

Application des méthodes multipôles rapides chez EADS CCR

Résolution de problèmes industriels en électromagnétisme, acoustique, électrostatique et mécanique

SYLVAND Guillaume (DCR STIC) guillaume.sylvand@eads.net



Plan

- 1 - Mises en œuvre effectives des FMM
 - Electromagnétisme
 - Acoustique
 - Outils associés : mailleur
- 2 - Etudes et recherches en cours
 - Méthode Basse Fréquence
 - Temporel
- 3 - Thèmes de recherche futurs
 - Mécanique
 - Electrostatique
 - PEEC

Le CCR

Centre Commun de Recherche

- EADS : Airbus , Eurocopter , Astrium , MBDA , Lanceurs (Ariane) , Military aircraft (Typhoon) : 115.000 salariés .
- Corporate research center (CRC)
 - Allemagne : Ottobrun (CRC-G)
 - France : Suresnes + Toulouse (CRC-F)
- Exclusivement recherche , au service des filiales
- 2 directions scientifiques :
 - Structure & production
 - Simulation , système et technologies de l'information
 - Mathématiques appliquées et simulation (I. Terrasse)

1 - Mises en œuvre effectives des FMM

- Electromagnétisme & acoustique
- Méthodes couplées
- Outils associés : jCAE



Electromagnétisme

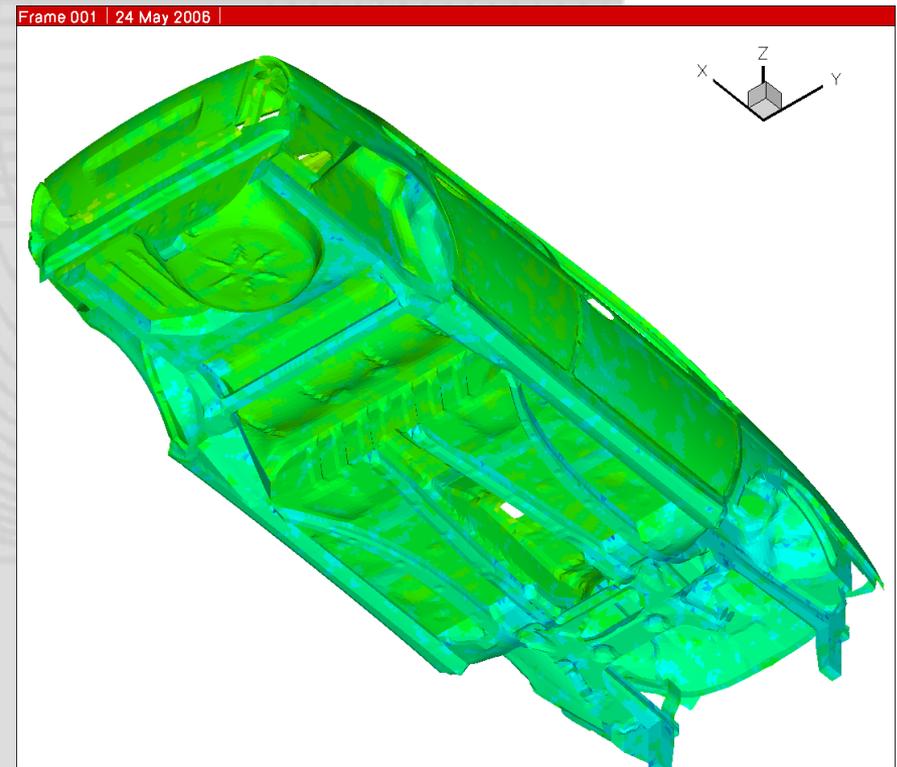
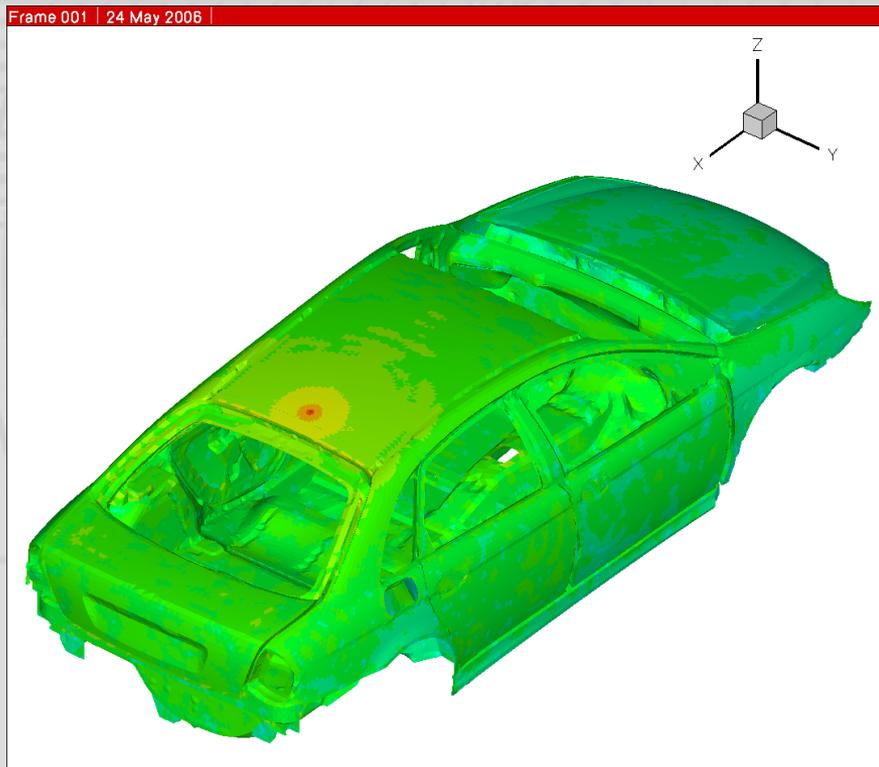
- BEM : activité depuis 90 au CCR
- FMM : lancé en 97
- Réalisation :
 - code parallèle
 - out-of-core
 - Capacité de traiter des très gros maillage (25 Mdof)
 - Solveur itératif « Block GMRES » (CERFACS)

Développements récents : Proche en FMM

- Méthode surfacique : nécessaire de post-traiter pour obtenir des résultats (E, H, vecteur de Poynting) dans le volume
- Proche : 1 produit matrice vecteur avec
 - Nb de colonne = nombre d'inconnues surfaciques
 - Nb de ligne = nombre de point de calcul
- FMM : même algo sauf
 - 2 octrees
 - Etape d'intégration différente pour obtenir E, H
- Performant : permet des domaines de calcul surfaciques /volumiques de grande taille

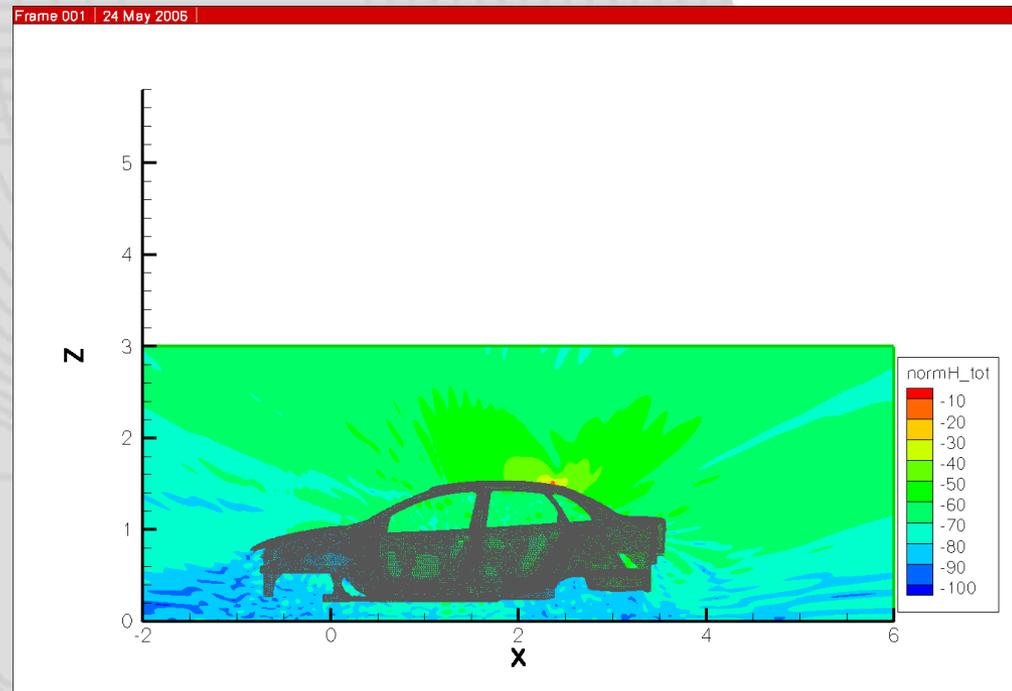
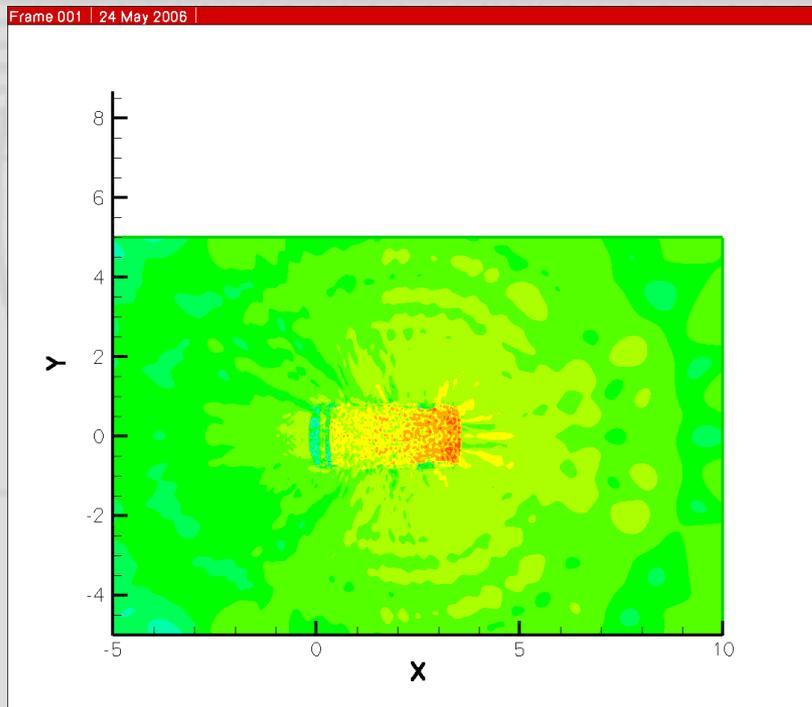
Exemple : Antenne sur voiture

- C5 (Source PSA Peugeot-Citroën)
- Antenne filaire à 1,75 GHz, structure PEC + plan de sol
- 190 kdof, 1h30 sur 4 procs.



Exemple : Antenne sur voiture

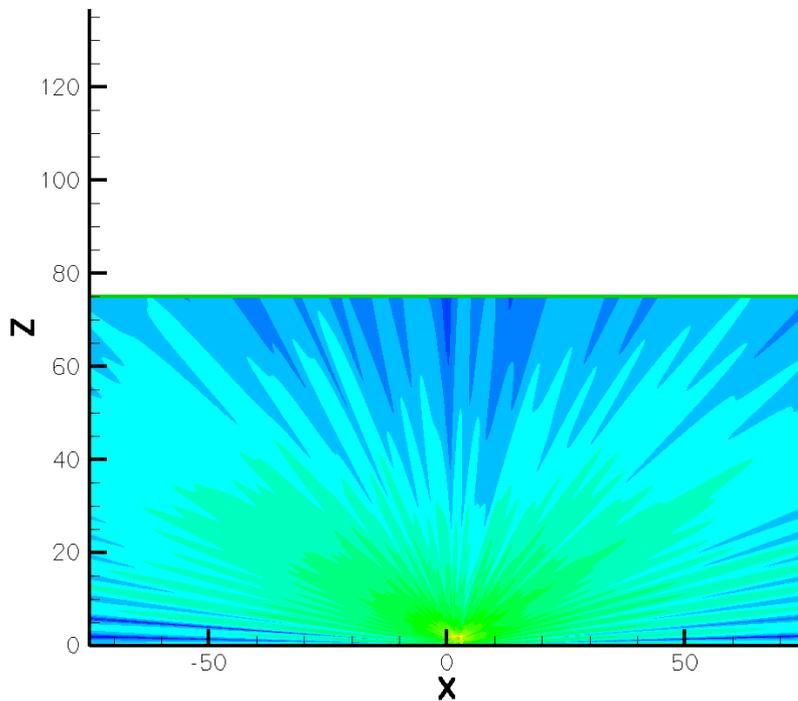
- Proche : on visualise $|E|$ en échelle log
- A gauche : 900x600 points, 90 λ , 6 minutes
- A droite : 500 x250 points, 50 λ , 5 minutes



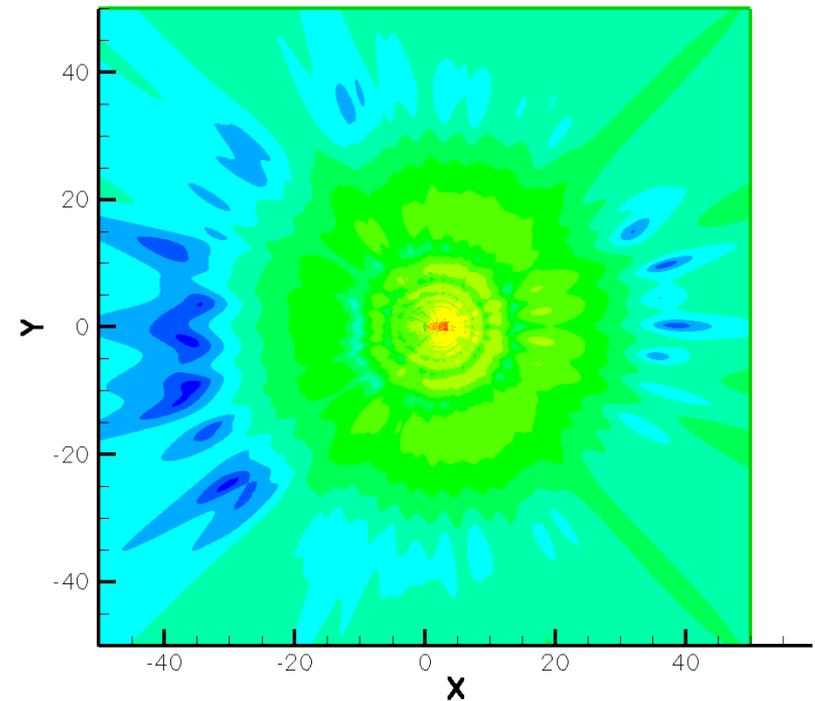
Exemple : Antenne sur voiture

- A gauche : 1500 x 750 points, 900 λ
- A droite : 1000 x 1000 points, 600 λ
- A chaque fois : 1h30 sur 4 procs

Frame 001 | 24 May 2006

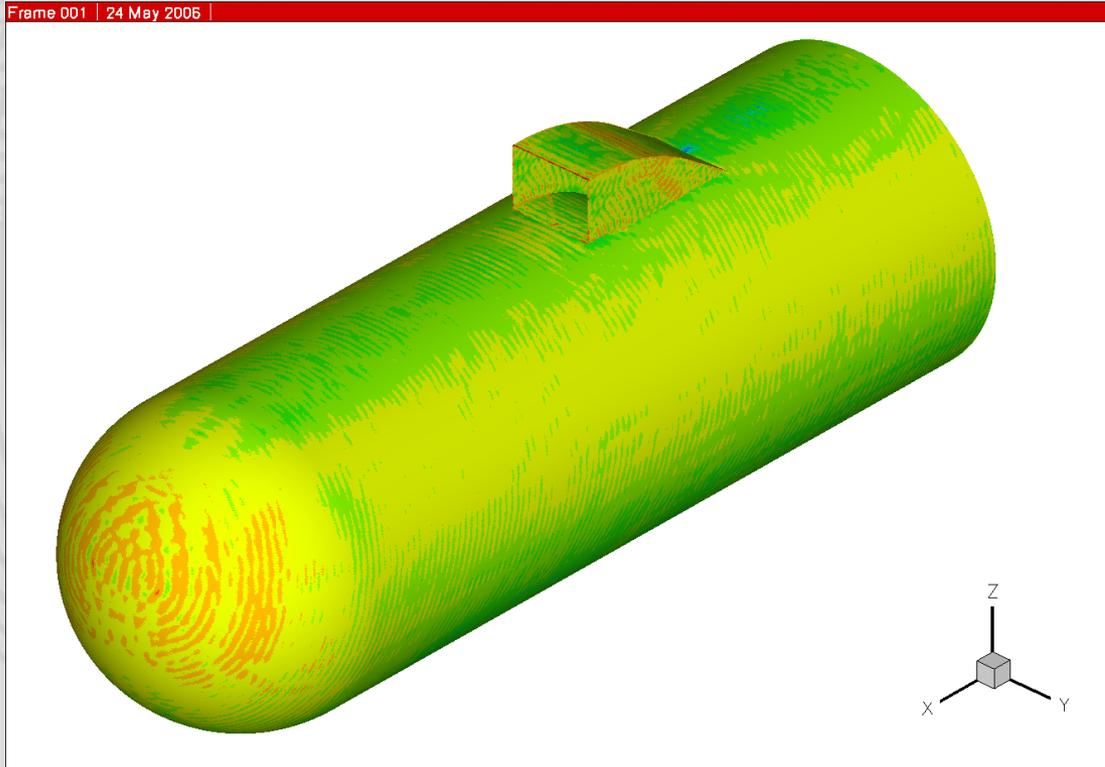


Frame 001 | 24 May 2006



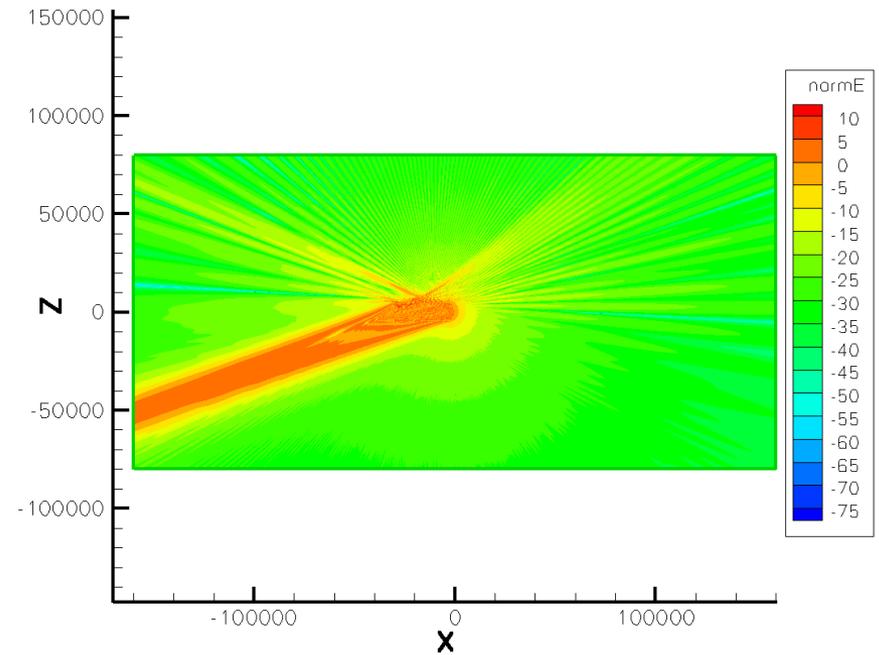
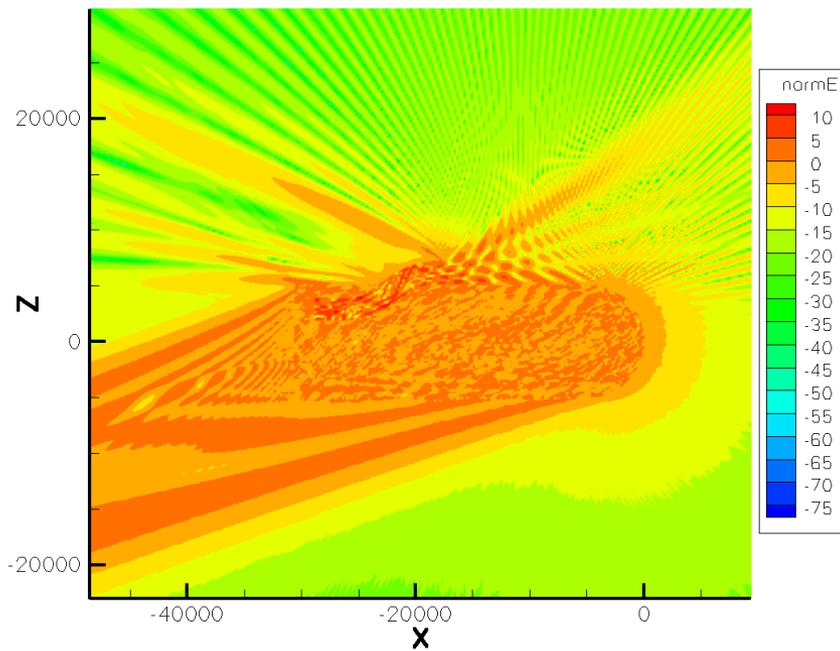
Exemple : SER Missile

- Cas test du workshop jina 2004
- Pseudo missile avec entrée d'air, illuminé par 1 onde plane
- 1,2 Mdof, 6h sur 4 procs



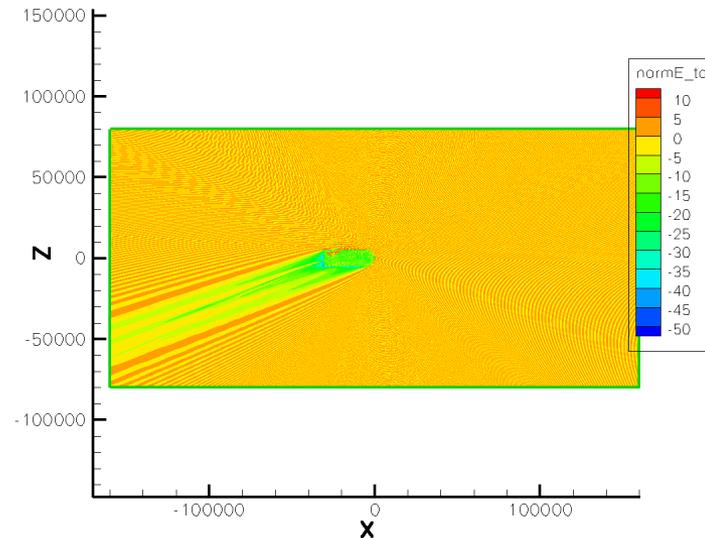
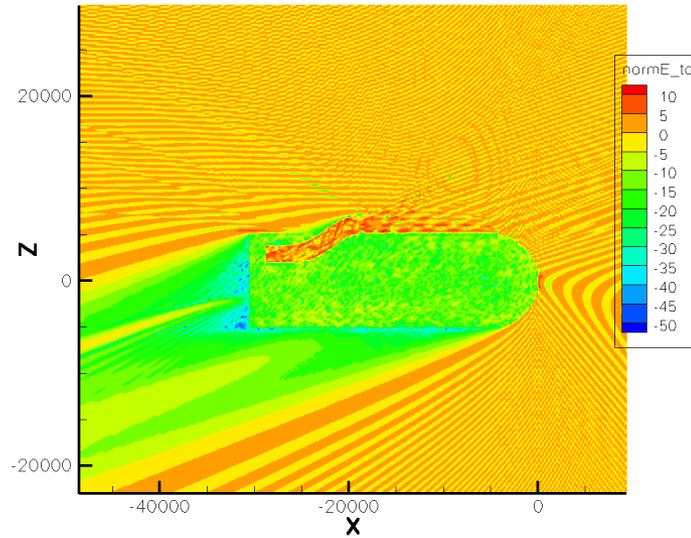
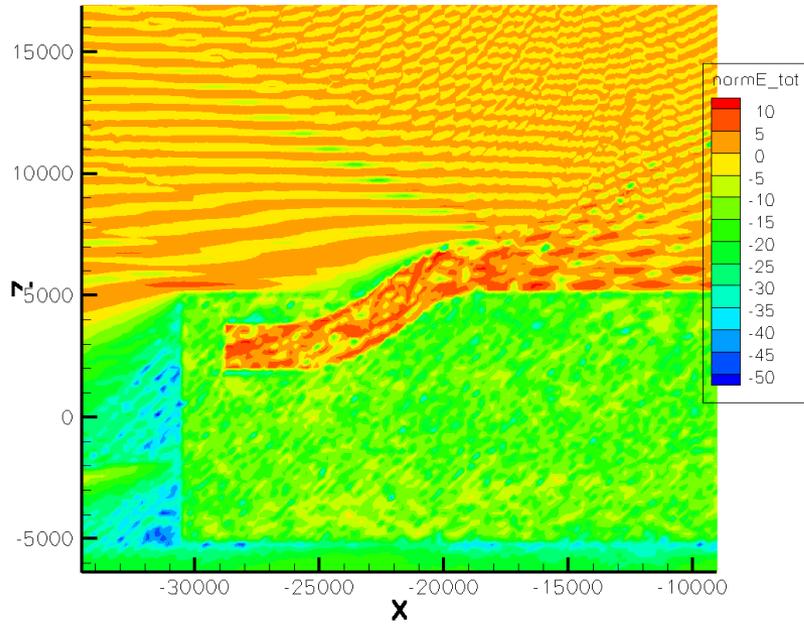
Exemple : SER Missile

- Champ diffracté : 1500x750 points, 700 λ , 36 minutes



Exemple : SER Missile

- Champ total

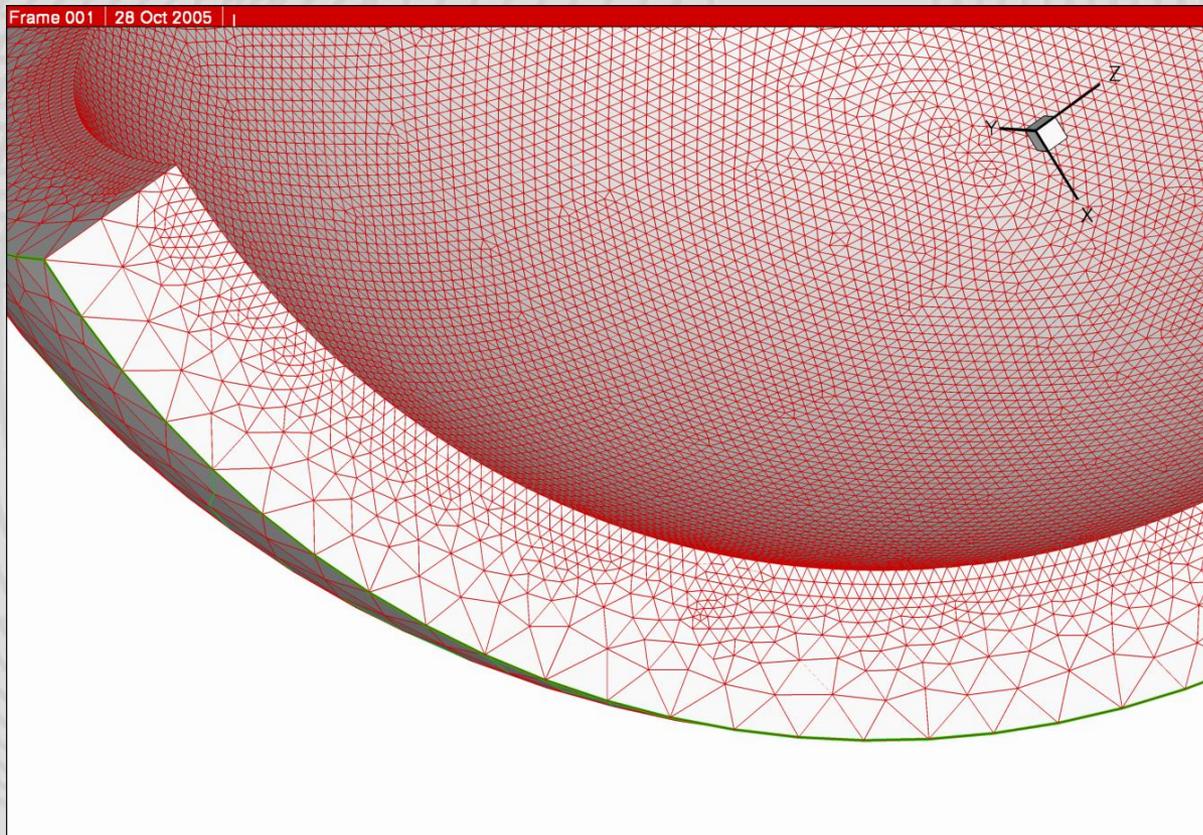


Acoustique

- Pression et vitesse remplacent E et H
- Application développée pour Airbus
 - Effets d'installation
 - Calcul Nacelle (forme, traitement)
- Illumination par guides d'ondes
 - Remplacent le moteur
 - 2 surfaces modales
 - Système par bloc
- Prise en compte d'un écoulement uniforme subsonique

Couplage volumique/surfacique

- BEM = uniquement matériaux homogène isotrope
- Pour inhomogène et/ou anisotrope : méthode volumique



Couplage volumique/surfacique

- Système par bloc
 - Surfacique = plein (traité avec FMM)
 - Volumique = creux
- Complément de Schur (en solveur direct comme itératif)
- Utilise MUMPS (solveur direct creux parallèle développé par ENSEEIHT/CERFACS/ENS Lyon)
- Plusieurs Mdof volumiques
- Limitation : mémoire vive (MUMPS = in-core)

Couplage par surface fictive

- **Couplages entre méthodes numériques**
 - Bruits de jet : Couplage « faible » avec code de méca-flu
- **Couplages entre industriels**
 - P. ex. missilier et avionneur
 - Pas d'échange de CAO ni de codes
 - Echange de matrices calculées sur la surface de couplage

jCAE

- Problème : Générer les maillages pour la FMM ?
- Outil spécifique : jCAE composé de :
 - un mailleur (Amibe) basé sur la bibliothèque géométrique et topologique OpenCascade,
 - Une IHM basée sur NetBeans
 - jCAE est basé sur java/java3d et est donc disponible sur les plateformes qui les supportent.
- Système de plug-in
- Projet sourceforge libre
 - <http://jcae.sourceforge.net>

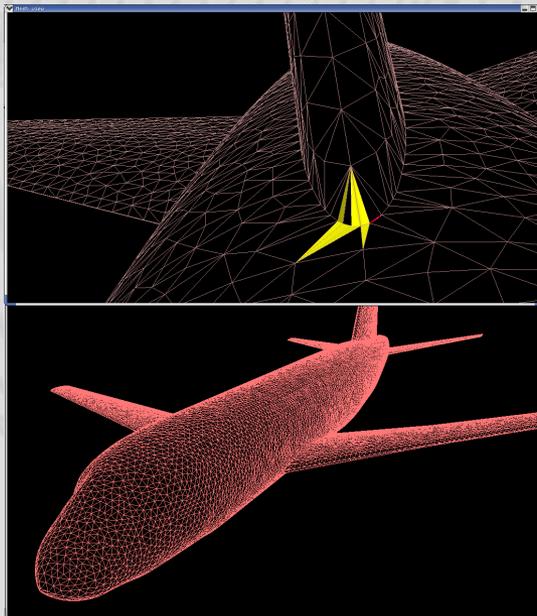
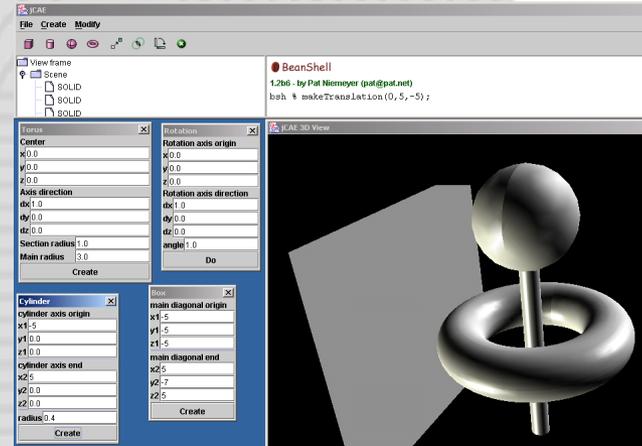
jCAE = *Java Computer Aided Environment*

Solid mini-modeler

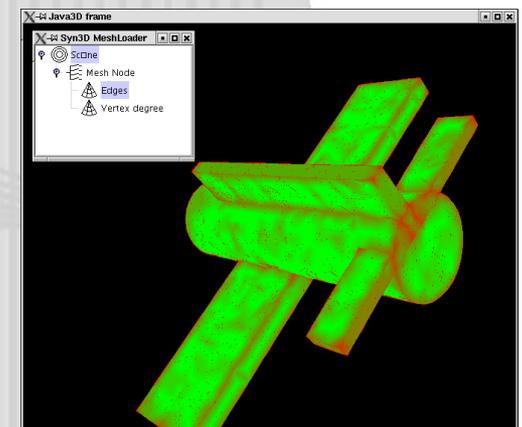
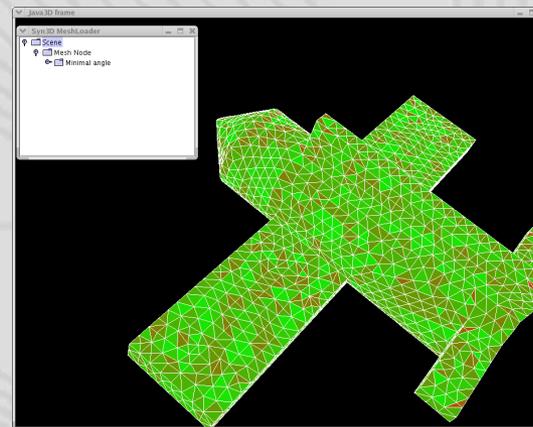
CAD files
IGES/STEP



Mesher



Mesh control

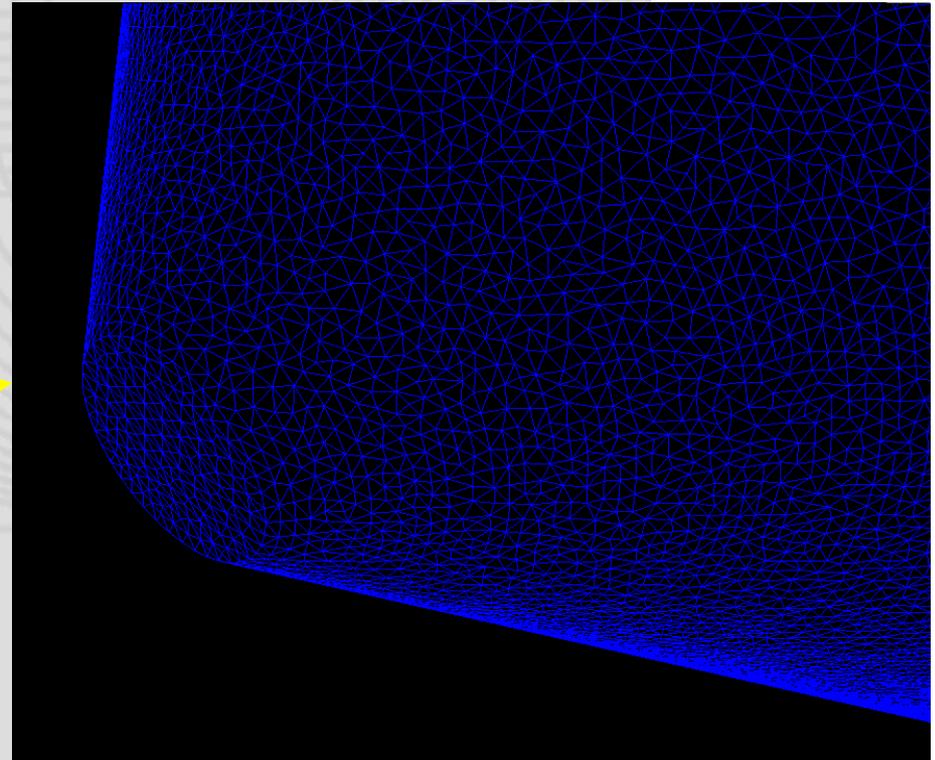
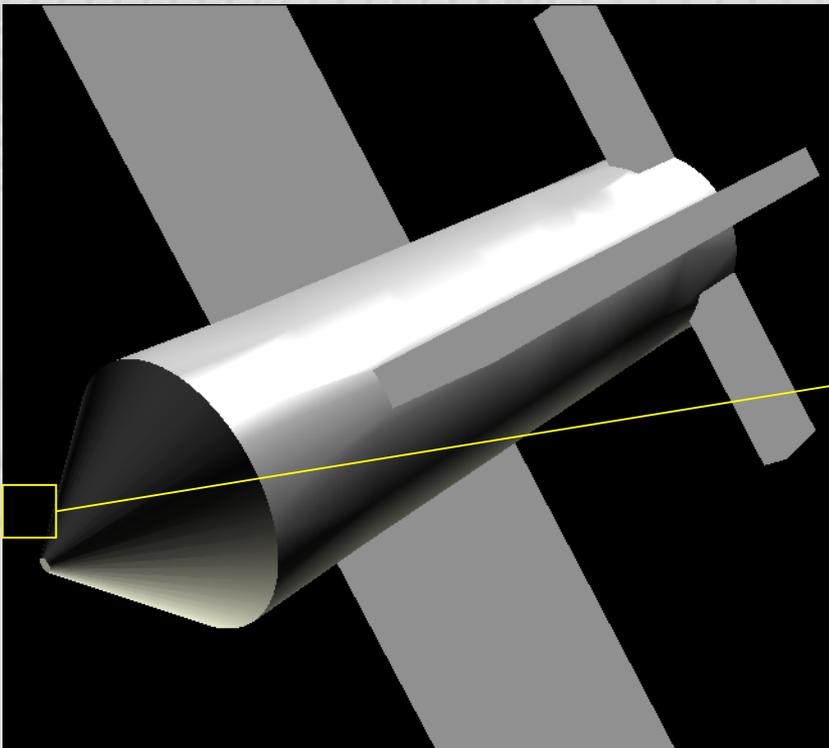


Limitations

- Pour l'instant le plus gros maillage réalisable à partir d'une CAO dépend de:
 - La taille du plus grand patch de la CAO à mailler. Un patch ne peut pas contenir plus de 4 millions de faces.
 - L'espace disque disponible (50Mo / millions de maille).
- A ce jour, le plus gros maillage réalisé à les caractéristiques suivantes:
 - 100 millions de triangles
 - Temps Total : 10 h 10 min (sur 1 CPU à 3.2Ghz)

Performances

- Nombre de mailles: 4810268
- CPU: 1 Athlon 1.8Ghz
- Temps de maillage: 4 heures
- Espace disque nécessaire: 220Mo
- Mémoire virtuelle nécessaire: 800Mo

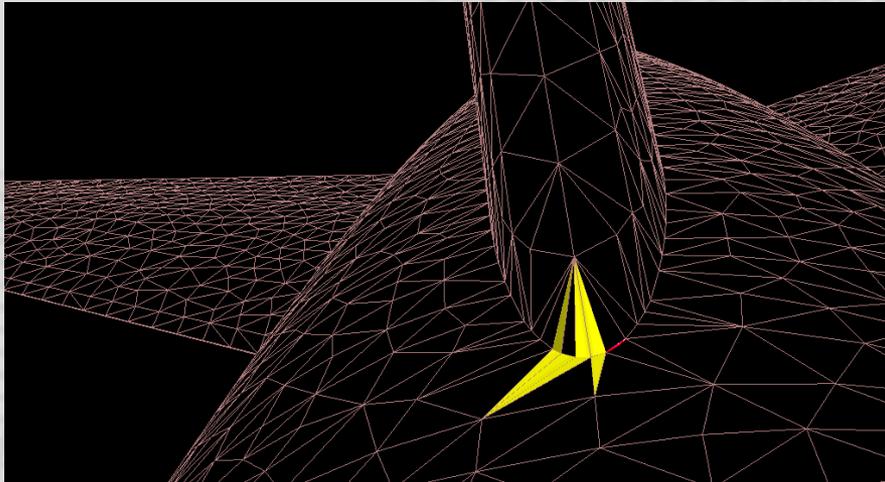


IHM

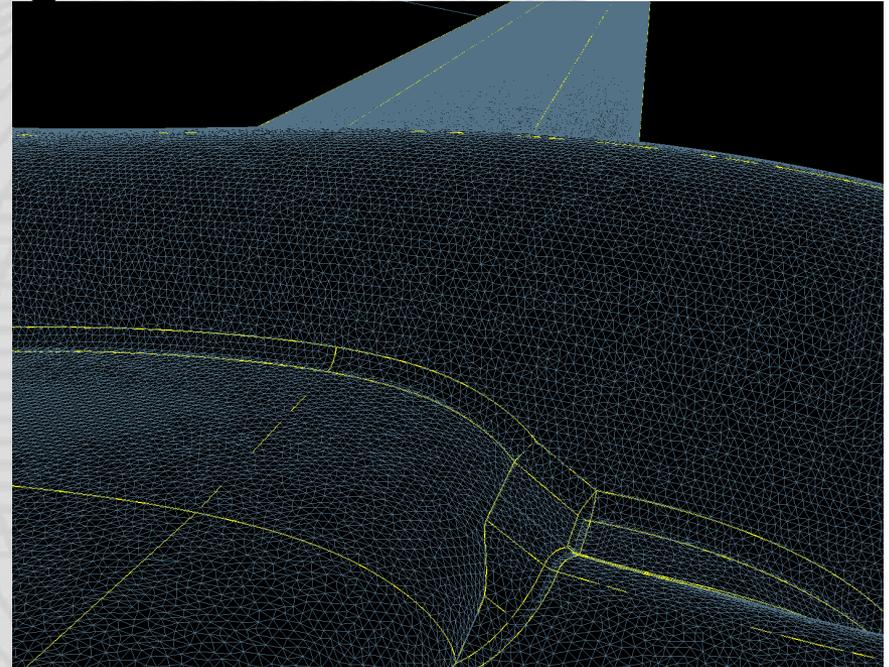
5163 s
8.568.213 faces

The screenshot shows the jCRE 0.7 interface. On the left, a 'Filesystems' tree shows a project structure with folders for 'CAD', 'teststep.brep', 'object', and 'Mesh'. Under 'Mesh', there is a 'Default mesh' folder containing 'Groups' 1 through 24. Below this, a 'Properties of 9' window shows fields for 'Id' (0), 'Name' (9), and 'Number Of Elements' (32). The main 3D view displays a highly detailed mesh of a wing, colored in various shades of blue, purple, and yellow. The bottom status bar shows the system tray with the date 'Thu Sep 16, 17:35' and a path: '#/tmp/test,a #/tmp/testst'.

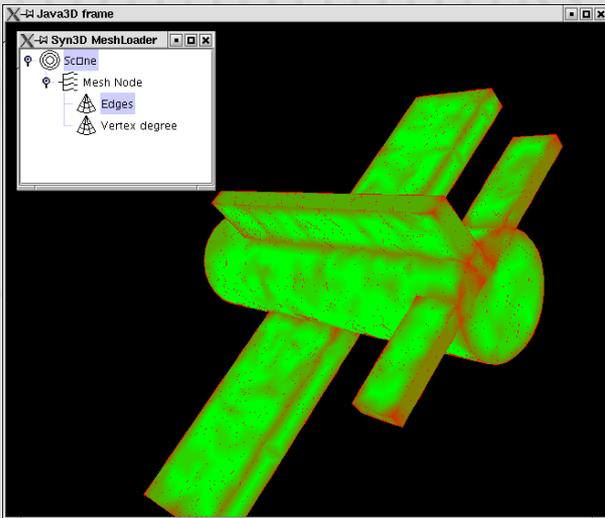
Visualisation/contrôle de maillage



Mise en évidence des triangles plats



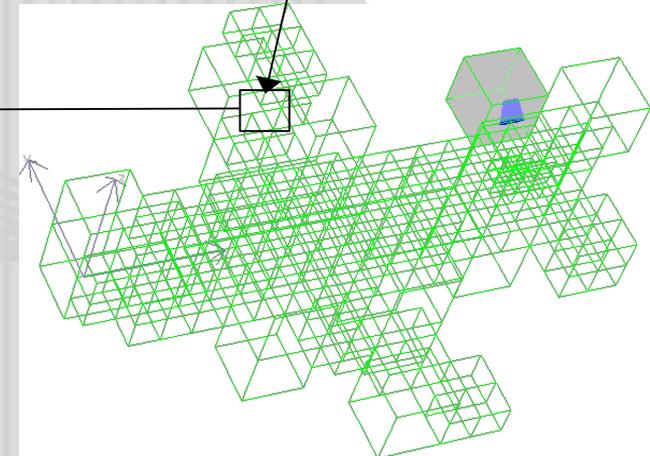
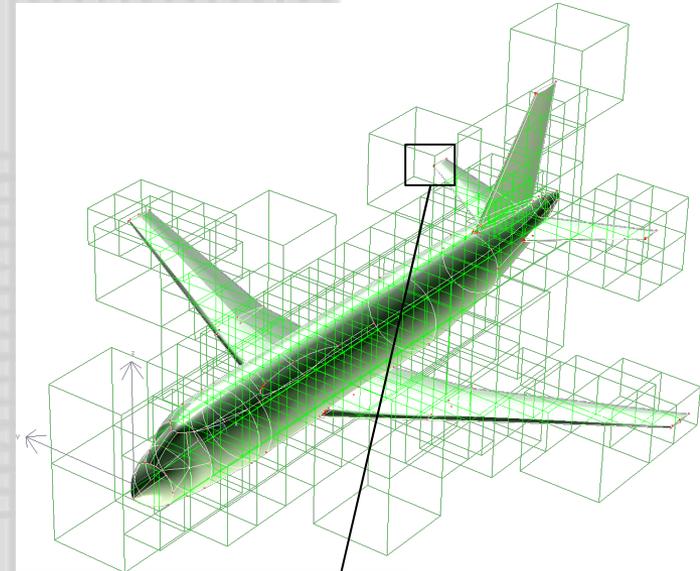
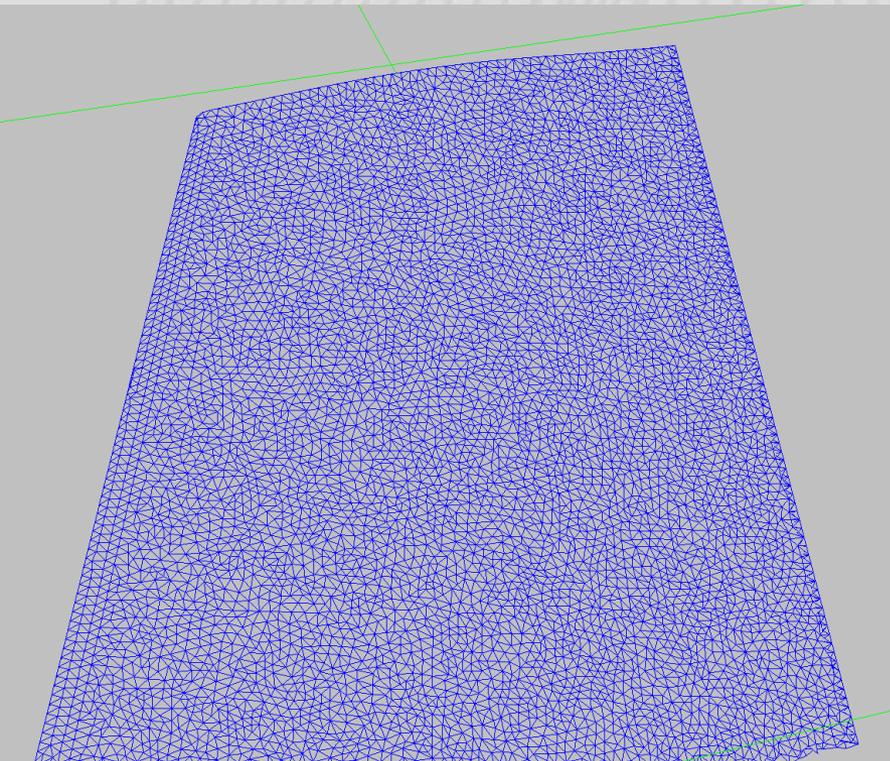
Visualisation des bords libres



Contrôle de connectivité

Visualisation de gros maillages

Visualisation par blocs pour les gros maillages



2 - Etudes et recherches en cours sur les FMM

- Méthode Basse Fréquence
- Temporel



Méthode Basse Fréquence

- Limitation de la FMM « usuelle »
 - Taille des boîtes limitée à $\lambda/4$
 - Inadapté aux maillages très fins $\lambda/100$: la performance n'est plus là
- Le problème se pose pour :
 - Matériaux d'indice élevé
 - Calcul BF
 - Fréquence nulle (noyau $1/r$)
- Solution : Formulation FMM alternative sans cette limitation
 - Article de Darve&Havé
 - Thèse de P. Havé (Paris 6, mai 2004)

Méthode Basse Fréquence

- Méthode toute fréquence
- Basée sur une autre décomposition du noyau
- Rappel : FMM Usuelle basée sur

$$G(|y - x|) = \frac{ik}{16\pi^2} \lim_{L \rightarrow +\infty} \int_{\vec{s} \in \mathcal{S}} e^{ik\vec{s} \cdot x \vec{M}_1} T_{M_1 \vec{M}_2}^L(\vec{s}) e^{ik\vec{s} \cdot \vec{M}_2 y} d\vec{s}$$

$$T_{M_1 \vec{M}_2}^L(\vec{s}) = \sum_{0 \leq l \leq L} (2l + 1) i^l h_l^{(1)}(k \cdot |M_1 \vec{M}_2|) P_l(\cos(\vec{s}, M_1 \vec{M}_2))$$

Méthode Basse Fréquence

- Nouvelle FMM basée sur :

$$\frac{e^{ik|r|}}{|r|} = \left(\frac{e^{ik|r|}}{|r|} \right)_{\text{propagatif}} + \left(\frac{e^{ik|r|}}{|r|} \right)_{\text{evanescent}}$$

$$= \frac{ik}{2\pi} \int_{S_{z^+}} e^{ik\vec{s}\cdot\vec{r}} d\vec{s} + \frac{1}{2\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\chi=0}^{\chi=+\infty} e^{-\chi z} e^{i\sqrt{\chi^2+k^2}(x \cos \phi + y \sin \phi)} d\chi d\phi,$$

- 2 termes : propagatif + évanescent
- Dépend de la direction
- Cette formule ne sépare (pas encore) les variables

Méthode Basse Fréquence

- Séparation des variables avec SVD $A=U.S.V^*$ avec
 - U, V à colonnes orthonormales
 - S diagonale
- Discretisation optimale (papier Yarvin/Rokhlin)
- Au final : c'est compliqué !
- Prototype multi-niveau
- Performance encore en retrait (de la FMM standard)
- Travail de Fanny Darbas (prestataire IMACS)
`Fanny.Darbas.external@eads.net`

FMM Temporelle

- On part d'un code BEM temporel basé sur la thèse d'I. Terrasse.
 - Solveur pas-à-pas en temps :

$$\sum_{k \geq 0} M^k . A^{n-k} = L^n$$

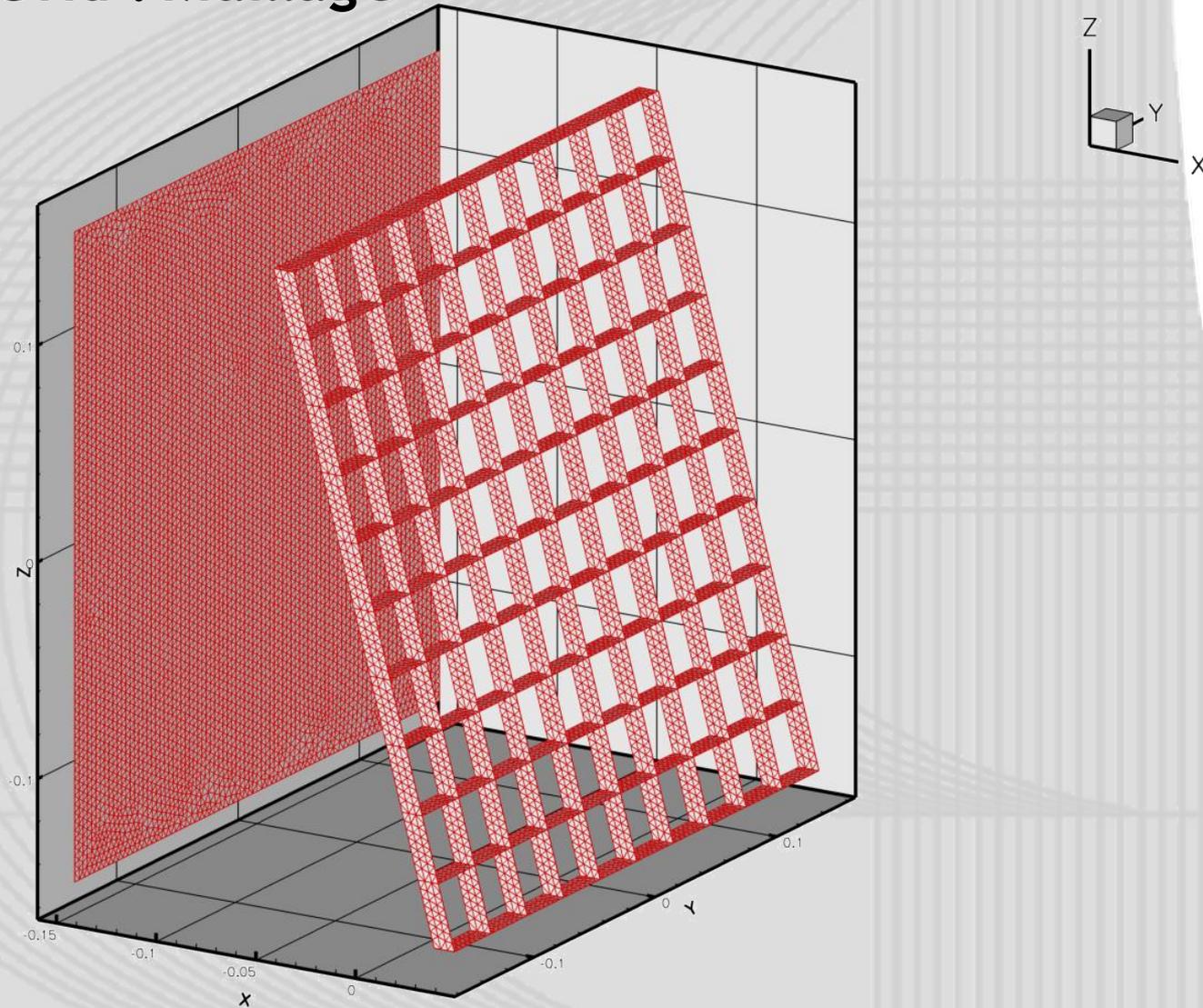
$$A^n = (M^0)^{-1} \left[L^n - \sum_{k > 0} M^k . A^{n-k} \right]$$

- Avantages :
 - Précision
 - Temps prévisible
 - Pas de problème de convergence (inconditionnellement stable)
- Inconvénients : Temps CPU = $O(n^{5/2})$ et stockage = $O(n^2)$

Exemple : Tilted Grid

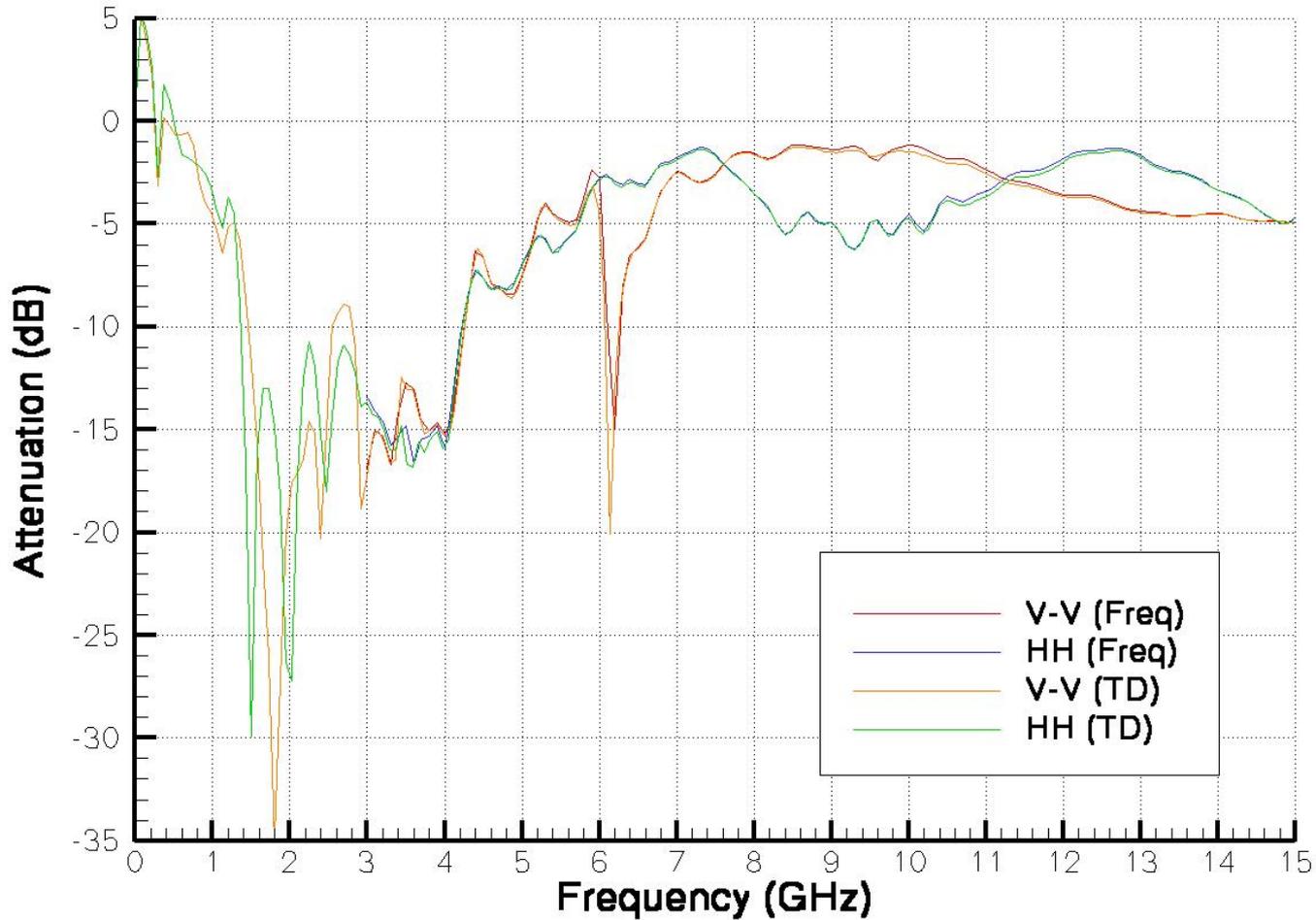
- Cas Test du Workshop JINA 2004
- Objectif : Calculer l'atténuation d'une grille inclinée placée devant une plaque (0.3 m x 0.3 m)
- Fréquence : de 5 à 15 GHz
- Maillage en $\lambda/6$ à 15 GHz (suffisant) : 32.849 inconnues

Tilted Grid : Maillage



Tilted Grid : Résultats

Tilted Grid (Coarse Mesh, TD vs. Freq Solver) | 20 Oct 2004



Tilted Grid : Performances

- Fréquentiel :
 - 101 fréquences à calculer
 - 4,5 h mono-proc par fréquence
 - Code optimisé => peu de marge d'amélioration
- Temporel :
 - 2000 pas de temps => 200 fréquences entre 0 et 15 GHz
 - 16 procs opteron 2.4 GHz : 14 h soit l'équivalent de 50 calculs fréquentiels
 - Forte marge d'amélioration possible
- Sur ce cas, le temporel est rentable.
- Si n augmente, l'écart se creuse en faveur du temporel :
 - Temporel = $O(n^{5/2})$
 - Fréquentiel = $O(n^3)$ nombre de fréquences = $O(n^{1/2})$

BEM Temporelle + solveur multipôle

- Assemblage partiel des matrices (interactions proches uniquement) + algorithme spécifique pour les interactions lointaines.
- Solveur pas-à-pas en temps
- A chaque pas de temps :
 - On résout un système linéaire avec la matrice 0
 - On fait rayonner le pas de temps courant vers les pas de temps à venir : convolution traitée via la FMM

BEM Temporelle + solveur multipôle

- On retrouve la structure de l'algorithme fréquentiel
- Presque tout le code de la FMM fréquentielle est réutilisé.
- Déjà fait : code parallèle, multi-niveau
- A faire : finir d'optimiser les algorithmes et les paramètres

BEM Temporelle + solveur multipôle

- Avantages :
 - Pas de problème de convergence
 - *[Sous réserve]* Temps CPU = $O(n^{3/2}\log(n))$ car $N_{iter} = O(n^{1/2})$
 - *[Sous réserve]* Stockage = $O(n^{3/2}.\log(n))$
- Inconvénients de la FMM fréquentielle :
 - N_{iter} n'est pas connu a priori : pas de solveur itératif (sauf éventuellement pour la matrice 0, système qui est facilement inversé)
 - *Limitation en basse fréquence* : n'existe plus.

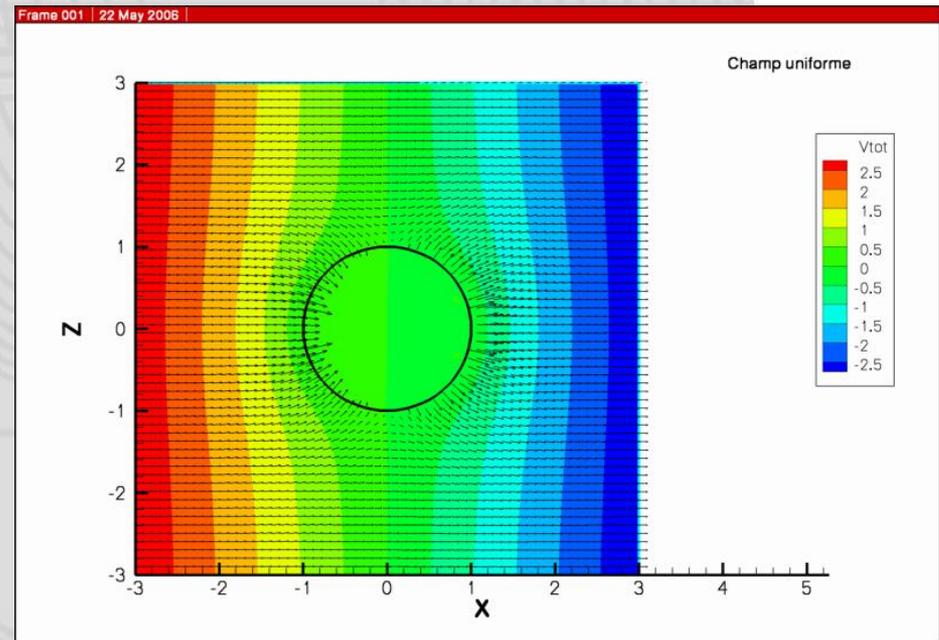
3 - Thèmes de recherche futurs

- Mécanique
- Electrostatique
- PEEC



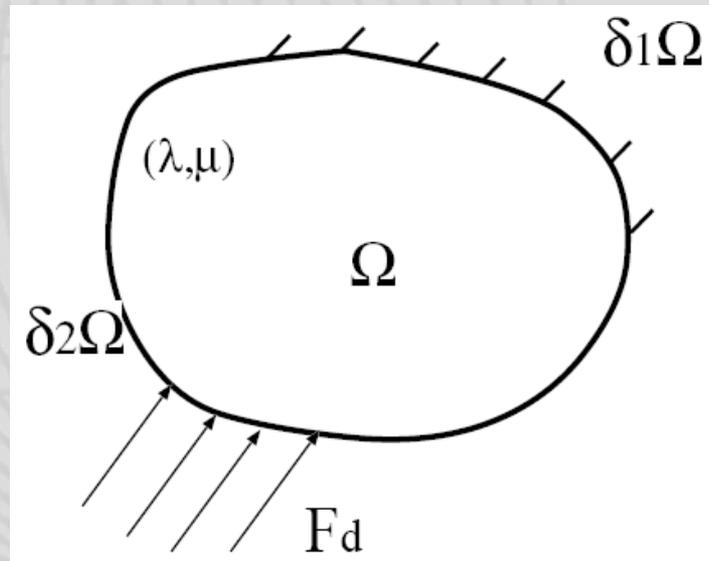
Electrostatique

- Applications : impact foudre, ...
- BEM : bien connu.
- Utilise la FMM à fréquence nulle (il existe d'autres FMM pour le noyau $1/r$)
- Premier stade



Mécanique

- Peu de travaux en équations intégrales en mécanique
- Hypothèse : matériau homogène isotrope (métallique, pas de composite)
- Equilibre statique (fissuration en itérant)



Mécanique

- Noyau de Green :

$$\underline{u}^i = \frac{1}{8\pi\mu(\lambda + 2\mu)} ((\lambda + 2\mu)\Delta - (\lambda + \mu)\nabla\text{div}) (r\underline{e}_i)$$

- Se ramène à $1/r$ et ses dérivées... donc on sait traiter en FMM !
- La FMM sert aussi pour la prise en compte des contraintes volumiques (poids) dans le second membre.

Mécanique

- C'est parfois un peu compliqué...

$$\begin{aligned}
 \int_{S_x} \underline{E}_d(\underline{x}) \cdot \underline{f}(\underline{x}) d\Gamma_x &= \frac{\mu}{4\pi(\lambda + 2\mu)} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\lambda=0}^{\infty} \left\{ \int_{S_x} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{XM}) [\lambda \underline{s} \cdot \underline{n}(\underline{x}) \underline{s} \cdot \underline{f}(\underline{x})] \right. \\
 &\quad \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{MM}') \left(\int_{S_y} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{M}'Y) \underline{n}(\underline{y}) \cdot \underline{g}(\underline{y}) d\Gamma_y \right) d\Gamma_x \\
 &\quad + \int_{S_x} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{XM}) [2(\lambda + \mu) \underline{s} \cdot \underline{n}(\underline{x}) \underline{f}(\underline{x}) \cdot \underline{x} - \lambda \underline{f}(\underline{x}) \cdot \underline{n}(\underline{x})] \\
 &\quad \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{MM}') \left(\int_{S_y} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{M}'Y) \underline{s} \cdot \underline{g}(\underline{y}) \underline{s} \cdot \underline{n}(\underline{y}) d\Gamma_y \right) d\Gamma_x \\
 &\quad + \int_{S_x} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{XM}) \underline{s} \cdot \underline{n}(\underline{x}) \underline{f}(\underline{x}) \cdot \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{MM}') \\
 &\quad \left. \left(\int_{S_y} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{M}'Y) [2\mu \underline{s} \cdot \underline{g}(\underline{y}) \underline{n}(\underline{y}) - \lambda \underline{s} \cdot \underline{n}(\underline{y}) \underline{g}(\underline{y}) - 2(\lambda + \mu) \underline{s} \cdot \underline{g}(\underline{y}) \underline{s} \cdot \underline{n}(\underline{y}) \underline{y}] d\Gamma_y \right) \right\} \\
 &\quad + \int_{S_x} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{XM}) \lambda \underline{s} \cdot \underline{f}(\underline{x}) \underline{n}(\underline{x}) \\
 &\quad \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{MM}') \left(\int_{S_y} \mathcal{K}(\lambda, \alpha, \underline{M}'Y) \underline{s} \cdot \underline{g}(\underline{y}) \underline{n}(\underline{y}) d\Gamma_y \right) d\Gamma_x
 \end{aligned}$$

Mécanique

- Travail à ses débuts
- Contact :

`jayant.sengupta@eads.net`

PEEC = Partial Element Equivalent Circuit

→ Méthode numérique de résolution des équations de Maxwell en quasi statique :

$$\vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \vec{\mathbf{E}}_0(\vec{\mathbf{r}}, t) + \vec{\mathbf{E}}'(\vec{\mathbf{r}}, t)$$

Champ électrique incident

$$\vec{\mathbf{E}}_0(\vec{\mathbf{r}}, t) = 0$$

Potentiel vecteur

Potentiel scalaire

Champ électrique diffracté

$$\vec{\mathbf{E}}'(\vec{\mathbf{r}}, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \vec{\mathbf{A}}(\vec{\mathbf{r}}, t) - \vec{\nabla} V(\vec{\mathbf{r}}, t)$$

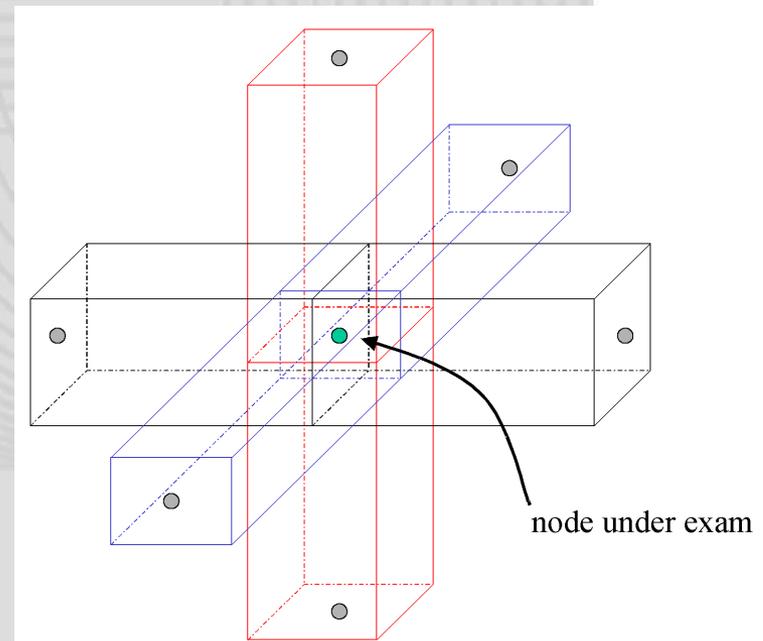
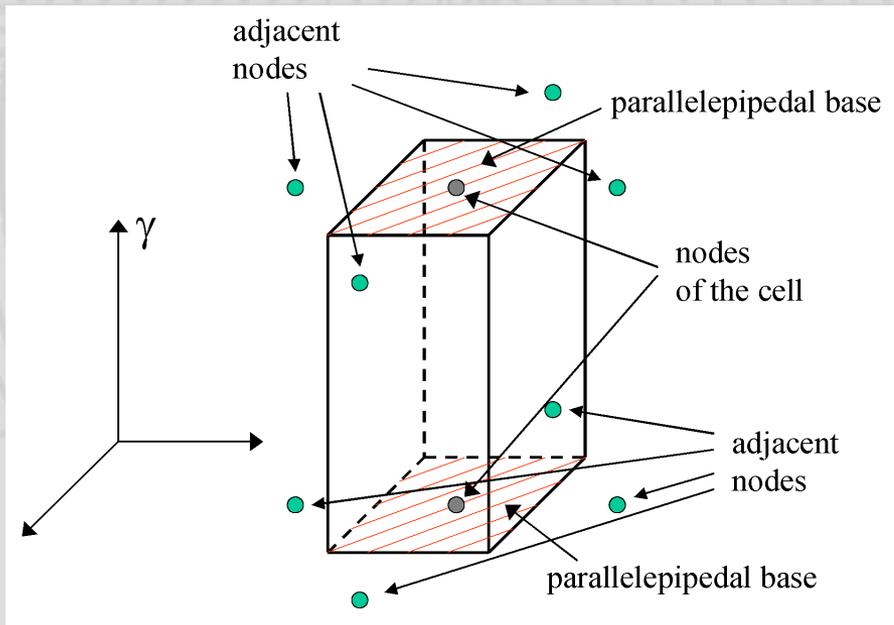
$$\vec{\mathbf{A}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \int_{V'} \frac{1}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|} \vec{\mathbf{J}}(\vec{\mathbf{r}}', t') dV'$$

$$V(\vec{\mathbf{r}}, t) = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \int_{S'} \frac{1}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'|} q^T(\vec{\mathbf{r}}', t') dS'$$

Discretisation de la géométrie

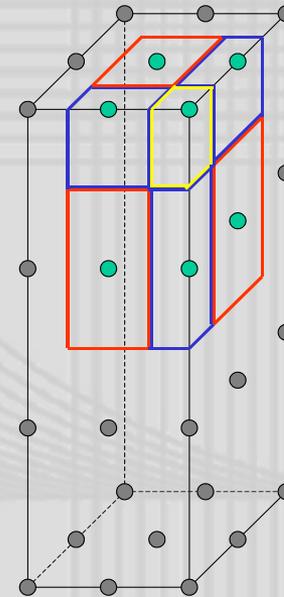
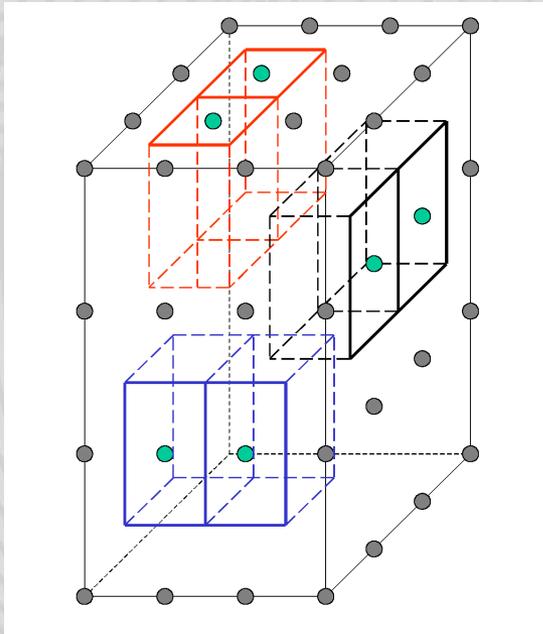
- Maillage de points cartésien du volume de l'objet.
- 2 types de cellules : volumique ou surfacique
- tout couple de points adjacents dans un matériau crée une cellule volumique (parallélépipède)

hypothèse: densité de courant constante



Discretisation de la géométrie

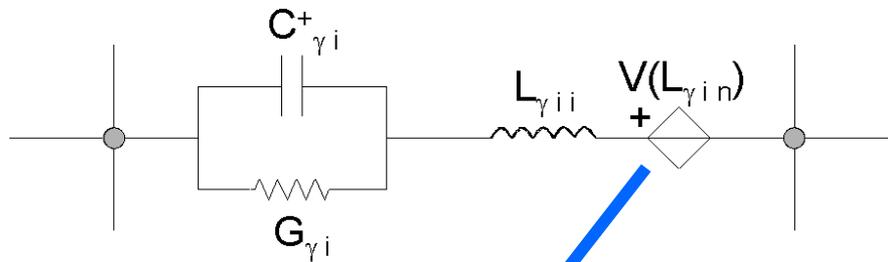
- tout point sur une surface extérieure crée une cellule surfacique
 - hypothèse: densité de charge constante



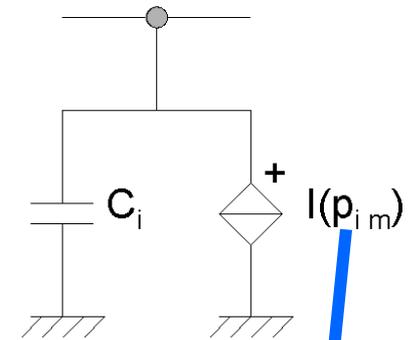
Circuits équivalents & solution

Les cellules volumiques et surfaciques sont transformées en circuits équivalents :

volume cell



surface cell



partial inductances

coefficients of potential

$$L_{\gamma in} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi a_{\gamma i} a_{\gamma n}} \int_{V_{\gamma i}} \int_{V_{\gamma n}} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' dV$$

$$p_{im} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 a_i a_m} \int_{S_i} \int_{S_m} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' dS$$

FMM dans la PEEC

$$\int_{V_{\gamma i}} \int_{V_{\gamma n}} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' dV \qquad \int_{S^+_{\gamma i}} \int_{S_m} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' dS$$

- FMM pour calculer ces intégrales dans les cas lointains
- Noyau $1/r$ ou $\exp(ikr)/r$ selon les cas
- Thèse en cours de Enrico VIALARDI
Enrico.Vialardi@eads.net
- Avancement : Prototype Matlab

Conclusion

- Beaucoup d'axes de recherche dans des domaines variés
- Les FMM sont partout !