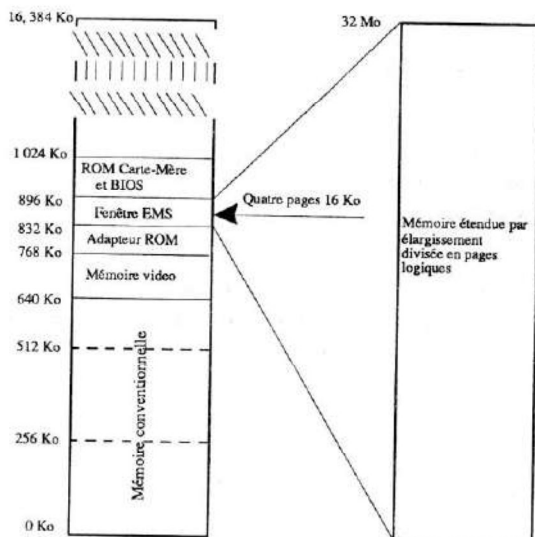


Figure 5.1 : Répartition de la mémoire

Cette représentation montre que la mémoire étendue par élargissement se situe en dehors de la portion directement adressable par le processeur.

La mémoire étendue par élargissement ne peut pas être utilisée pour faire tourner des applications et est plus lente que la mémoire étendue par prolongement ou la mémoire conventionnelle.

La mémoire utilisable dépend également de la largeur du bus d'accès (ou d'adressage) à la mémoire centrale. Un bus d'adressage consiste dans l'outil de numérotation utilisé pour l'identification de toutes les adresses de la mémoire RAM.

Si la largeur du bus est de 20 chiffres binaires, le nombre total d'adresses identifiables est de 1 048 576 chiffres binaires soit de un méga-octet. Ce bus est utilisé pour les processeurs de la classe du 8086 et 8088

de la gamme des PC XT et compatibles.

Le processeur 80286 de la gamme des PC AT utilise un bus de 25 chiffres binaires ; ce qui lui donne une capacité d'adressage de 16 méga-octets.

Le processeur 80386 utilise un bus de 32 chiffres binaires ; ce qui lui donne une capacité d'adressage de 4 giga-octets. Il importe de relever que cette capacité d'adressage est égale à celle de l'ordinateur IBM 3090 modèle 600 Sierra qui coûte plus de dix millions de dollars.

Il convient cependant, de ne pas perdre de vue qu'il s'agit là de capacité théorique et que, dans la pratique, d'autres limitations existent. Ainsi pour l'IBM PS/2 Modèle 80, par exemple, il n'existe que trois fentes d'insertion de 32-bits. Pour approcher la capacité maximum, il est nécessaire d'utiliser trois plaques de 1,3 giga-octets chacune. Au prix de 500 dollars le méga-octets, cette extension coûtera plus de deux millions de dollars.

Une autre limitation provient du mode opératoire du processeur.

Les processeurs d'Intel peuvent fonctionner selon deux modes :

- ◆ le mode réel,
- ◆ le mode protégé.

En *mode réel*, le processeur fonctionne selon les caractéristiques des micro-processeurs 8086 et 8088. Cette faculté a été décidée par le fabricant pour que les nouveaux processeurs 80286 et 80386 puissent utiliser les logiciels développés pour les 8086 et 8088. Le mode réel signifie, par conséquent, le mode 8086 et 8088. En mode réel, le processeur émule de façon totale le processeur 8086 et 8088 y compris les limitations de ces derniers.

En *mode protégé*, qui est le mode d'origine des nouveaux processeurs 80286 et 80386, le processeur fonctionne tel qu'il a été conçu avec accès à toute la mémoire prévue. Il se trouve que ce mode de fonctionnement n'est pas compatible avec les logiciels écrits pour le mode réel. Pour pouvoir utiliser en mode protégé un logiciel conçu pour le mode réel, il est nécessaire de le réécrire pour les nouveaux processeurs.

Pour utiliser toute la mémoire disponible sur la machine, il ne suffit pas d'avoir le processeur et le bus adéquats. Il faut encore que le système opérationnel permette d'atteindre cette capacité.

Le système DOS a été conçu pour le mode réel. Aussi ne peut-il adresser plus d'un méga-octet de mémoire centrale. Sur ces 1 024 Ko, 384 Ko sont réservés pour les besoins propres du système. De ce fait, le maximum de mémoire adressable par le système DOS ne peut excéder 640 Ko. En utilisant des périphériques (écran principalement) plus économes en mémoire, on peut aller jusqu'à 736 Ko en mémoire centrale selon les machines.

Le système protégé a été conçu pour les nouveaux systèmes opérationnels tels que OS/2 qui peuvent adresser plus d'un méga-octet de mémoire centrale.

Si la mémoire étendue par prolongement se comporte exactement comme la mémoire conventionnelle, c'est loin d'être le cas pour la mémoire étendue par élargissement.

En effet cette dernière a constitué un pis aller pour pallier la limite de 640 Ko de mémoire adressable par le système DOS.

La mémoire étendue par élargissement ne fait pas partie de l'espace d'adressage du processeur. Pour utiliser cette catégorie de mémoire, on a recours à la technique de la pagination et du fenêtrage. Le système crée des pages de 16 Ko contiguës de manière à former des blocs de 64 Ko échangeables entre la mémoire conventionnelle et la mémoire étendue par élargissement. Ces blocs de 64 Ko peuvent adresser 32 Mo de mémoire par l'intermédiaire d'un gestionnaire d'extension mémoire. Or, pour garder la trace des enregistrements sur la mémoire étendue par élargissement, il est nécessaire d'avoir présente, en mémoire conventionnelle, une base de donnée.

Cette base devant grandir avec l'importance du programme et des enregistrements en mémoire ainsi étendue, la limite de 640 Ko sera encore plus rapidement atteinte.

Ainsi, une plaque de mémoire étendue par élargissement de 2 Mo peut n'offrir en fait que 300 à 400 Ko.

En mode protégé, la mémoire étendue par élargissement est totalement inutile.

En mode protégé, le processeur 80286 génère automatiquement 1 giga-octet (1 024 Mo) de mémoire dans un espace physique d'adressage de 16 Mo. Pour le processeur 80386 il en est de même avec le 1 Go qui devient 64 téra-octet et l'espace de 16 Mo qui devient 4 Go. En outre, les deux processeurs acceptent la multiprogrammation.

Quand un programme requiert d'avantage de mémoire que ce qui est physiquement disponible, le processeur utilise automatiquement, d'abord la mémoire étendue par prolongement, puis le disque dur comme mémoire virtuelle et l'échange entre la mémoire de base et la mémoire étendue par prolongement ou le disque dur se fait automatiquement.

Avec les processeurs de la famille 80386 trois modes de fonctionnement sont ainsi disponibles :

- ◆ le mode réel,
- ◆ le mode protégé,
- ◆ le mode réel virtuel.

Le *mode réel* est le mode "compatible 8086". Dans ce mode, le système 80386 se comporte comme un "Turbo PC".

Le *mode protégé* assure la compatibilité totale avec le système 80286 avec, en plus, une nouvelle unité de gestion de la mémoire (MMU).

Le *mode réel virtuel* permet au processeur de fonctionner en mode protégé tout en simulant le mode réel. Ce mode est surtout utile lorsque l'on veut utiliser l'ordinateur pour faire tourner simultanément plusieurs applications utilisant des systèmes opérationnels différents. C'est le vrai "multi-tâches" en ce sens que chaque application tourne en totale indépendance par rapport aux autres y compris pour le redémarrage du système (reboot).

6 LES PRE-PROCESSEURS DES LOGICIELS M.E.F.

La M.E.F. exige un contrôle rigoureux des données. Aussi la préparation des données revêt-elle une importance de premier ordre.

En effet, il est nécessaire de :

- dessiner correctement la géométrie de la structure,
- générer les noeuds, les éléments finis, les propriétés des matériaux et les chargements,
- modifier ces données pour les diverses analyses.

Comme la modélisation par éléments finis implique obligatoirement le contrôle permanent de la géométrie et du maillage, l'outil de dessin a une importance capitale.

Outre le traçage proprement dit, le dessin de la structure doit pouvoir se prêter à des transformations sur les coordonnées telles que :

- a) - translations,
- b) - rotations,
- c) - homothéties,
- d) - conversions dans divers systèmes de coordonnées :
 - (i) cartésiennes,
 - (ii) cylindriques,
 - (iii) sphériques.

Il est souhaitable que le maillage soit fait automatiquement avec une numérotation optimisée des éléments et des noeuds afin de réduire le plus possible la largeur de bande. Ce maillage est généralement fait à partir d'un profil donné et le long d'une trajectoire donnée en partant d'un profil pour rejoindre un autre selon un balayage suivant deux trajectoires avec rapprochement par interpolation linéaire.

Les données, une fois saisies, doivent pouvoir être vérifiées avant traitement. Pour ce faire un module de vérification automatique de cohérence de la structure est nécessaire afin d'éviter les omissions, les superpositions et autres erreurs. La vérification automatique devrait au moins permettre :

- ✓ le nombre total de noeuds,
- ✓ le nombre total de groupes d'éléments,

- ✓ le nombre de cas de chargement,
- ✓ le nombre de fréquences,
- ✓ le code de type d'analyse,
- ✓ le système de coordonnées

De plus on devrait pouvoir obtenir :

- a) - la *carte des noeuds* indiquant tous les points de l'espace 3-D qui ont servi à bâtir le modèle. Cette carte doit indiquer pour chaque noeud les six degrés de liberté, les trois coordonnées, le système de coordonnées, éventuellement, la température et les noeuds non utilisés.
- b) - la *carte des éléments* (poutres, plaques...) indiquant le type d'élément, le nombre d'éléments dans le groupe, le nombre de matériaux différents, les propriétés des matériaux, la masse spécifique et le poids spécifique, les facteurs de charge par élément (3 ensembles de facteurs de charge qui concernent la gravité, les forces réparties de pression et /ou les températures), l'orientation et la définition de chaque élément.
- c) - la *carte des forces nodales* indiquant le cas de chargement convenable, la direction de la force ou du moment.
- d) - le ou les *multiplicateur(s) de charge* pour chaque élément et pour chaque cas de charge désiré et de forces nodales ainsi que les combinaisons.

Dans la préparation des données, il est souvent plus commode de procéder par sous-ensembles simples et d'assembler ensuite ces parties pour en faire un ensemble plus complexe. Dans cette opération d'assemblage, il sera nécessaire d'éliminer les lignes dupliquées et de renuméroter l'ensemble des éléments et des noeuds.

De plus une visualisation complète et sélective doit pouvoir être effectuée.

Cette visualisation, pour être utile, devrait permettre :

- a)- l'affichage ou non des axes,
- b)- de modifier le facteur d'agrandissement,
- c)- d'indiquer ou non la numérotation,
- d)- de faire apparaître les noeuds seulement, les éléments seuls ou les deux, avec ou sans numérotation,
- e)- d'effectuer des rotations,
- f)- de faire disparaître ou apparaître les lignes cachées d'une structure 3-D,
- g)- d'utiliser diverses couleurs,
- h)- d'afficher la vue en perspective,
- etc ...

Un autre important facteur de la préparation des données d'entrée réside dans les *générateurs de données dynamiques*.

Ces générateurs reçoivent comme *inputs* les valeurs

de la fréquence, du coefficient d'amortissement, le type de spectre d'entrée soit en déplacement soit en accélération, l'amplitude de l'excitation de la base, les directions de l'excitation et le type de combinaisons de modes à utiliser (SAP IV, guide NCR ver. 1.92 ou 1.92 mod.). Ils génèrent le fichier pour l'analyse de la réponse spectrale pour une excitation sinusoïdale constante en fréquence et en amplitude.

Signalons enfin, l'utilité des possibilités de liaison avec un gestionnaire de base de données.

Il s'agit de pouvoir consulter, en ligne, une bibliothèque de données (propriétés des sections de poutres métalliques, propriétés des matériaux, ...). Certains programmes permettent la consultation automatique de cette bibliothèque et la vérification des données avant la validation de leur entrée sans se soucier de la conversion des unités de mesure ou de l'ordre d'entrée des valeurs.

7 LES POST-PROCESSEURS DES LOGICIELS M.E.F.

Pour exploiter les résultats d'un calcul de structure, on a généralement besoin de faire figurer dans le dossier les pièces suivantes :

- ✓ le dessin de la structure avec les cotations et les commentaires,
- ✓ un dessin montrant le maillage,
- ✓ un dessin contenant la déformée selon des échelles pratiques,
- ✓ un tracé des isovaleurs,
- ✓ les déplacements pour chaque mode et les déplacements correspondants à la combinaison calculée et détermination des extrêmes.

En outre, il est nécessaire de pouvoir imprimer et afficher à l'écran, sous forme tabulaire, les composantes des contraintes en ayant la flexibilité dans la combinaison des résultats pour des facteurs de chargements différents. Comme l'impression de ces sorties représente une tâche fastidieuse, il est préférable de pouvoir obtenir ces sorties pour une partie de la structure, un ou plusieurs groupes d'éléments choisis par l'ingénieur conduisant l'analyse.

De plus, il est utile de pouvoir superposer la géométrie du modèle à sa déformée en indiquant un coefficient d'exagération, afin de pouvoir la visualiser puis de l'imprimer.

Pour le calcul dynamique, l'animation permet de visualiser les vibrations libres et les superpositions modales.

8 CONCLUSIONS

L'utilisation des logiciels M.E.F. sur micro-ordinateurs est aujourd'hui très généralisée grâce au développement des performances de ces derniers, prin-

ciement dans les domaines suivants :

- a) - la vitesse des processeurs,
- b) - la taille de la mémoire centrale,
- c) - la largeur de bande des bus de transmission de données ou d'adresses.

L'implantation de ces logiciels sur micro n'est cependant pas un fait nouveau. En effet, dès le tout début des années 80, on vit apparaître sur le marché des logiciels de M.E.F. Certes, ils étaient limités du point de vue nombre de degrés de liberté ou d'éléments, mais ils ont pu être utilisés assez efficacement. Au fur et à mesure des progrès technologiques des micro-ordinateurs, ces logiciels ont subi des mues successives pour s'adapter au nouvel environnement et tirer avantage des nouvelles performances.

Aujourd'hui on peut affirmer qu'avec une machine dont le prix n'excède pas 4 à 5 000 dollars il est possible de traiter tous les problèmes courants de calcul de structure.

Outre le calcul proprement dit, la profusion des autres applications utiles à l'ingénieur et disponibles sur micros tels que les bases de données, les logiciels de dessin, les boîtes à outils, rendent (plus facilement que sur les grosses machines) l'intégration des travaux d'études.

Aujourd'hui, avec l'avènement des réseaux (réseaux ordinaires, réseaux experts, réseaux neuraux), des dispositifs de partage des ressources (hardware et software), des machines réellement multi-tâches et des considérables moyens de stockage (disques compacts notamment), il est désormais possible de concevoir et de mettre en oeuvre des installations :

- relativement pas chères,
- ne nécessitant aucune préparation spéciale des salles,
- rapidement mises en oeuvre,
- très efficaces,
- intégrées,
- avec une fiabilité de fonctionnement très appréciable.

Cependant, il convient de ne pas perdre de vue que si ces avantages existent effectivement, leur obtention n'est pas garantie dans tous les cas.

En effet, si les logiciels et les machines sont devenus plus performants, la complexité de leur installation et configuration a considérablement augmenté.

Les cas d'incompatibilité ne sont pas tous documentés, d'une part, et les manuels pas suffisamment explicites, d'autre part.

Le marché de l'informatique est de plus en plus encombré de charlatans et de fournisseurs sans scrupules.

Ces considérations militent en faveur de la recommandation suivante pour la mise en oeuvre d'une solution informatique de calcul selon la M.E.F.:

Pour obtenir la solution informatique la mieux adaptée aux calculs selon la M.E.F., il est nécessaire aujourd'hui, de réunir des compétences pratiques et théoriques aux plans :

- ✓ des unités centrales,
- ✓ des périphériques,
- ✓ de la connectique,
- ✓ du software systèmes opérationnels,
- ✓ des logiciels M.E.F.,
- ✓ des logiciels outils de bureaux d'études,
- ✓ des passerelles possibles entre les logiciels M.E.F. et les autres outils du bureau d'études ①

9 REFERENCES

- [1] Exemple décrit par Mauro Bonomi dans la revue Byte du mois de mars 1988 p. 198.
- [2] Représentation tirée du livre de Scott Mueller "Upgrading and repairing PC's" p. 449 ISBN 0-88022-395.

