

---

# Méthodes Numériques et Outils Logiciels pour la Prise en Compte des Effets Capacitifs dans la Modélisation CEM de Dispositifs d'Électronique de Puissance

---

Vincent Ardon – le 21 Juin 2010

**Direction :**

Mme Edith Clavel,

G2Elab

**Encadrement :**

M. Olivier Chadebec,

G2Elab

M. Yann Le Floch,

CEDRAT



# Introduction : Compatibilité ÉlectroMagnétique

Introduction - contexte

## ➤ Définition de la CEM : aptitude d'un système électrique à fonctionner

- sans se perturber lui-même
- sans perturber l'environnement (normes d'émission)
- sans être perturbé par l'environnement (normes de susceptibilité)



## ➤ La CEM et le monde du transport

### • Vers le tout électrique !

- ✓ De plus en plus de composants
- ✓ Complexité grandissante
- ✓ Environnement confiné (compacité)

### → Génération d'interférences ElectroMagnétiques

→ Passage de plus en plus difficile des normes CEM des systèmes électriques industriels



# Enjeux de la modélisation CEM en EP (Électronique de Puissance)

Introduction - contexte

➤ Challenge : 15% de l'énergie électrique est convertie dans les structures d'électronique de puissance

• Hacheur, onduleur, redresseur, variateur

➤ La CEM dans la chaîne de conception d'un produit

• Actuellement, traitée en aval

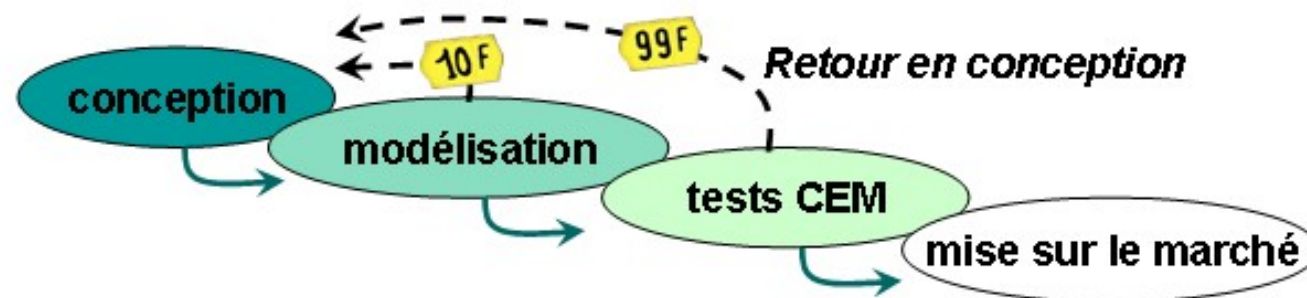
✓ Difficulté de modélisation → création de prototypes → tests CEM

• Coût des boucles de retour en conception (non passage des normes)

✓ Ex. Schneider-Electric : coût de la CEM estimé à **plusieurs millions € par an** [Étude interne 2008] !



Variateur de vitesse  
Schneider-Electric



→ **Besoin de plateforme logicielle permettant de modéliser en amont les couplages électromagnétiques de structures d'EP industrielles**

# Projet O2M (Outil de conception et de Modélisation Mécatronique)

Introduction - contexte

➤ **Objectif** : développement d'une plateforme collaborative qui réalise un continuum de modélisations multi-métiers

- simulation système, circuit, multi-physique 3D

➤ Labellisé par 2 pôles de compétitivité



➤ Domaine du transport

- Automobile, aéronautique, etc.

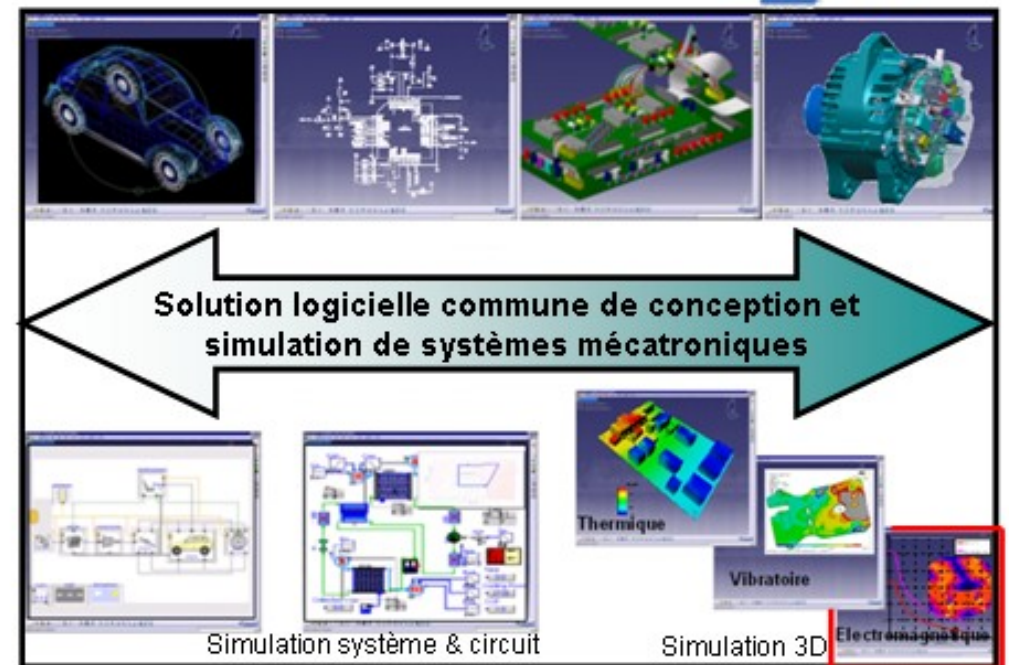
➤ 8 sous-projets

- Conception innovante et modélisation 3D

➤ Financement (30M€)

- Dont 12M€ publics

Exemple de plateforme **o2m**



21 juin 2010  
Ardon Vincent  
Soutenance de thèse

Méthodes Numériques et Outils Logiciels pour la Prise en Compte des Effets Capacitifs dans la Modélisation CEM de Dispositifs d'Électronique de puissance

# Sous-projet SP4-CEM (Compatibilité ÉlectroMagnétique)

Introduction - contexte

## ➤ Objectifs :

- Réaliser des modèles CEM de composants discrets d'Électronique de Puissance

✓ Semi-conducteurs (transistors, diodes), condensateurs, inductances

- Obtenir des modèles CEM conduits et rayonnés de structures complètes d'EP

✓ composants discrets + routage

- Accéder à une simulation CEM système via des solveurs circuits

**Motivation de  
cette thèse**

## ➤ Pilotage



**irseem**

## ➤ Partenaires industriels



**THALES**



## ➤ Partenaires universitaires



# La modélisation CEM en Électronique de Puissance

Introduction - contexte

## ➤ Caractéristiques

- Électronique de commutation
- Puissances commutées : du W au GW
- Forts  $di/dt$  et  $dv/dt$

## ➤ Phénomènes fortement 3D

- Structures planes et multi-couches, prédominance de l'air
- Compacité des structures en augmentation

## ➤ Diversité des matériaux

- Semi-conducteurs, conducteurs, diélectriques, magnétiques

## ➤ Phénomènes large bande : 10kHz → 200 MHz (EP)

- Champ pénétrant dans les matériaux (effet de peau)
- Fréquences de fonctionnement en augmentation
  - ✓ Effets magnétiques et électrique fortement couplés
  - ✓ Champ magnétique / électrique ↔ tensions / courants

→ Modélisation difficile : de nombreux verrous à lever

# Quelle méthode choisir ?

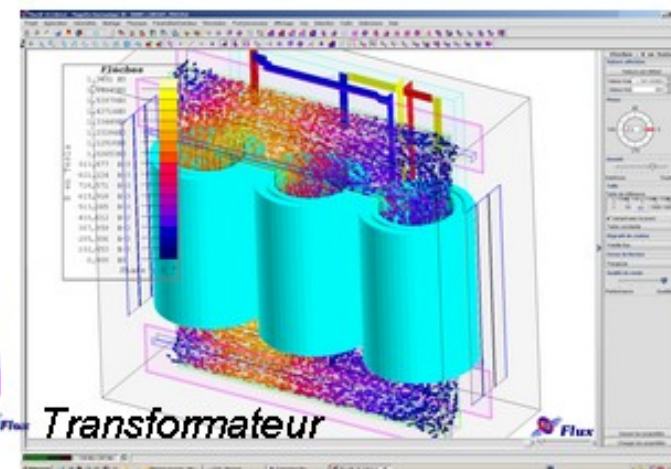
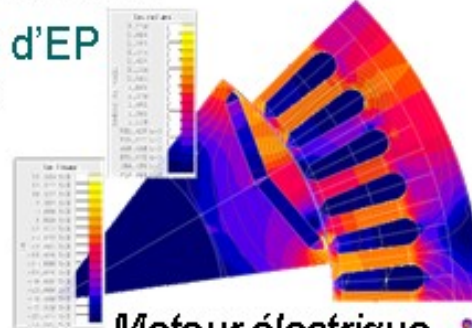
Introduction - contexte

## ➤ Méthodes analytiques et Lignes de Transmission

- Hypothèses trop simplificatrices

## ➤ Méthodes éléments finis :

- Méthodes générales, robustes,
  - ✓ Applications : moteurs, transformateurs, actionneurs
- mais, peu adaptées pour des structures d'EP
  - Principalement à cause du maillage de l'air



## ➤ Méthodes intégrales

- Méthodes légères et précises pour les calculs d'interactions à distance
  - ✓ Pas de maillage de l'air
- Un cas particulier, la méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit)
  - ✓ Adaptée à l'extraction naturelle de schéma électrique équivalent à constantes localisées

→ Choix d'une méthode intégrale : la méthode PEEC

# Méthode PEEC : Partial Element Equivalent Circuit

Introduction - contexte  
● ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○

## ➤ Principe de la méthode PEEC classique

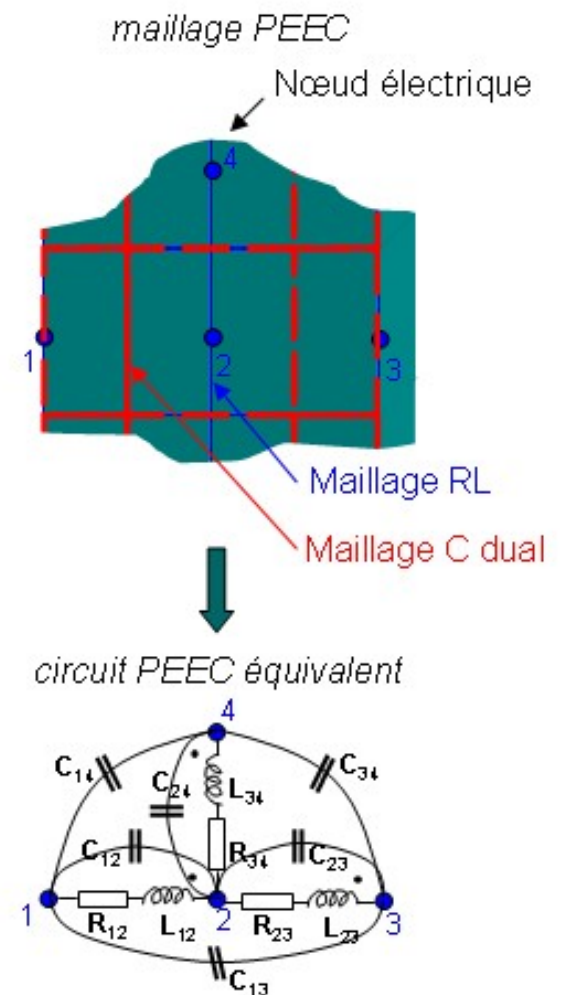
- Extraction naturelle d'un schéma à constantes localisées RLMC
- Utilisation d'un maillage dual des matériaux actifs

## ➤ Utilisation de la méthode en hautes fréquences

- Modélisation des microprocesseurs, d'antennes ( $f > \text{GHz}$ )

## ➤ Application à l'Électronique de Puissance

- Nécessité de raffiner le maillage pour prendre en compte l'effet de peau
- Phénomènes de propagation négligés
  - ✓ dans le cuivre à 200MHz,  $\lambda/10=15\text{cm}$
- Possibilité de relâcher le maillage dans la longueur des conducteurs



→ **Besoin d'adapter la méthode PEEC aux structures d'Electronique de Puissance**



# Introduction de solveur EM 3D : InCa3D

Introduction - contexte

## ➤ Naissance du logiciel InCa3D

### • Modélisation des amenées de courant

[Schanen 94], [Clavel 96], [Piette 99], [Guichon 01], [Gonnet 05]

✓ Armoires électriques, busbarres dans les structures d'EP

## ➤ Modélisation PEEC inductive

### • Extraction de matrices d'éléments parasites RLM

✓ résistances (**R**), inductances (**L**), mutuelles-inductances (**M**)

### • Maillages :

✓ unidirectionnel : adaptés à l'épaisseur de peau (conducteurs fins)

✓ bidirectionnel (plans de masse)

## ➤ Calcul des éléments parasites

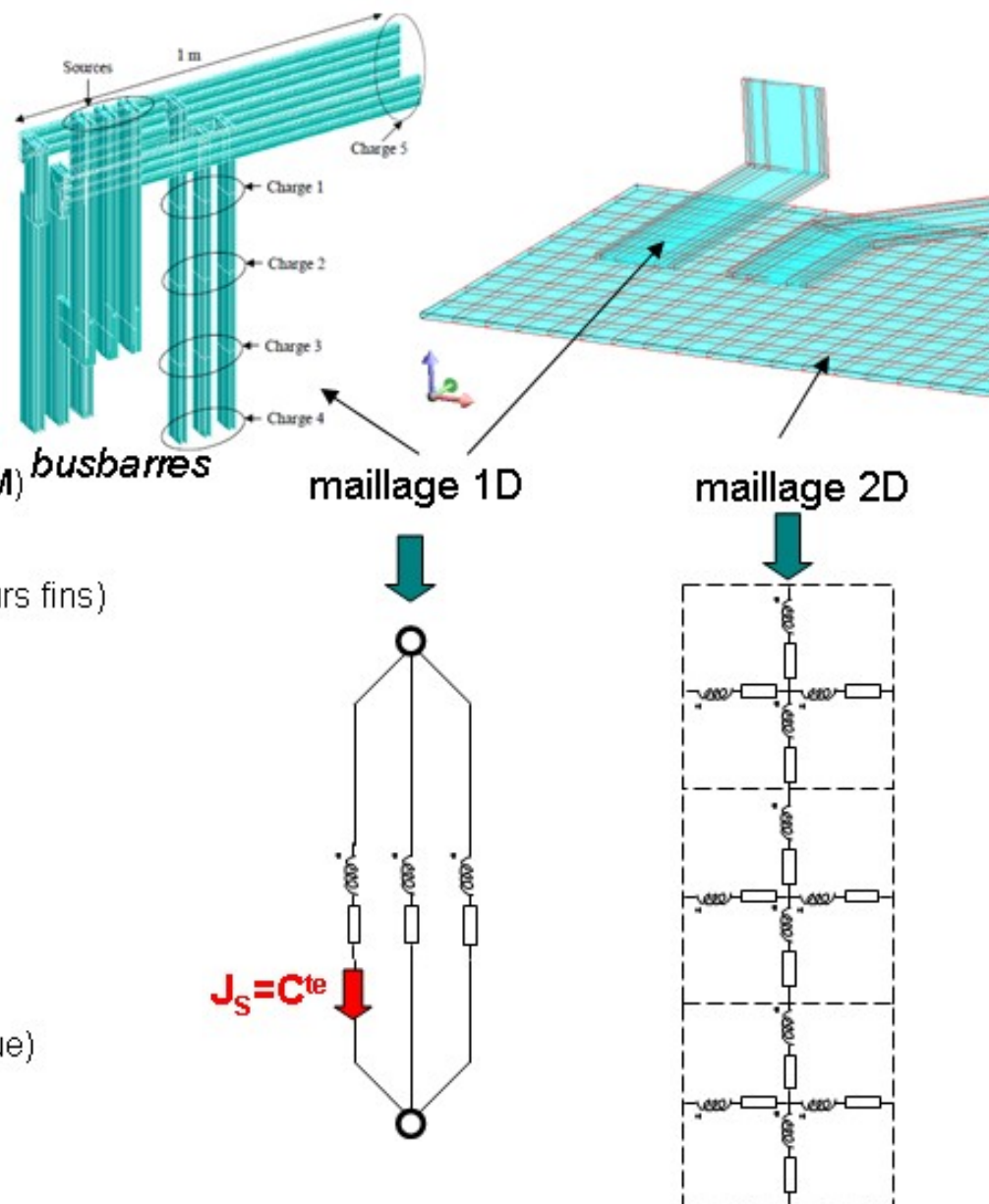
### • Hypothèses :

✓ densité de courant constante par élément

### • Calculs des éléments :

✓ Résistance (formule analytique)

✓ Inductance et mutuelle-inductance (formule semi-analytique)

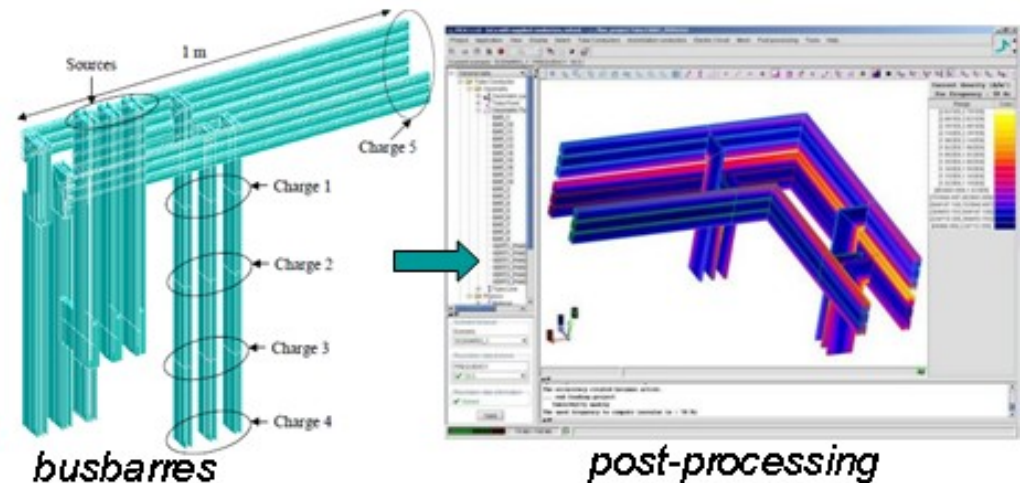


# InCa3D : performances et limites pour la modélisation CEM

Introduction - contexte

## ➤ Applications possibles

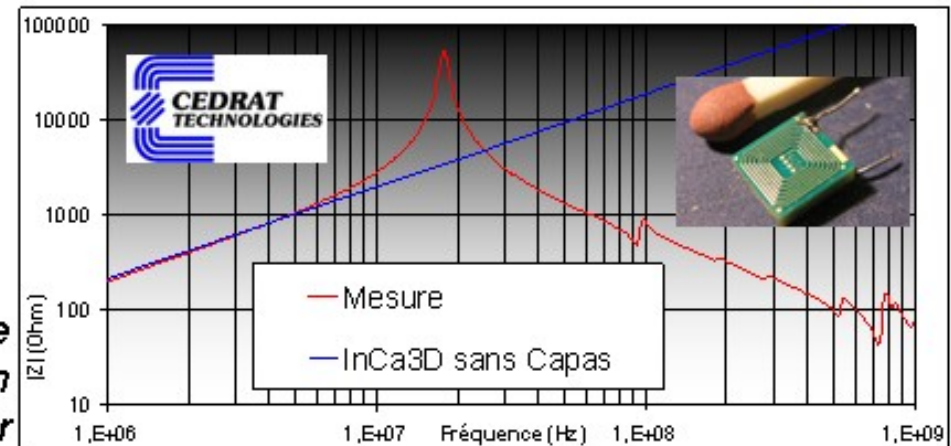
- Modélisation des interconnexions **en basse fréquence**
- Calculs en post-processing
  - ✓ Répartition de courants, pertes, champ magnétique, forces...
- Export de circuit électrique réduit RLM → solveur circuit



## ➤ Inconvénient : pas de modélisation des capacités parasites !

→ Domaine de validité limité aux basses fréquences

*Exemple: spectre d'impédance d'un micro-capteur*



→ **Nécessité d'ajouter les capacités parasites pour élargir la gamme de fréquences et pour prendre en compte les courants parasites qui circulent dans l'air (CEM)**

# Plan de la présentation

## ➤ I Introduction & Contexte

### Résumé

- Forte finalité industrielle des objectifs de la thèse
- Modélisation CEM en Electronique de Puissance = challenge
- Justification du choix de la méthode PEEC dédiée
- Nécessité de prendre en compte les capacités parasites dans le logiciel InCa3D

## ➤ II Calcul des capacités par méthode intégrale

## ➤ III Accélération des calculs avec la Fast Multipole Method

## ➤ IV Construction d'un circuit électrique équivalent RLM-C

## ➤ V Applications : modélisation CEM de structures industrielles

## ➤ VI Valorisation des travaux dans InCa3D

## ➤ VII Conclusions & Perspectives

# Principe de la méthode intégrale

## ➤ Hypothèses du problème

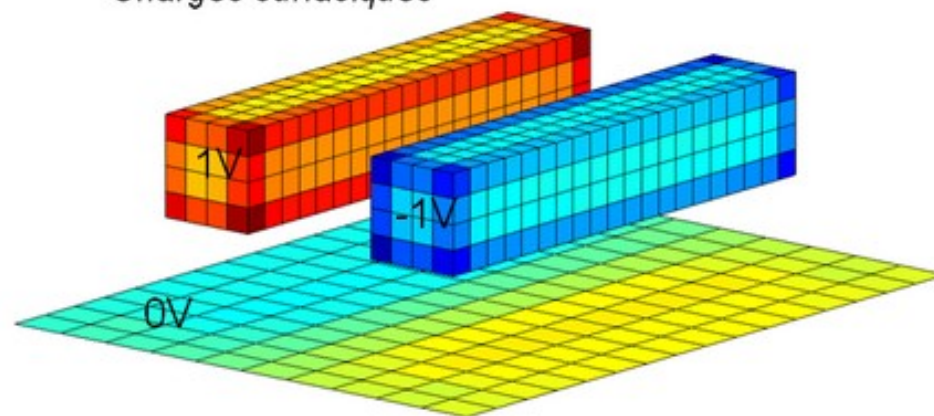
- Problème électrostatique
- Conducteurs iso-potentiels et diélectriques homogènes
- Répartition des charges à la surface des matériaux

## ➤ Système matriciel pour extraire les charges

- Matrice d'interaction **pleine** composée de 2 équations
  - ✓ Potentiel électrique

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{S'} \frac{\sigma(\mathbf{r}')}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|} dS'$$

Charges surfaciques



# Principe de la méthode intégrale

## ➤ Hypothèses du problème

- Problème électrostatique
- Conducteurs iso-potentiels et diélectriques homogènes
- Répartition des charges à la surface des matériaux

## ➤ Système matriciel pour extraire les charges

- Matrice d'interaction **pleine** composée de 2 équations
  - ✓ Potentiel électrique

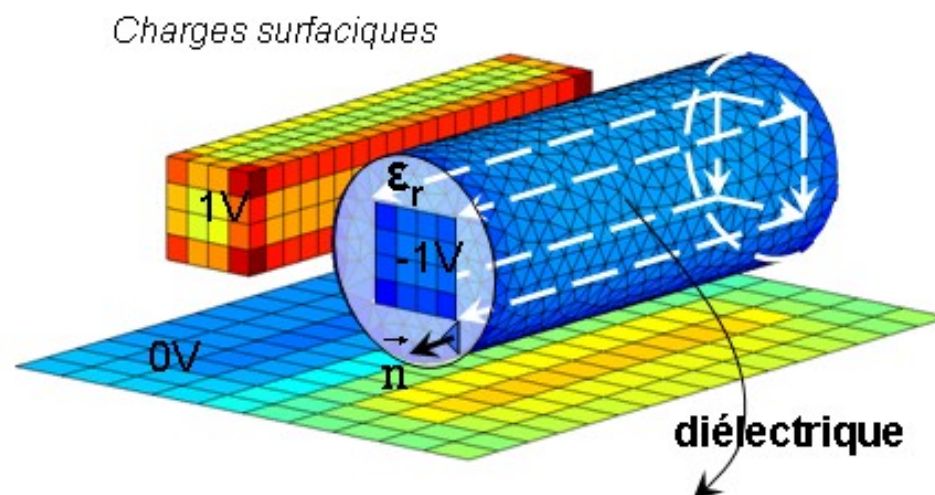
$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{S'} \frac{\sigma(\mathbf{r}')}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|} dS'$$

- ✓ Champ normal

$$En(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{S'} \sigma(\mathbf{r}') \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|^3} dS'$$

- Système matriciel

$$\begin{bmatrix} P \\ En \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_c \\ q_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \\ 0 \end{pmatrix}$$



Saut de la composante normale du champ:

$$\begin{cases} \epsilon_1 En_1 = \epsilon_2 En_2 \\ En_1 - En_2 = -\sigma/\epsilon_0 \end{cases}$$

# Formulations et techniques d'intégration

## ➤ Différentes formulations

Collocation **ou** Galerkin

**Approche discrète :**  
équation valable en un point (au barycentre)

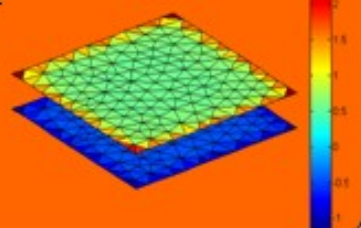
$$\varphi(\mathbf{P}) = \sum \iint \frac{\sigma_i}{r_i} dS_i$$

**Approche variationnelle :**  
équation valable : sur une fonction de forme (F)

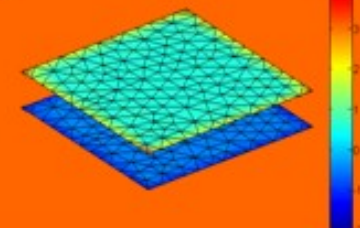
$$\iint \mathbf{F} \cdot \varphi(\mathbf{P}) dS = \iint \mathbf{F} \cdot \left( \sum \iint \frac{\sigma_i}{r_i} dS_i \right) dS$$

Ordre 0 **ou** Ordre 1

Charge constante par élément



Charge variant linéairement sur l'élément (charges aux noeuds)



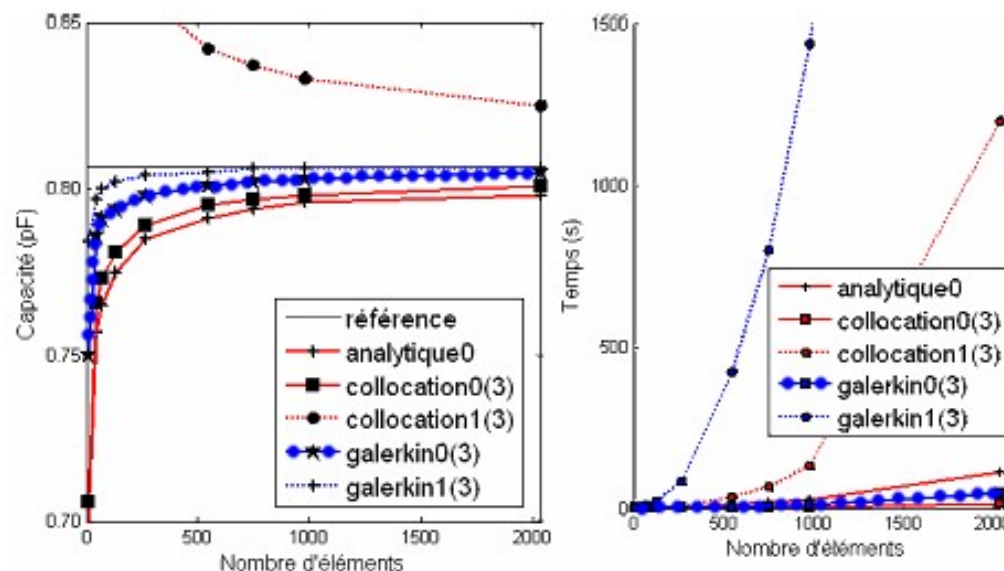
## ➤ Différentes techniques d'intégration

- Analytique ou numérique (points de Gauss)

## ➤ Comparaison sur un exemple

- Cas de deux plaques parallèles

➔ Galerkin Ordre 0 = bon compromis temps d'intégration/précision



# Principe : calcul des capacités à partir des charges électriques

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

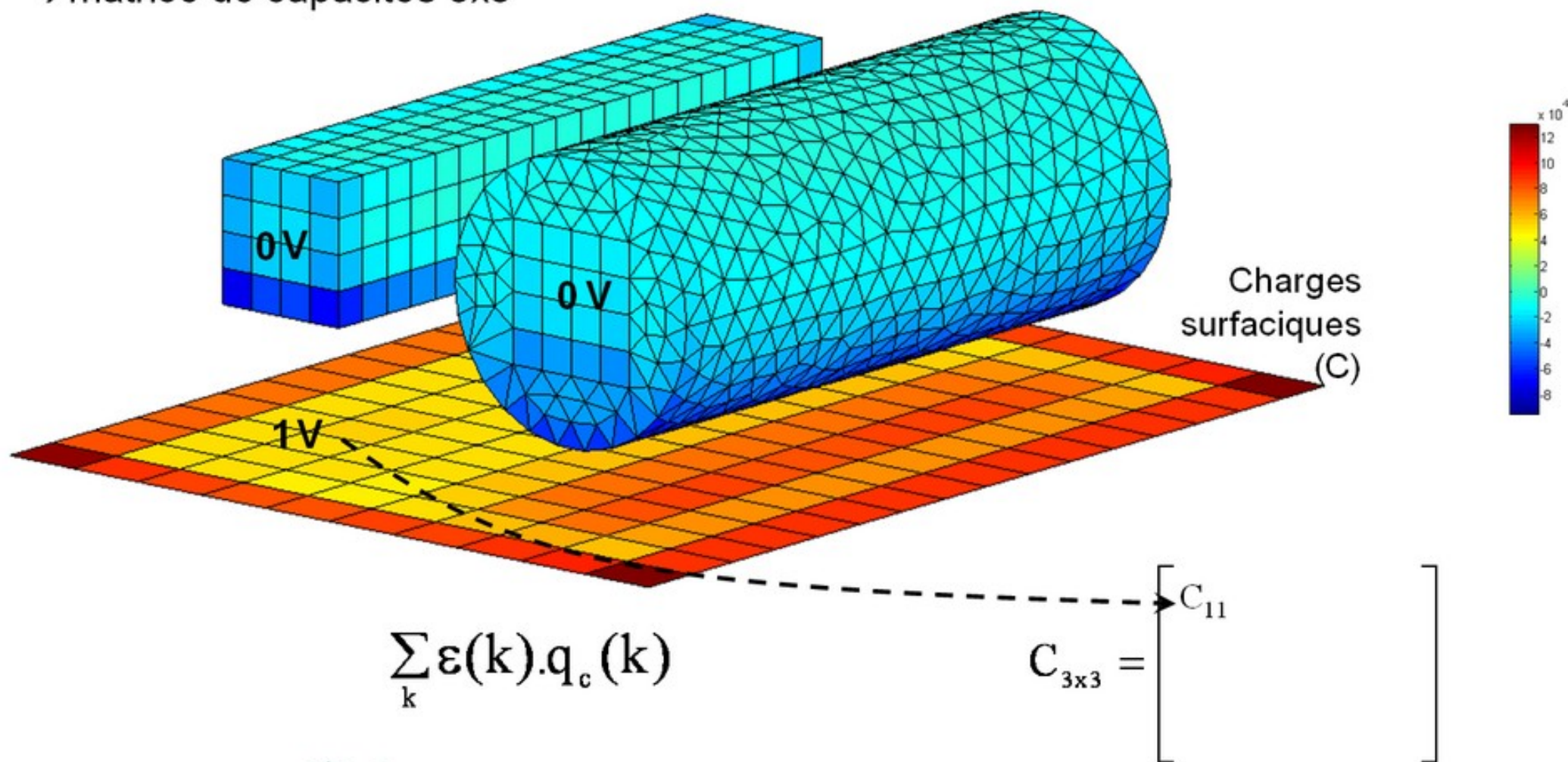
○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

3 conducteurs → 3 résolutions matricielles pour obtenir les charges

→ matrice de capacités 3x3



# Principe : calcul des capacités à partir des charges électriques

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

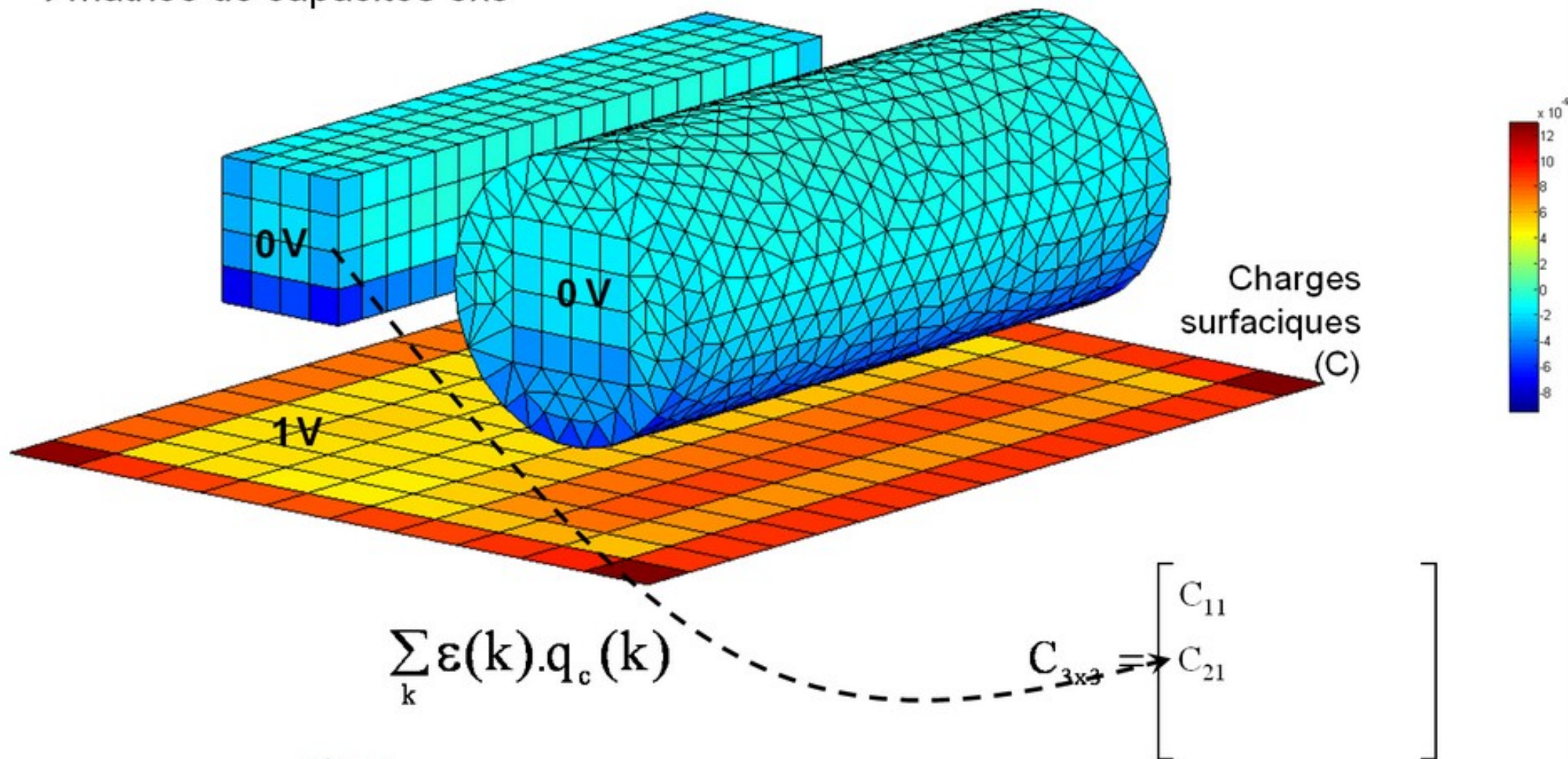
○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

3 conducteurs → 3 résolutions matricielles pour obtenir les charges

→ matrice de capacités 3x3





# Principe : calcul des capacités à partir des charges électriques

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

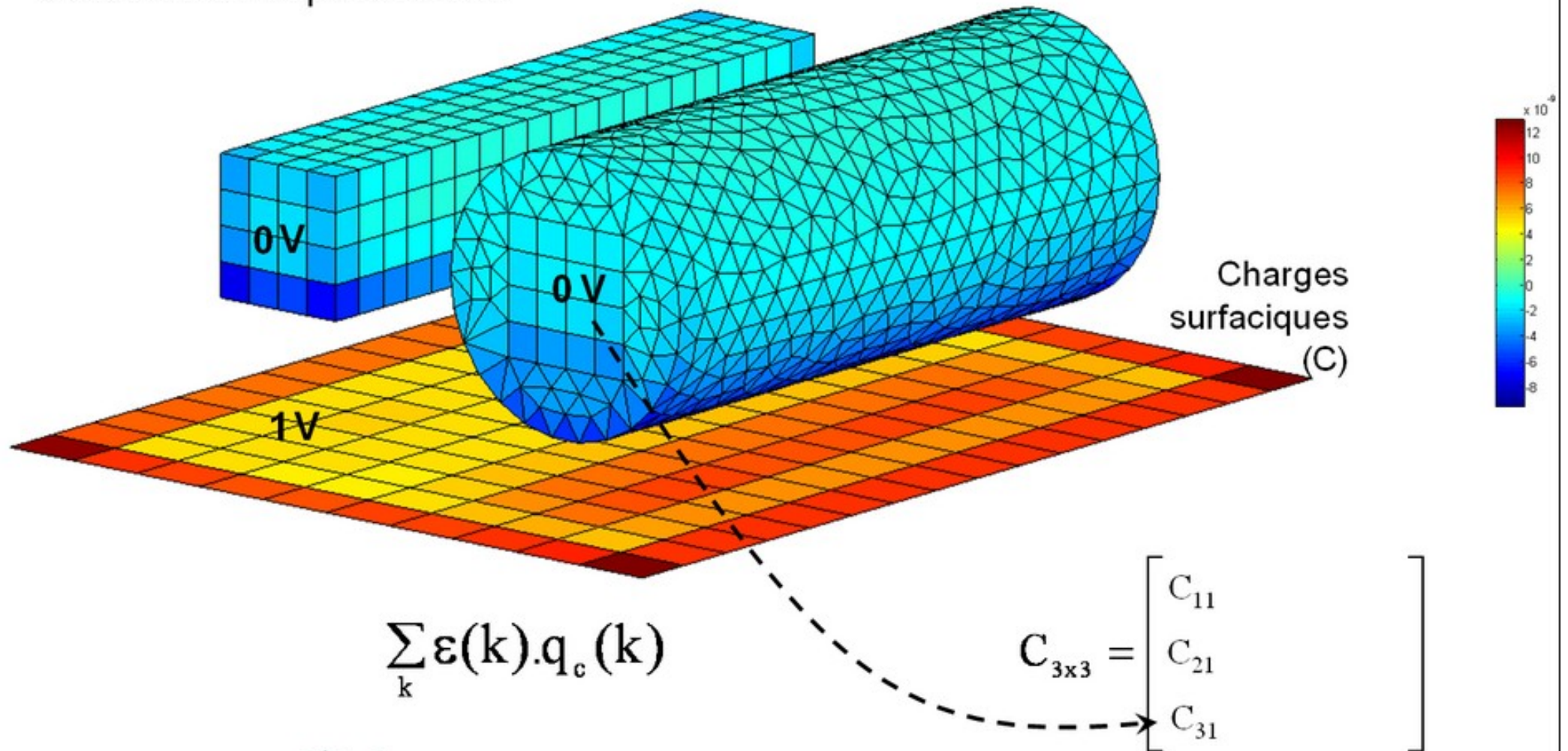
○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

3 conducteurs → 3 résolutions matricielles pour obtenir les charges

→ matrice de capacités 3x3



# Principe : calcul des capacités à partir des charges électriques

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

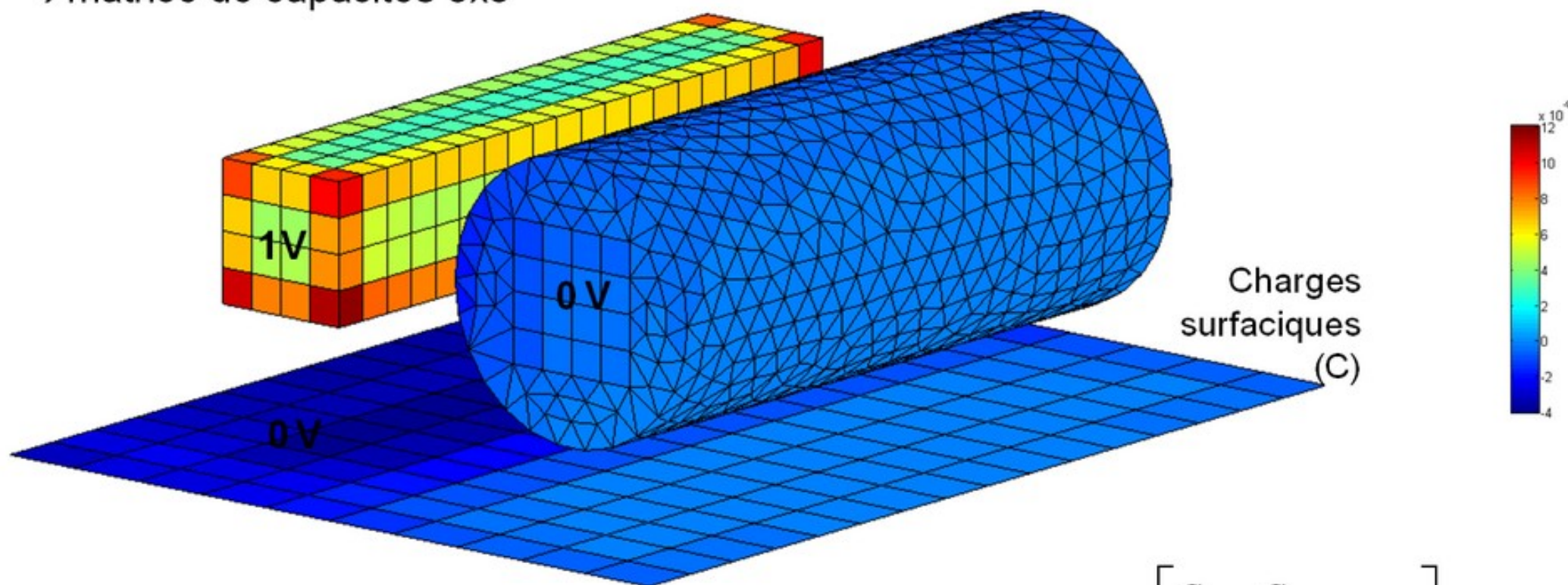
○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

3 conducteurs → 3 résolutions matricielles pour obtenir les charges

→ matrice de capacités 3x3



$$C_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \\ C_{21} & C_{22} & \\ C_{31} & C_{32} & \end{bmatrix}$$

# Principe : calcul des capacités à partir des charges électriques

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

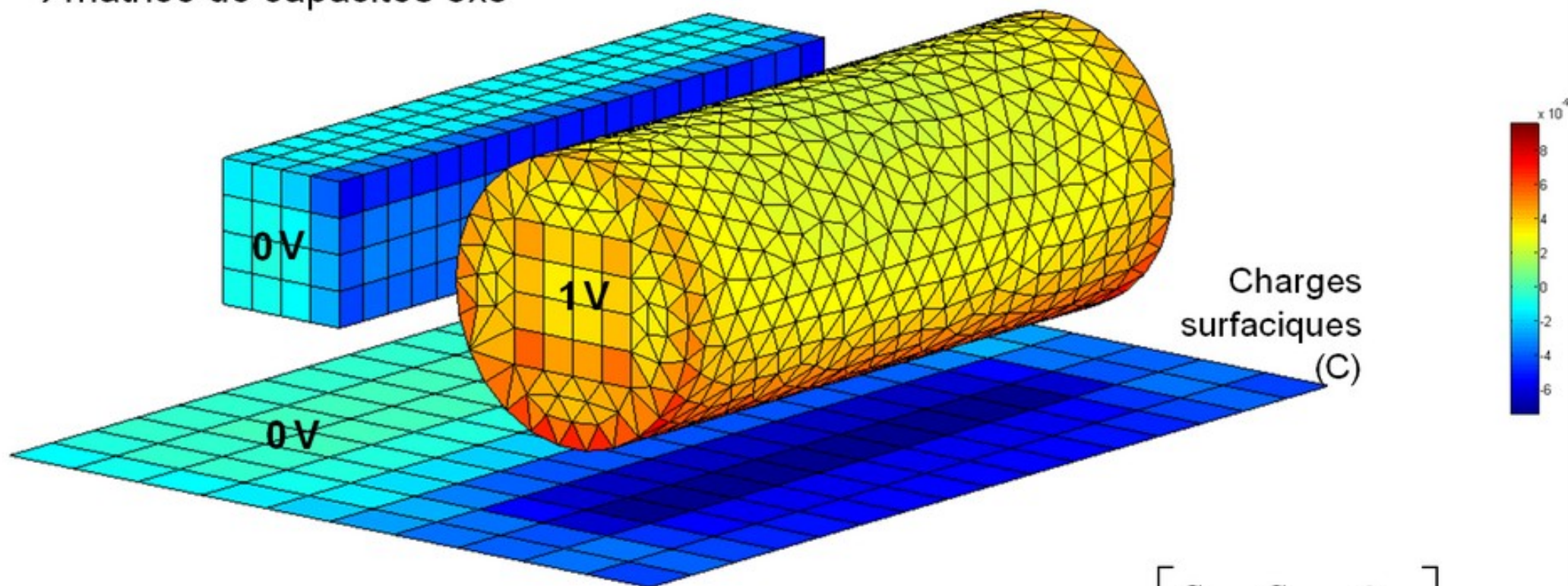
○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

3 conducteurs → 3 résolutions matricielles pour obtenir les charges

→ matrice de capacités 3x3



→ matrice symétrique  $C_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$

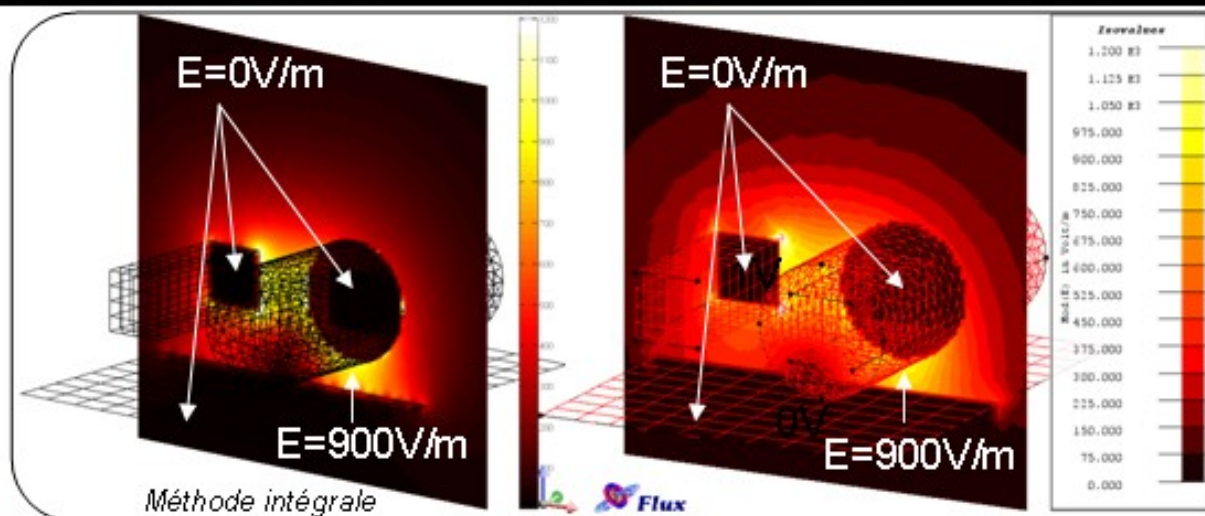
# Validation de la méthode

## ➤ Comparaison avec la méthode des éléments finis (logiciel Flux)

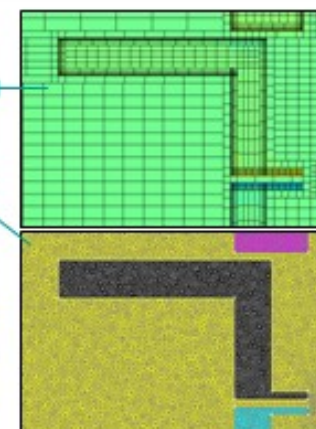
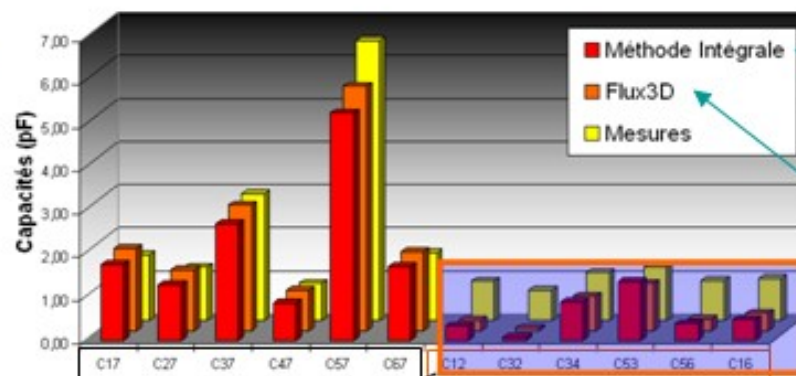
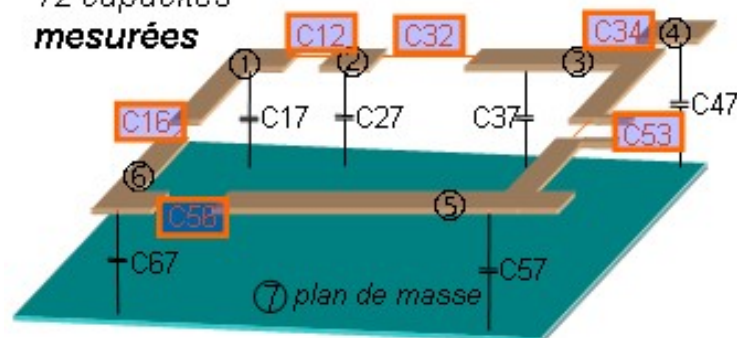
- Différentes formulations validées
- Valeurs des charges, capacités
- Post-processing en champ ou potentiel

## ➤ Comparaison avec des mesures

- Mesures de capacités parasites d'un hacheur



12 capacités mesurées



7 000 éléments  
(matrice pleine)

600 000 éléments  
(matrice creuse)

Capas < 1 pF : mesure peu fiable ( $\pm 1$  pF)

➔ Méthode de calcul validée par la méthode des éléments finis (Flux) et en mesure  
➔ Méthode générale, robuste, adaptée pour le calcul des capacités parasites

# Nécessité d'utiliser un maillage adapté aux charges

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

○ InCa3D

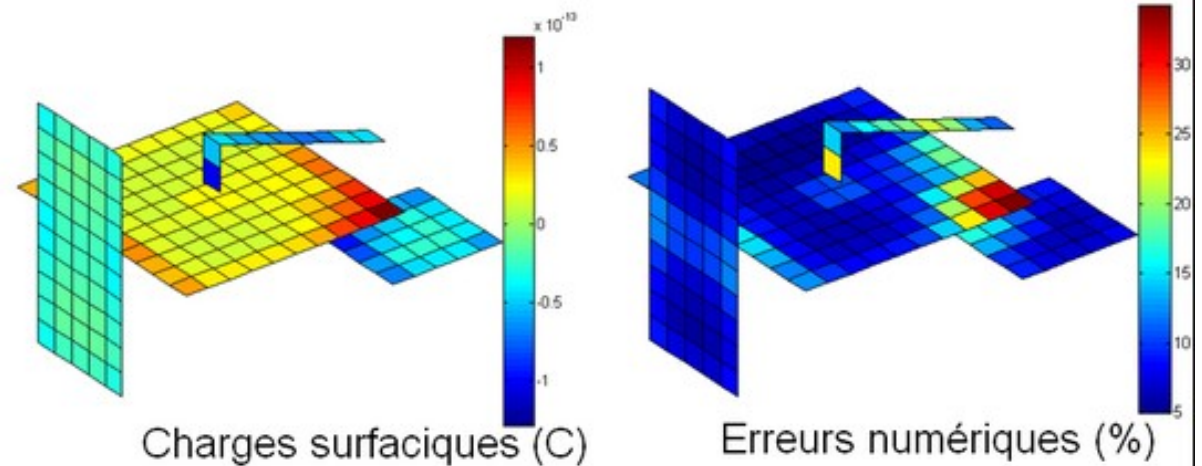
○ Conclusion

## ➤ Répartition des charges

- Localisation en périphérie des conducteurs
  - ✓ Distributions fortement inhomogènes
- Effets d'ombrage

## ➤ Mise en place d'une stratégie de remaillage adaptatif

- But : remailler les zones de forts gradients
- Critère numérique entre 2 formulations :
  - ✓ Calcul des charges (Collocation ordre 0)
  - ✓ Calcul du potentiel avec ces charges (Galerkin ordre 0)
  - ✓ Comparaison avec le potentiel théorique
  - Calcul des erreurs numériques et remaillage



# Nécessité d'utiliser un maillage adapté aux charges

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

○ InCa3D

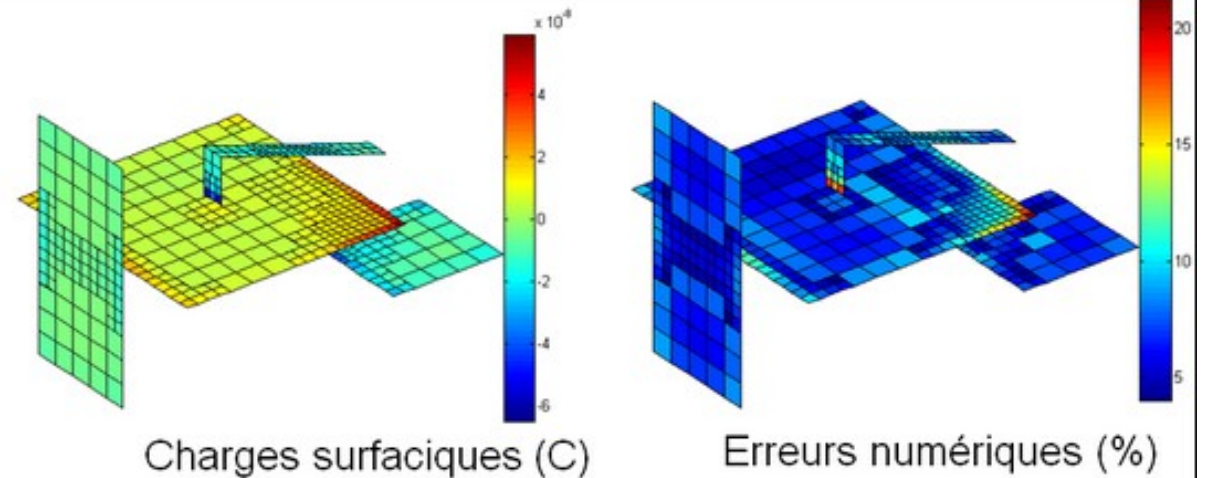
○ Conclusion

## ➤ Répartition des charges

- Localisation en périphérie des conducteurs
  - ✓ Distributions fortement inhomogènes
- Effets d'ombrage

## ➤ Mise en place d'une stratégie de remaillage adaptatif

- But : remailler les zones de forts gradients
- Critère numérique entre 2 formulations :
  - ✓ Calcul des charges (Collocation ordre 0)
  - ✓ Calcul du potentiel avec ces charges (Galerkin ordre 0)
  - ✓ Comparaison avec le potentiel théorique
  - Calcul des erreurs numériques et remaillage



# Nécessité d'utiliser un maillage adapté aux charges

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

○ InCa3D

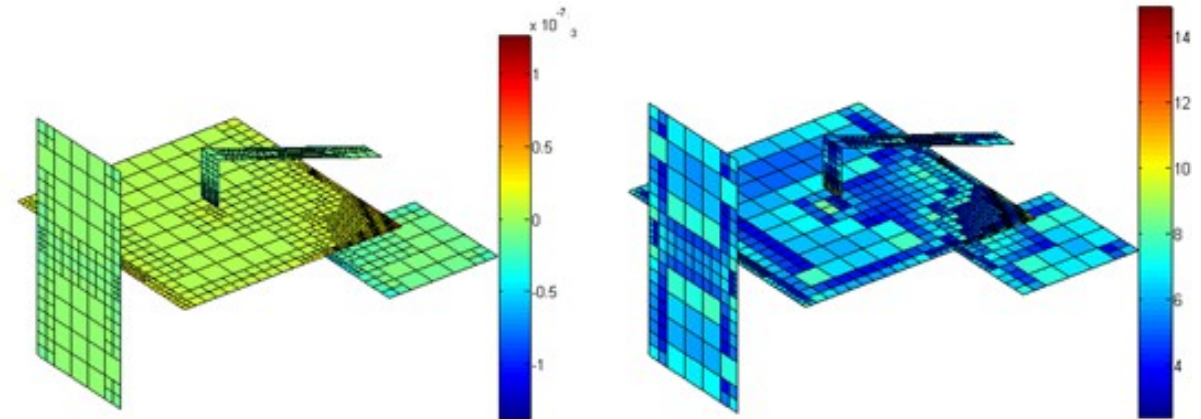
○ Conclusion

## ➤ Répartition des charges

- Localisation en périphérie des conducteurs
  - ✓ Distributions fortement inhomogènes
- Effets d'ombrage

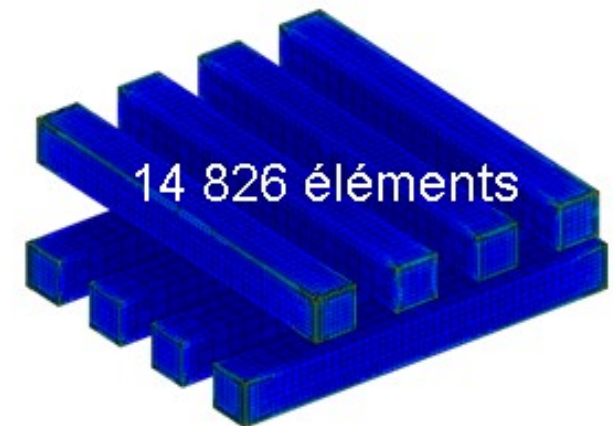
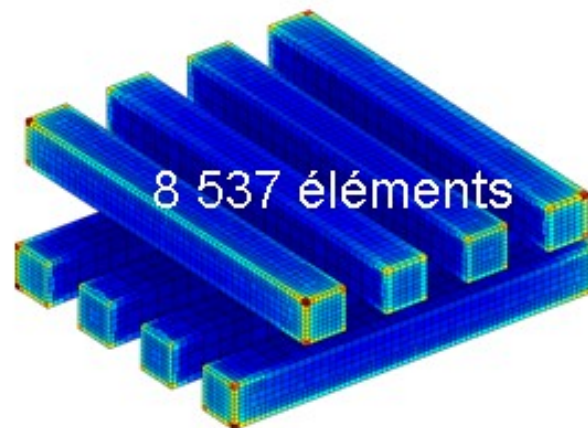
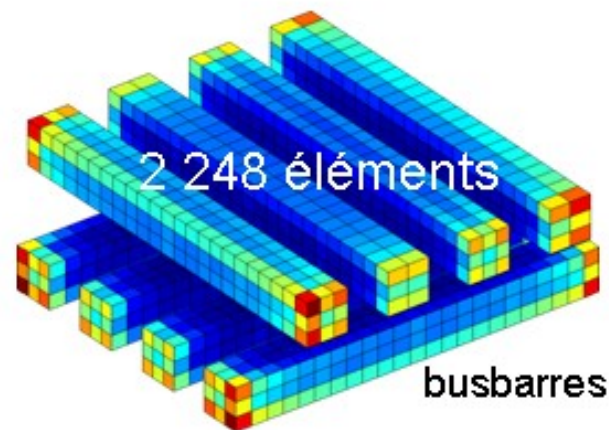
## ➤ Mise en place d'une stratégie de remaillage adaptatif

- But : remailler les zones de forts gradients
- Critère numérique entre 2 formulations :
  - ✓ Calcul des charges (Collocation ordre 0)
  - ✓ Calcul du potentiel avec ces charges (Galerkin ordre 0)
  - ✓ Comparaison avec le potentiel théorique
  - Calcul des erreurs numériques et remaillage



Charges surfaciques (C)

Erreurs numériques (%)



# Performances et limites de cette méthode intégrale

○ Introduction - contexte

● Calcul des capas

○ Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

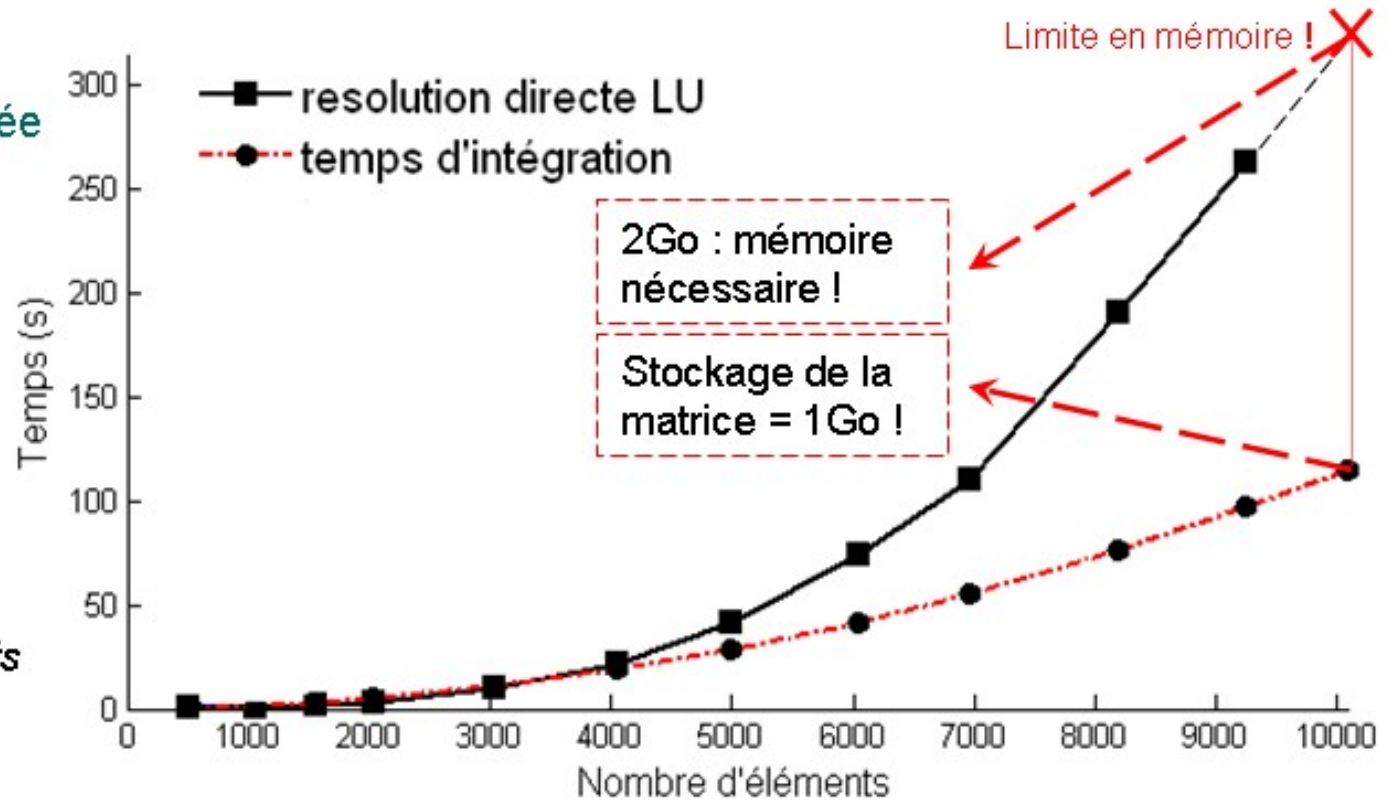
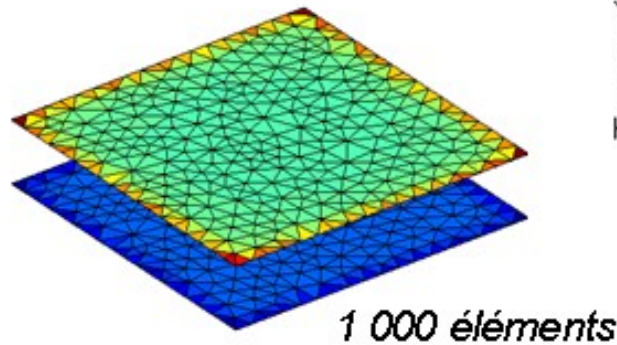
○ InCa3D

○ Conclusion

## ➤ Performances en temps

- Intégration numérique vectorisée
- Progression en  $O(n^2)$

✓ Exemple 2 plaques parallèles



## ➔ Limites de la méthode intégrale en interaction totale

- Intégration et stockage d'une **matrice d'interaction pleine**

➔ **Inadaptée pour modéliser des géométries complexes !**



# Plan de la présentation

- I Introduction & Contexte
- II Calcul des capacités par méthode intégrale

## Résumé

- Développement d'une méthode intégrale pour l'extraction des capacités parasites
- Différentes formulations validées
- Inconvénient majeur : le stockage de la matrice d'interaction pleine

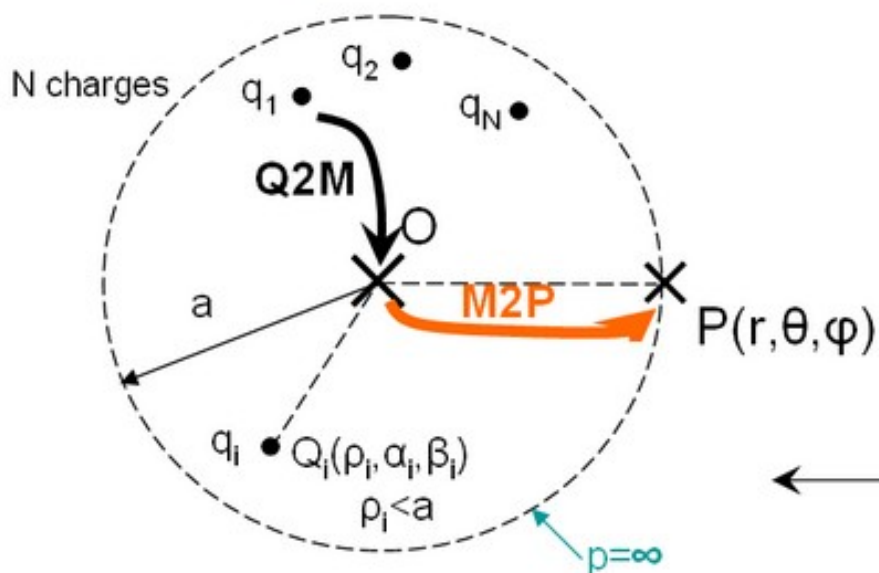
- III Accélération des calculs avec la Fast Multipole Method
- IV Construction d'un circuit électrique équivalent RLM-C
- V Applications : modélisation CEM de structures industrielles
- VI Valorisation des travaux dans InCa3D
- VII Conclusions & Perspectives

# Décomposition multipolaire du potentiel

## ➤ Harmoniques sphériques : solutions de l'équation de Laplace ( $\Delta\Phi=0$ )

- Coefficients harmoniques sphériques :

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}} \cdot P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot e^{im\phi}$$



Potentiel  $\Phi(P) \approx \sum_{n=0}^p \sum_{m=-n}^n M_n^m \cdot \frac{Y_n^m(\theta, \phi)}{r^{n+1}}$

troncature à l'ordre  $p$

Multipôle  $M_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$

Approximation multipolaire à un certain ordre

# Décomposition multipolaire du potentiel

## ➤ Harmoniques sphériques : solutions de l'équation de Laplace ( $\Delta\Phi=0$ )

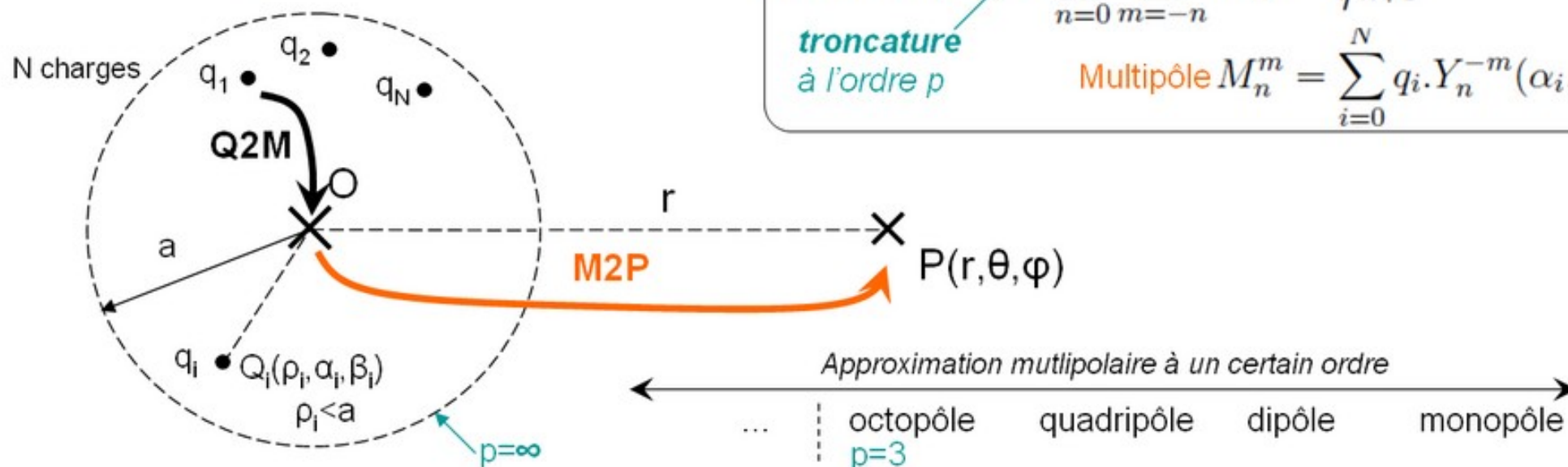
- Coefficients harmoniques sphériques :

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}} \cdot P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot e^{im\phi}$$

Potentiel  $\Phi(P) \approx \sum_{n=0}^p \sum_{m=-n}^n M_n^m \cdot \frac{Y_n^m(\theta, \phi)}{r^{n+1}}$

*troncature à l'ordre p*

Multipôle  $M_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$



# Décomposition multipolaire du potentiel

## ➤ Harmoniques sphériques : solutions de l'équation de Laplace ( $\Delta\Phi=0$ )

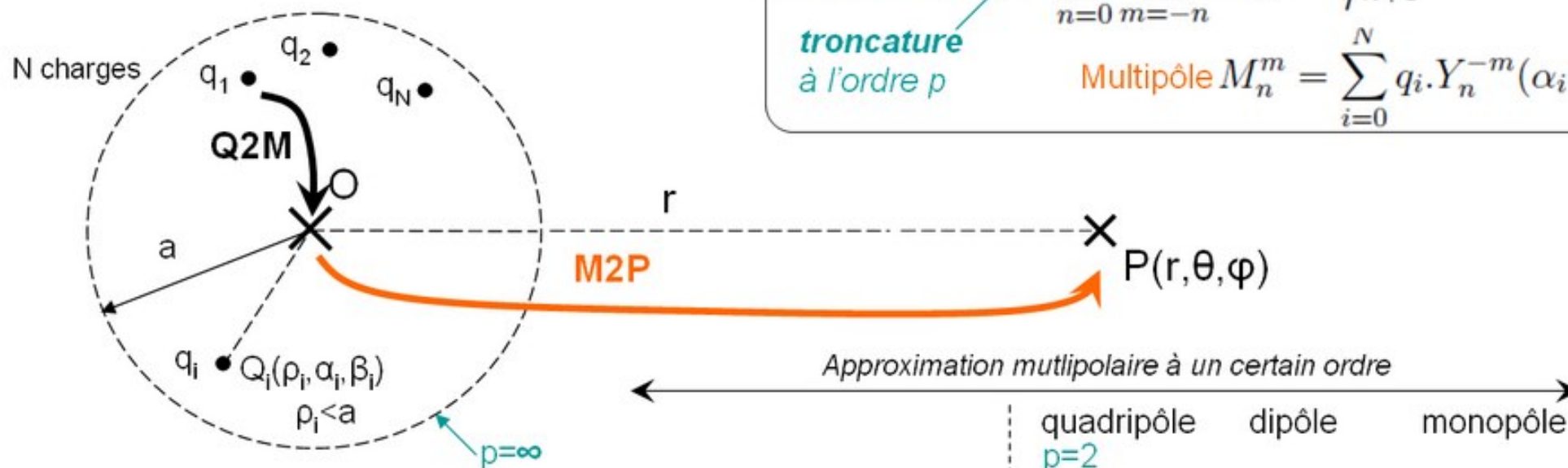
- Coefficients harmoniques sphériques :

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}} \cdot P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot e^{im\phi}$$

Potentiel  $\Phi(P) \approx \sum_{n=0}^p \sum_{m=-n}^n M_n^m \cdot \frac{Y_n^m(\theta, \phi)}{r^{n+1}}$

troncature à l'ordre  $p$

Multipôle  $M_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$



# Décomposition multipolaire du potentiel

## ➤ Harmoniques sphériques : solutions de l'équation de Laplace ( $\Delta\Phi=0$ )

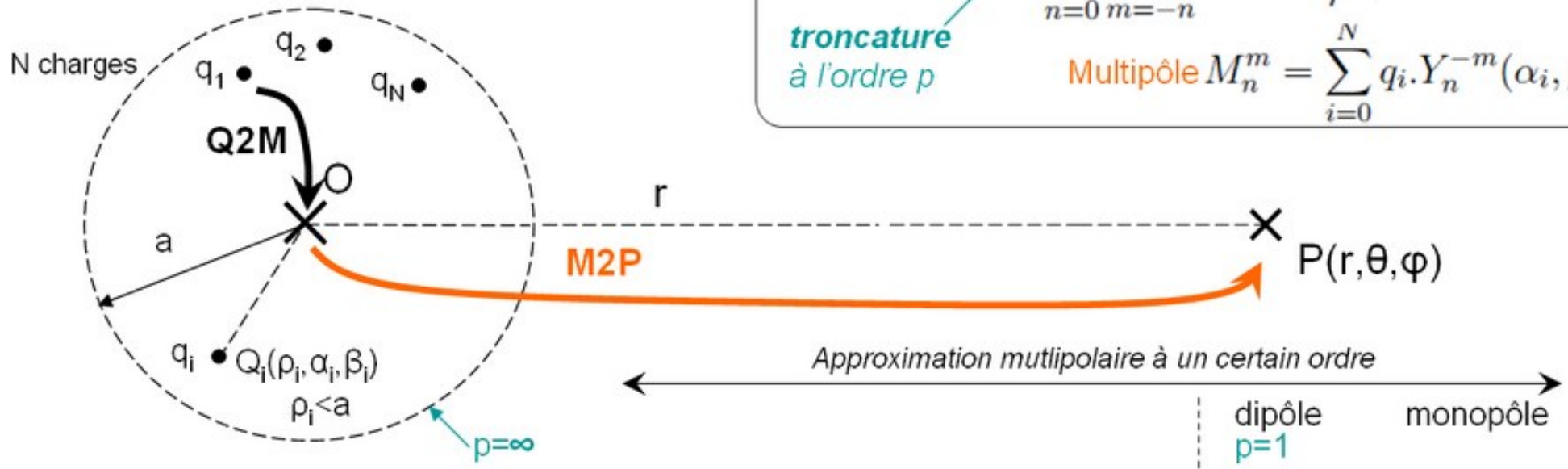
- Coefficients harmoniques sphériques :

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}} \cdot P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot e^{im\phi}$$

Potentiel  $\Phi(P) \approx \sum_{n=0}^p \sum_{m=-n}^n M_n^m \cdot \frac{Y_n^m(\theta, \phi)}{r^{n+1}}$

*troncature à l'ordre p*

Multipôle  $M_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$



# Décomposition multipolaire du potentiel

## ➤ Harmoniques sphériques : solutions de l'équation de Laplace ( $\Delta\Phi=0$ )

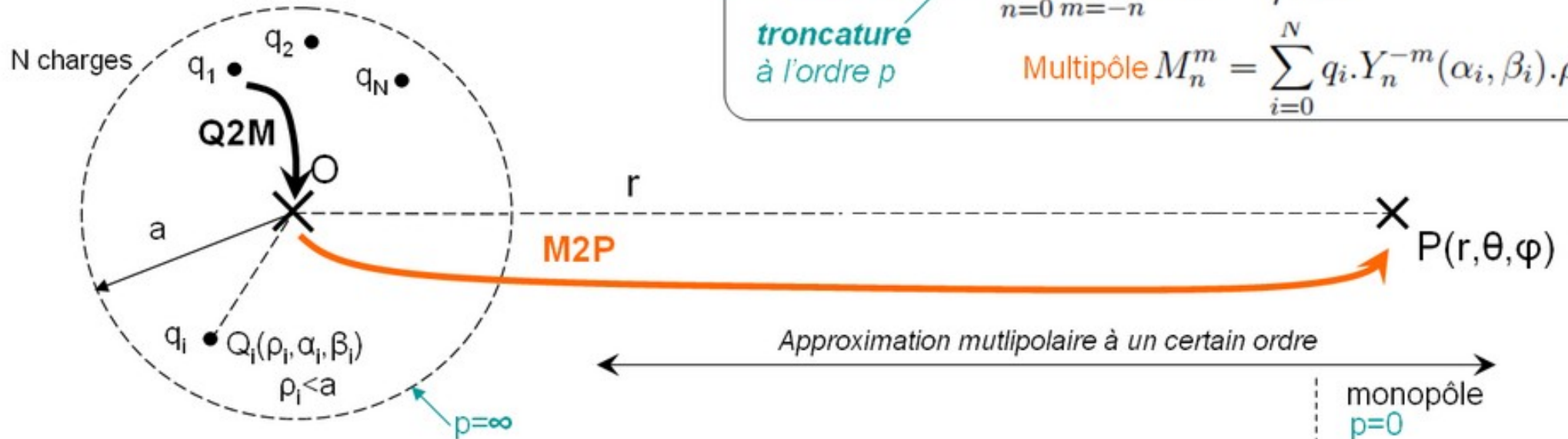
- Coefficients harmoniques sphériques :

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}} \cdot P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot e^{im\phi}$$

Potentiel  $\Phi(P) \approx \sum_{n=0}^p \sum_{m=-n}^n M_n^m \cdot \frac{Y_n^m(\theta, \phi)}{r^{n+1}}$

troncature à l'ordre  $p$

Multipôle  $M_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$

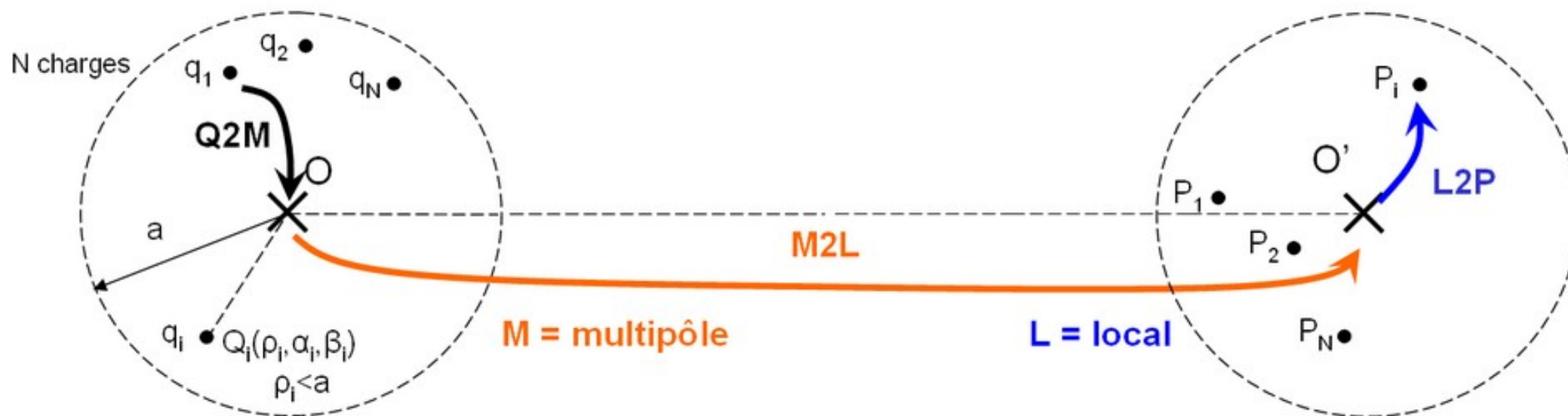


# Décomposition multipolaire du potentiel

➤ Harmoniques sphériques : solutions de l'équation de Laplace ( $\Delta\Phi=0$ )

• Coefficients harmoniques sphériques :

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(n - |m|)!}{(n + |m|)!}} \cdot P_n^{|m|}(\cos \theta) \cdot e^{im\phi}$$



➔ Accélère le calcul du potentiel (un seul vecteur M2L pour l'ensemble des charges et des potentiels)

➔ **Besoin d'un algorithme qui contrôle les calculs d'interaction**

# Partitionnement et calcul des interactions lointaines

○ Introduction - contexte  
○○○○○○○○○○○○○○○○

○ Calcul des capas  
○○○○○○○○○○○○○○○○

● Accélération AMLFMM  
○●○○○○○○○○○○○○○○

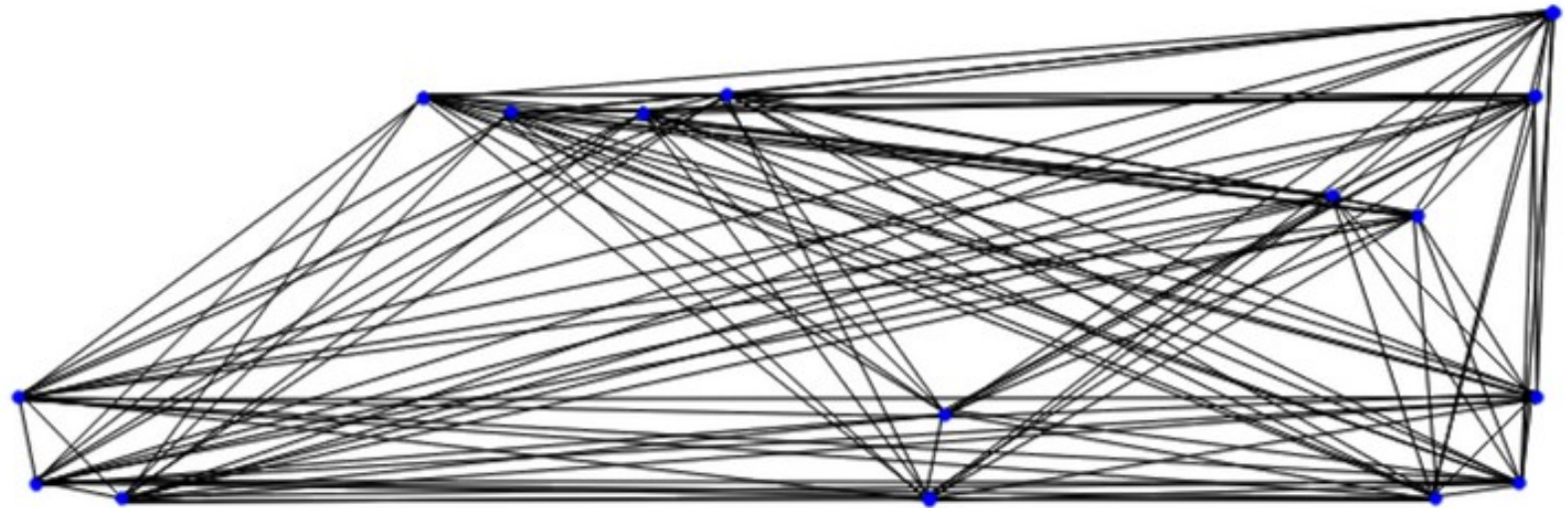
○ Circuit RLM+C  
○○○○○○○○○○○○○○○○

○ Études CEM  
○○○○○○○○○○○○○○○○

○ InCa3D  
○○○○○○○○○○○○○○○○

○ Conclusion  
○○○○○○○○○○○○○○○○

## Interaction totales !



16 éléments



# Partitionnement et calcul des interactions lointaines

○ Introduction - contexte  
○○○○○○○○○○

○ Calcul des capas  
○○○○○○○○

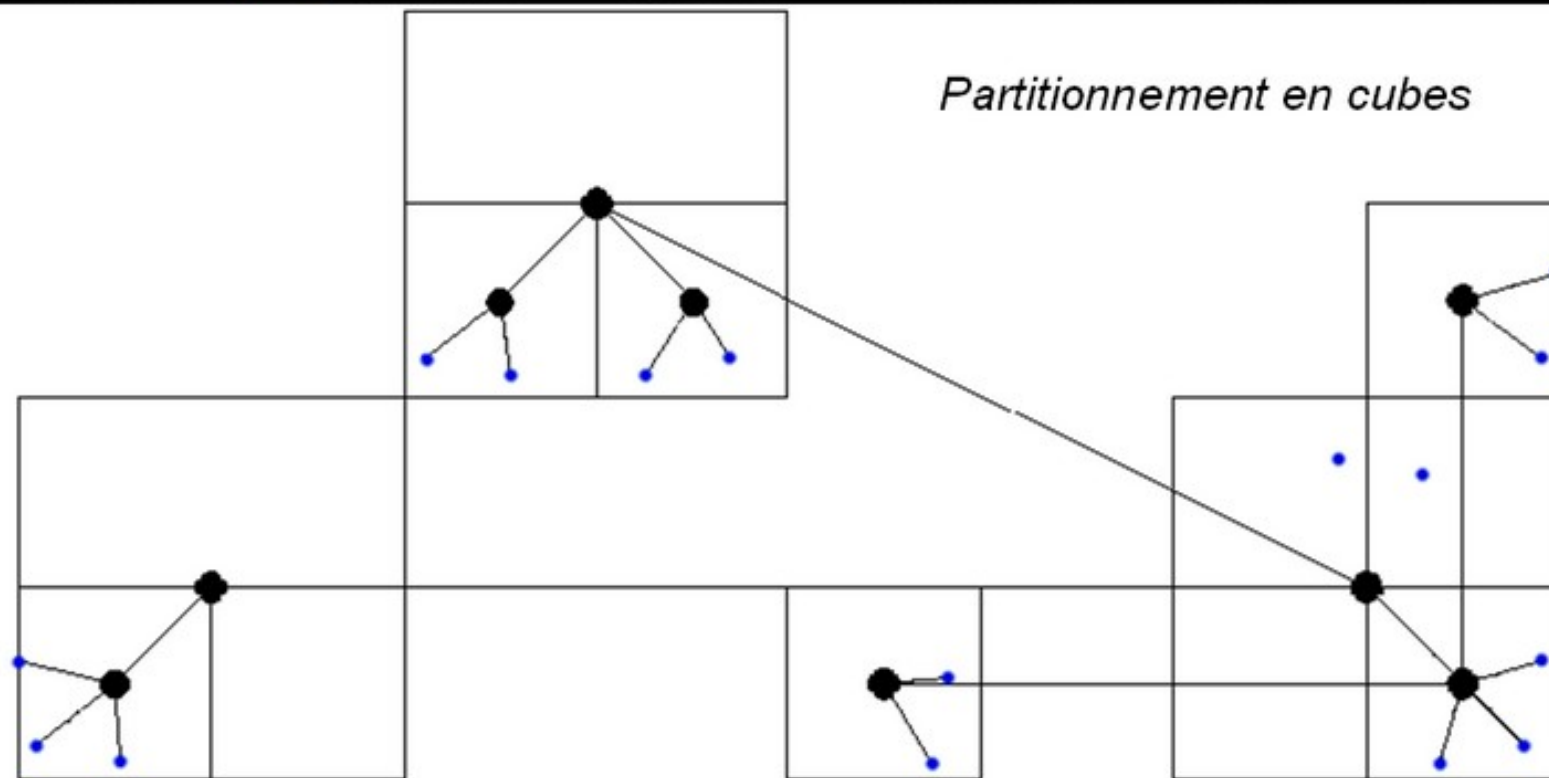
● Accélération AMLFMM  
●○○○○○○○○

○ Circuit RLM+C  
○○○○○○

○ Études CEM  
○○○○○○○○

○ InCa3D  
○○○○

○ Conclusion  
○○○○



16 éléments

# Partitionnement et calcul des interactions lointaines

## Vecteurs d'interactions

— **Q2M**  
 des charges au multipôle

$$O_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$$

— **M2M**  
 du multipôle au multipôle

$$M_j^k = \sum_{n=0}^j \sum_{\substack{m=-n, \\ |k-m| < j-n}}^n K_{jn}^{km} \cdot O_{k-m}^{j-n} \cdot Y_n^{-m}(\alpha, \beta) \cdot \rho^n$$

— **M2L**  
 du multipôle au local

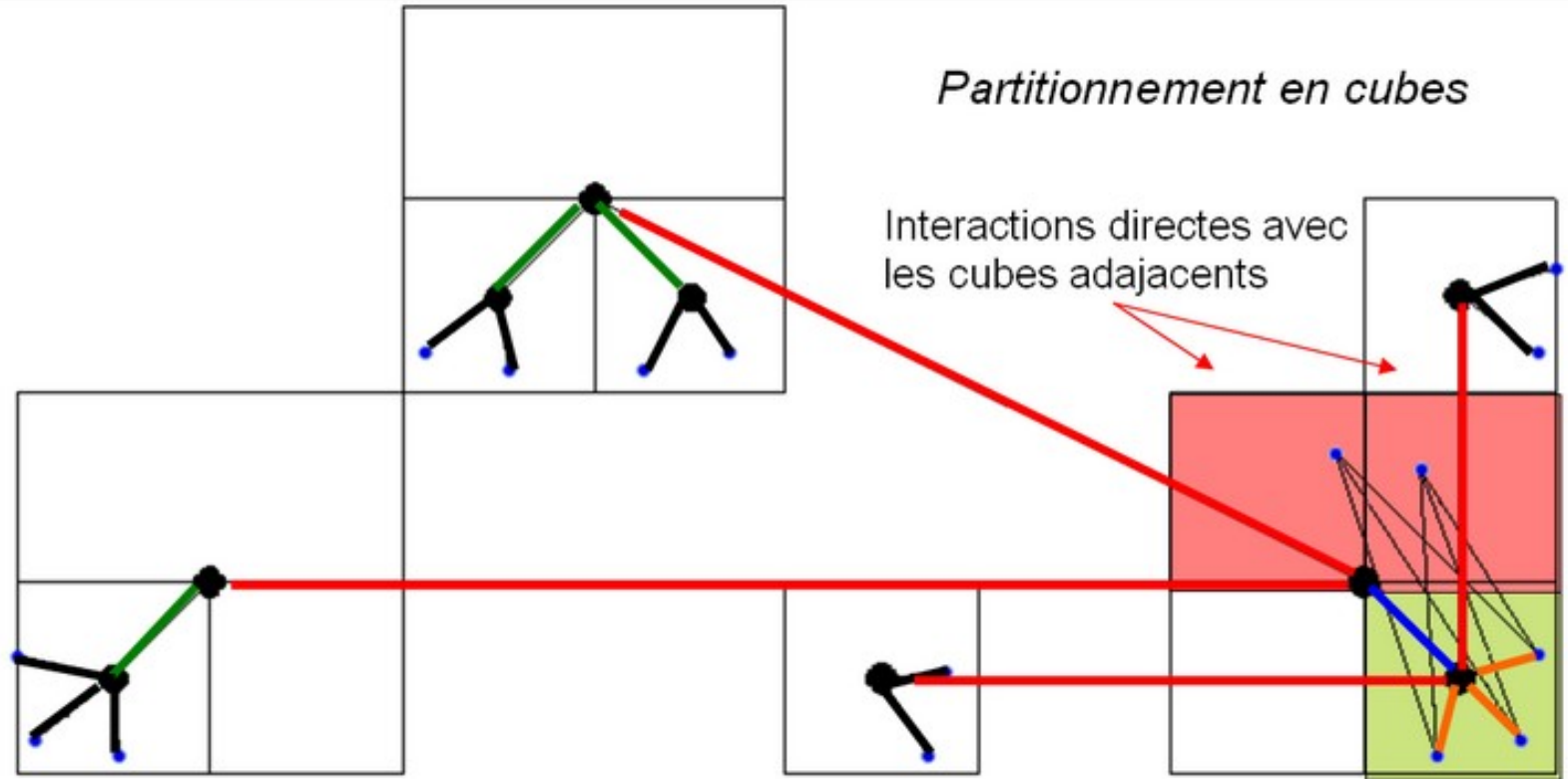
$$O_j^k = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=-n}^n K_{jn}^{km} \cdot M_n^m \cdot \frac{Y_{j+n}^{m-k}(\alpha, \beta)}{r^{j+n+1}}$$

— **L2L**  
 du local au local

$$L_j^k = \sum_{n=j}^p \sum_{\substack{m=-n, \\ |l-k| < n-j}}^n K_{jn}^{km} \cdot O_m^n \cdot Y_{n-j}^{m-k}(\alpha, \beta) \cdot \rho^{n-j}$$

— **L2P**  
 du local au potentiel

$$\Phi(P) = \sum_{j=0}^{+\infty} \sum_{k=-j}^j L_j^k \cdot Y_j^k(\theta, \phi) \cdot r^j$$



# Partitionnement et calcul des interactions lointaines

## Vecteurs d'interactions

— **Q2M**  
 des charges au multipôle

$$O_n^m = \sum_{i=0}^N q_i \cdot Y_n^{-m}(\alpha_i, \beta_i) \cdot \rho_i^n$$

— **M2M**  
 du multipôle au multipôle

$$M_j^k = \sum_{n=0}^j \sum_{\substack{m=-n, \\ |k-m| < j-n}}^n K_{jn}^{km} \cdot O_{k-m}^{j-n} \cdot Y_n^{-m}(\alpha, \beta) \cdot \rho^n$$

— **M2L**  
 du multipôle au local

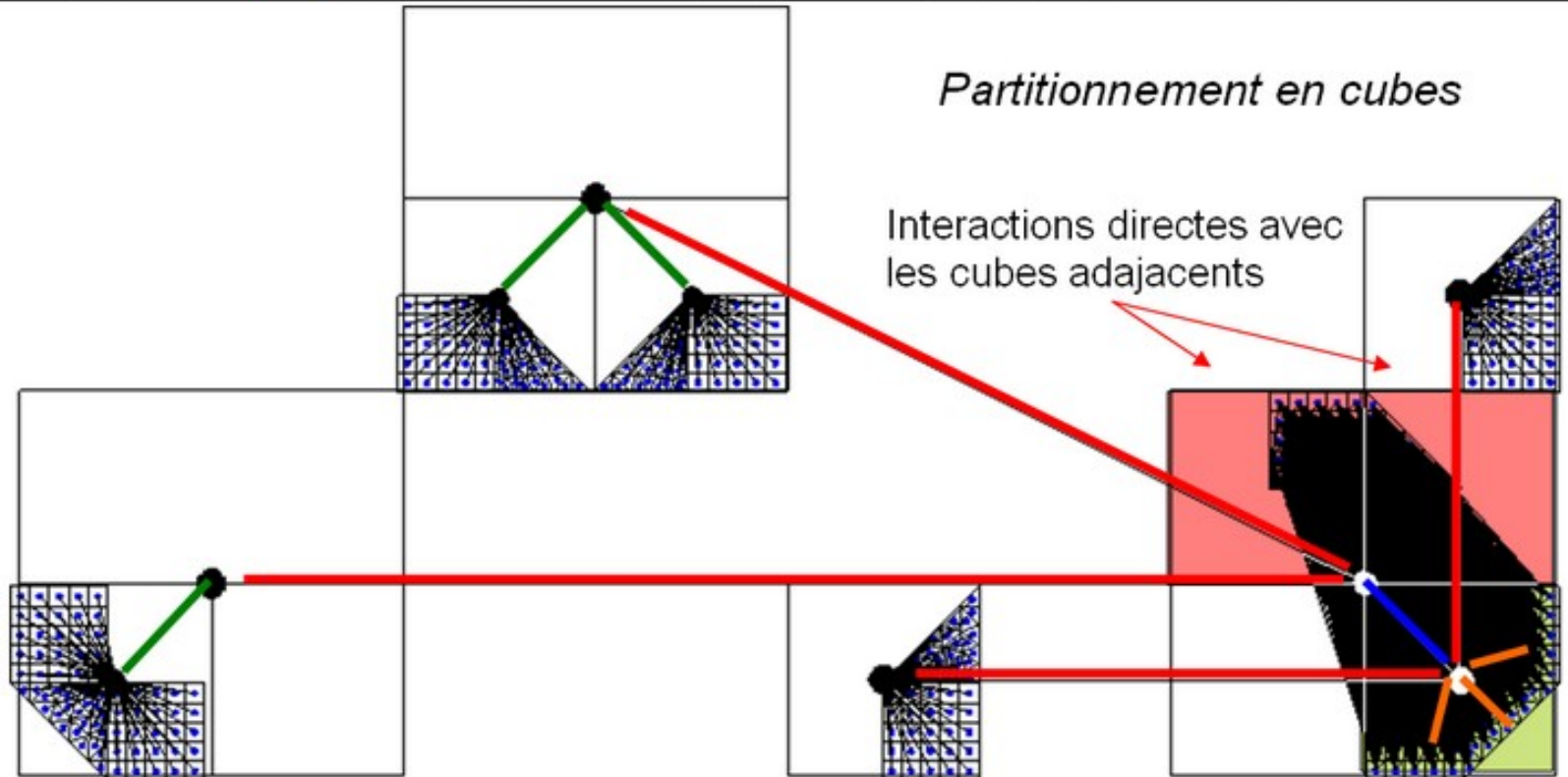
$$O_j^k = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=-n}^n K_{jn}^{km} \cdot M_n^m \cdot \frac{Y_{j+n}^{m-k}(\alpha, \beta)}{r^{j+n+1}}$$

— **L2L**  
 du local au local

$$L_j^k = \sum_{n=j}^p \sum_{\substack{m=-n, \\ |l-k| < n-j}}^n K_{jn}^{km} \cdot O_m^n \cdot Y_{n-j}^{m-k}(\alpha, \beta) \cdot \rho^{n-j}$$

— **L2P**  
 du local au potentiel

$$\Phi(P) = \sum_{j=0}^{+\infty} \sum_{k=-j}^j L_j^k \cdot Y_j^k(\theta, \phi) \cdot r^j$$



## Partitionnement en cubes

Interactions directes avec les cubes adjacents

400 éléments

→ Mêmes chemins d'interactions lointaines **M2M**, **M2L**, **L2L**

Calcul du potentiel

→ Chemins d'interactions communs pour différents cubes : gain en mémoire

# Multi-niveau adaptatif (AMLFMM) et adaptation

○ Introduction - contexte

○ Calcul des capas

● Accélération AMLFMM

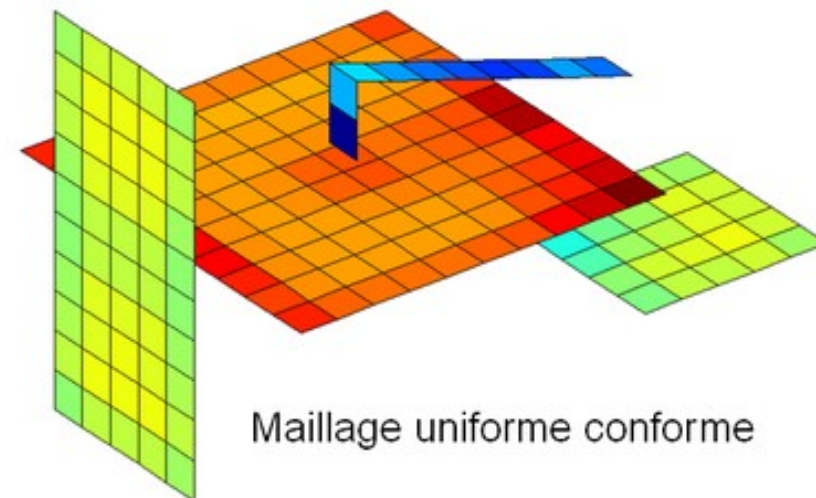
○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

## ➤ Utilisation d'un multi-niveau adaptatif



Maillage uniforme conforme

# Multi-niveau adaptatif (AMLFMM) et adaptation

○ Introduction - contexte

○ Calcul des capas

● Accélération AMLFMM

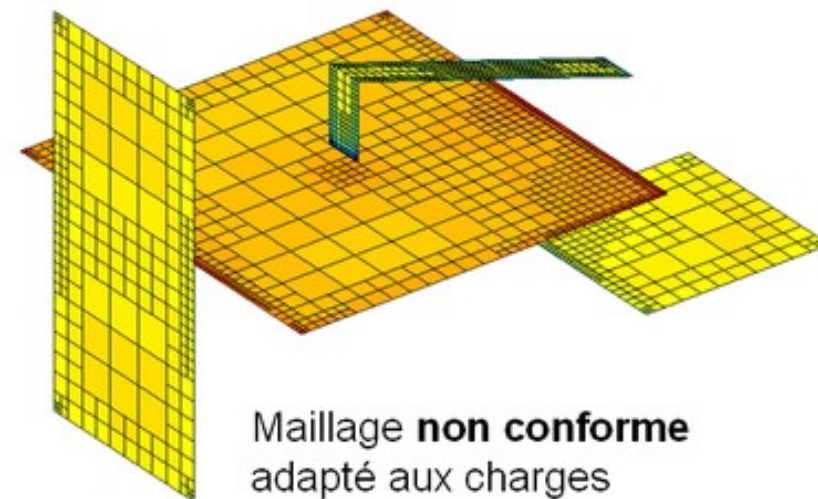
○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

## ➤ Utilisation d'un multi-niveau adaptatif



# Multi-niveau adaptatif (AMLFMM) et adaptation

○ Introduction - contexte

○ Calcul des capas

● Accélération AMLFMM

○ Circuit RLM+C

○ Études CEM

○ InCa3D

○ Conclusion

## ➤ Utilisation d'un multi-niveau **adaptatif**

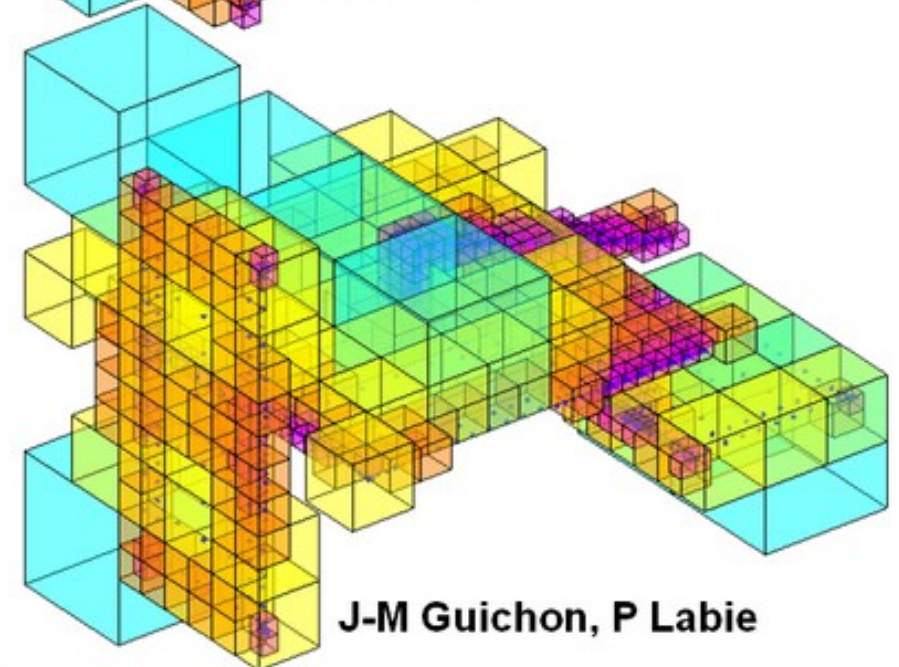
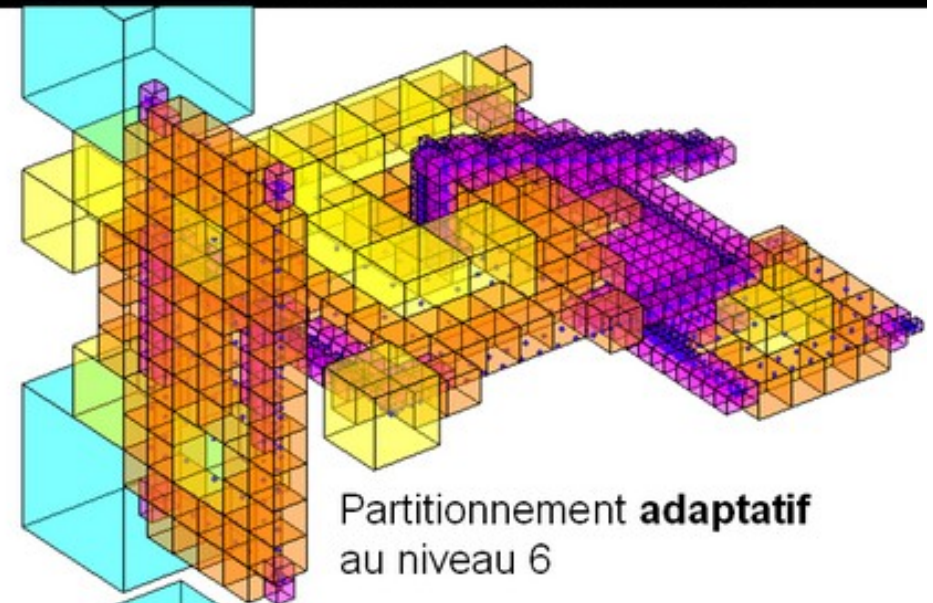
- Particulièrement pertinent des répartitions de sources ponctuelles inhomogènes

[Green et al. 88]

## ➤ Prise en compte de la taille réelle des éléments

- Contrôle de l'inclusion des éléments dans les cubes

→ Nécessite une place mémoire plus importante mais précision assurée !



# Résolution avec GMRES(m) : solveur itératif

## ➤ La matrice d'interaction n'est plus explicite

- Seuls les calculs de potentiels et de champs sont possibles à partir de valeur de charges données

## ➤ Utilisation d'un solveur itératif GMRES(m)

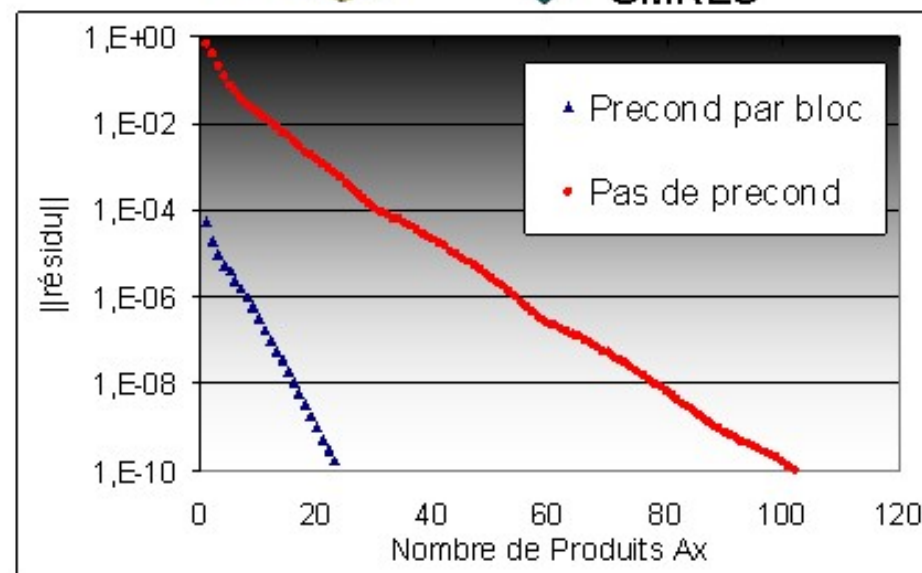
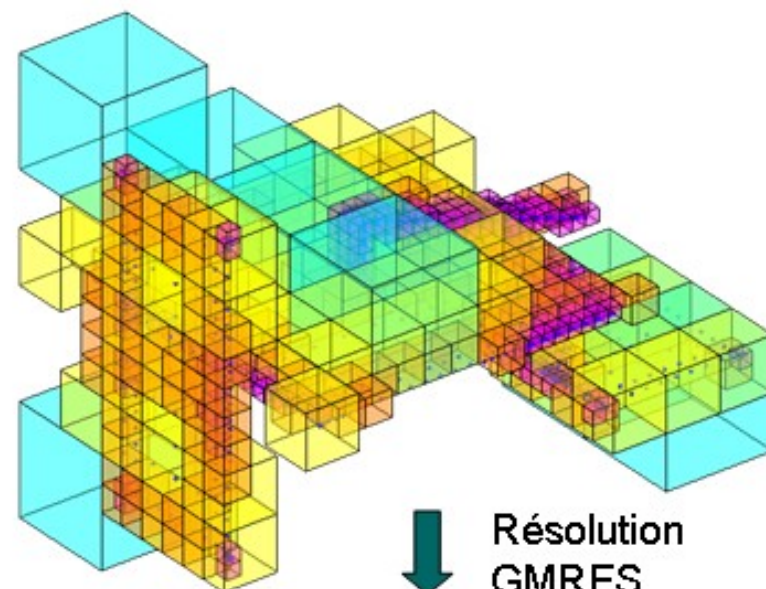
- Basé sur la méthode de Krylov

- ✓ Robuste
- ✓ Rapide
- ✓ Peu gourmand en mémoire

- Préconditionné à gauche par blocs

(bloc = inverse d'une matrice d'interaction totale)

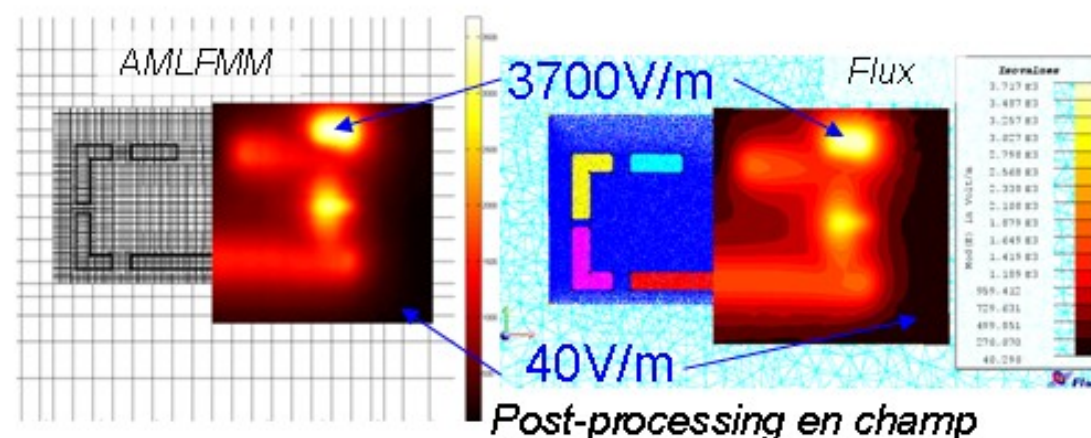
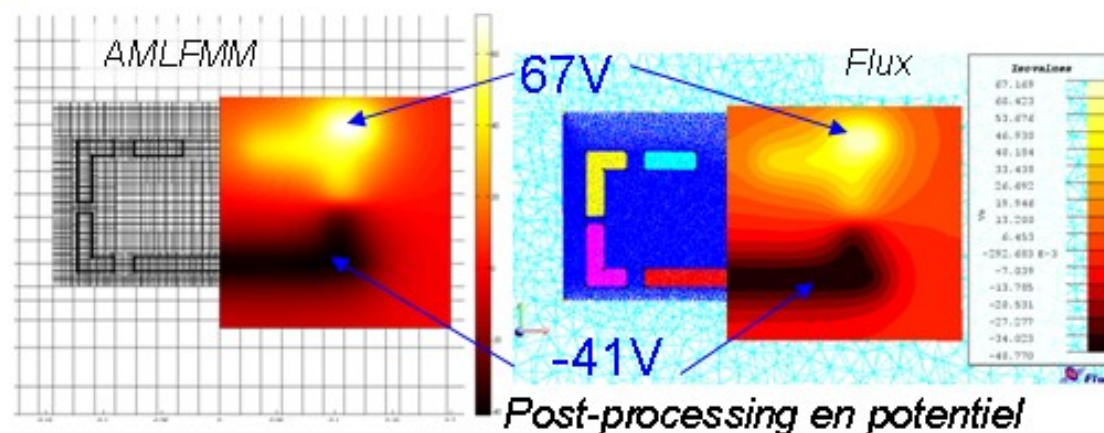
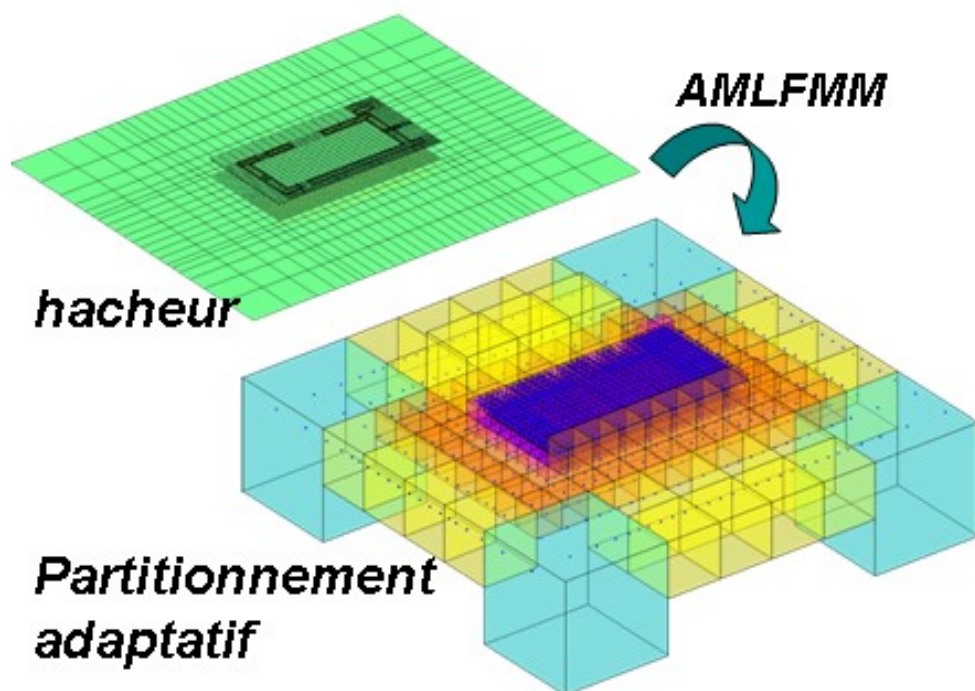
- ✓ Amélioration du conditionnement du problème
- ✓ Accélération du temps de résolution



# Validation de la méthode AMLFMM

➤ Validation avec la méthode intégrale en interaction totale (référence) et éléments finis (Flux)

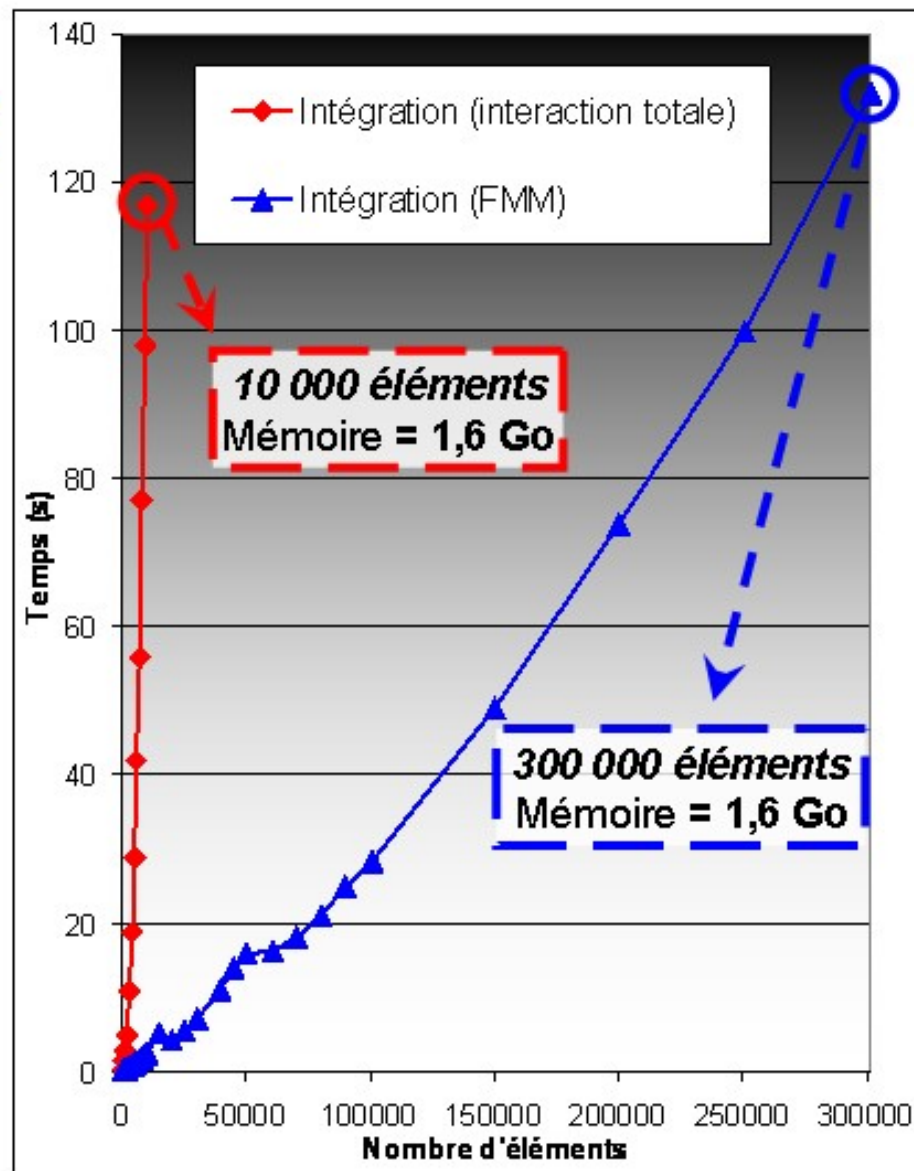
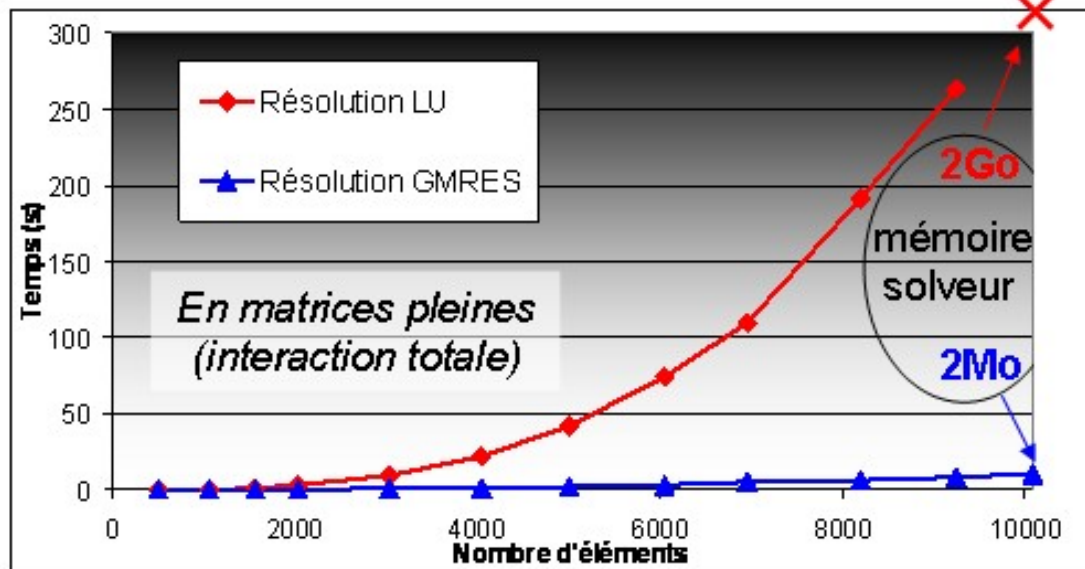
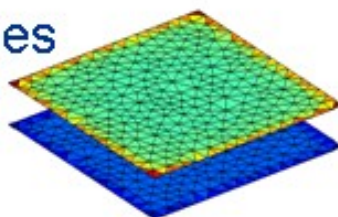
→ Écart =  $\Delta < 5\%$  environ





# Performances de l'AMLFMM / GMRES(m)

## ➤ Exemple des 2 plaques parallèles

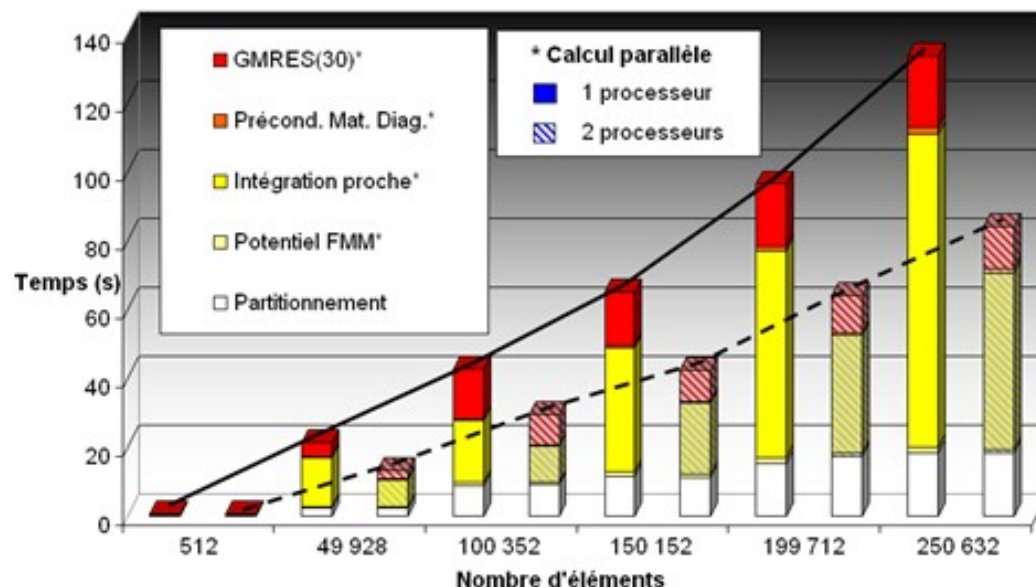


→ Très bonnes performances temps / mémoire / précision !

# Calcul parallèle multi-processeurs

## ➤ Parallélisation des calculs (Intégration & Résolution)

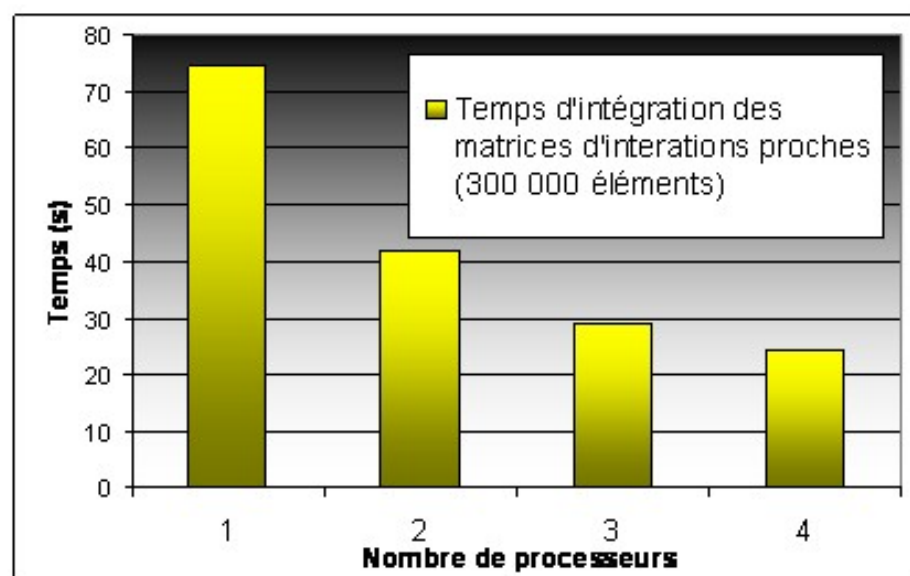
- Intégration des matrices d'interactions proches
- Préconditionnement par blocs dans le GMRES
- Potentiel
  - ✓ lointain avec la FMM
  - ✓ proche (produit matriciel)



## ➤ Performances avec 4 processeurs

Nombre de Processeurs	2	3	4
Facteur de division en temps	1,8	2,6	3,1

→ Gain en temps très important pour peu de complexité supplémentaire



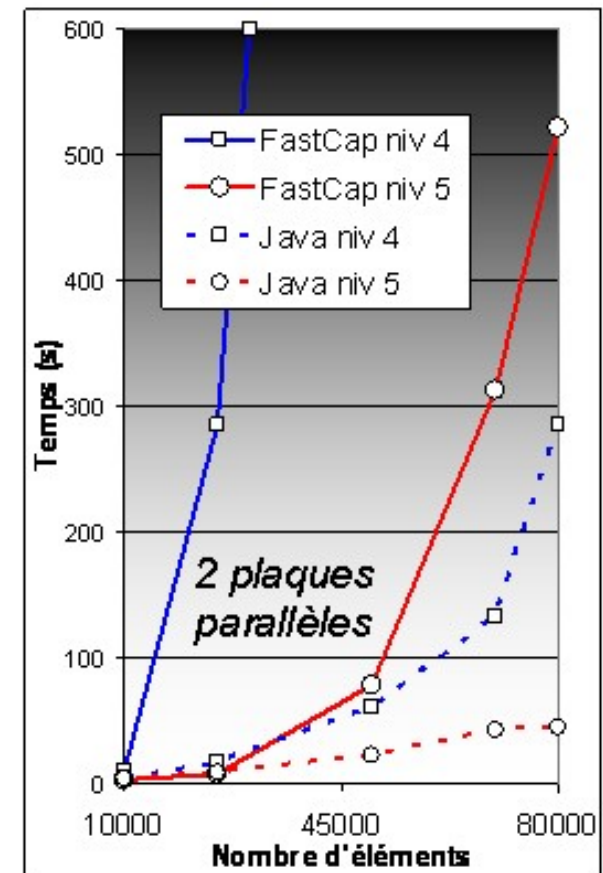
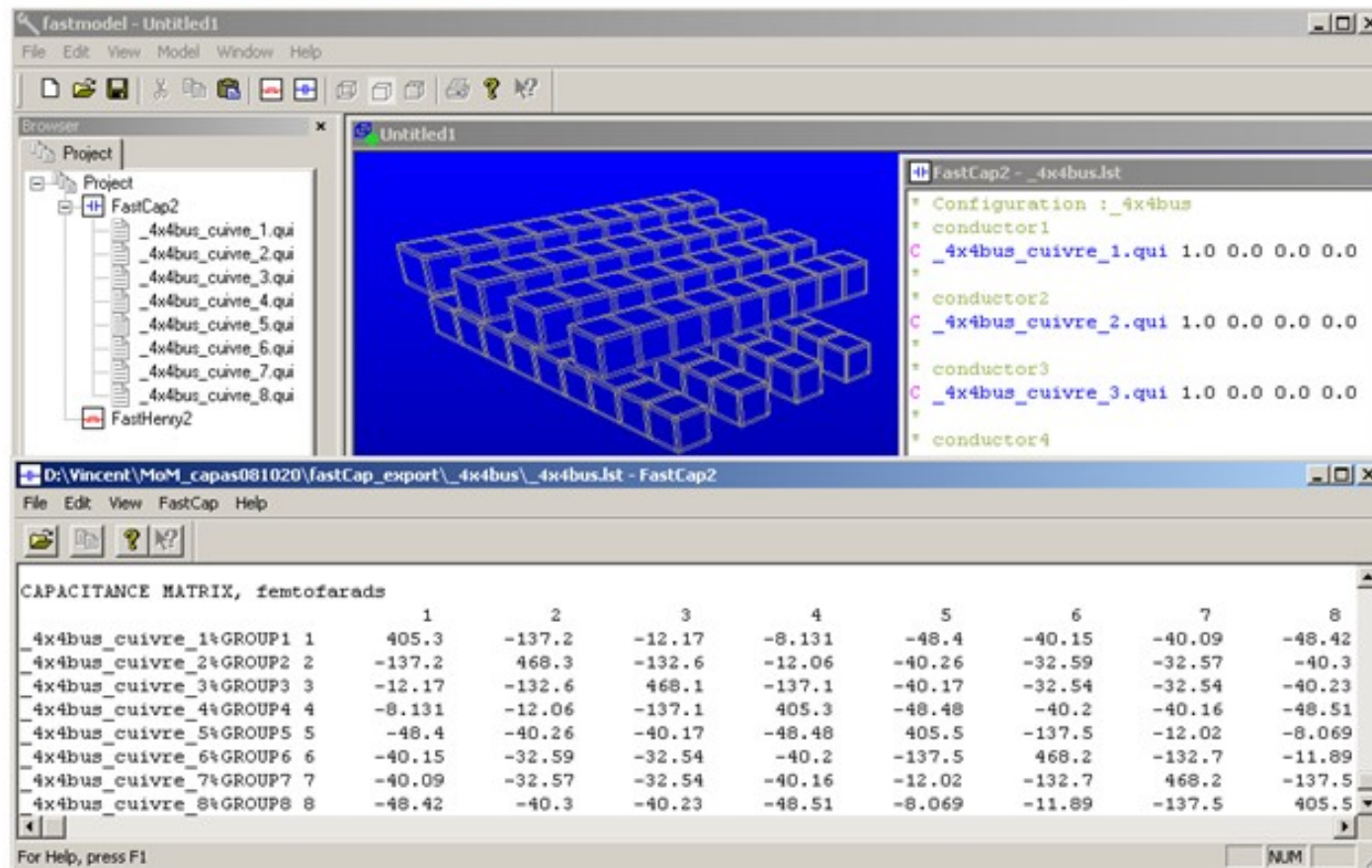
# Plus rapide que FastCap ! (logiciel libre du MIT)

## ➤ Logiciel de calcul de capacités avec la FMM [Nabors & Whites, 1990]

- Temps de calculs plus rapide **avec seulement un processeur**

✓ FastCap est plus lent pour le calcul des interactions proches

→  $\Delta\text{capa} < 5\%$  environ



# Plan de la présentation

- I Introduction & Contexte
- II Calcul des capacités par méthode intégrale
- III Accélération des calculs avec la Fast Multipole Method

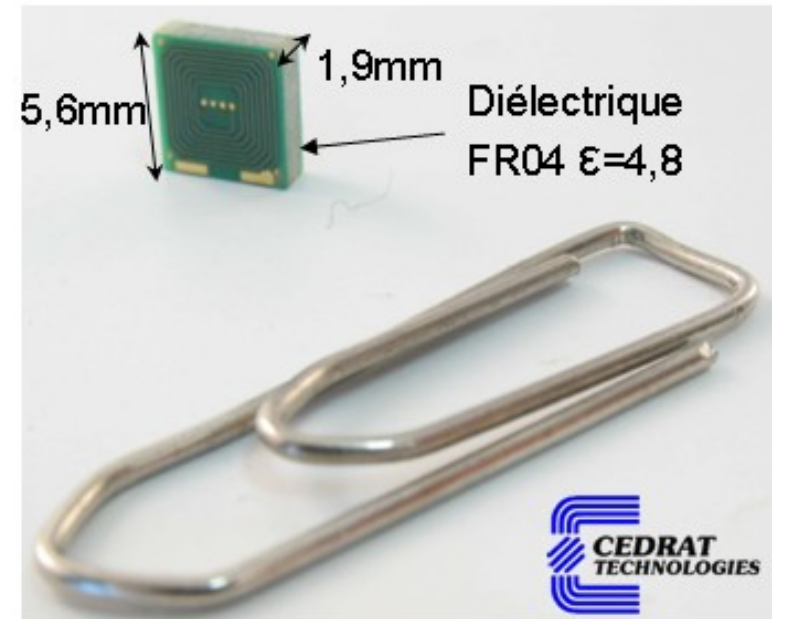
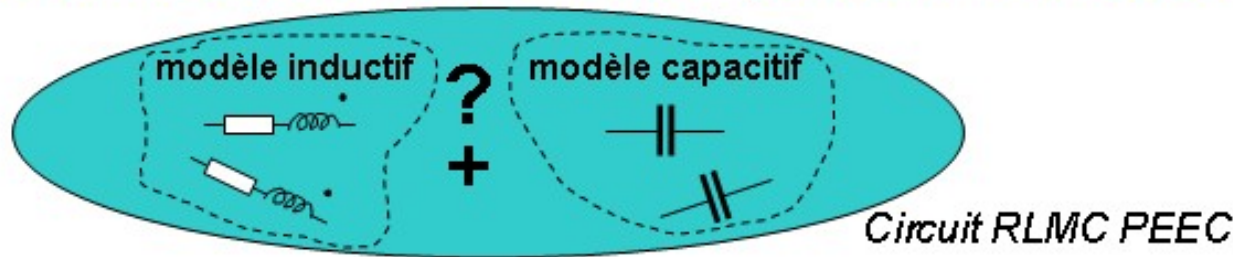
## Résumé

- Développement d'une méthode rapide peu gourmande en mémoire
- Couplage avec GMRES(m) : solveur itératif performant
- Mise en œuvre validée et optimisée en vue de traiter des grosses géométries

- IV Construction d'un circuit électrique équivalent RLM-C
- V Applications : modélisation CEM de structures industrielles
- VI Valorisation des travaux dans InCa3D
- VII Conclusions & Perspectives

# Construction du circuit (RLM-C) d'un microcapteur

## ➤ Comment connecter les composants RLM et C ?



## ➤ Capteur de position à courant de Foucault

- Microbobine sur PCB
- **Géométrie confidentielle multi-couches**

## ➤ Discrétisation capacitive arbitraire

1 région capa entre plusieurs couches ?



1 région capa par couche ?



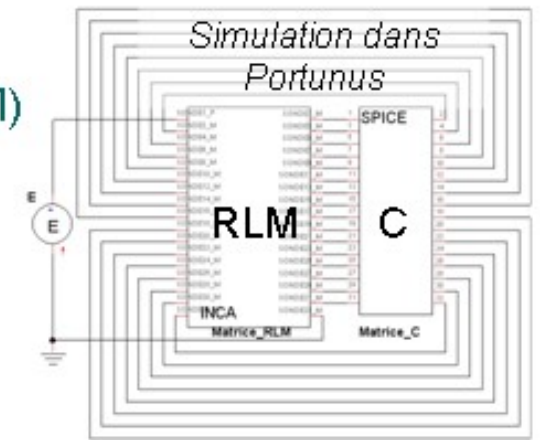
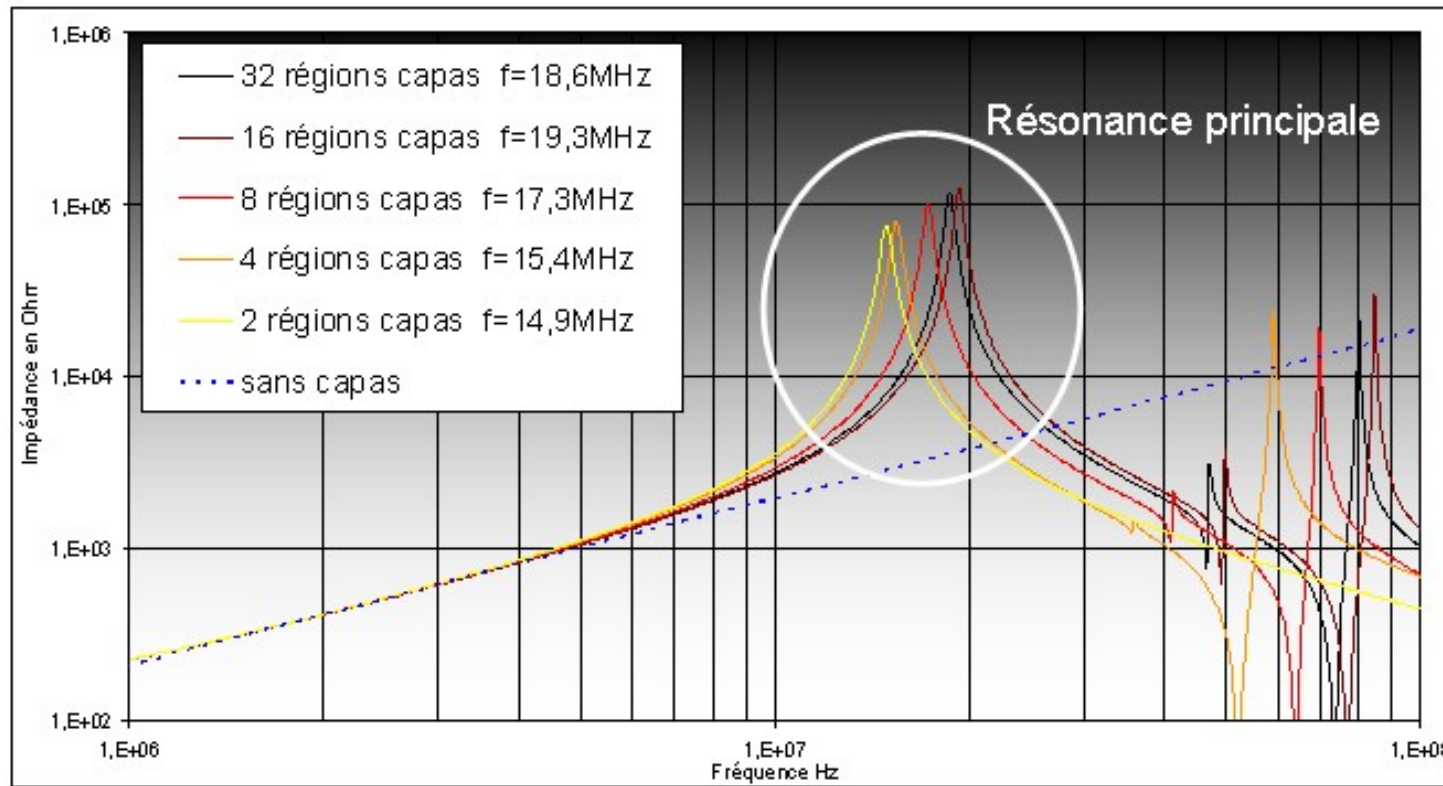
Plusieurs régions capas par couche ?



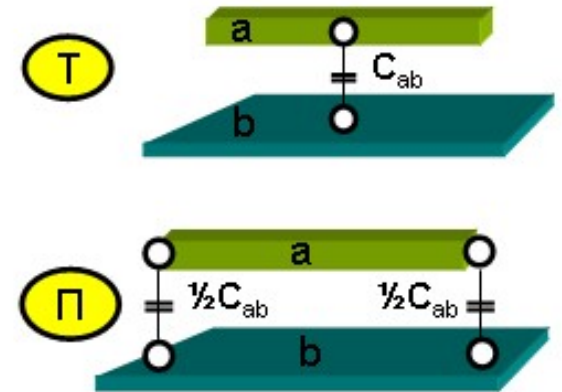
# Etude de spectre d'impédance $Z(f)$ du capteur

## ➤ Discrétisation capacitive : de 2 à 32 régions

→ Spectre d'impédance dans Portunus (connexions des capacités en  $\Pi$ )

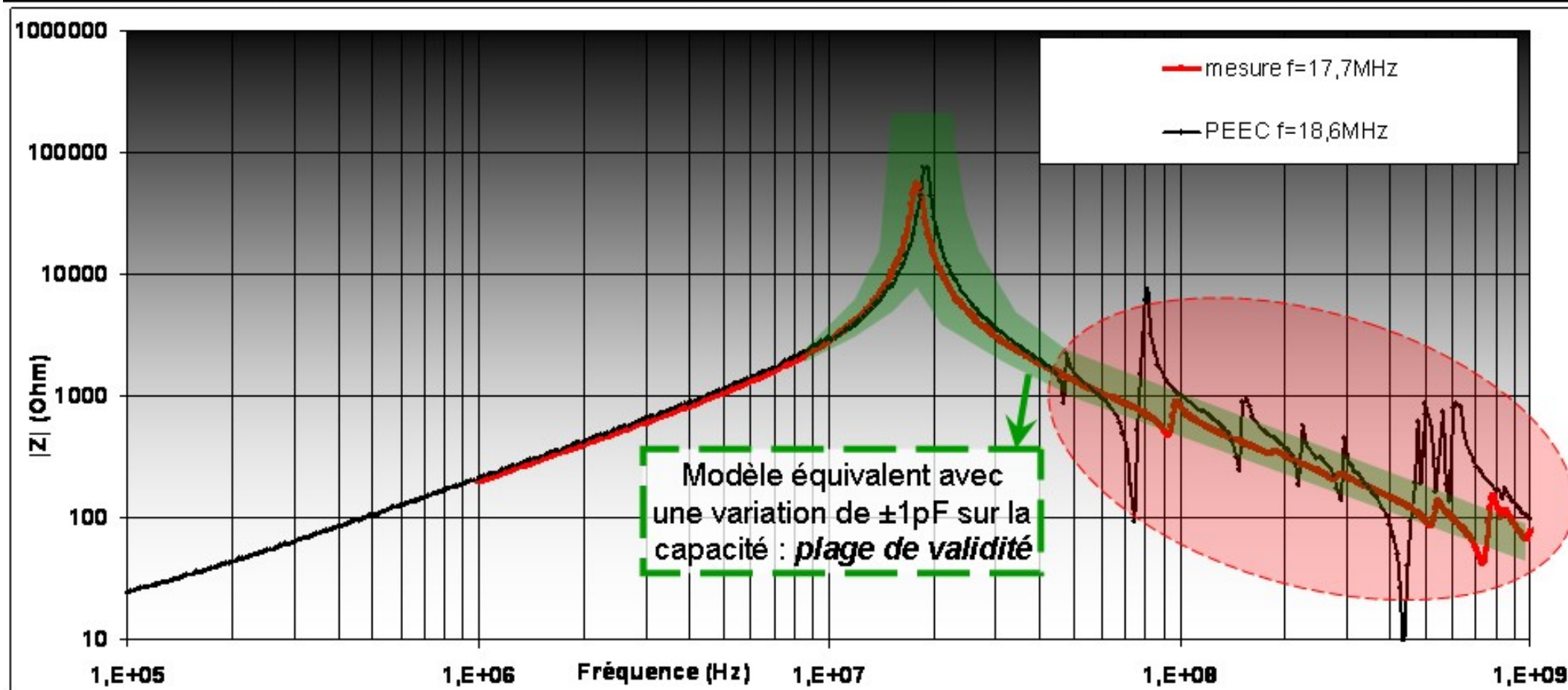


Deux types de connexions :



→ Convergence de la fréquence de résonance principale en fonction de la discrétisation

# Comparaison avec mesures à l'impédance-mètre

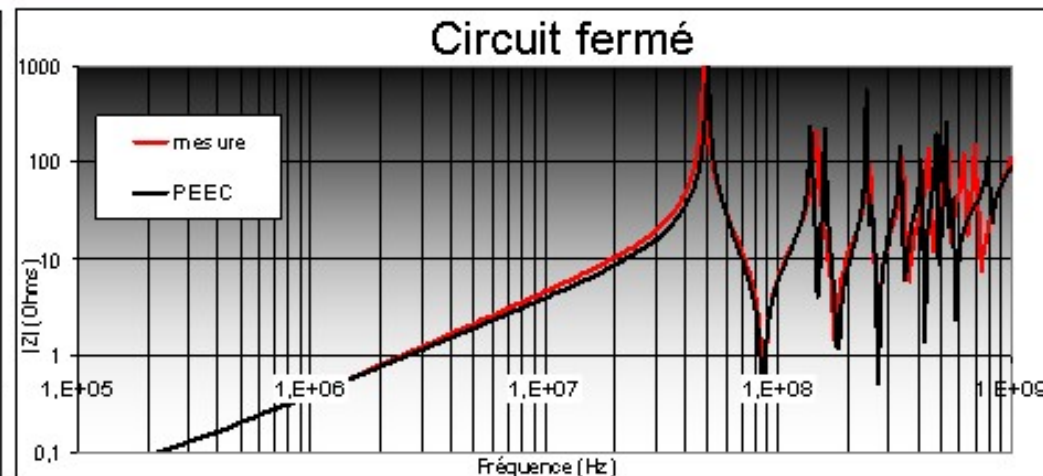
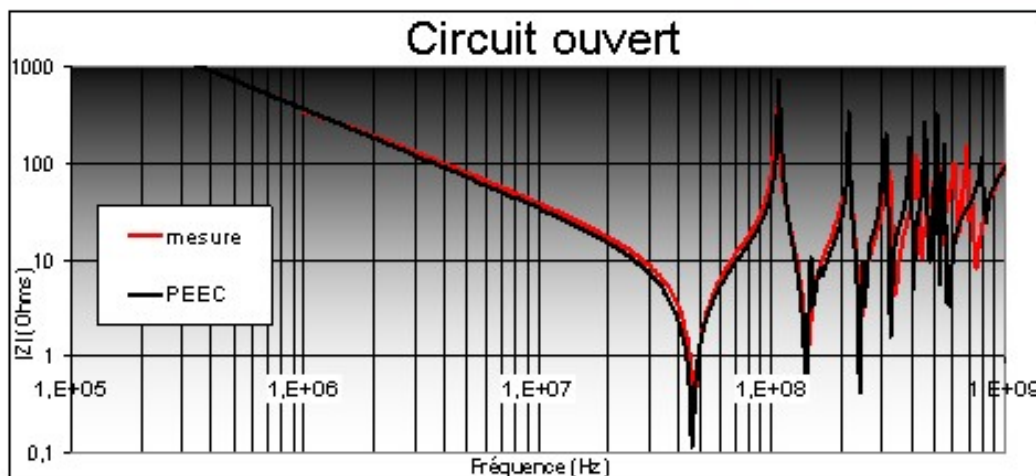
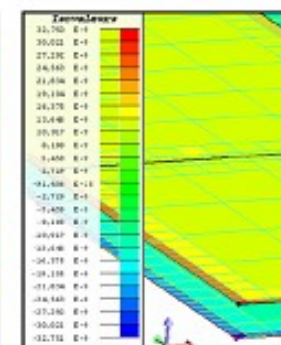
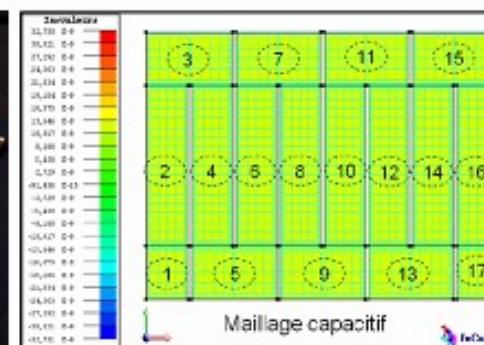
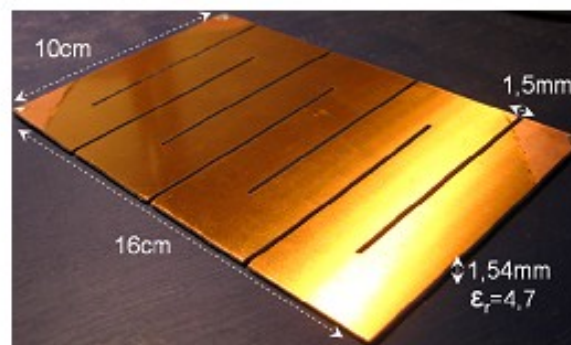


➤ Bonne corrélation avec la mesure jusqu'à 40 MHz

- Apparition de résonances en plus hautes fréquences (certainement dues à la discrétisation capacitive)

# Autre exemple: spectre d'impédance d'un serpentin

- 2 plaques parallèles séparées par un diélec.
- 34 régions capas



- Analyse des comparaisons avec la mesure

- Bonne corrélation jusqu'à 200 MHz

$\sqrt{\lambda} / 10 \approx 15 \text{ cm} \rightarrow$  limite du modèle statique

→ Validation de l'approche PEEC et de la connexion des modèles inductifs et capacitifs



# Plan de la présentation

- I Introduction & Contexte
- II Calcul des capacités par méthode intégrale
- III Accélération des calculs avec la Fast Multipole Method
- IV Construction d'un circuit électrique équivalent RLM-C

## Résumé

- Choix d'une discrétisation capacitive s'appuyant sur l'expertise
- Différentes stratégies de connexions des schémas RLM-C
- Validation de la méthode par la mesure

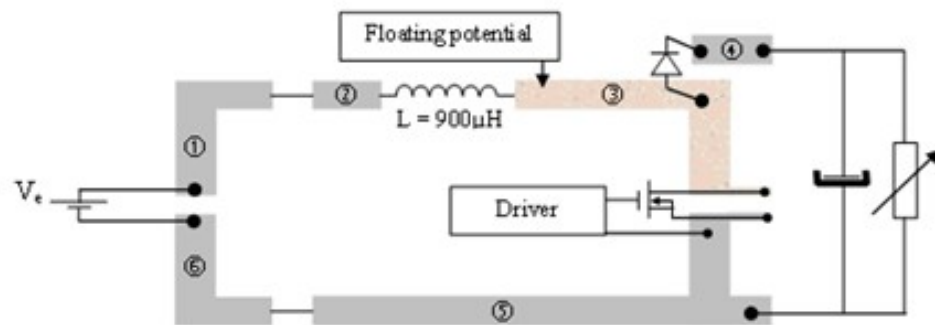
- V Applications : modélisation CEM de structures industrielles
- VI Valorisation des travaux dans InCa3D
- VI Conclusions & Perspectives



***Etroite collaboration avec  
Dr. Jérémie Aimé [2009]  
G2Elab/Schneider-Electric***

# CEM conduite d'un hacheur boost

## ➤ Schéma électrique de principe

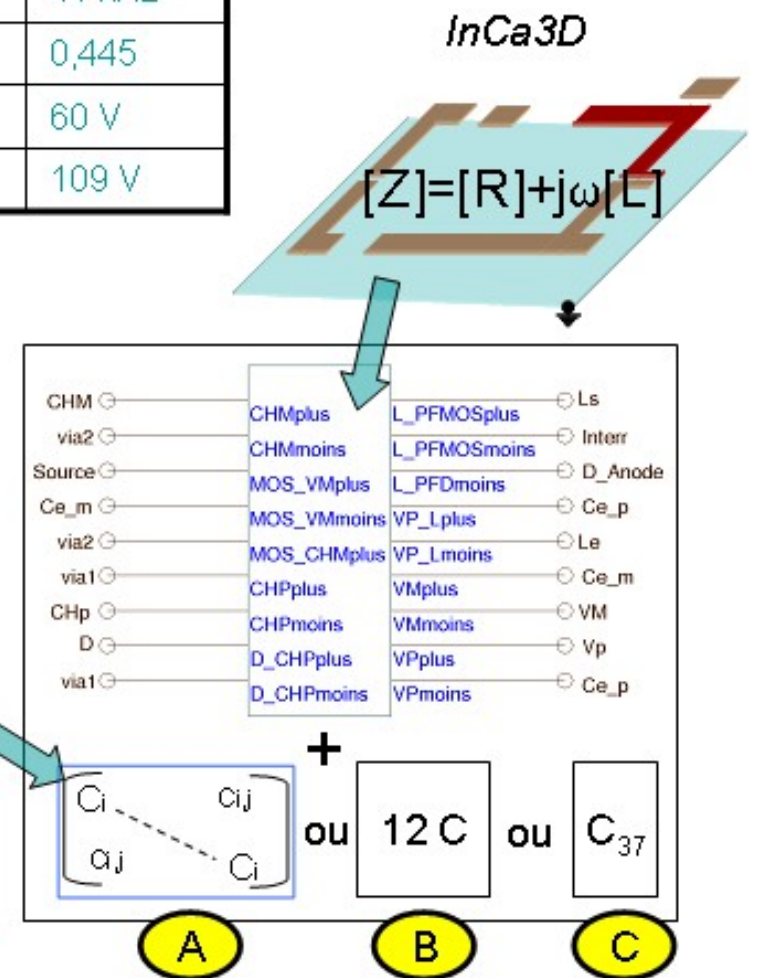
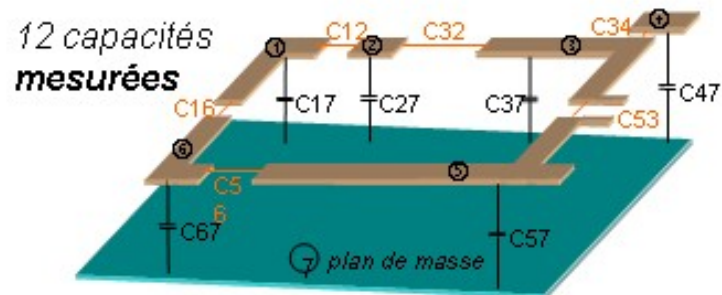


### Données

Fréquence	41 kHz
Rapport cyclique	0,445
Tension d'entrée	60 V
Tension de sortie	109 V

## ➤ 3 Modèles capacitifs étudiés

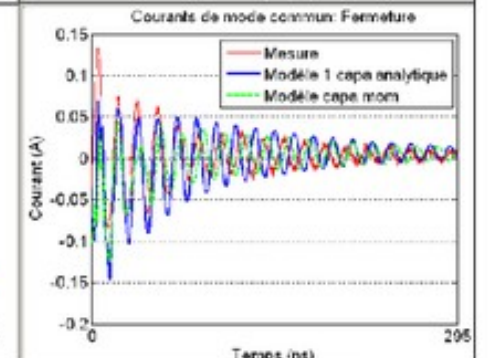
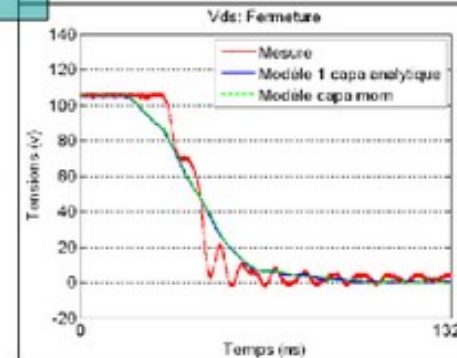
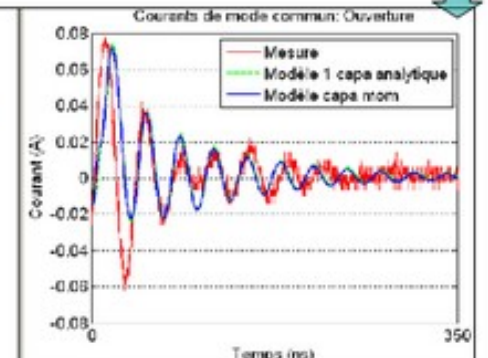
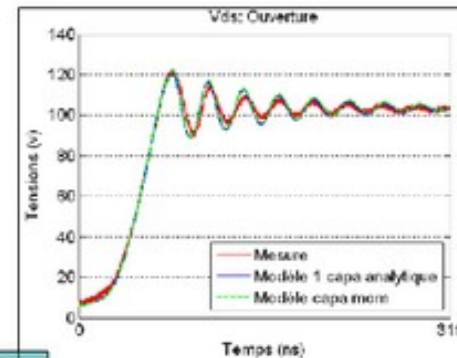
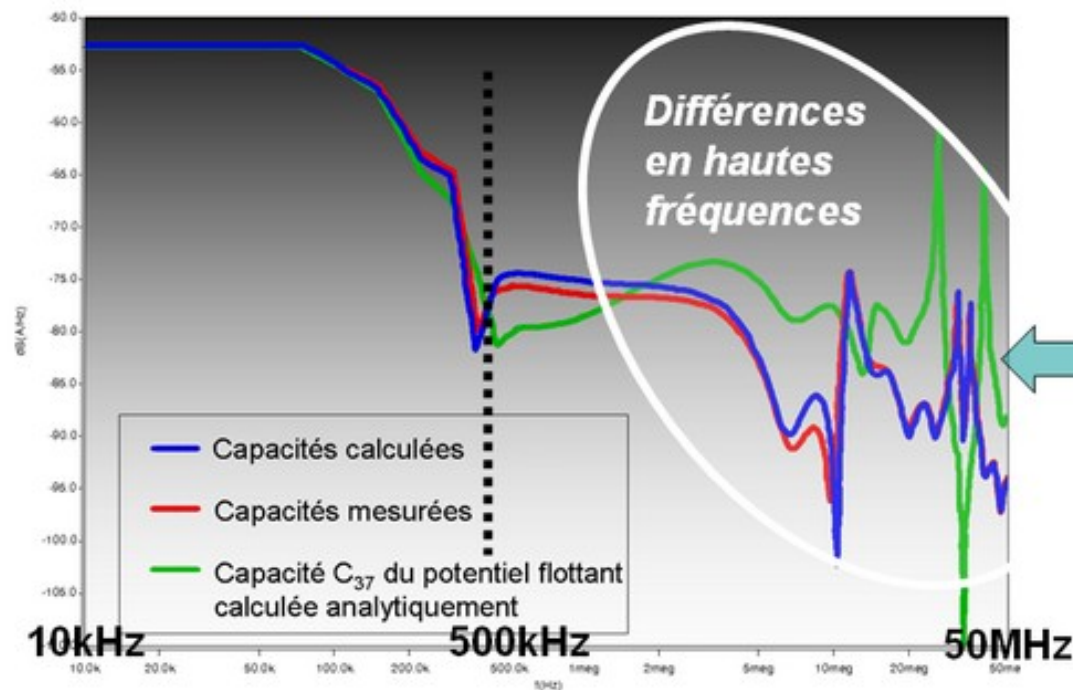
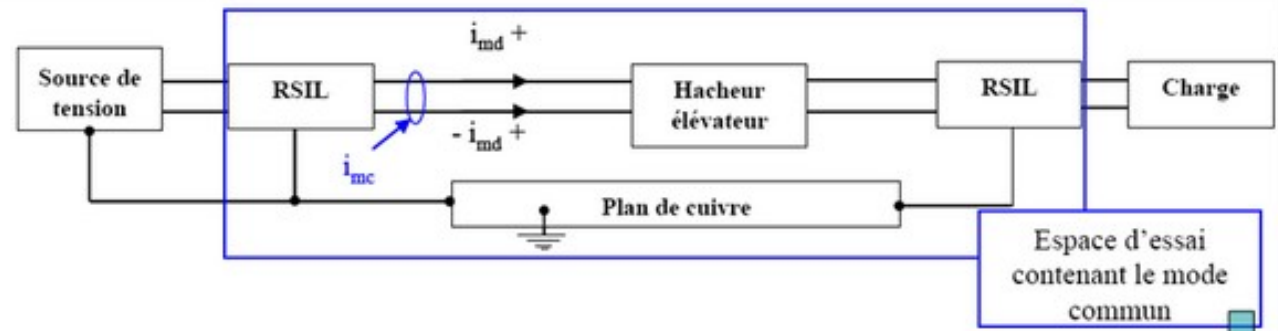
- A** 12 capacités mesurées
- B** Modèle capacitif complet (28 capas)
- C** capa entre potentiel flottant et le plan de masse



# Étude CEM conduite

## ➤ Modélisation des courants de mode commun

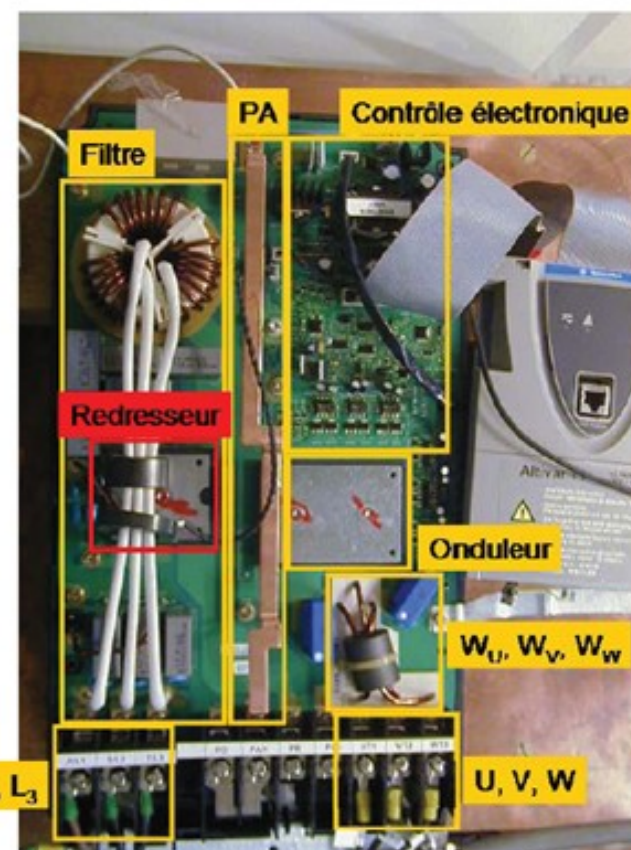
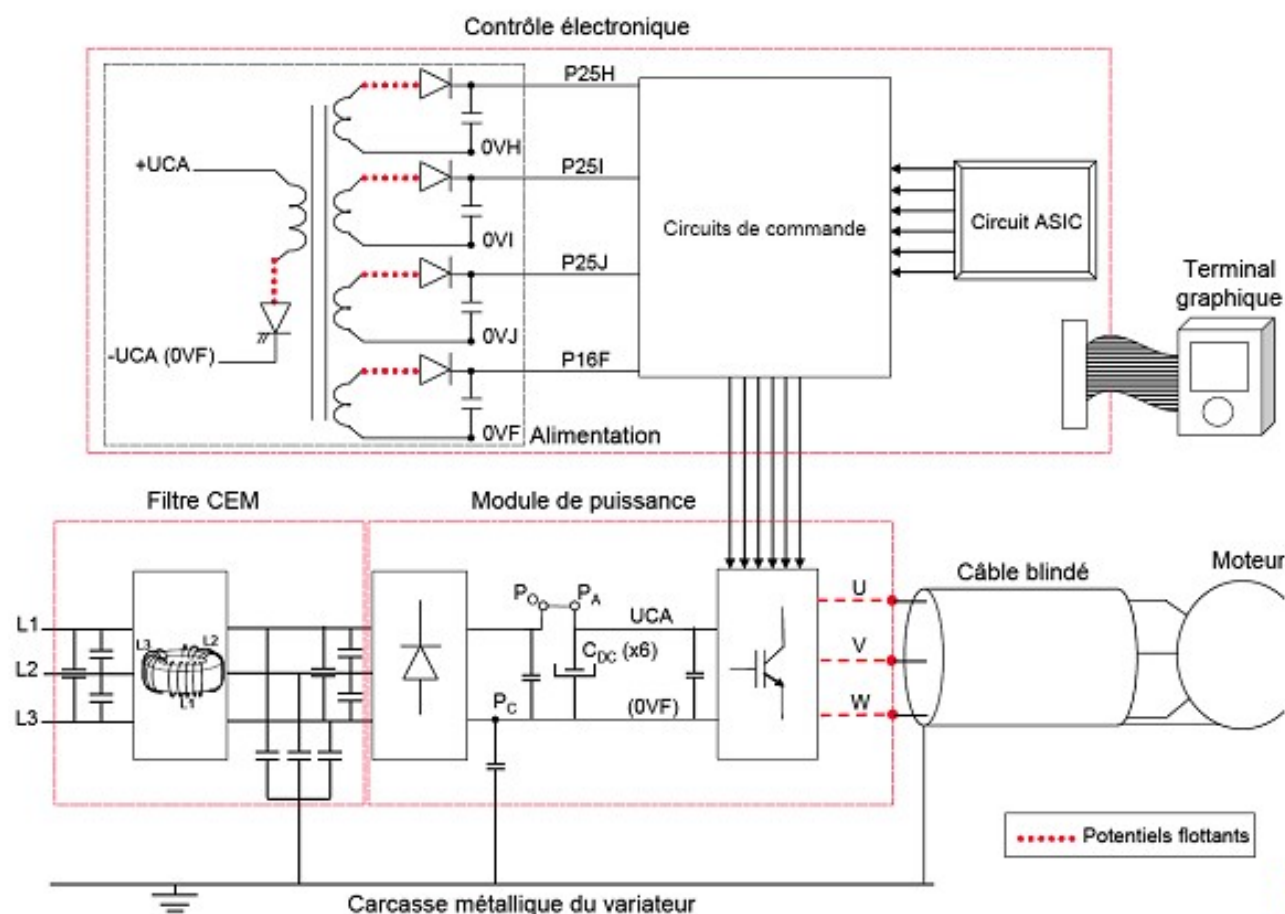
- Courant circulant dans l'air par les capacités parasites entre pistes et plan de masse



→ Nécessité de prendre en compte les capacités parasites en haute fréquence (>1MHz)

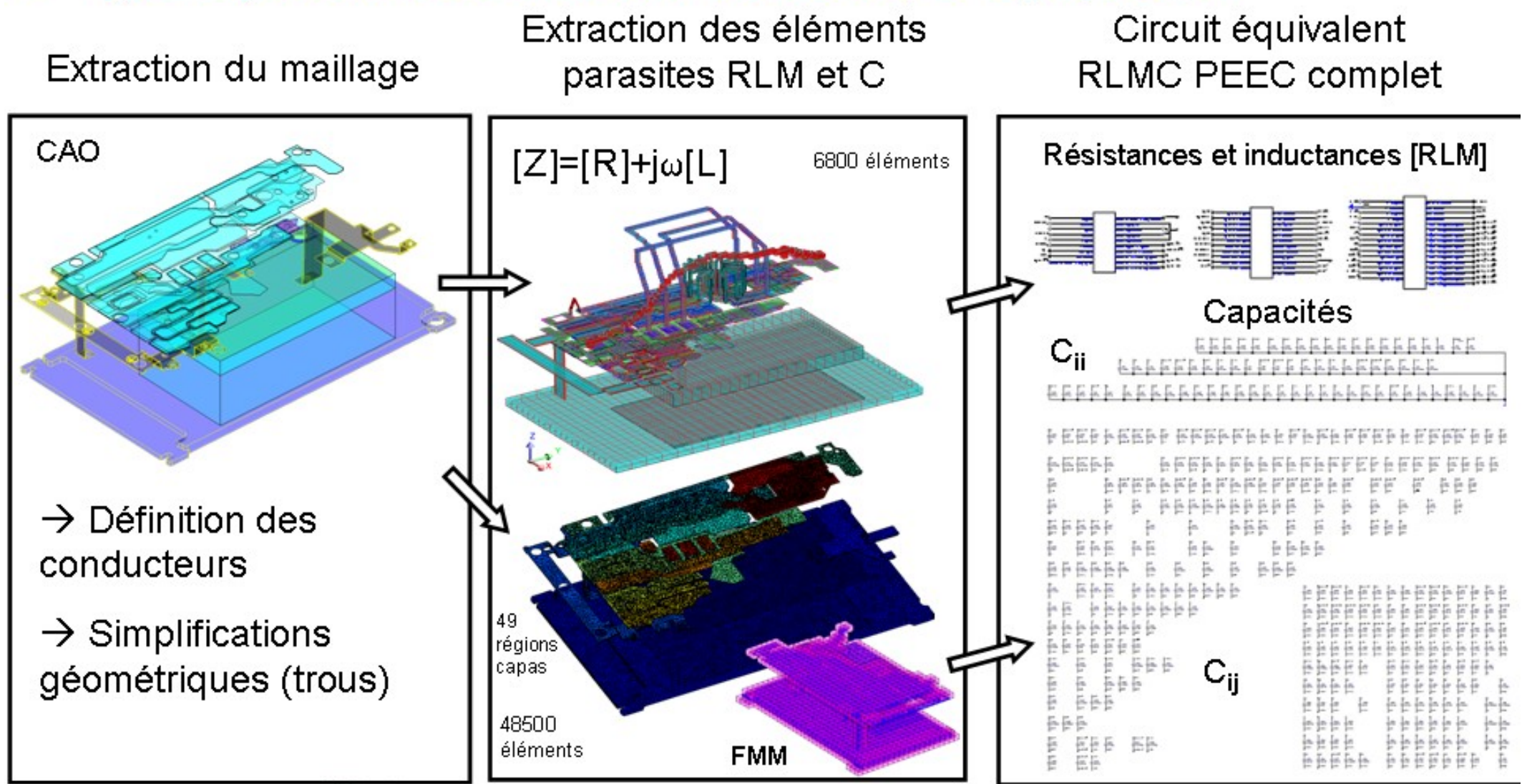
## ➤ Structure de convertisseur statique industrielle

- géométrie multi-couches : 4 couches fines de 70µm d'épaisseur
- Schéma électrique de principe



# Extraction des éléments parasites RLM-C

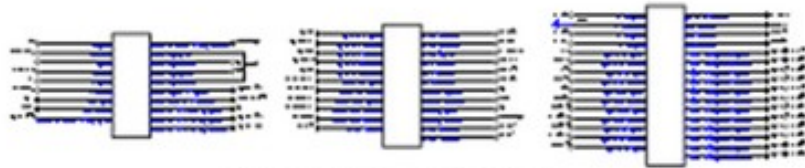
➤ Type de plateforme de simulation souhaitée par le projet *o2m*



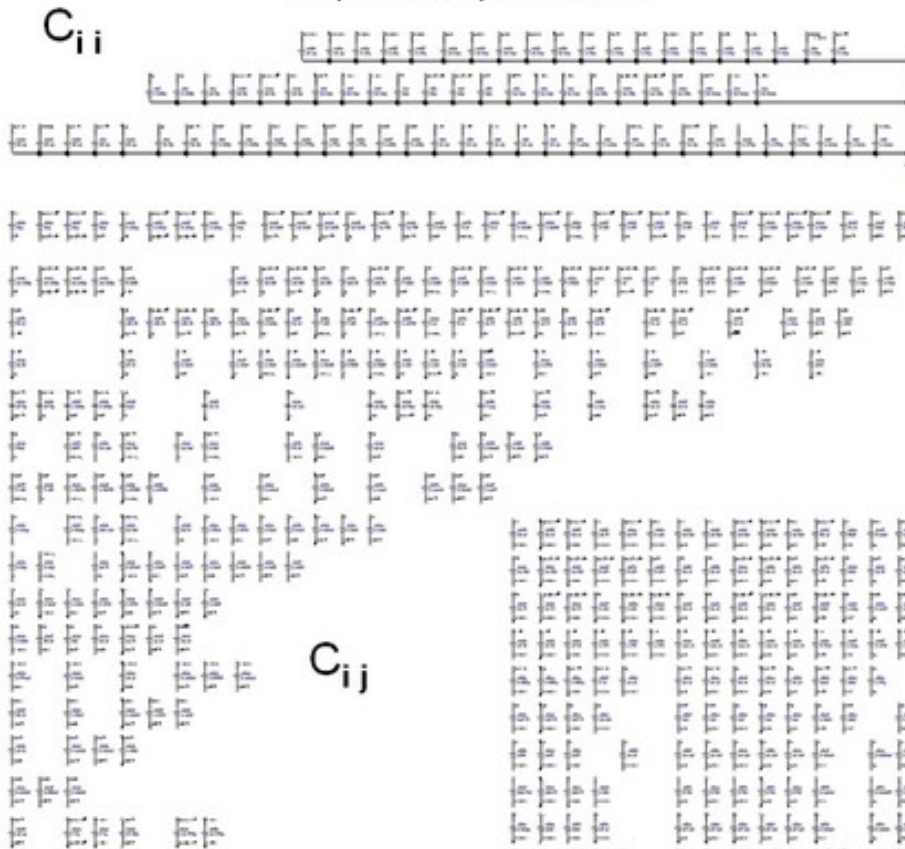
# Analyse des résultats de simulation-circuit

## Circuit Électrique Équivalent (Saber)

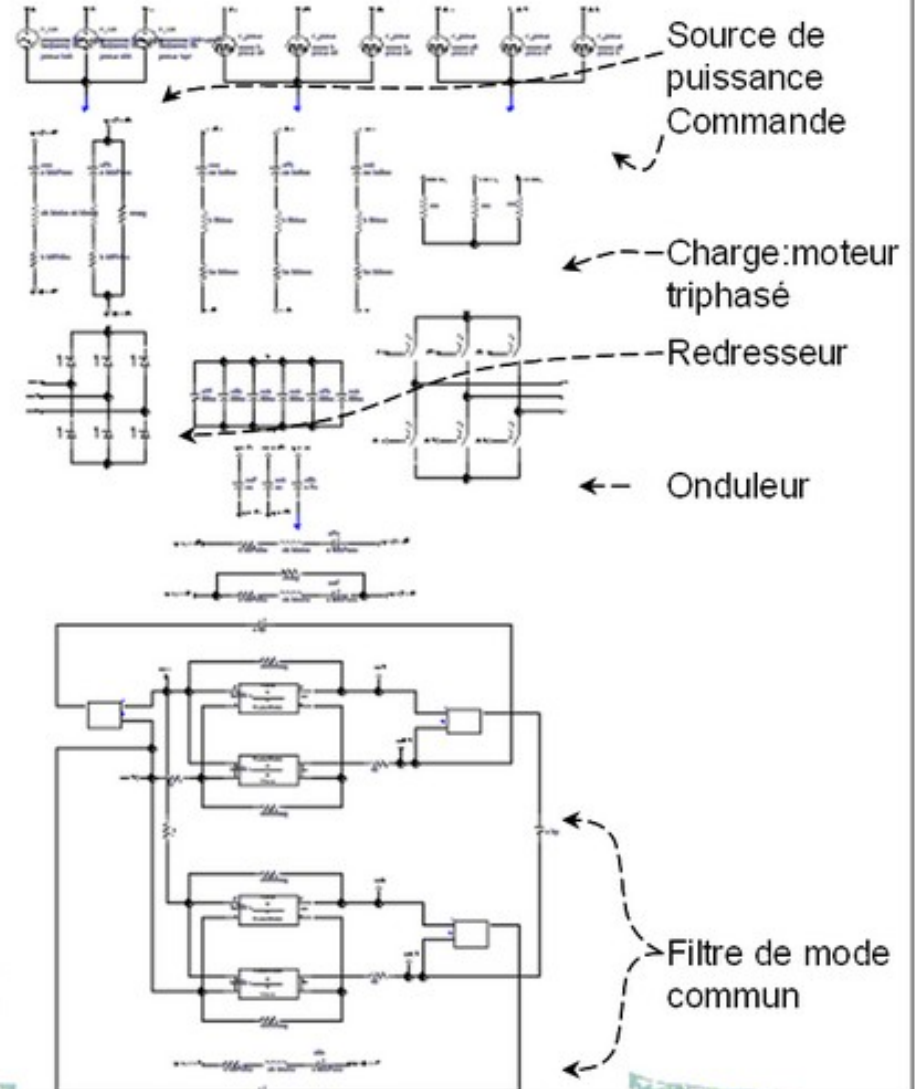
Resistances et inductances [RLM]



Capacités parasites

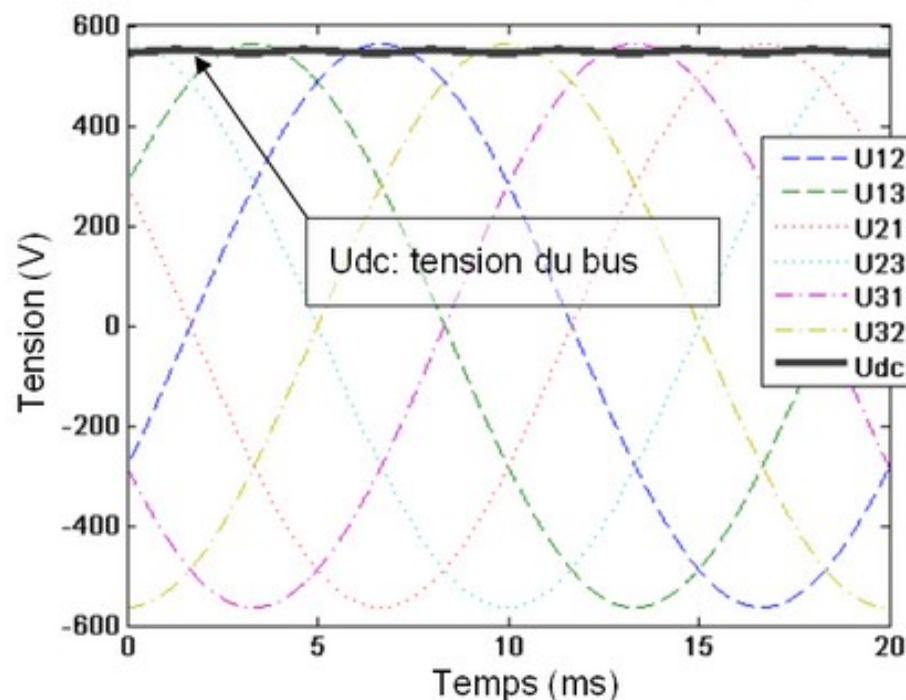


Circuit de commande et puissance

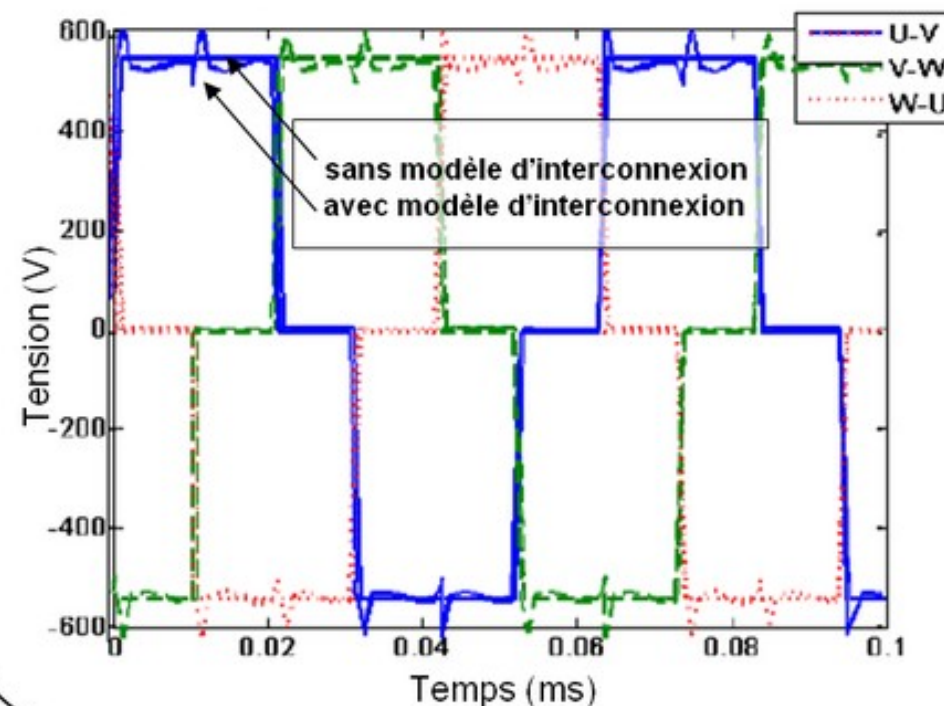


# Analyse des résultats de simulation-circuit

- Tension du bus DC = 538V  
→ écart < 2% avec la théorie (548V)



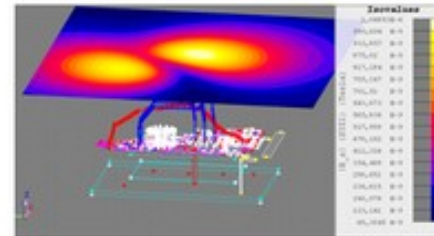
- Tensions des bras d'onduleur  
→ Apparition de surtensions parasites



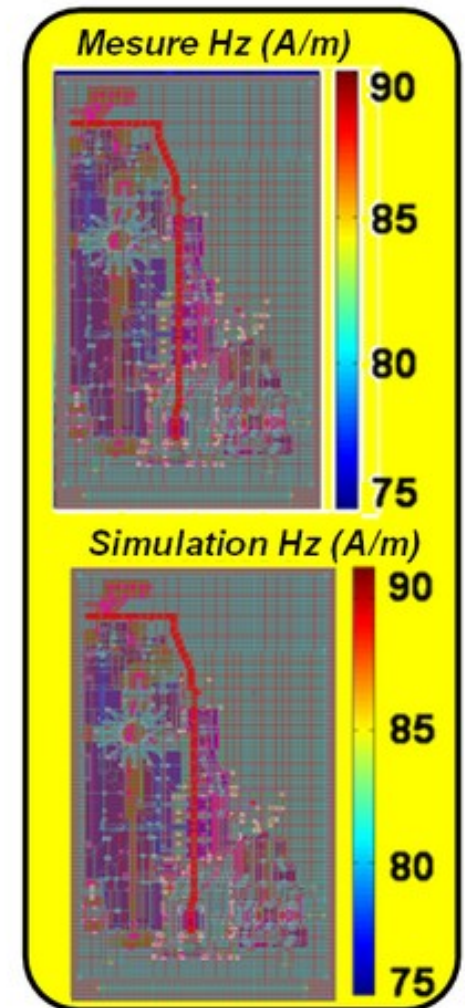
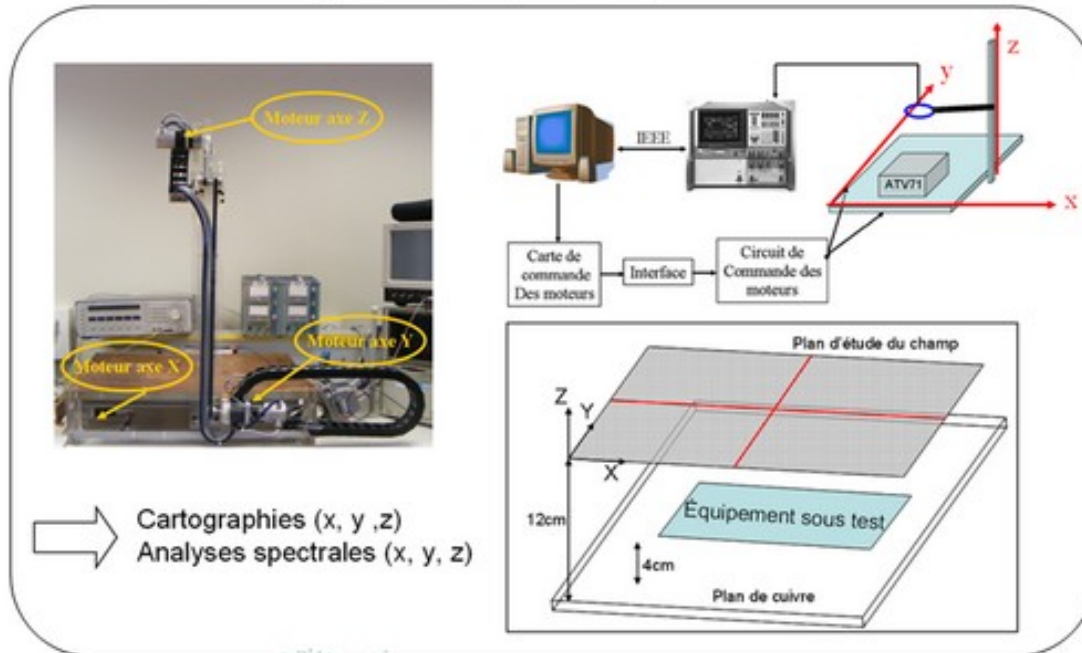
→ Validation du fonctionnement électrique du variateur  
→ Influence non négligeable des interconnexions de puissance

# Simulations et mesure du champ H proche

1. FFT des tensions et courants sources (Saber)
2. Résolution de la répartition des courants  
 ✓ pour une fréquence donnée dans InCa3D
3. Simulation du champ  $H(f)$   
 ✓ Grille au-dessus du variateur  
 ✓ Loi de Biot Savart en post-processing  
 → Comparaison du champ  $H_z$  à 32kHz



▪ Mesures Mines de Douai [08 - O. Aouine, C Labarre]





# Simulations et mesure du champ H proche

1. FFT des tensions et courants sources (Saber)

2. Résolution de la répartition des courants

✓ pour une fréquence donnée dans InCa3D

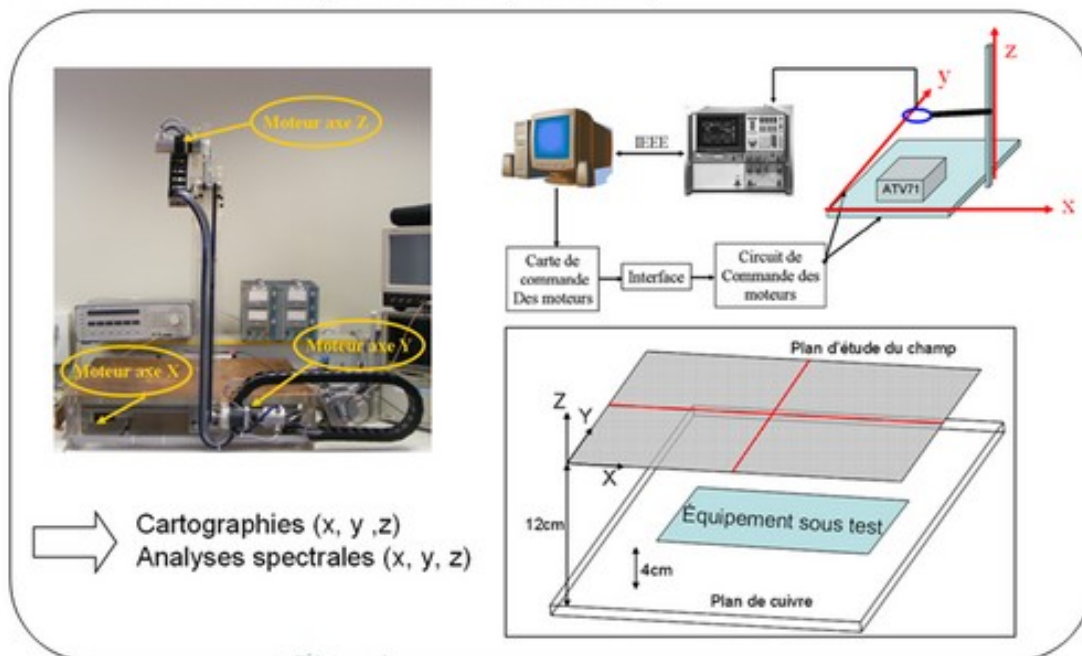
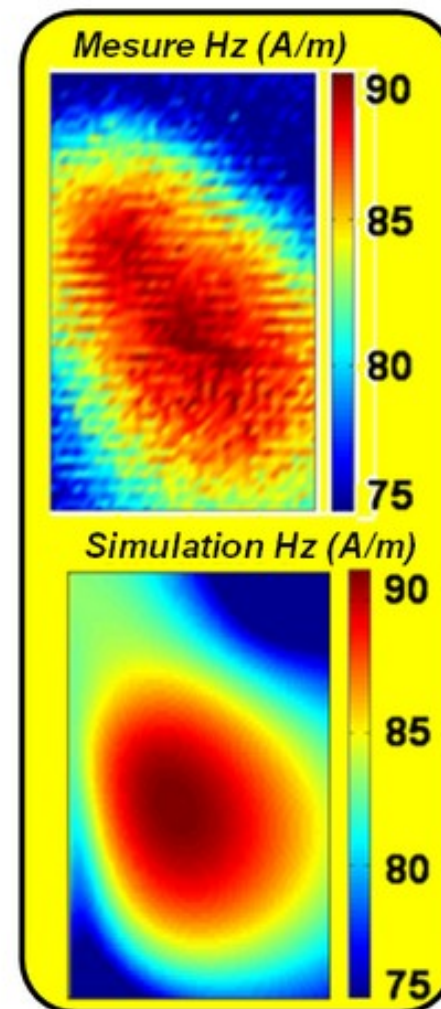
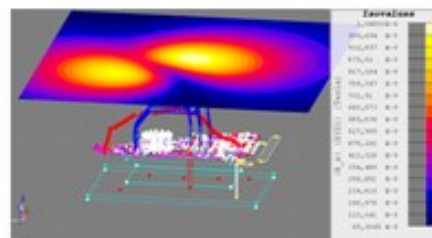
3. Simulation du champ  $H(f)$

✓ Grille au-dessus du variateur

✓ Loi de Biot Savart en post-processing

→ Comparaison du champ Hz à 32kHz

- Mesures Mines de Douai [08 - O. Aouine, C Labarre]



→ Cartographies (x, y, z)  
Analyses spectrales (x, y, z)

→ Bonne corrélation

# Plan de la présentation

- I Introduction & Contexte
- II Calcul des capacités par méthode intégrale
- III Accélération des calculs avec la Fast Multipole Method
- IV Construction d'un circuit électrique équivalent RLM-C
- V Applications : modélisation CEM de structures industrielles

## Résumé

- Application de l'ensemble des méthodes sur des structures industrielles d'EP
  - Modélisation CEM conduite et rayonnée
  - Résultats de comparaison avec des mesures encourageants
- **Validation de l'approche système**

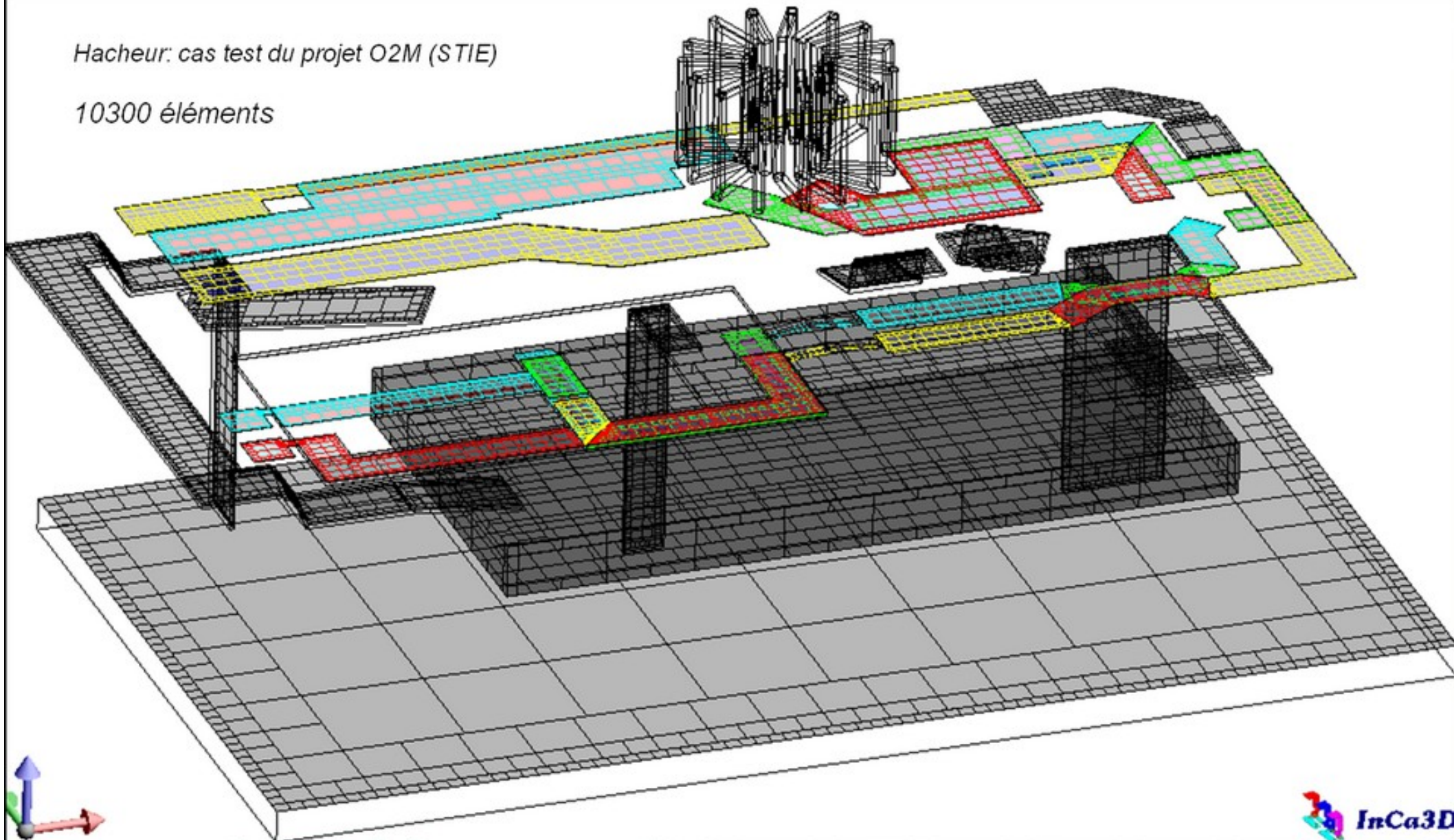
➤ VI Valorisation des travaux dans InCa3D

➤ VI Conclusions & Perspectives

# Prise en compte des capacités dans InCa3D

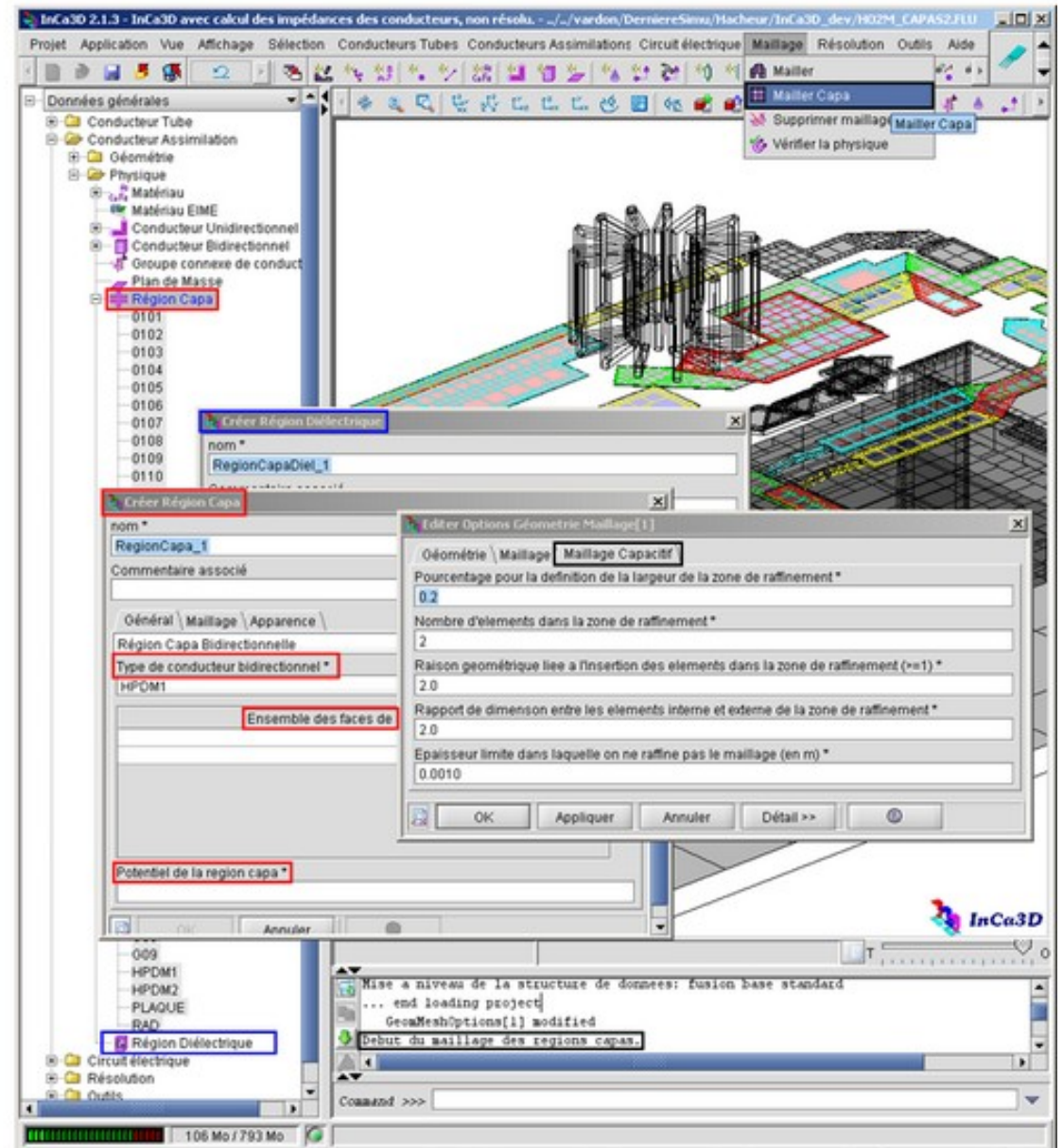
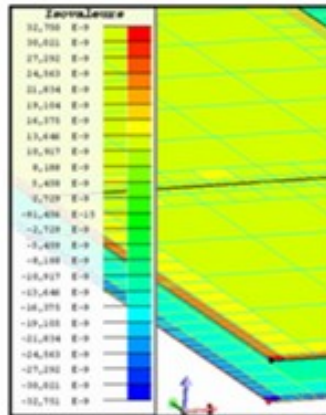
Hacheur: cas test du projet O2M (STIE)

10300 éléments



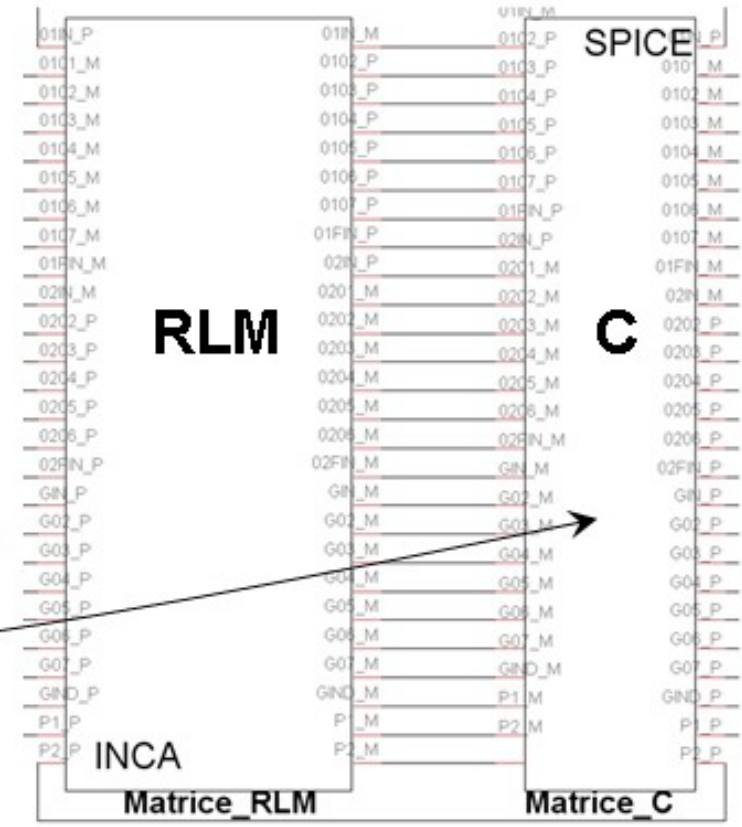
# Pise en compte des capacités dans InCa3D

- Définition des régions capas et diélectriques
- Maillage capacitif automatique
- Interfaçage avec le noyau de calcul AMLFMM
  - Calculs de charges, de capacités
- Post-processing
  - Visualisation des charges surfaciques



# Automatisation de l'utilisation des capacités

- Création / modification des capacités parasites dans InCa3D
- Connexion des capacités en fonction des distances entre nœuds électriques
  - Types de connexion en  $\Gamma$ , T ou  $\Pi$
- Export de bloc capacitif pour les solveurs circuits



→ Vers une plateforme de modélisation CEM de structures industrielles complexes

**Connexions du bloc résistif-inductif au bloc capacitif dans Portunus**

# Plan de la présentation



- I Introduction & Contexte
- II Calcul des capacités par méthode intégrale
- III Accélération des calculs avec la Fast Multipole Method
- IV Construction d'un schéma électrique équivalent RLM-C
- V Applications : modélisation CEM de structures industrielles
- VI Valorisation des travaux dans InCa3D
  
- VI Conclusions & Perspectives

## ➤ Justification du choix de la méthode PEEC dédiée

- Méthode légère, peu d'hypothèses simplificatrices
- Dédiée à la modélisation CEM des interconnexions de puissance
- Séparation des phénomènes physiques modélisés : résistif-inductif / capacitif
- Extraction de circuit électrique équivalent à constantes localisées

## ➤ Développement d'une méthode d'extraction des capacités

- Utilisation de deux algorithmes performants : **Fast Multipole Method** et **GMRES(m)**
  - ✓ Parmi les 10 algorithmes les plus performants du XX<sup>ème</sup> siècle [SIAM] !
- Méthode intégrale générale, légère et rapide

## ➤ Applications et validations des méthodes et outils logiciels

- Études de spectres d'impédance / validation en mesure
- Études CEM conduites et rayonnées de structures industrielles / validation en mesure
- Amélioration du logiciel InCa3D

## ➤ Vers une **version industrielle** de InCa3D avec les capacités parasites

**G2Elab** : Travaux du groupe MIPSE : Méthodes Intégrales Pour les Systèmes Electrique

### ➤ Utilisation de la FMM dans la méthode PEEC inductive

[thèse G2Elab - **NGuyen** 2012]

### ➤ Introduire des matériaux magnétiques

[thèse G2Elab - **Le Duc** 2011]

**La semaine dernière :**

27 500 éléments 944s avec  
**2Go** seulement contre **80 Go**  
nécessaire normalement !

### ➤ Introduction de modèles rayonnés

[thèse O2M G2Elab / Ampère - **Zanghi** 2012]

### ➤ Réduction de modèle : un seul schéma PEEC pour une gamme de fréquence donnée



---

# Méthodes Numériques et Outils Logiciels pour la Prise en Compte des Effets Capacitifs dans la Modélisation CEM de Dispositifs d'Électronique de puissance

---

Merci de votre attention

Vincent Ardon – le 21 Juin 2010

**Direction :** Mme Edith Clavel, G2Elab  
**Encadrement :** M. Olivier Chadebec, G2Elab  
M. Yann Le Floch, CEDRAT

