



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



« Le calcul par éléments finis et son évolution dans le domaine des structures »

J.C. CRAVEUR



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Aucune formation « éléments finis » à l'école d'ingénieurs (promo 82).

Premiers calculs EF dès mon embauche à l'ONERA en septembre 1983.

40 ans de calcul EF, de manière quasi-quotidienne, jusqu'en septembre 2023.

Suivi de l'évolution des problématiques posées, des codes de calcul (en particulier de SAMCEF), de l'informatique, du nombre de calculateurs et de leur formation.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Interactions avec le CNRS

20 écoles thématiques CNRS-IN2P3 ou CNRS depuis 1996.

1 ou 2 PRIE par an de 1996 à 2023 (Projet de Recherche Industrielle Encadré, 3^{ème} année du cycle ingénieur) : travail en équipe de 3 ou 4 étudiants, de mi-septembre à mi-mars. Presque exclusivement donné par le CPPM puis par le SERAS et l'IUSTI.

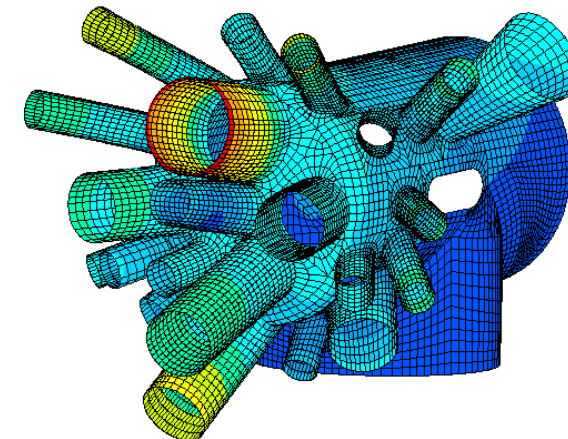
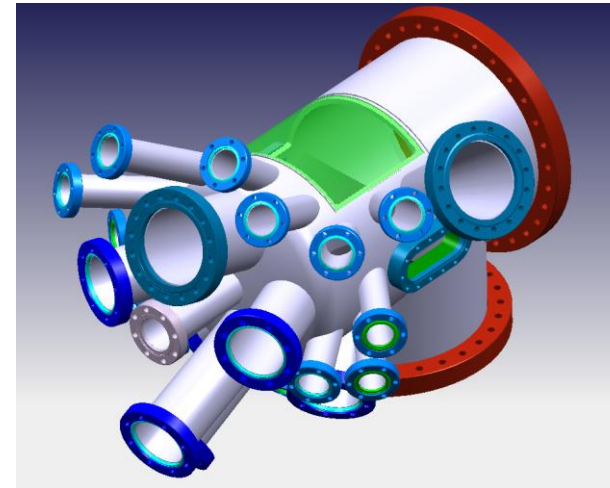
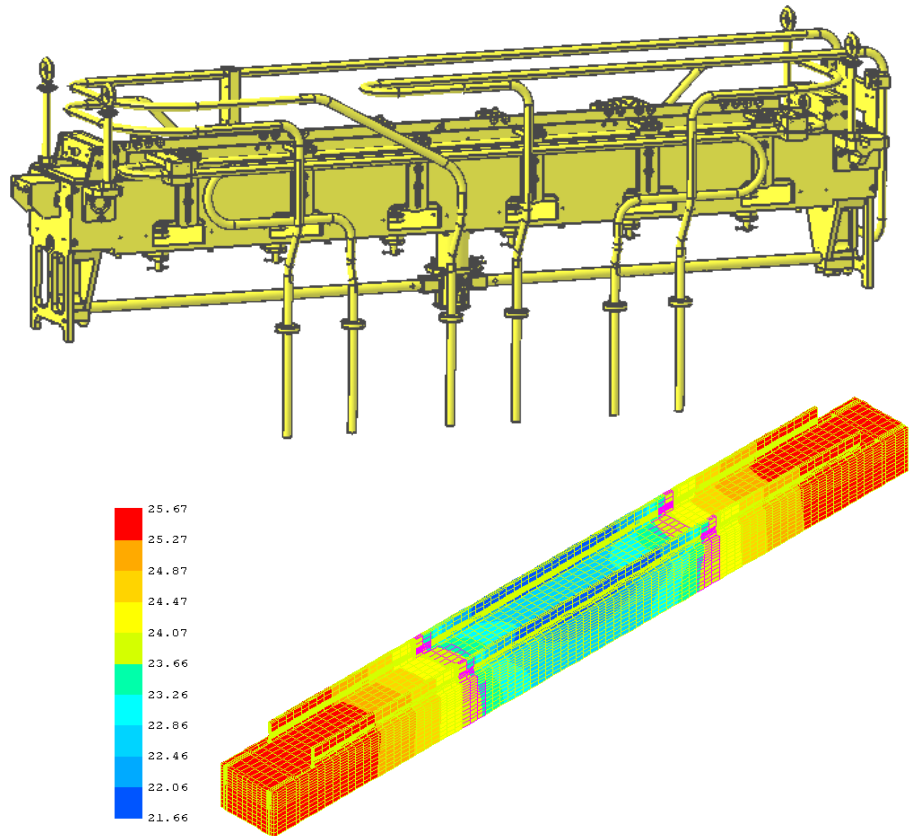
1 stage ingénieur par an de 1996 à 2023, 2 ou 3 certaines années : de début avril à fin septembre, 3^{ème} année du cycle ingénieur.
Grenoble, Annecy, Marseille, Nantes, Strasbourg, Caen.

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Interactions avec le CNRS

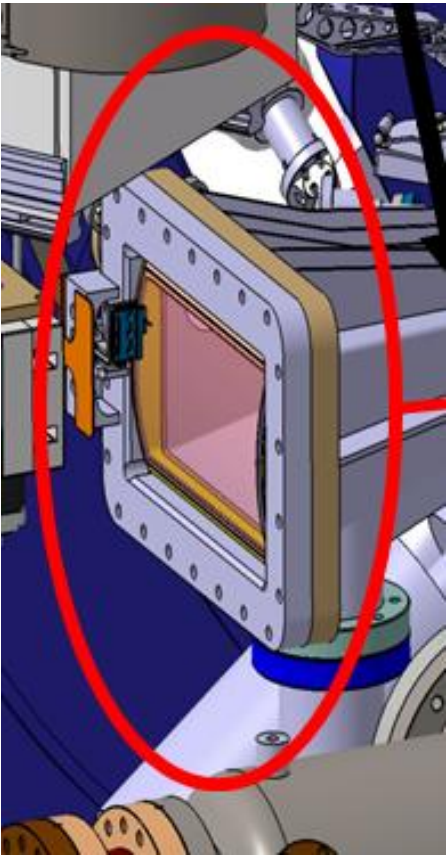
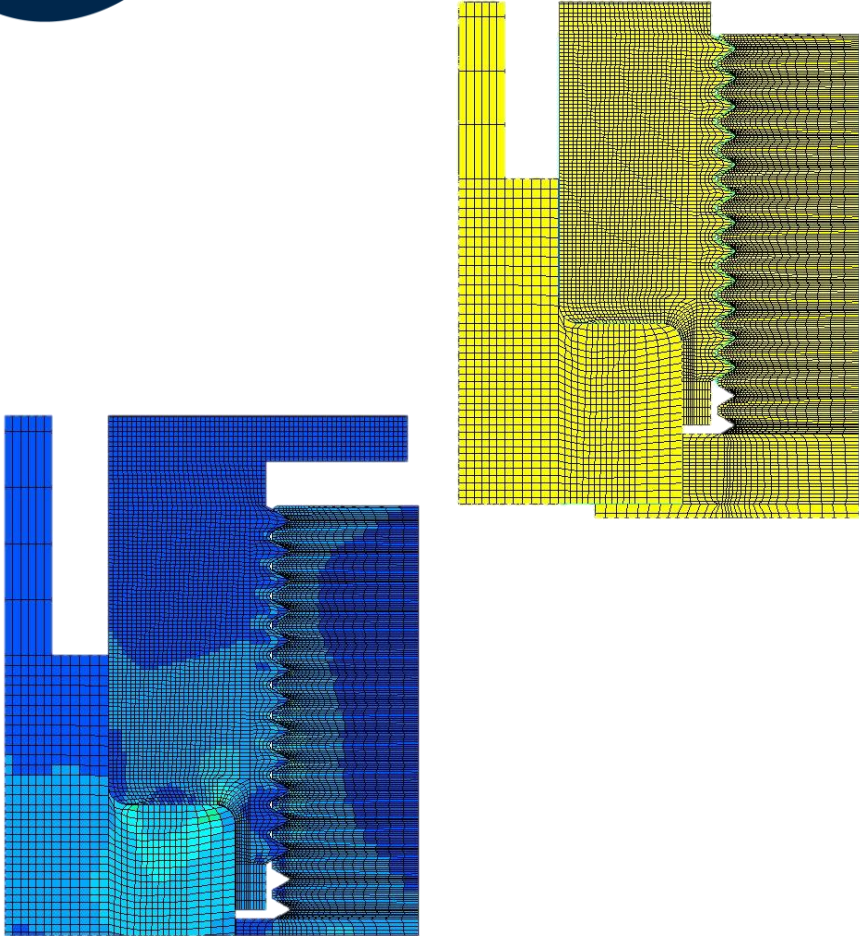


RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS

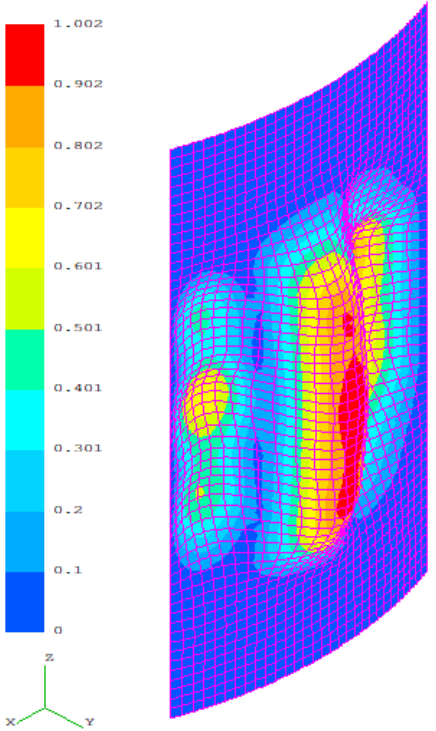


Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Interactions avec le CNRS



Déplacements nodaux (DX,DY,DZ) : Modules des déplacements
 Mode critique 1
 Ch. critique 1.1837
 Echelle géométrique
 100.
 Echelle numérique 1/17.100046
 Echelle de la déformée 22.00

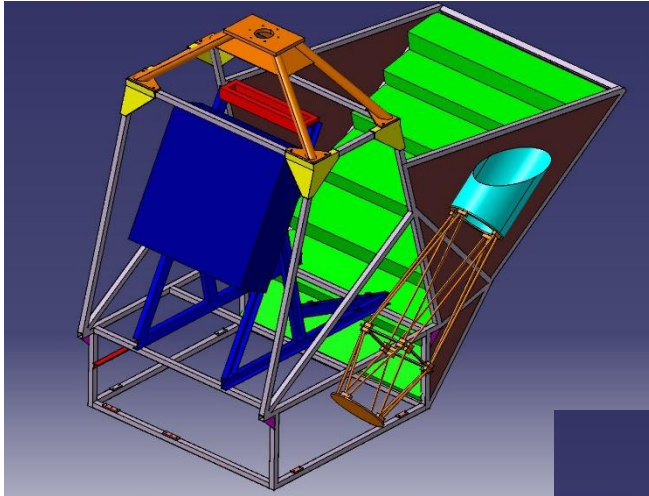


Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

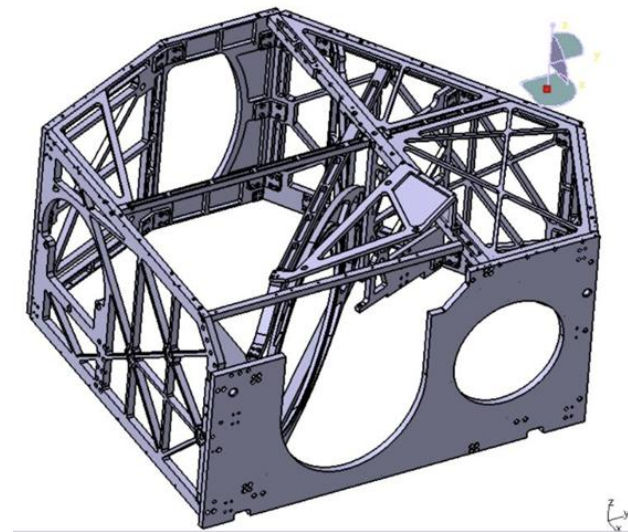
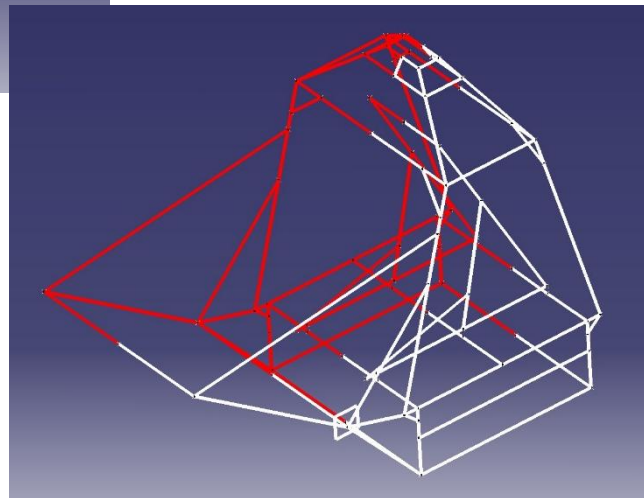
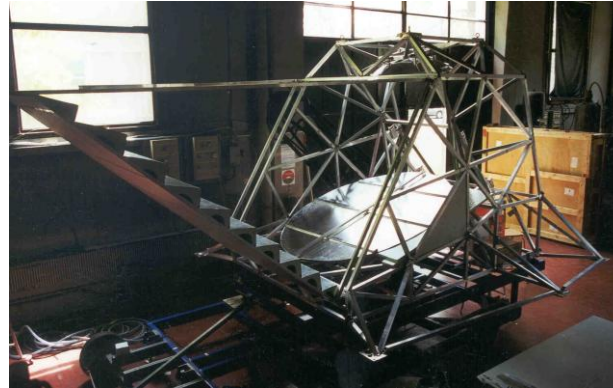
Interactions avec le CNRS



RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS



Archéops version 1
et version 2



Antarès, Nemo, Virgo, Atlas, Coriolis...

Bobines du LCMI, hublots béryllium et kapton, cristaux des lignes de lumière, échelles pixel ...



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Méthode des forces pour les treillis (1955)

Mise en place d'un système matriciel dans lequel les inconnues sont les forces aux nœuds, résolution par un ordinateur.

Quand le problème est hyperstatique (cas le plus fréquent), choix des inconnues hyperstatiques, puis écriture du système en fonction de celles-ci.

Interventions manuelles lors de la résolution, ne se prête pas à l'informatisation et à une résolution « automatique ».



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Méthode des déplacements pour les treillis (1956)

Mise en place d'un système matriciel dans lequel les inconnues sont les déplacements des nœuds.

Méthode automatique et complètement « transparente », valable que le treillis soit iso ou hyperstatique, intérieur ou extérieur.

Aucune intervention manuelle en cours de processus de résolution, aucune limite théorique liée aux treillis (complexité et nombre de membrures, charges, conditions aux limites,...).

Seule limitation d'ordre informatique : capacité des ordinateurs.

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Méthode des déplacements pour les treillis (1956)

Poutre « réelle » : géométrie 3D



Poutre « RDM » : fibre neutre, propriétés équivalentes de la section qui n'est pas définie explicitement



Poutre « EF » : 2 points, fonctions mathématiques les liant, propriétés équivalentes de la section qui n'est pas définie explicitement





Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Concept de système discret :
information concentrée aux nœuds



Résolution séquentielle, fondamentalement différente de celle de la RDM :

- calcul du déplacement des nœuds alors qu'on ne connaît pas encore toutes les forces extérieures appliquées sur le treillis,
- calcul des MNT à chaque extrémité de chaque membrure,
- connaissant ce qui se passe aux deux extrémités de chaque membrure, utilisation de la RDM pour revenir si besoin à ce qui se passe dans chaque membrure.

Pas de maillage. Nœud = lieu de raccord de diverses membrures et points de liaison au monde extérieur.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Méthode des déplacements pour les treillis (1956)

Mise en place du système $F = Kq$

F : charge extérieure appliquée aux nœuds du treillis

K : matrice de raideur du treillis

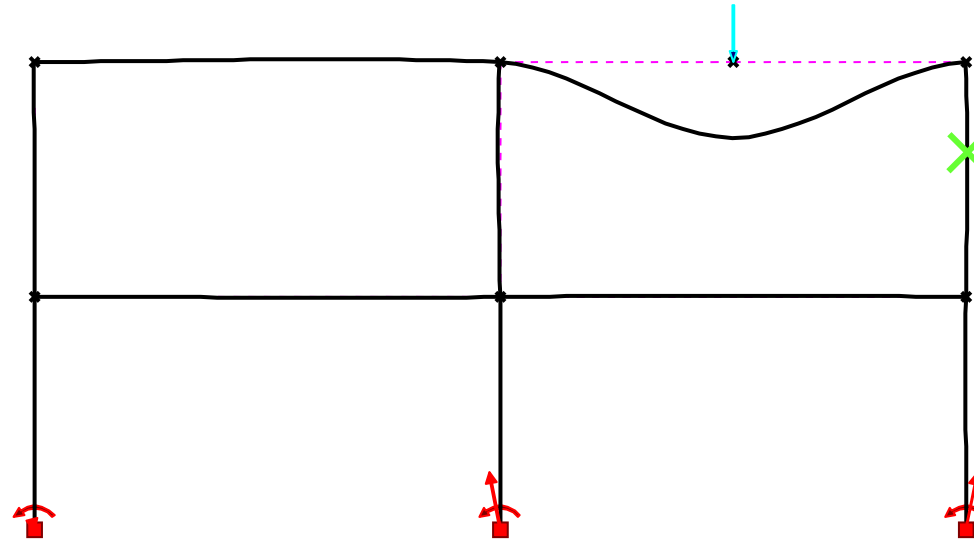
q : déplacements et rotations éventuelles des nœuds

Résolution en 6 étapes

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Méthode des déplacements pour les treillis (1956)



Si on veut le déplacement d'un point d'une membrure, plutôt que de reconstruire entre A et B, pourquoi ne pas avoir dès le départ défini deux membrures liées au point d'intérêt ? Puisque c'est l'ordinateur qui travaille, on peut ajouter des tronçons !

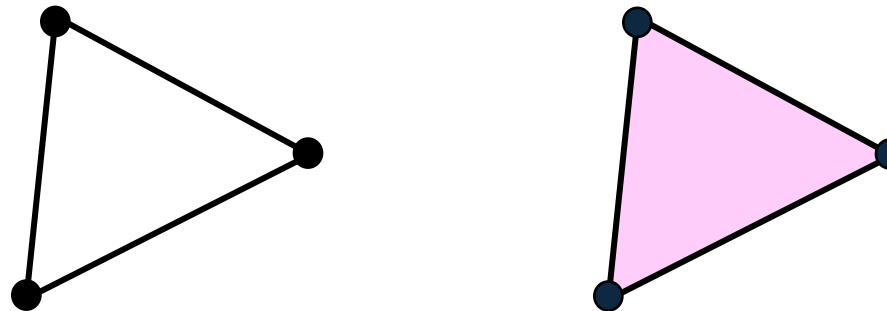
Notion de maillage : membrures physiques décomposées en « morceaux ».

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Méthode des déplacements pour les treillis (1956)

Treillis triangulaire : on sait le calculer par la méthode des déplacements.



Triangle « plein » : si on sait ramener sur les trois sommets l'information décrivant le comportement de la matière contenue dans le triangle, on sait terminer le calcul par la méthode des déplacements.

Changement de nom : méthode des éléments finis !



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Assise mathématique des méthodes d'approximation

Courant a mis en place les fondements mathématiques de la méthode dès 1943 : principes variationnels, méthode des résidus pondérés en formulation faible.

EF : par qui ?

Sûrement plusieurs en même temps, dans plusieurs pays... Turner (1956) est souvent cité, Clough a associé élément et fini en 1960 (« the finite element in plane stress analysis »). Très grande contribution de l'Université de Liège dès la fin des années 50.





Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Début des éléments continus développés en même temps que les ordinateurs (1958-1980)



A Berkeley en 1958, Clough et Wilson utilisaient un IBM 701 (4k!), les gros problèmes avaient 50 ddl environ. En 1959, un IBM 704 allait déjà 100 fois plus vite.

En 1976, supercalculateur Cray-1, capable d'effectuer 130 millions d'opérations en virgule flottante par seconde. Depuis le début des années 2000, vitesse de calcul des supercalculateurs en Tflops (milliers de milliards d'opérations en virgule flottante par seconde).

En 1985, lancement des SUN3, premières stations de travail Unix dans un monde où les « main frames » régnaient en maître : RAM de 8 Mo, disque de 300 Mo !



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Vers 1964, traitement (théorique) de tous les problèmes de statique linéaire pour des structures en matériaux isotropes avec des éléments de barre, poutre, membrane, plaque, coque et volume.

Ordinateurs de capacité insuffisante : méthode des super-éléments, technique de décomposition en série de Fourier développées.

Vers 1968, traitement (théorique) de tous les problèmes d'analyse modale pour des structures en matériaux isotropes.

Vers 1970, traitement (théorique) de tous les problèmes de réponse harmonique et de réponse transitoire linéaire pour des structures en matériaux isotropes.

Toujours limité par les machines : les progrès des méthodes numériques sont plus rapides que les progrès de l'informatique.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Entre 1972 et 1980, traitement des problèmes de flambage linéaire, de thermique non linéaire stationnaire et transitoire, de mécanique non linéaire géométrique et de plasticité. Extension des méthodes au calcul des structures comprenant des matériaux composites.

Mécanique des sols (porosité, diffusion, fluage, relaxation), électricité, électromagnétisme, mécanique des fluides, début de la mécanique explicite (crash)...

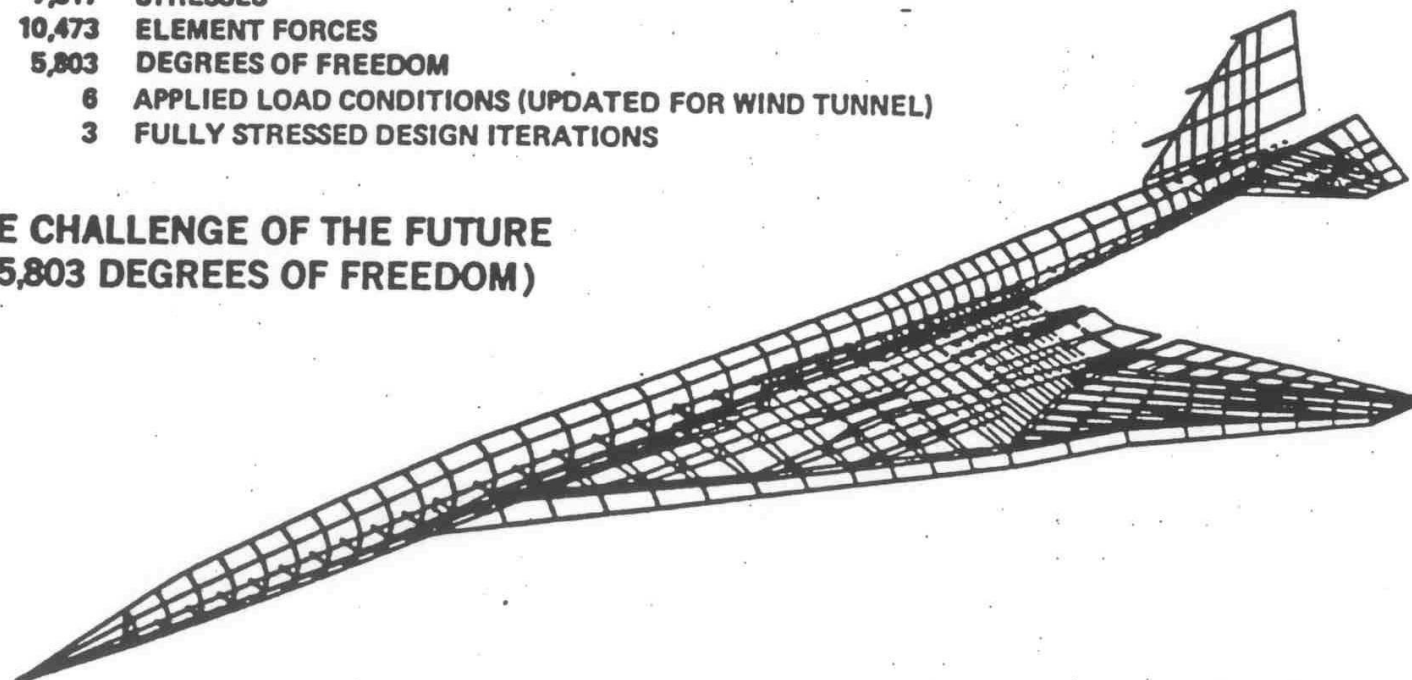
La plupart des grands codes existent, développés soit par des organismes gouvernementaux (NASA pour Nastran, CEA pour Castem), des universités (Liège pour Samcef, Stuttgart pour Permas), des industriels (Westinghouse pour Ansys, Framatome pour Systus) et tant d'autres aujourd'hui disparus...

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



1,280	JOINTS
644	LOAD VECTORS
2,834	BARs
2,149	PANELS (1,328 TRIANGULAR MEMBRANES AND 821 SHEAR WEBS)
7,817	STRESSES
10,473	ELEMENT FORCES
5,803	DEGREES OF FREEDOM
6	APPLIED LOAD CONDITIONS (UPDATED FOR WIND TUNNEL)
3	FULLY STRESSED DESIGN ITERATIONS

**THE CHALLENGE OF THE FUTURE
(5,803 DEGREES OF FREEDOM)**



TYPICAL ADVANCED DESIGN FINITE-ELEMENT MODEL FOR STATIC STRENGTH IN THE LATE 1970s

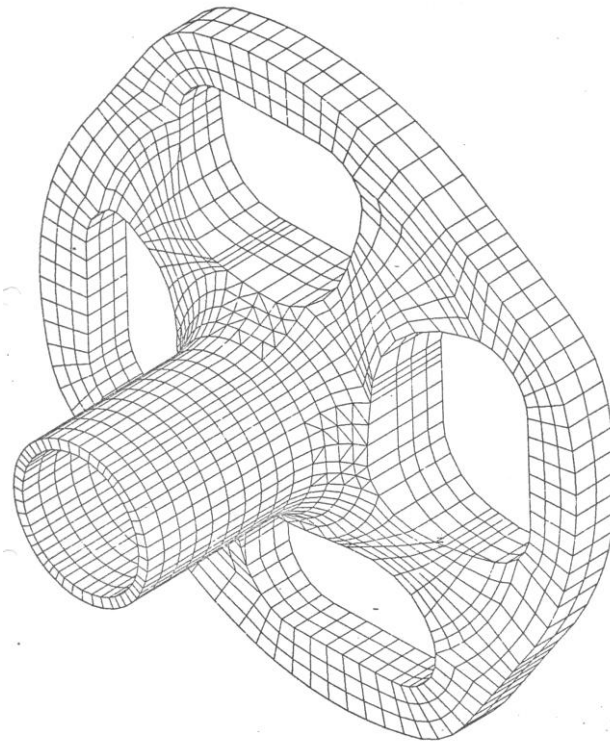
Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Aérospatiale Marignane (JU SAMCEF 1984)

Dimensionnement rotor principal hélicoptère



RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS



TEMPS	CALCUL
-------	--------

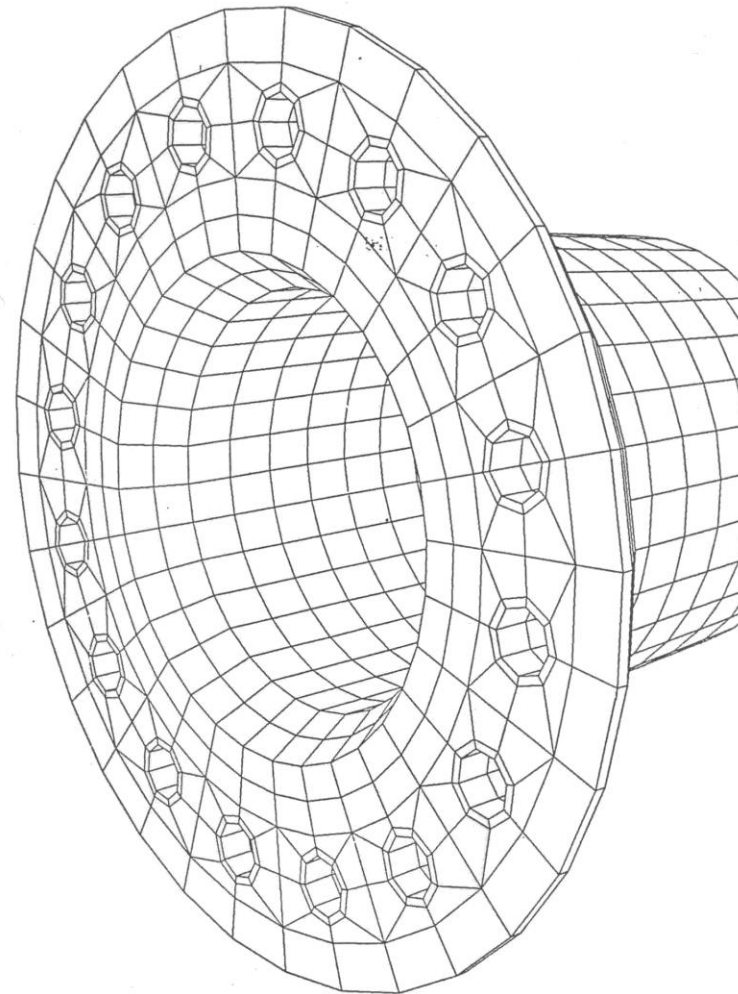
- PREPRO 205"
- (DONT REORGANISATION 120")
- GENERATION 111 "

• RESOLUTION	15 heures
--------------	-----------

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



On comprend mieux pourquoi les trous sont octogonaux et les maillages si grossiers. Mais les résultats loin d'être absurdes. Et ces hélicoptères ont volé plusieurs décennies.



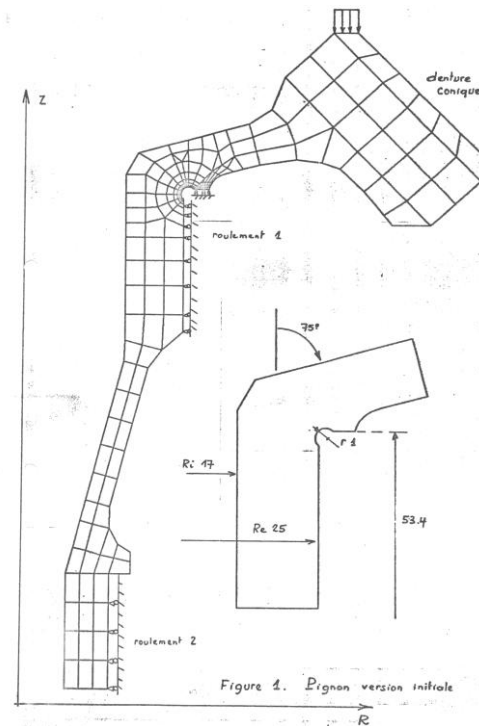
Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Aérospatiale Marignane (JU SAMCEF 1984)



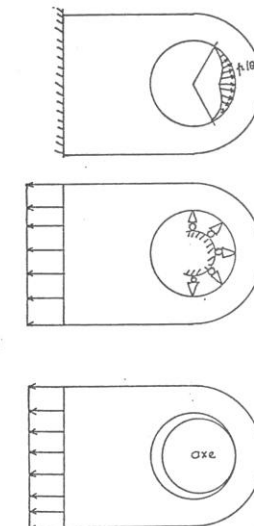
RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS

Utilisation d'OPTI de SAMCEF pour le dimensionnement d'un pignon.



INFLUENCE DES ACTIONS DE CONTACT
AXE - ALESAGE
DANS LES CALCULS DE CHAPE

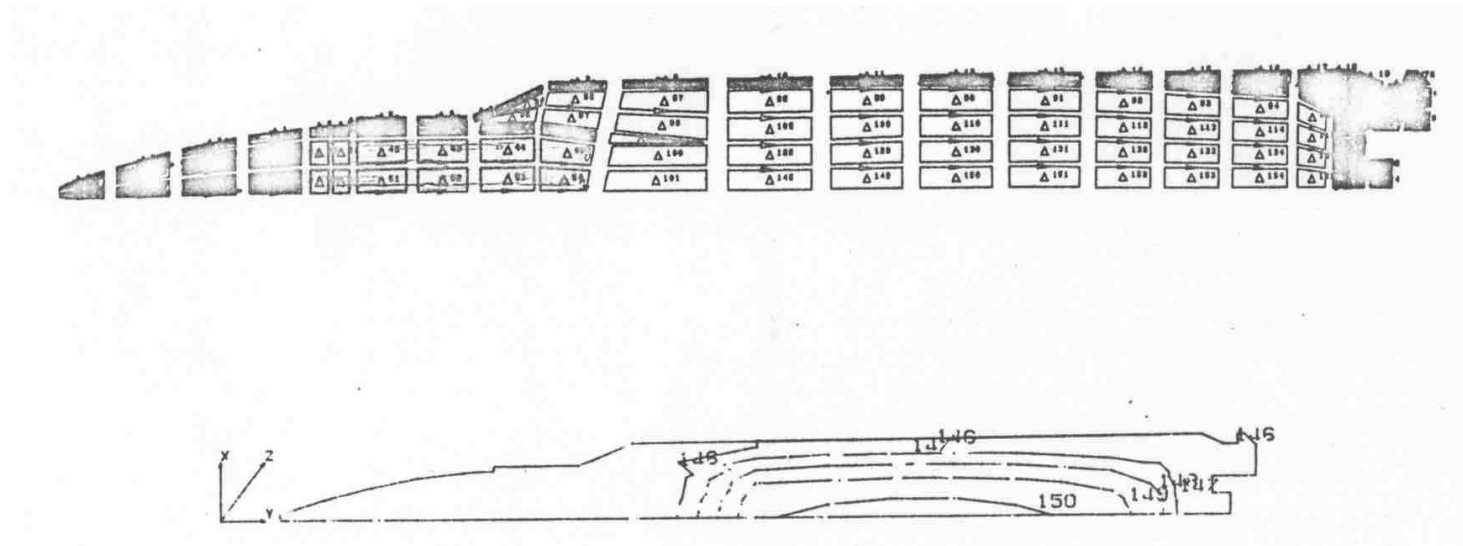
Modèles prenant en compte le contact nœud à nœud en linéaire...



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Fabrique Nationale Belge (JU SAMCEF 1984)

Auto-inflammation de poudres dans une munition



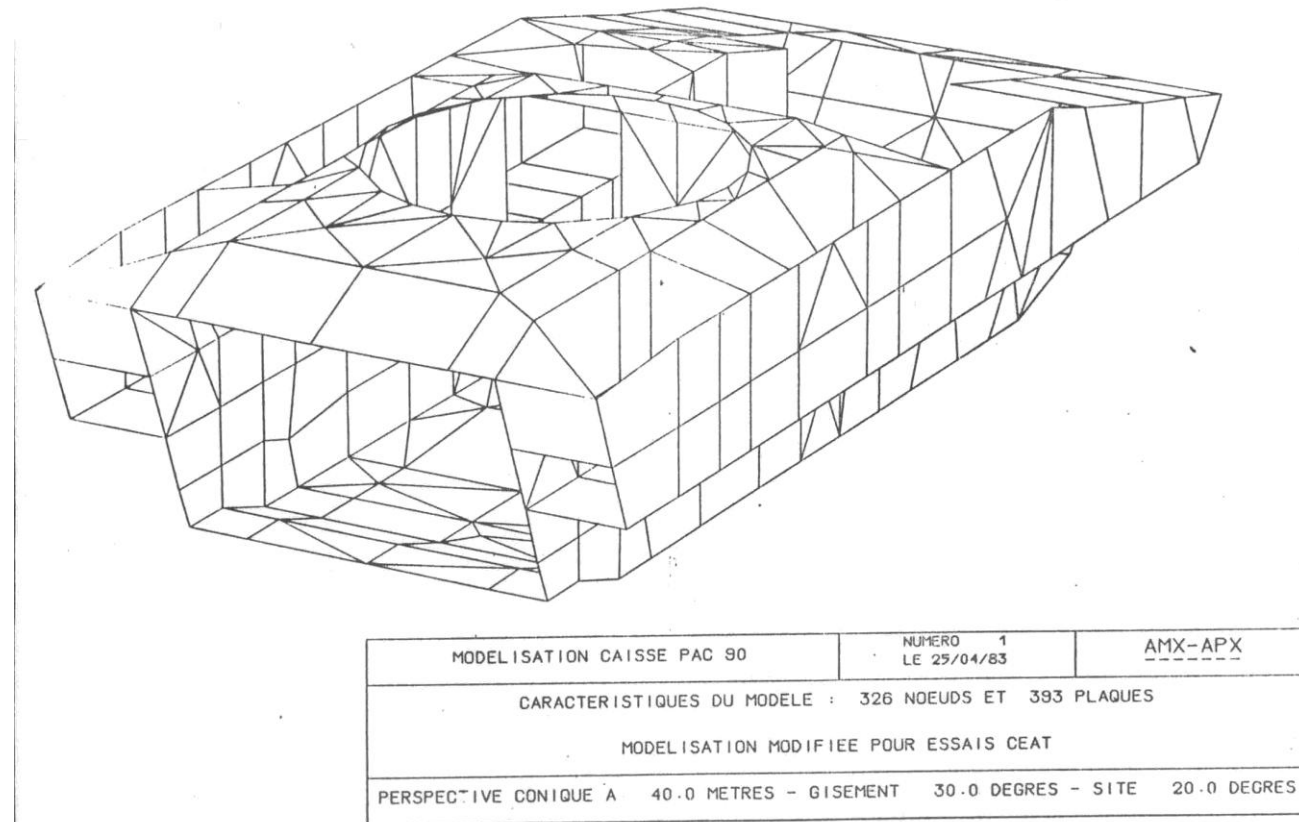
Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

AMX-APX (JU SAMCEF 1984)

Dimensionnement de la caisse d'un véhicule blindé



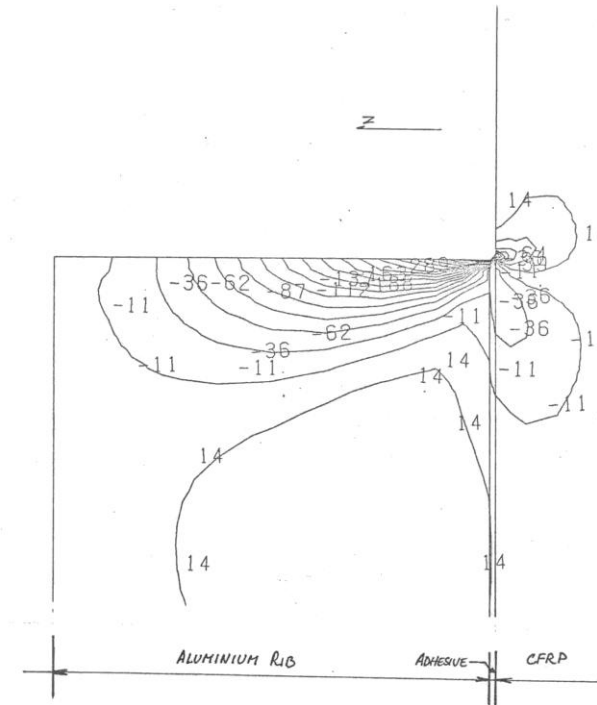
RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS



Iso-contraintes de pelage dans un joint soumis à une élévation de température.

Le pré et le post avaient déjà bien évolué en 1984. Mais par rapport à aujourd'hui...

Pas de CAO, mais planche à dessin, rotring et calques. Et pourtant, « ils » arrivaient déjà à faire des choses sympa et compliquées !



ISOCONSTRAINTES T_2 (EFFORT DE PELAGE) DANS
UN JOINT COLLÉ SOUMIS A $\Delta T = 100^\circ C$



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Et depuis le début des années 80 ?

Développement de l'analyse numérique : nouvelles méthodes d'extraction de valeurs propres, de résolution non linéaire (en particulier pour le flambage)...

Développement d'éléments à large spectre, limitant le contenu des bibliothèques dans les codes industriels, ce qui évite que les utilisateurs se trompent de formulation...

Réécriture des solvers pour profiter des progrès des machines : vectoriel, parallèle, augmentation de la vitesse d'exécution et de la capacité de stockage.

Apparition de nouvelles méthodes d'inversion spécifiques aux matrices peu peuplées (sparse solver), particulièrement efficaces pour les problèmes de grande taille.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Et depuis le début des années 80 ?



Développement des outils graphiques : passage des terminaux Tektronix 4111 monochromes aux consoles d'aujourd'hui, couleurs, tracés de courbes, visualisation et animation des résultats...

Développement des mailleurs automatiques, des interfaces utilisateur, des échanges de maillage puis de géométries entre logiciels.

Intégration des codes de calcul dans des solutions CAO.

Développement de modèles mathématiques de plus en plus complexes pour décrire les phénomènes physiques avec plus de précision (plasticité, contact, hyperélasticité, composites, mécanique de l'endommagement, mécanique de la rupture, ...).



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Et depuis le début des années 80 ?



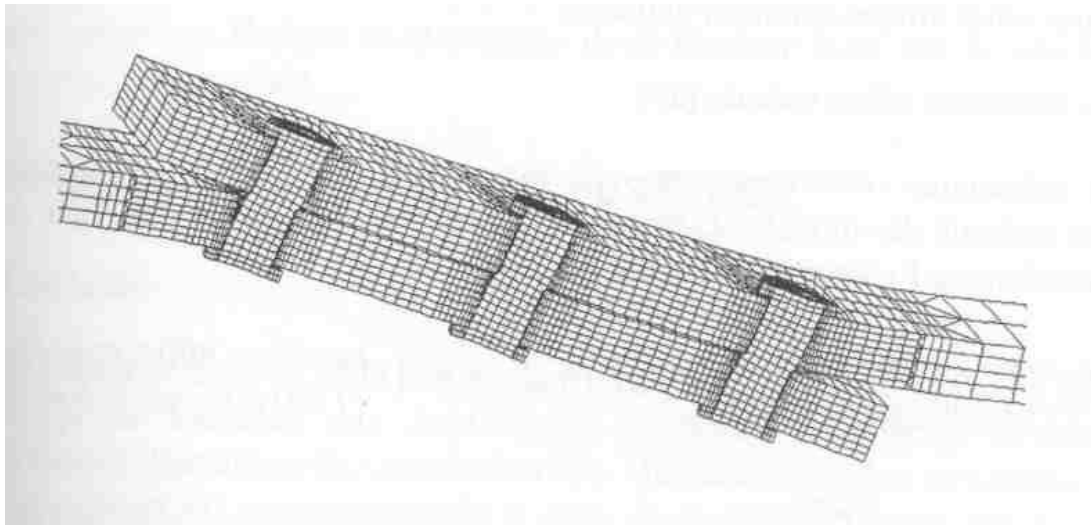
Développement des méthodes d'optimisation : dimensionnement, forme, topologique, empilement et orientation plis composites

Développement de l'approche multi-physique : couplages entre disciplines pour traiter un problème plus global

- Interaction fluide-structure
- Piezo-electricité
- Thermomécanique découplée et couplée
- Electrocinétique-thermique-mécanique des fluides-mécanique des structures

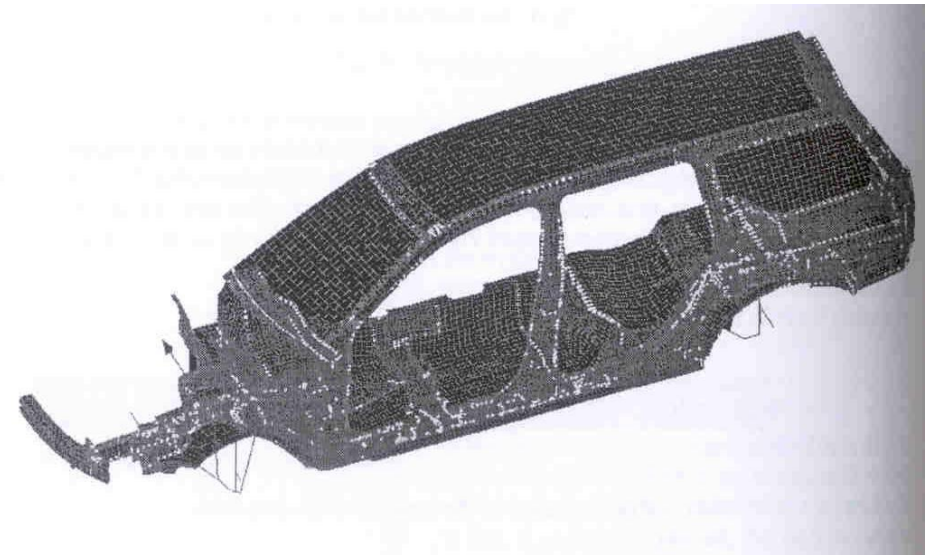
Snecma moteurs (JU SAMCEF 1998)

Analyse 3D d'une liaison boulonnée



TSE GmbH (JU SAMCEF 1998)

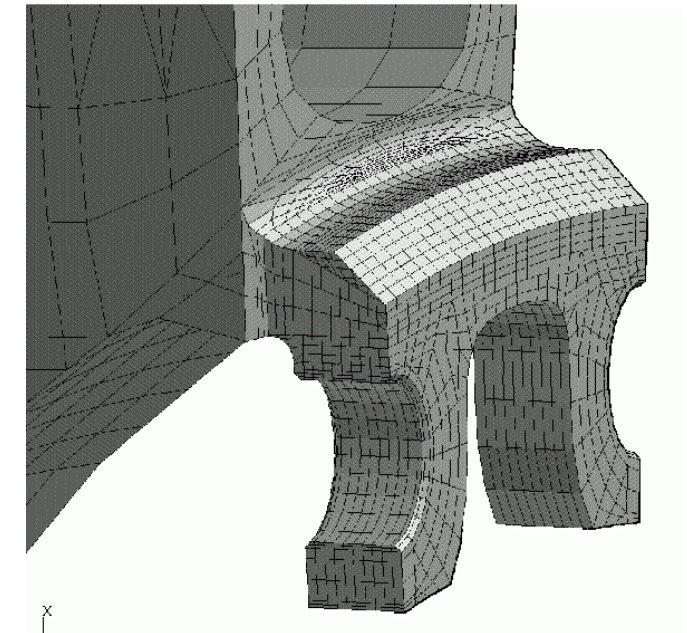
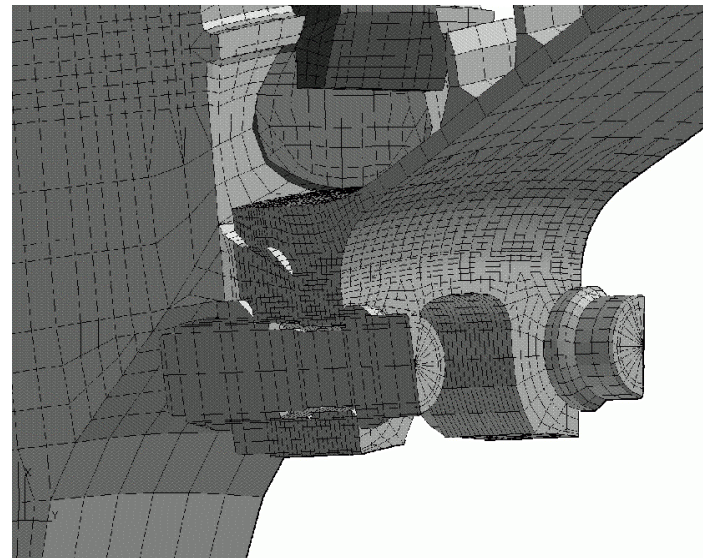
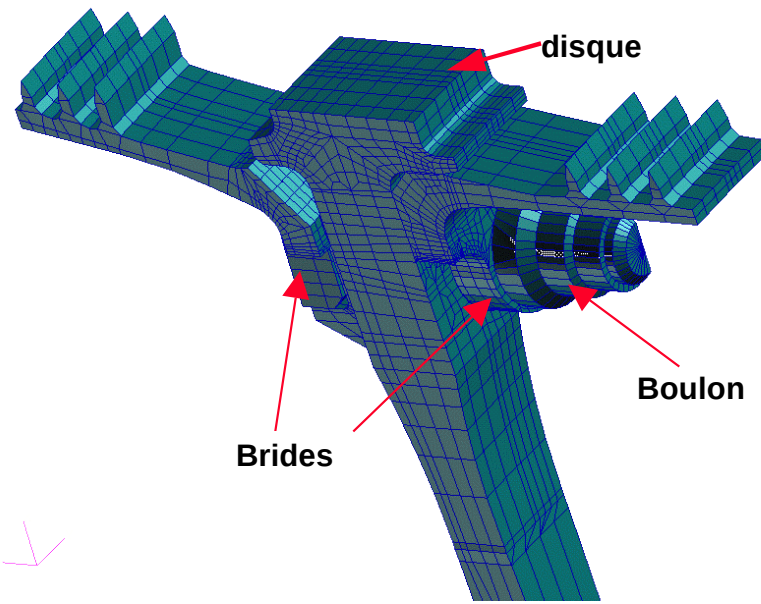
Optimisation du nombre et de la localisation des points de soudure



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Snecma moteurs (JU SAMCEF 2003)

Analyse transitoire 3D d'une liaison boulonnée



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Rheinmetal Landsysteme GmbH (JU SAMCEF 2005)

Simulation of parametric tracked-vehicle-models with Mecano

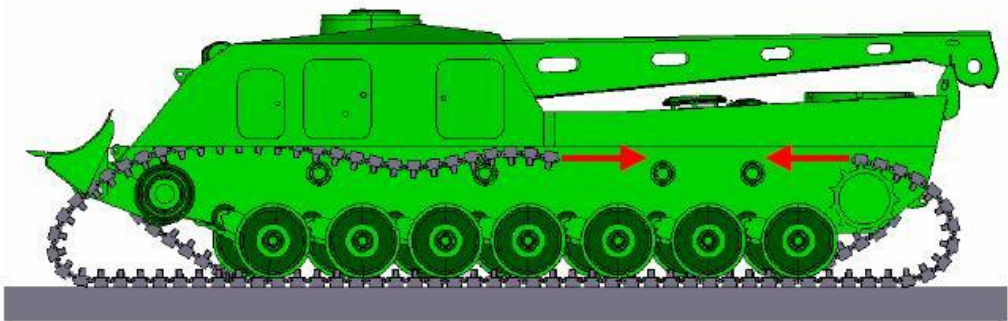


Figure 3: Generation of initial track-positions

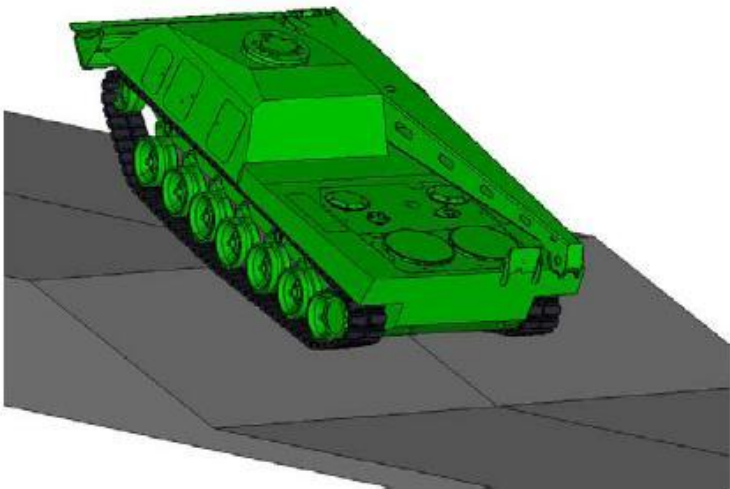


Figure 12: Example Armoured Recovery Vehicle driving onto a ramp onto ramp

	30%	40%	50%
			6 km/h
			8 km/h
			10 km/h
			12 km/h
		14 km/h	14 km/h
		16 km/h	16 km/h
		18 km/h	
20 km/h	20 km/h		
22 km/h	22 km/h		
24 km/h	24 km/h		
26 km/h			
28 km/h			
30 km/h			
32 km/h			
34 km/h			

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Snecma moteurs (JU SAMCEF 2005)

3D cracking calculations: application to a turboshaft engine component

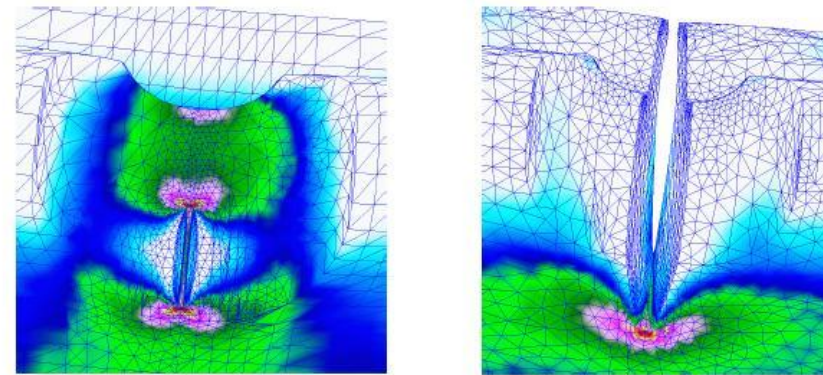
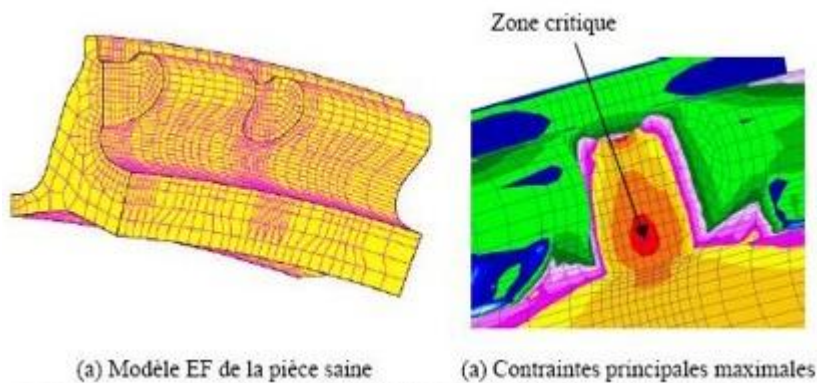


Figure 10 Déformées et iso-contraintes de Von Mises pour différentes tailles de fissure.

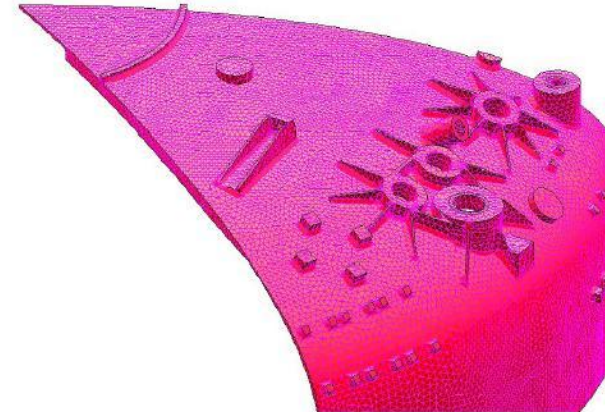
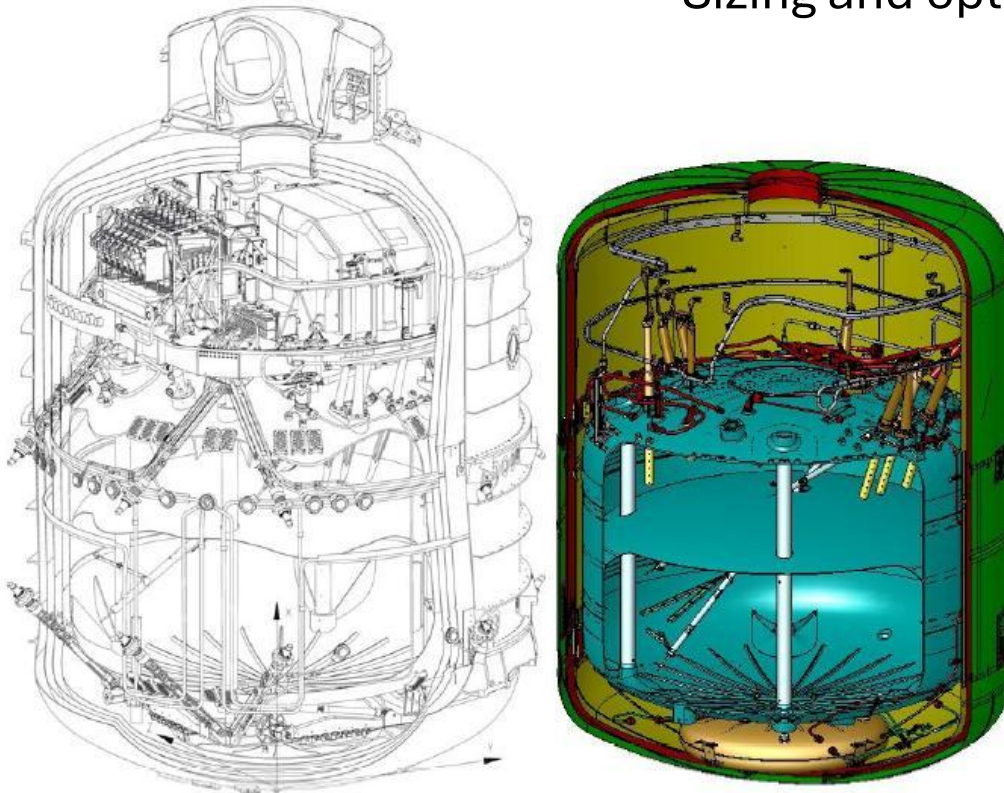
Aujourd'hui, énorme simplification dans la gestion de l'évolution des fissures (et donc du maillage 3D) par la méthode XFEM. Mais pas de changement notable en mécanique de la rupture.

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

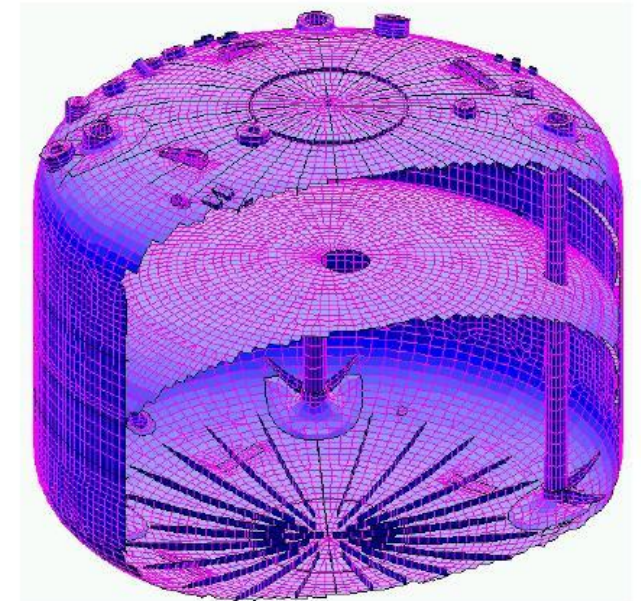


Air Liquide DTA (JU SAMCEF 2003)

Sizing and optimization of HERSCHELL satellite HTT tank



Les modes propres de la structure avec fluide compressible ont également été calculés à l'aide d'un modèle spécifique (réalisé avec un autre logiciel).





Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Calcul de structures



Outil extraordinaire, qui a eu entre 1960 et 1980 un développement scientifique impressionnant, étroitement lié au développement des ordinateurs.

Développé par quelques petites équipes (USA, Belgique, Allemagne, France, Royaume Uni), utilisé par quelques équipes d'ingénieurs mécaniciens spécialisés, employés dans de grandes entreprises, principalement dans le spatial et l'aéronautique, le nucléaire, puis l'automobile, le naval et le ferroviaire.

Problèmes « simples », analyses essentiellement linéaires (et statiques), systèmes matriciels de petite taille, matériaux métalliques et un peu de composites. Maillages « grossiers », faits à la main, fortes limitations dues à l'espace disponible et au temps de calcul.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Calcul de structures



Outil, qui a eu entre 1980 et 2000, une diffusion importante dans tous les secteurs industriels, liée entre autres à l'apparition des stations de travail Unix. Utilisé par un nombre en forte croissance d'ingénieurs spécialisés, plus nécessairement mécaniciens.

Plus grande convivialité de l'interface homme-machine, facilité de maillage due à l'arrivée des mailleurs automatiques, 2D puis 3D, pré-traitement et post-traitement interactifs sur écran couleurs.

Problèmes complexes, analyses linéaires et non linéaires, systèmes matriciels de grande taille (>100 000 ddl), tous types de matériaux. Maillages « fins », limitations dues à l'espace disponible et au temps de calcul malgré les progrès extraordinaires de l'informatique.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis



Calcul de structures

Depuis l'an 2000 environ, une diffusion exponentielle dans tous les secteurs industriels, liée entre autres aux interfaces CAO-calcul puis à l'intégration du calcul dans l'environnement CAO. Utilisé par « tout le monde », simulation numérique dès la terminale via CATIA, NX, Autocad...

Problèmes encore plus complexes, analyses linéaires, non linéaires, multi-physiques, systèmes matriciels de très grande taille (>5 000 000 ddls), tous types de matériaux. Maillages « très fins et bien souvent trop fins », quasiment plus de limitations dues à l'espace disponible et au temps de calcul (clusters de plusieurs centaines ou milliers de cœurs !).

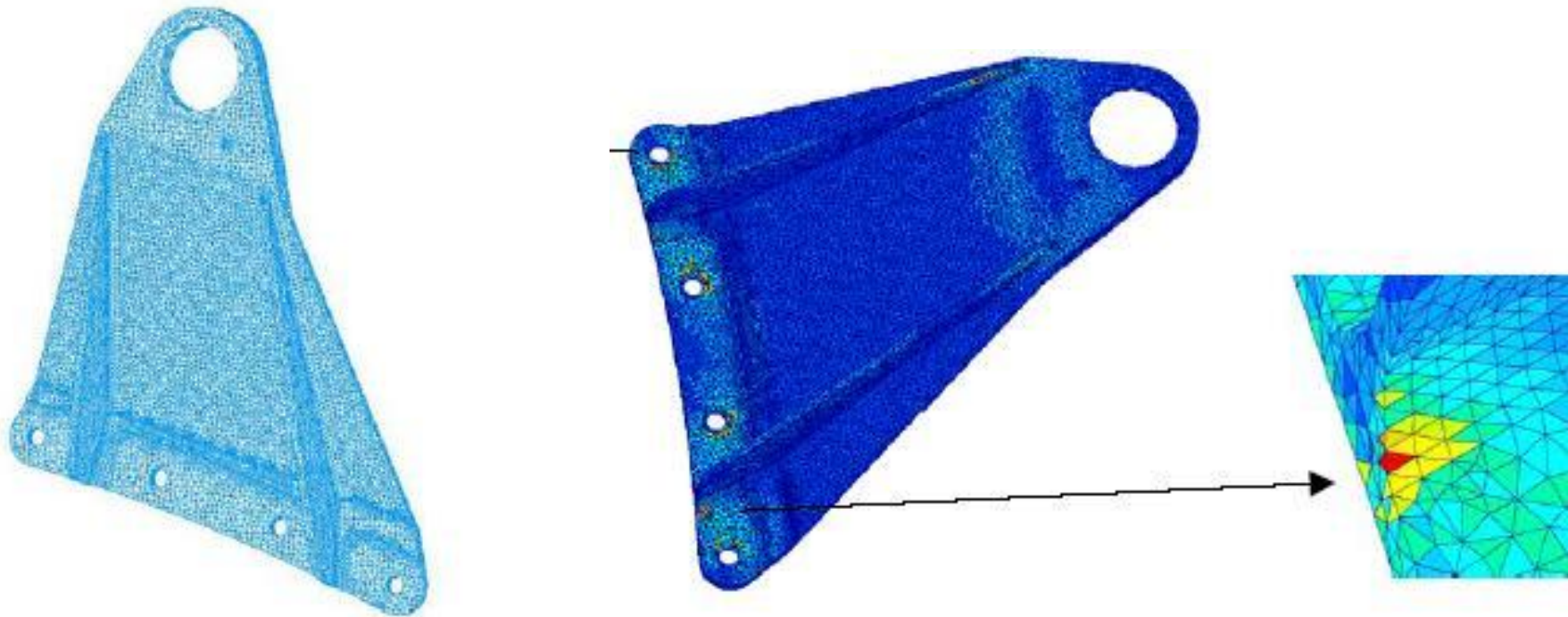
Gros modèles, dépassant 70 000 000 de degrés de liberté (démonstrateur technologique Airbus A350)

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Anonymous, de nos jours



RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS



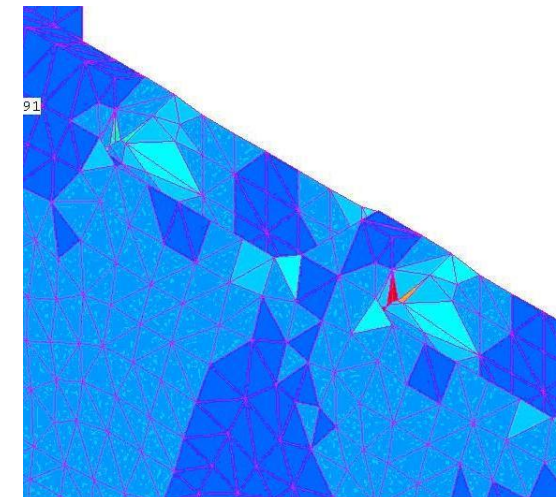
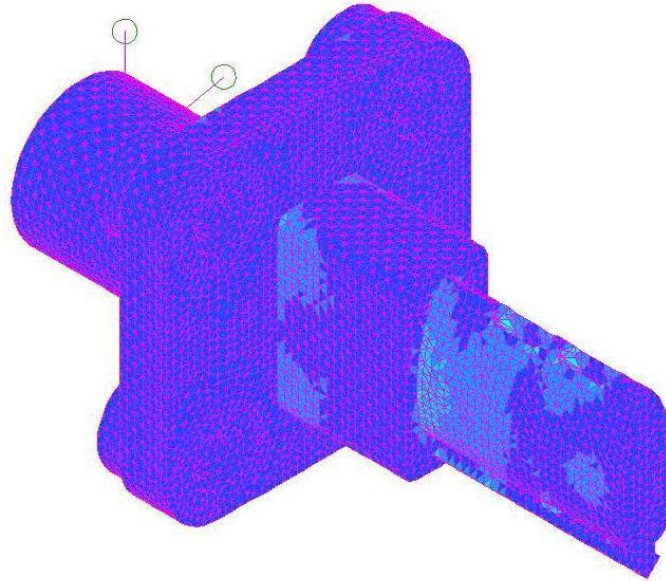
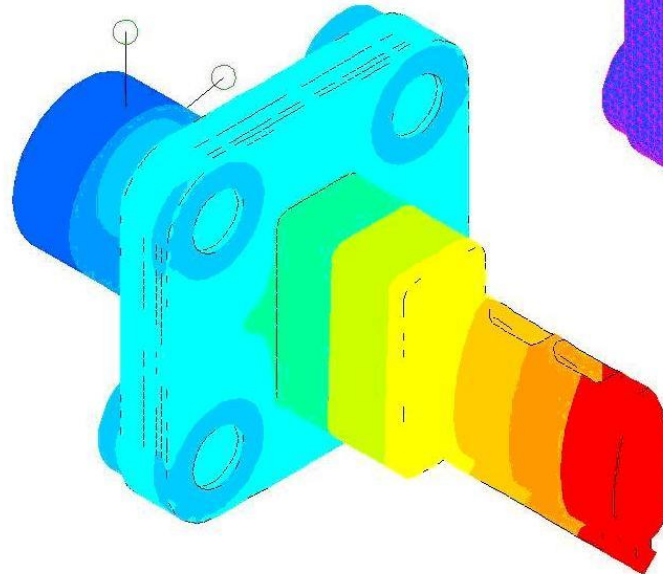
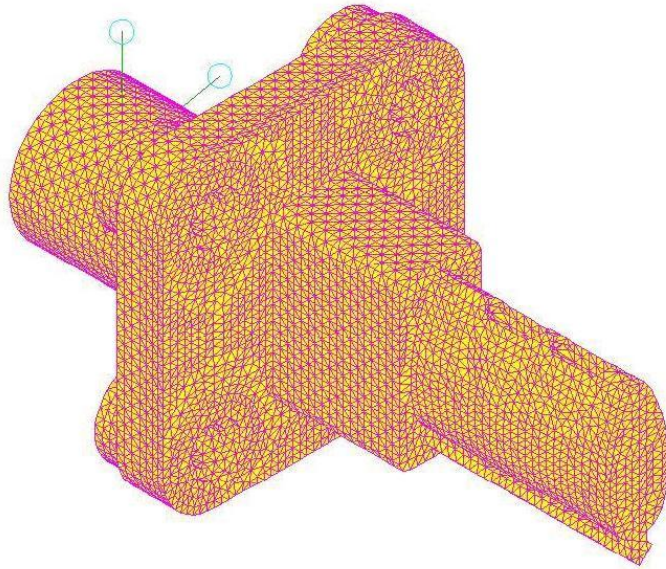
Maillage automatique tétraédrique, nombre considérable de ddl, tache rouge sur un élément et forte discontinuité dans les contraintes : pas de validation des contraintes malgré la finesse du maillage !

Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Anonymous, de nos jours



RDM
RÉSEAU DES MÉCANICIENS





Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Calcul de structures



Niveau de connaissances scientifiques des utilisateurs pas toujours en adéquation avec les difficultés des problèmes à traiter : flambage en non linéaire, endommagement des composites, hyper-élasticité, fluage, multi-physique...

Toujours beaucoup de calculs linéaires, mais de très grande taille, et ne représentant aujourd'hui qu'une petite partie des analyses effectuées.

Pas ou pas assez de réflexion pour définir le modèle en accord avec l'objectif de l'étude, puis de soin pour faire un bon maillage. On maille tout à partir de la CAO, vite et très fin, on réclame toujours plus de ressources informatiques et une diminution des temps de calcul...

Mailler n'est pas modéliser !



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Calcul de structures



Approche superficielle et trop théorique du calcul (peu de connaissances sur les éléments finis et les théories sous-jacentes, les hypothèses « cachées », les limites des outils). Perte globale de connaissances d'autant plus problématique qu'on veut résoudre des problèmes plus compliqués qu'avant.

Pas d'apprentissage des techniques de maillage et de leur impact sur la solution.

Pas d'apprentissage de la modélisation, TD souvent tirés des tutoriels des logiciels : focalisation sur l'utilisation des outils pour mettre dans un CV « maîtrise (!) de tel ou tel logiciel ».

Pas d'apprentissage de la validation du modèle et des résultats obtenus : perte des réflexes de base, trop grande confiance dans les résultats qu'on ne sait pas toujours expliquer puisqu'il manque les bases théoriques.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Calcul de structures



National Geographic, Novembre 2024 : dossier sur l'IA en neurochirurgie, en astrophysique, pour le décodage de documents antiques, en géophysique...

En calcul de structures, IA encore pas utilisée. Pas assez de données, en partie car confidentielles et donc non partagées, et parce qu'il y a une extraordinaire diversité de structures étudiées.

IA utilisée pour accélérer le post-traitement, l'écriture des rapports d'étude, la recherche d'informations (quelles sont les méthodes existantes pour représenter...), mais ne fait pas le modèle EF, le maillage et la mise en données, n'interprète les résultats et ne les valide pas.

On a encore besoin d'ingénieurs calcul, plus compétents que leurs prédécesseurs, du fait de la difficulté croissante des problèmes à résoudre.



Evolution des techniques de calcul des structures par éléments finis

Calcul de structures



«L'ingénieur est un type qui sait ce qu'il peut négliger. »
Pouvoir négliger est, en technique, une nécessité tout aussi impérieuse que savoir calculer. Mais *savoir négliger ou modéliser est un art difficile et subtil qui exige à la fois une connaissance approfondie des phénomènes ainsi que des techniques, et un jugement sûr pour évaluer le degré d'approximation nécessaire, encore compatible avec les buts à atteindre.* L'ingénieur doit savoir que les modèles simples sont faux, mais que ceux qui ne le sont pas sont inutilisables.

Prof. E. Juillard, 1886 - 1982