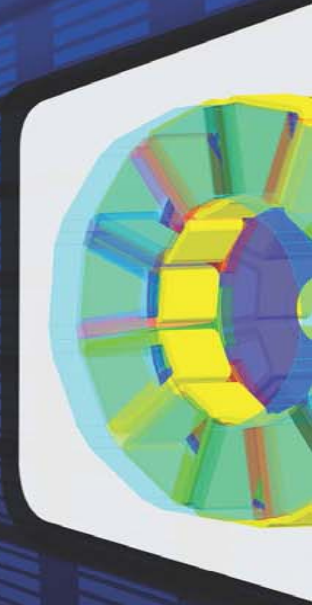
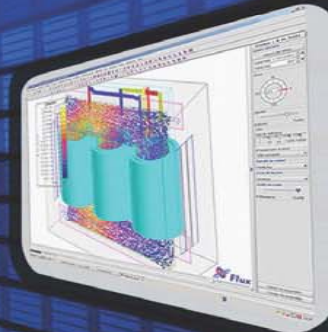
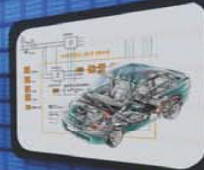
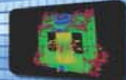


Modélisation CEM de systèmes et équipements de puissance



Enrico Vialardi



CEDRAT
design solutions for
electrical engineering

AFCEM



Introduction

- Quels liens entre puissance et CEM ?
 - ▶▶ Electric-mobility
 - ✓ Compacité accrue et montée en fréquence
 - ✓ Perturbations conduites et rayonnées
 - ▶▶ Green energy
 - ✓ Optimisation des performances
 - ✓ Réduction des phénomènes parasites

- Quelques exemples
 - ▶▶ Retour du courant dans une voiture
 - ▶▶ Jeu de barres d'une armoire électrique
 - ▶▶ Busbars laminés d'onduleur
 - ▶▶ Variateur de vitesse pour moteur électrique



Carrosserie et câblage dans les véhicules

- Les nouveaux véhicules hybrides et électriques
 - ▶▶ Présence de plusieurs câbles de puissance
 - ▶▶ Grandes surfaces conductrices de la carrosserie
 - ▶▶ Etude en amont des risques CEM
 - ▶▶ Pré-dimensionnement des architectures électriques embarquées
- Problématique : maîtrise des parcours de retour du courant à la source
 - ▶▶ Bande de fréquence : quelques Hz ÷ centaines de kHz
 - ▶▶ Chemins empruntés par le courant sont très différents
- Analyse par la simulation : modélisation en 3D avec logiciel Flux® – méthode EF



Modélisation 3D par EF avec couplage circuit

- Différents éléments de la carrosserie (capot, ailes, ouvrants, plancher)

- ▶▶ calcul de la conduction électrique du courant

- ✓ effet de peau

- ✓ perméabilité magnétique μ (acier)

- ▶▶ faible épaisseur "e" (ordre de mm $\gg \delta$)

- ✓ maillage volumique \rightarrow nombre trop important d'inconnues à résoudre

- ✓ contraintes géométriques \rightarrow présence de trous (boucles de courant)

➡ Régions minces 3D couplées au circuit

- Câbles de puissance connectés à la carrosserie

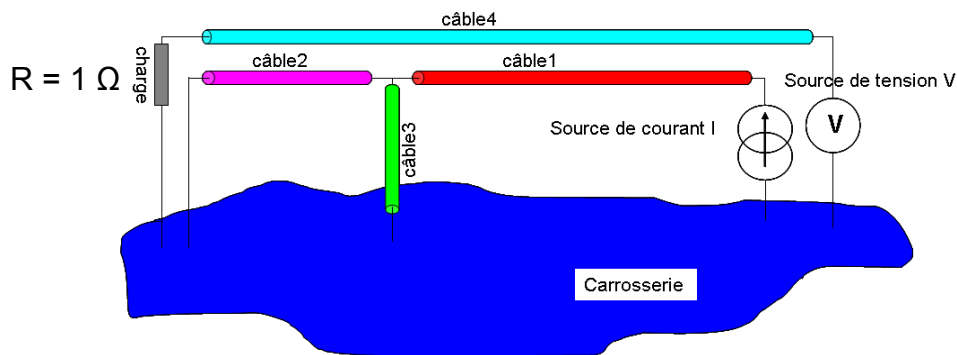
➡ Bobines couplées au circuit

- Sources et charges

➡ Circuit électrique

Mise en œuvre des simulations [10 Hz ÷ 100 kHz]

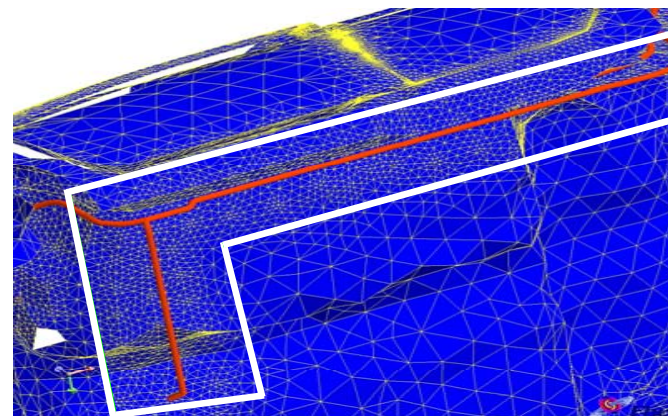
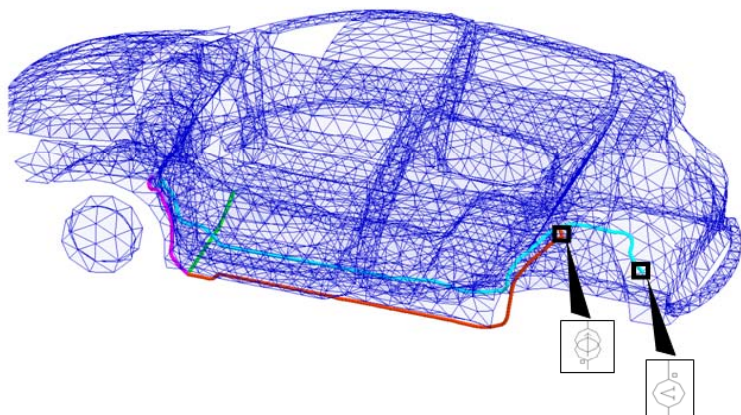
- Schéma de principe, c'est-à-dire circuit



source de courant : $I_{\text{eff}} = 7.07 \text{ A}$ et $\varphi_I = 53.13^\circ$
 source de tension : $V_{\text{eff}} = 3.53 \text{ V}$ et $\varphi_V = 0^\circ$

Les valeurs des sources et des charges sont à titre d'exemple de cas test

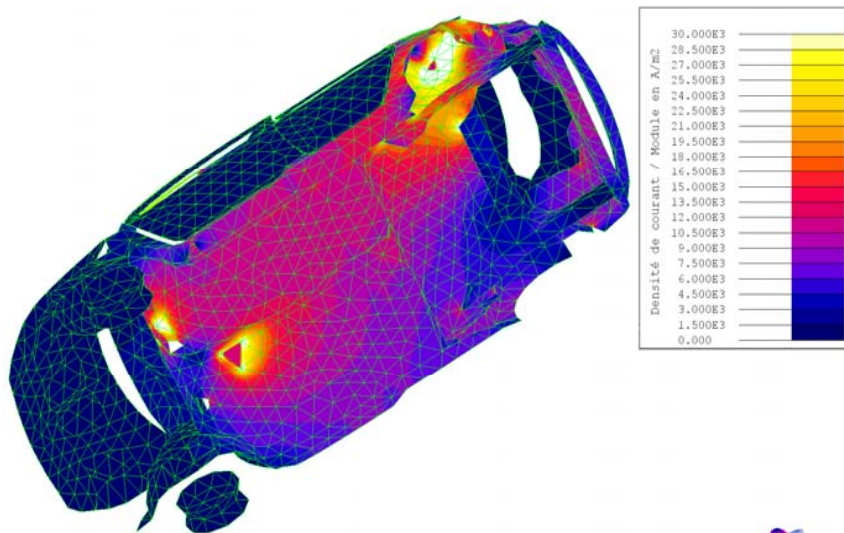
- Import NASTRAN de la géométrie CAO d'un véhicule réel et maillage



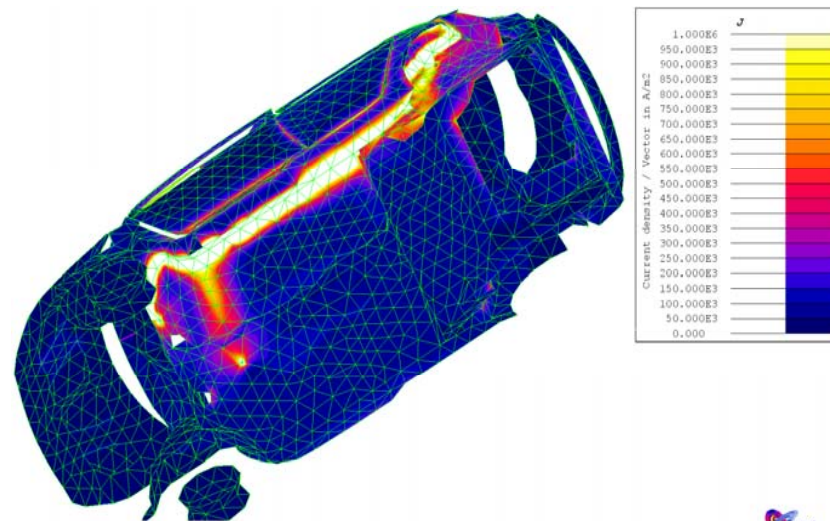
Etude réalisée en partenariat avec PSA Peugeot Citroën Automobiles - Salah Benhassine **PSA PEUGEOT CITROËN**

Distribution du courant dans la carrosserie

Densité de courant J [A/m^2]



f=10Hz



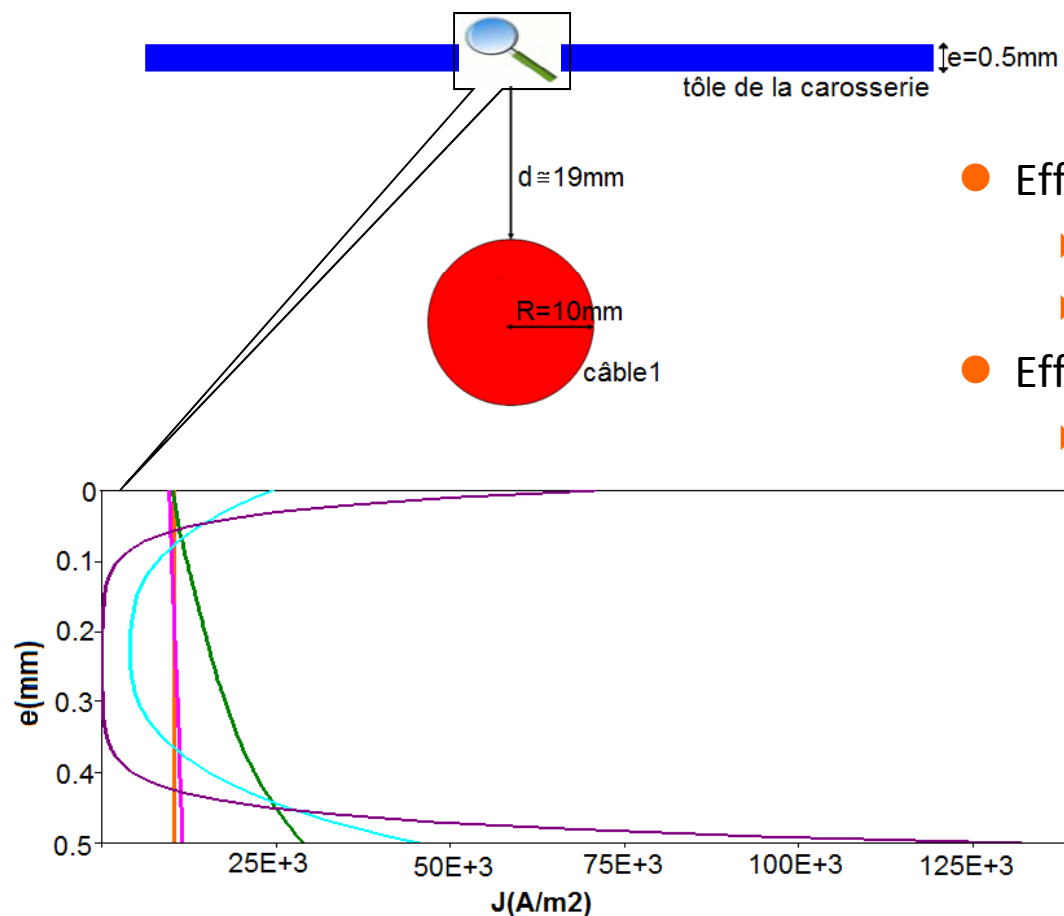
f=100kHz



Retour du courant : le parcours le moins résistif, le plus court en longueur

Retour du courant : le cheminement des câbles d'une borne à l'autre, les boucles sont les moins inductives.

Courant dans « l'épaisseur » de la carrosserie



- Effet de peau
 - ▶ basses fréquences : J quasi constante
 - ▶ fréq. plus élevées : variation hyperbolique
- Effet de proximité
 - ▶ J plus élevée du côté du câble (@ 0.5 mm)

↓

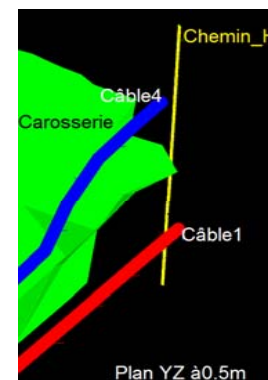
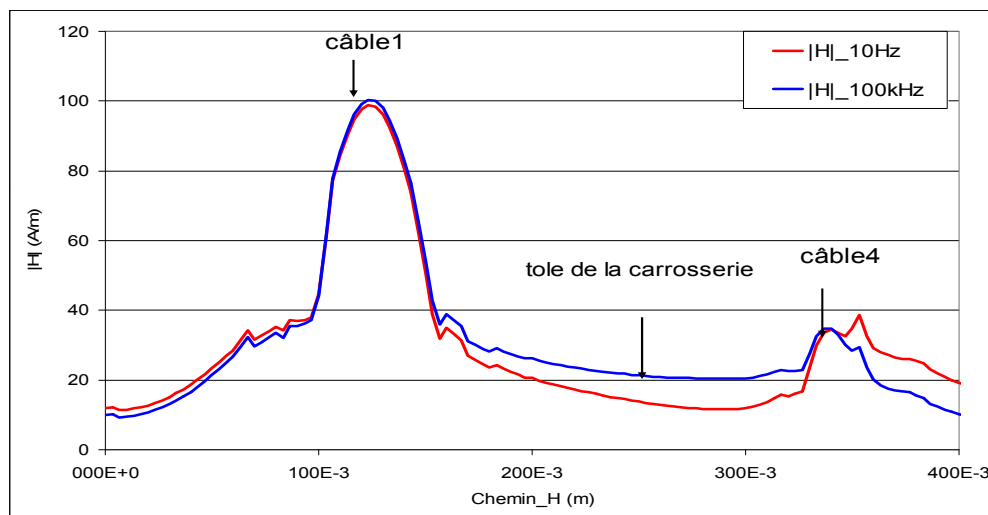
pertes Joule
(échauffement)
plus importantes

Etude réalisée en partenariat avec PSA Peugeot Citroën Automobiles - Salah Benhassine

PSA PEUGEOT CITROËN

Champs magnétiques rayonnés

- A l'arrière du véhicule, dans la zone des deux sources



*chemin d'exploitation
des résultats*

zone câble 1: $|H_z|_1 = 100 \text{ A/m}$

zone câble 4: $|H_z|_4 = 35 \text{ A/m}$

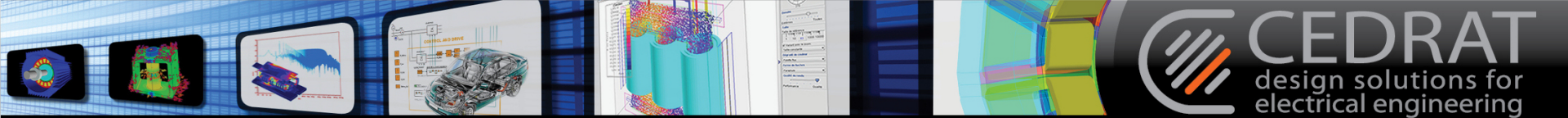
→ $|H_z|_1 / |H_z|_4 \sim 2.8$

→ $||(\text{câble1})|| / ||(\text{câble4})|| \sim 2.8$

zone câbles: courbes superposées

→ courants ne dépendent pas de la fréquence

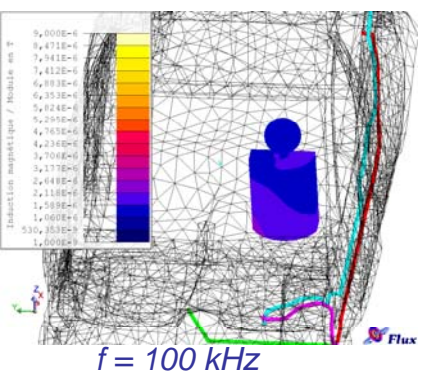
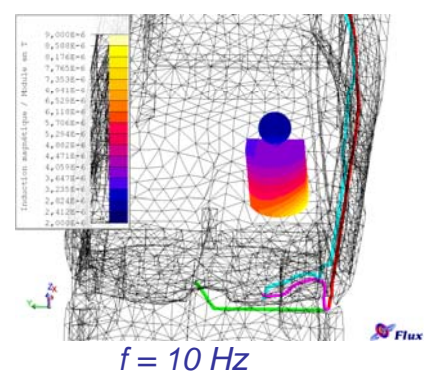
zone tôle: $|H|$ plus faible à 10 Hz (J diffusée)
qu'à 100 kHz (J localisée)



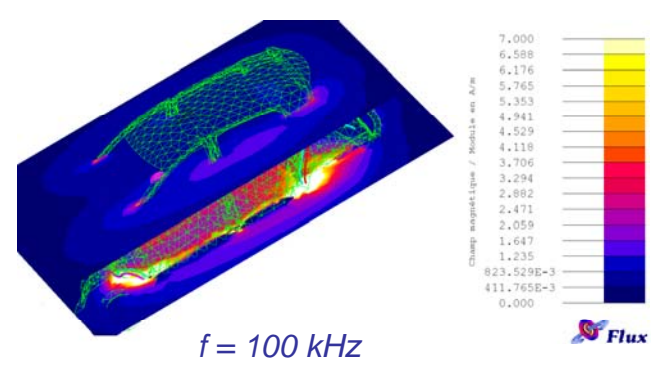
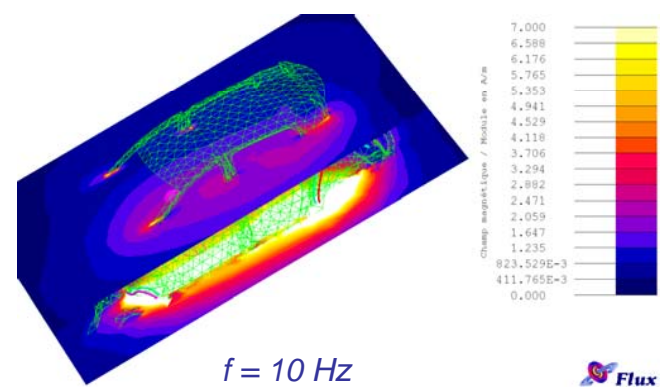
Effets sur les passagers du véhicule

- Modèle très simplifié de corps humain et calcul de B

sur la surface du corps



au niveau de la tête et des pieds



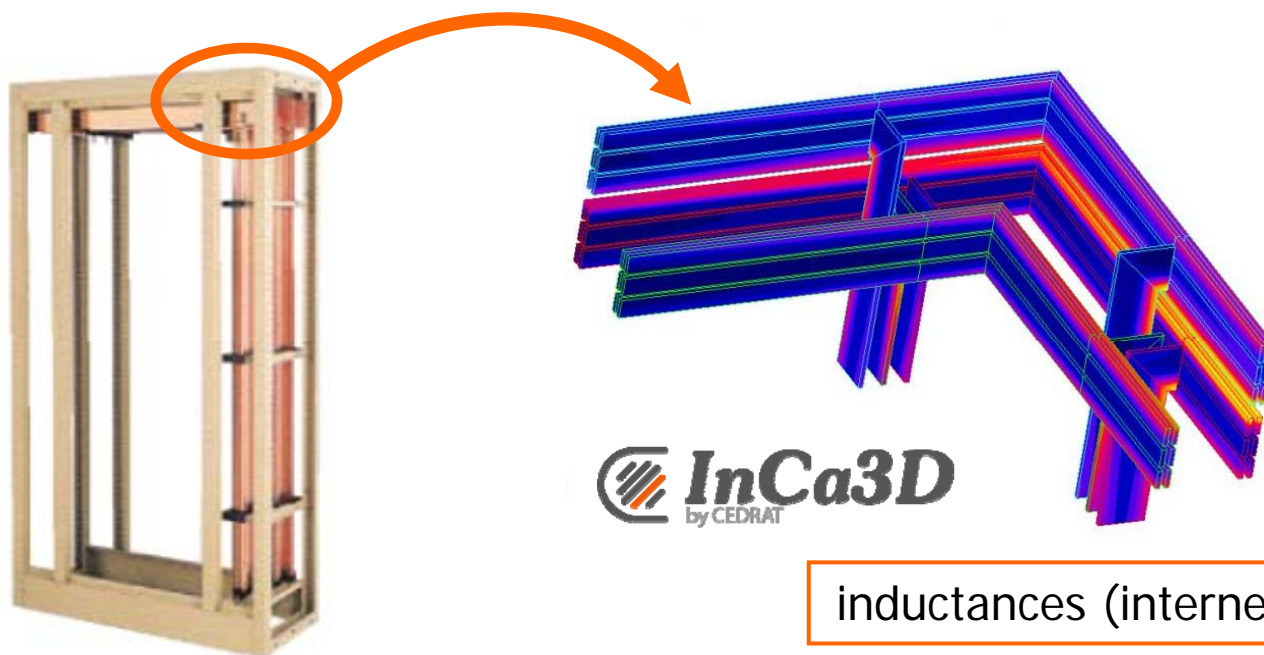
- Bruit électromagnétique dépend :
- Fréquence
 - Courants induits
 - Distance du passager par rapport à la source de perturbation

Etude réalisée en partenariat avec PSA Peugeot Citroën Automobiles - Salah Benhassine **PSA PEUGEOT CITROËN**

Armoire de distribution électrique



- Effets de peau et de proximité augmentent les pertes Joule, même à 50 Hz et même avec charges équilibrées
- Système triphasé de barres de distribution de puissance
 - ▶▶ Six barres en parallèle pour chaque phase



InCa3D
by CEDRAT

fort déséquilibre de J :
facteur 8

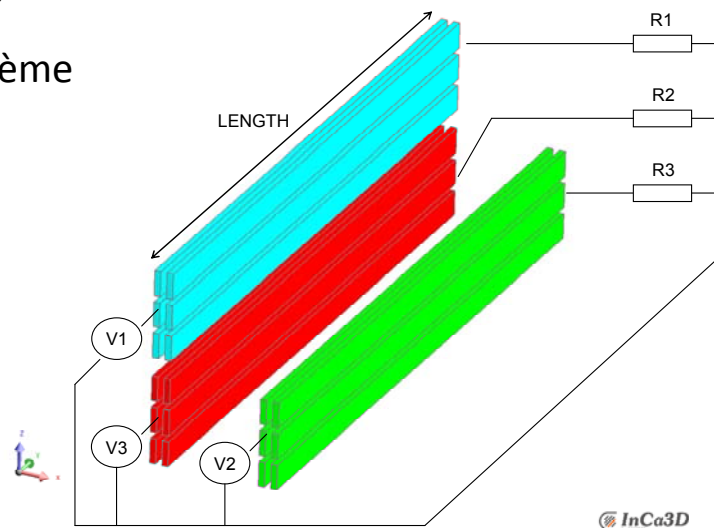
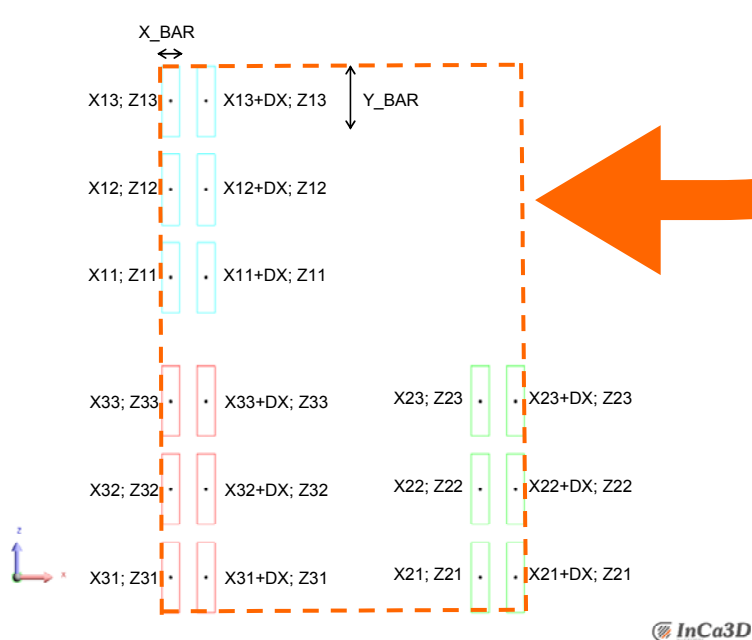
inductances (internes et externes) parasites

Minimisation des pertes Joule parasites

- Modifications dans la disposition géométrique des barres

- ▶▶ Processus d'optimisation avec le logiciel GOT-It®

- ✓ une contrainte sur l'encombrement total du système
 - ✓ barres liées à deux à deux : inter-distance figée

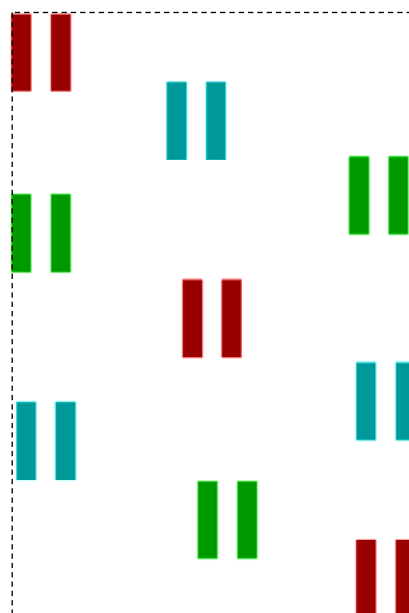


Optimisation mono-objectif
par algorithme stochastique
sur 18 paramètres

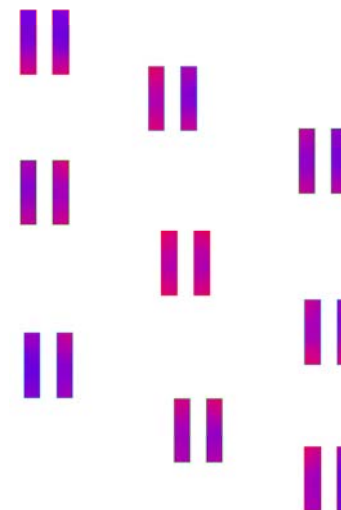
Minimisation des pertes Joule parasites

disposition initiale :
612,8 W

disposition proposée :
424,2 W gain : 30%
en DC : 373 W



Réduction des boucles d'inductance
Effets de proximité limités
Répartition plus uniforme de J

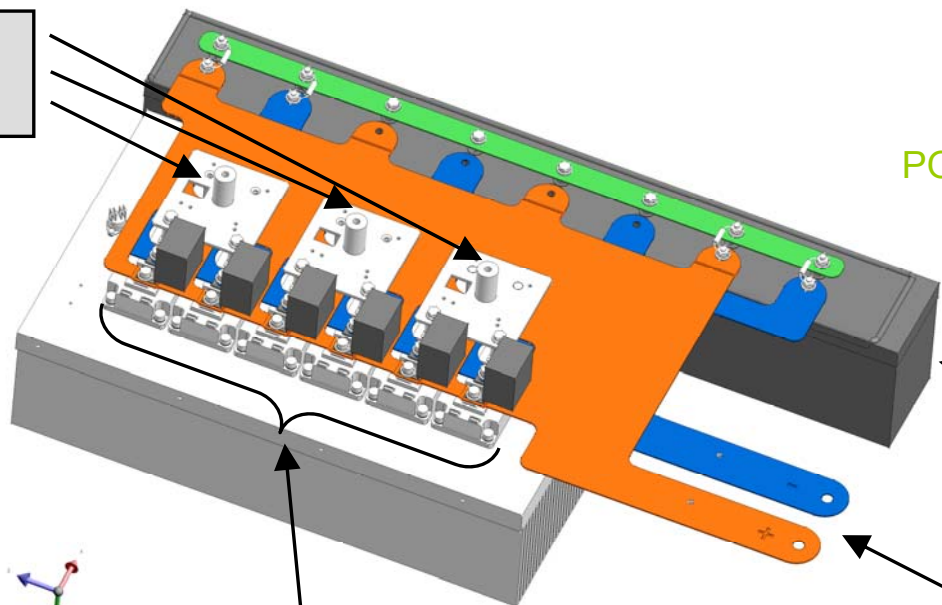


InCa3D

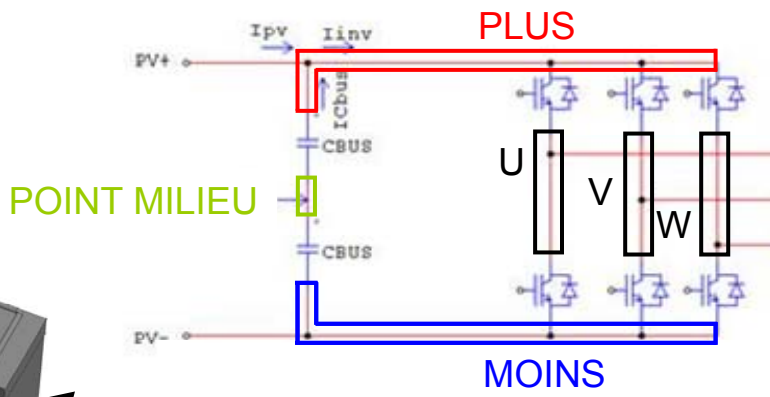
Busbars d'onduleur triphasé



sortie triphasée



6 IGBT + diode



banc de condensateurs

arrivée du continu



- Les courants sont-ils équilibrés ?
- Quelles variations en fonction de la fréquence ?

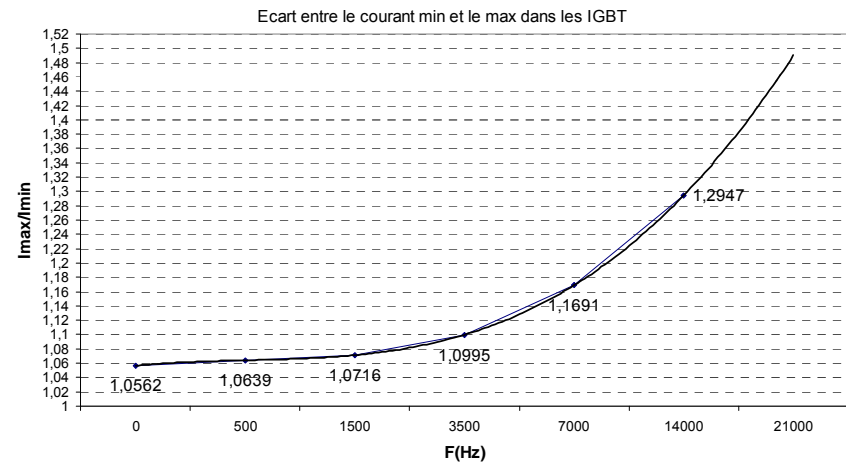
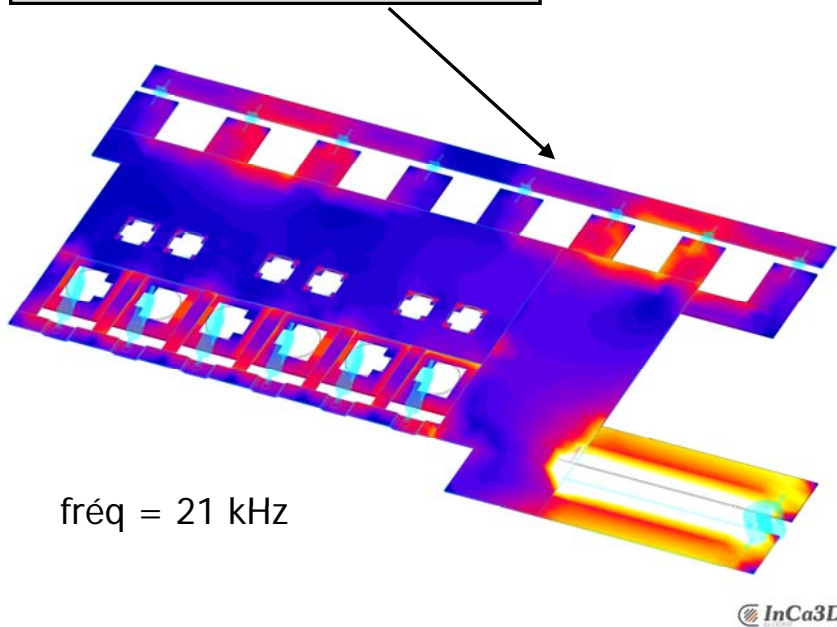
Répartition du courant dans les busbars et IGBT

- Simulations par méthode PEEC – logiciel InCa3D®
- IGBT et diodes modélisés par leur résistance interne à l'état ON

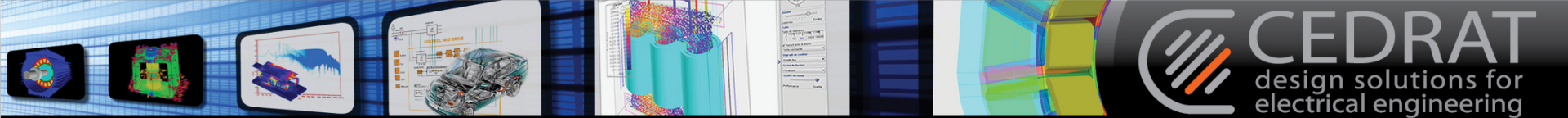


les condensateurs, bien qu'ils soient en parallèle, ne voient pas le même courant

les 6 IGBT non plus : I_{\max}/I_{\min} croissant avec la fréq
→ marges à prendre en phase de conception pour assurer la fiabilité

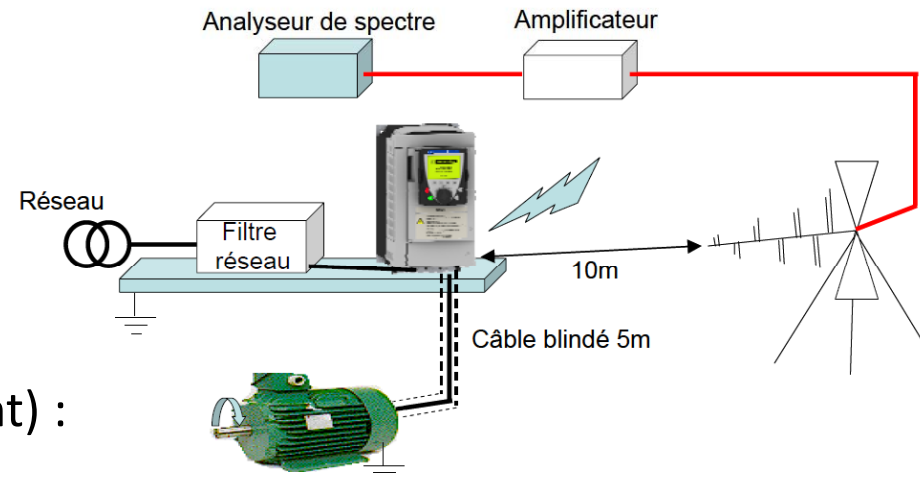


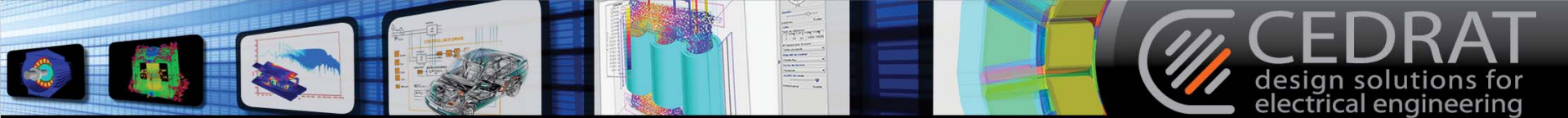
comportement non-idéal (parasite)
des conducteurs (résistance et inductance)



Variateur de vitesse pour moteur

- Respect des normes en émissions conduites (très basse fréquence) et rayonnées
- Cartes PCB reliées à un boîtier plastique & métallique (refroidissement) :
 - ▶ masse mécanique
 - ▶ courants de mode commun
- Dans le même PCB multicouches
 - ▶ contrôle – commande
 - ▶ puissance
 - ✓ composants : condensateurs, bobines, filtres CEM
 - ✓ connectique : pistes, plans, câbles



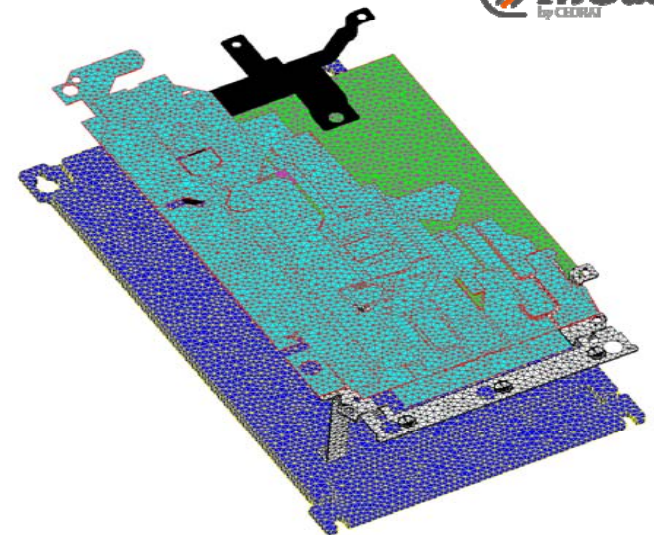
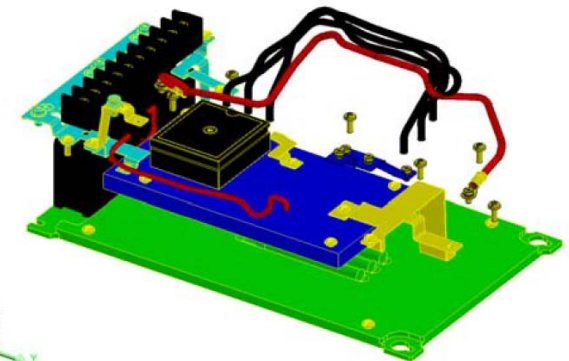


Stratégie de modélisation



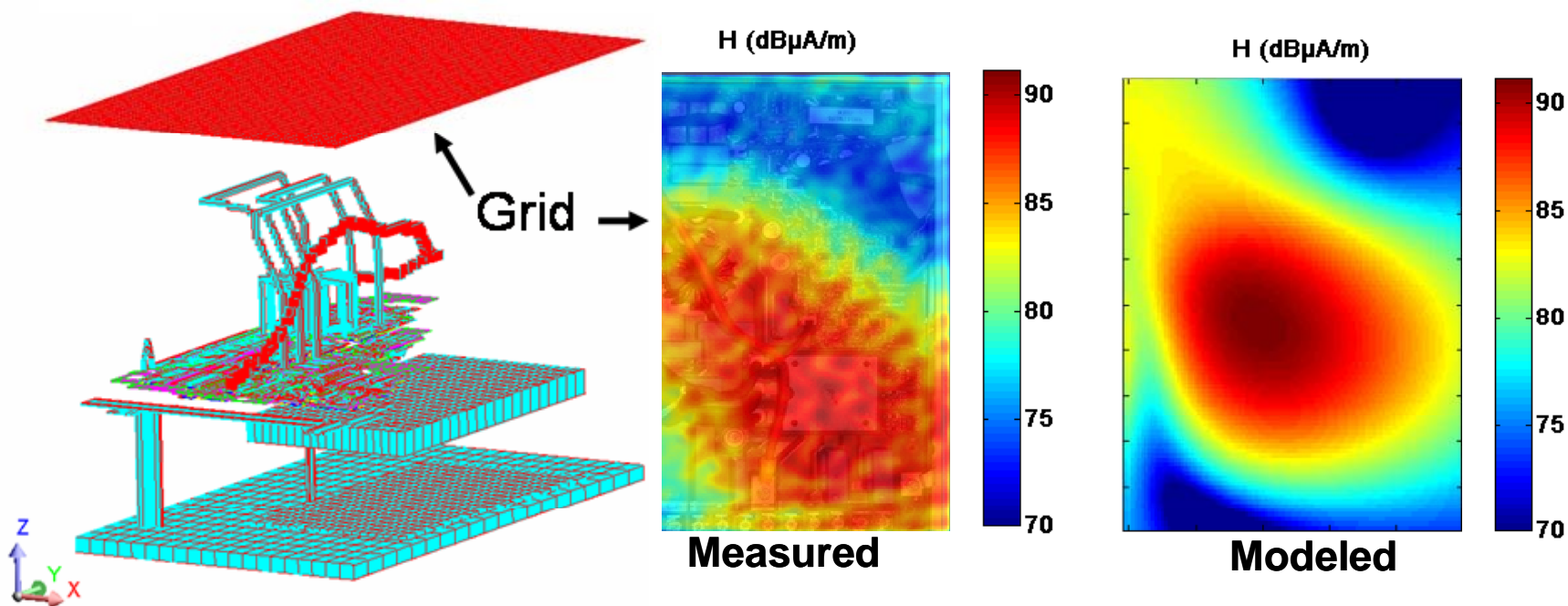
- Import CAO de la connectique :
 - ▶▶ STEP pour parties mécaniques
 - ▶▶ Gerber pour PCB
- Simplification de la géométrie et maillage
- Définition du comportement fréquentiel des composants passifs : $Z(f)$ ou ESR + ESL
- Définition des sources de bruit : $I(f)$ ou $V(f)$

ATV71 230V monophasé 5.5kW



Champ magnétique proche rayonné

- Calcul PEEC (logiciel InCa3D®) de la distribution du courant dans le dispositif
- Application de la loi de Biot-Savart pour en déduire le champ magnétique rayonné dans l'espace environnant
- @ $f=32$ kHz, deuxième harmonique, cartographie de la composante spatiale Z

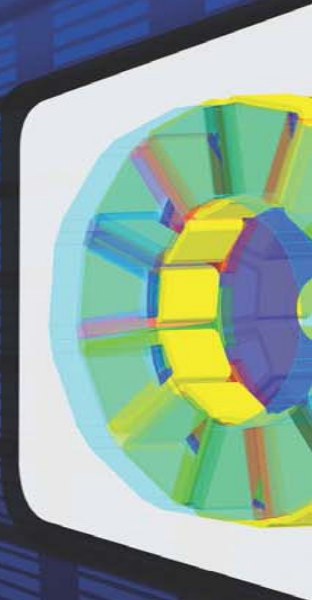
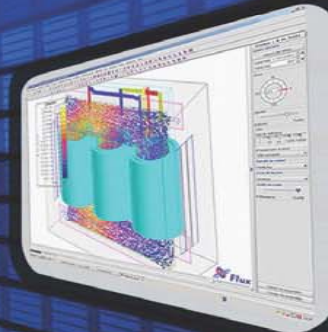
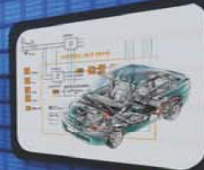
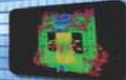




Conclusion

- Quelques exemples applicatifs
 - ▶ prise en compte de la CEM dans les systèmes et les équipements des puissances
- Maitrise par simulation des phénomènes parasites
 - ▶ couplages inductifs et capacitifs de la connectique

Modélisation CEM de systèmes et équipements de puissance



Enrico Vialardi



CEDRAT
design solutions for
electrical engineering

AFCEM