

# GESTION DU CABLAGE DES MASSES ELECTRIQUES DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE

## Application C.E.M

Soutenance de thèse

Fabrice DUVAL

ESIGELEC / IRSEEM / LGEP / VALEO

04 décembre 2007



# Sommaire

---

- Introduction
  - Environnement automobile
  - Objectifs de l'étude
- CEM automobile
  - La masse
  - Les couplages au niveau câblage
- Méthodologie développée
- Application automobile
- Conclusion et perspectives

---

# INTRODUCTION

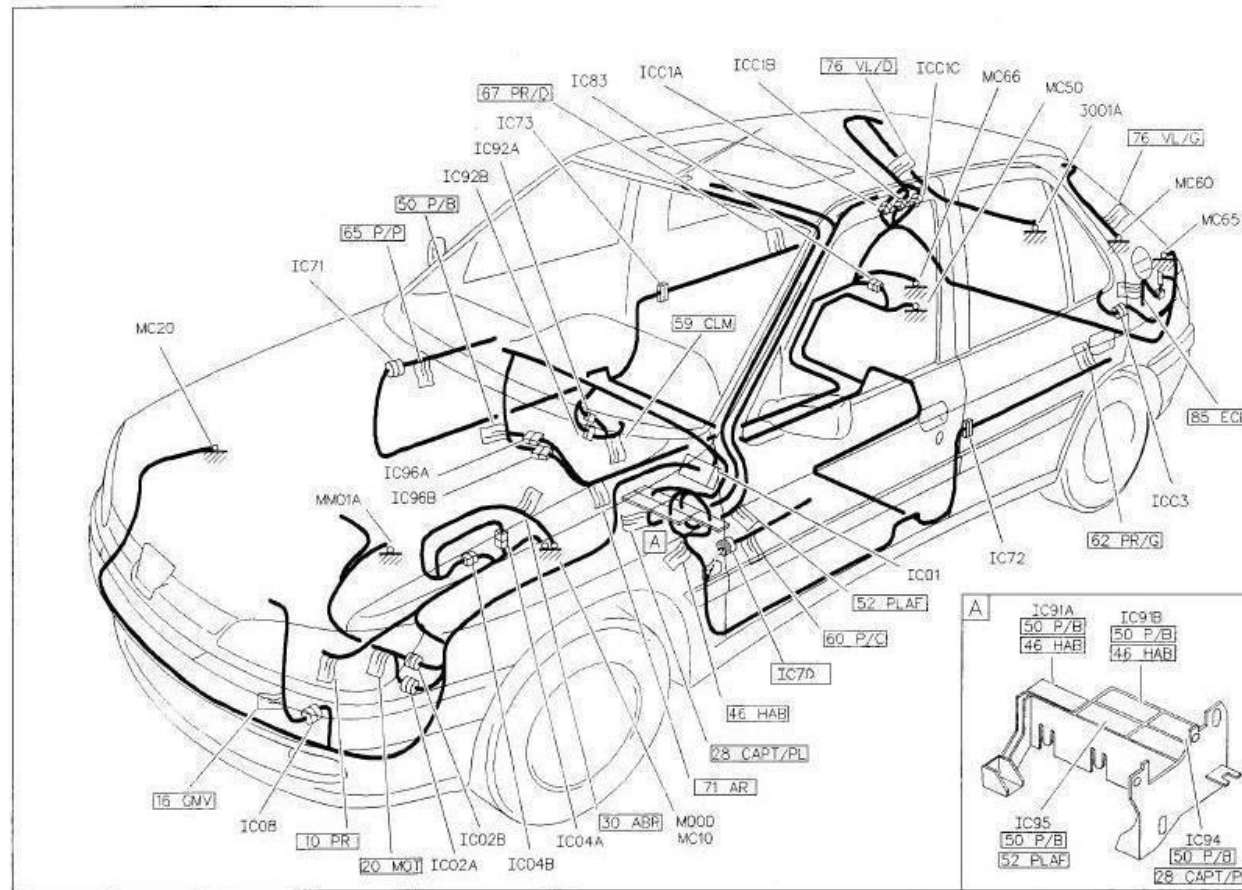
# Introduction

---

## □ But :

- Obtenir une modélisation des équipements et des câblages permettant de comprendre et d'anticiper les problèmes de Compatibilités ElectroMagnétiques (CEM) dans le domaine automobile
  - Connaître les particularités des signaux dans le domaine automobile
  - Connaître les éléments à prendre en compte dans une simulation
- Application à un problème de commutations sur faisceau batterie

# Introduction



Faisceaux 306 (1997)

# L'environnement automobile

---

- Croissance de l'électronique
  - Équipements de confort
    - GPS, Autoradio communicant, climatisation
  - Équipements d'aide à la conduite
    - ABS, ESP, Radar, régulateur
  - Équipements à venir
    - TNT, WiMax (802.16e)
  
- Puissance en augmentation
  - Chauffage électrique, assistance de direction, START&GO
  
- Signaux couvrant une large bande de fréquences

# Types de signaux

---

- Puissances
  - Fréquences DC → 1 MHz ; quelques kW
- Commandes
  - Fréquences DC → 1 MHz ; <1 W
- Audio
  - Fréquences 20 Hz → 20 kHz ; quelques dizaines de Watts
- Numériques
  - Fréquences DC → 100 MHz ; <1 W
- Hautes fréquences
  - Fréquences 100 kHz → 6 GHz ; <10 mW
- Optiques
  - Fréquences <100 MHz ; puissance optique
- Mixtes

# Les perturbations électromagnétiques

---

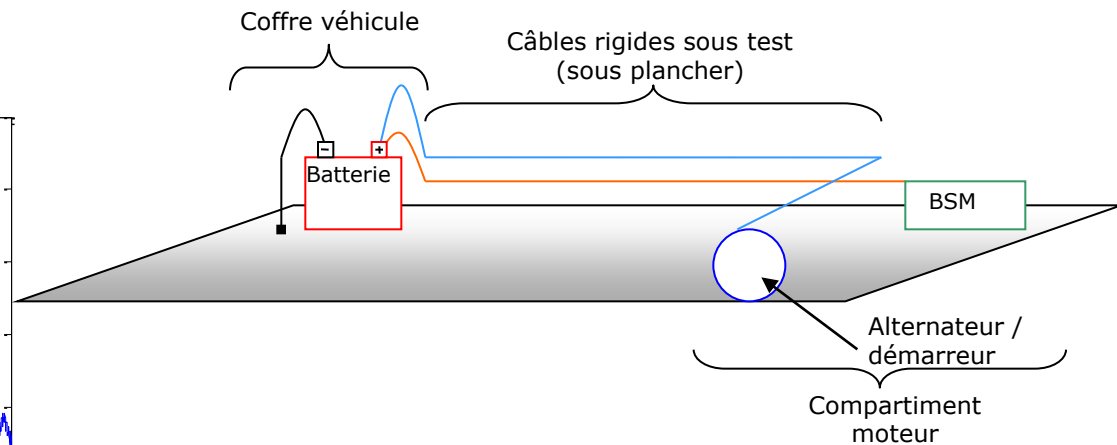
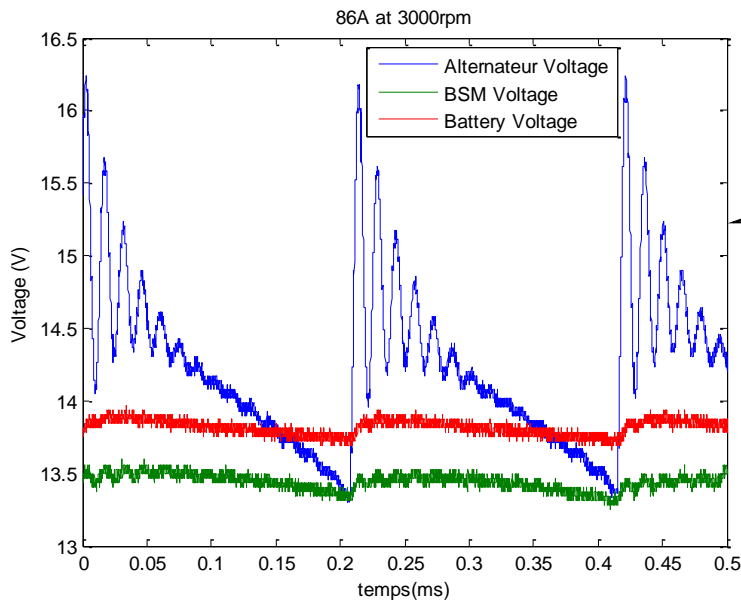
- Nouveaux perturbateurs
  - Lampe à iode, « 14+X », ...
  - Mise à jours d'anciens perturbateurs
    - Essuie-glace
  
- Nouvelles victimes
  - Récepteurs de radiocommunications
  - Récepteur GPS
  - Capteurs sensibles (pollution, pression,...)



# La CEM et l'automobile

## ■ Nouvelles contraintes CEM dans l'automobile

- Il est possible d'avoir des perturbations aux bornes des fils des câblages



⇒ La CEM est à prendre en compte lors de l'intégration des éléments électroniques, notamment au niveau des câblages

Possibilité d'utiliser la simulation pour analyser et comprendre les phénomènes

# Objectifs

---

- ❑ Développer un outil d'analyse et de conception
  - Connaître le type de perturbations et leurs modes de couplage
  - Permettre d'obtenir des résultats rapidement
  - S'interfacer avec des logiciels de type Spice
  
- ❑ Organisation du travail de thèse
  - Études théoriques des phénomènes mis en jeu
    - ❑ Impact de la masse
    - ❑ Impact des couplages capacitifs, inductifs et par impédance commune
  - Choix d'une méthode numérique pour le code
  - Validation du code sur des cas simples
  - Utilisation du code sur un cas concret automobile

---

# CEM Automobile

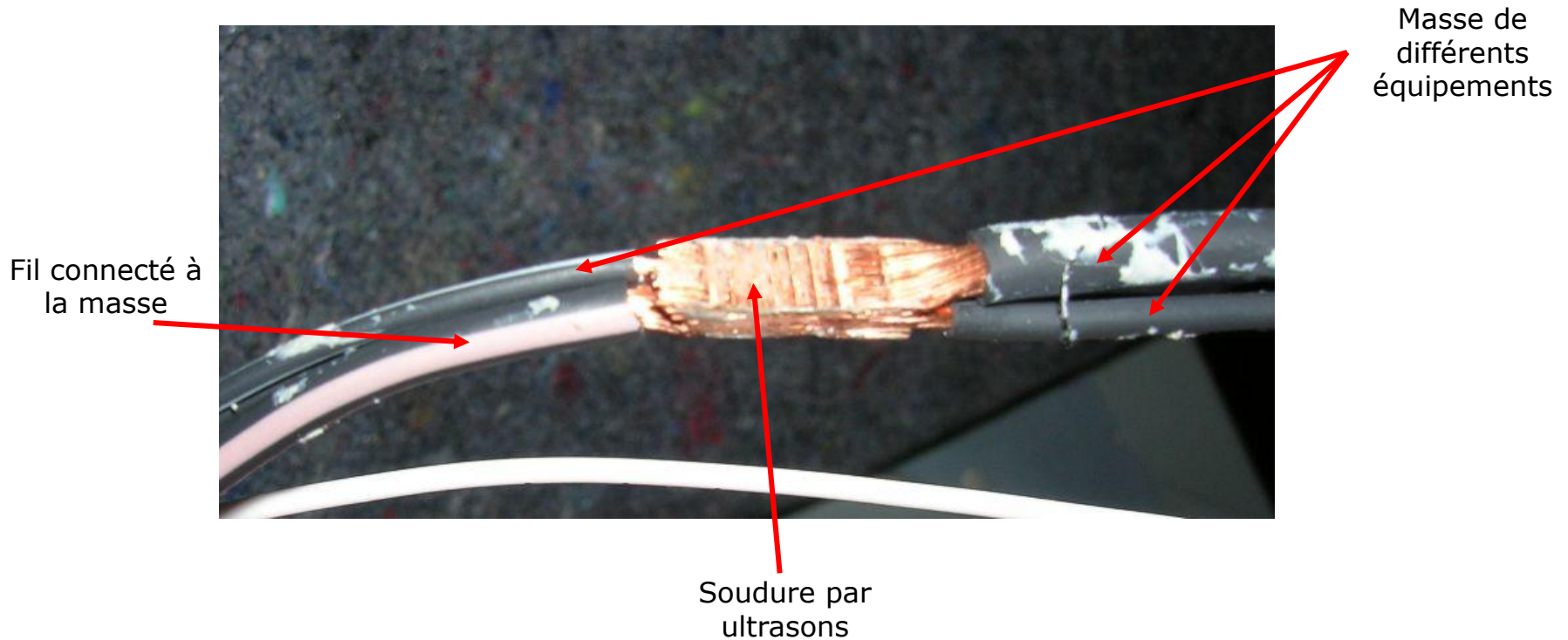
# La masse

---

- Ce terme désigne
  - Les parties métalliques de la carrosserie
  - Les fils reliés à ces parties métalliques
  - La cosse (généralement négative) de la batterie
  
- Usages de base
  - Référence de tension
  - Conducteur de retour
  
- Aspect économique important

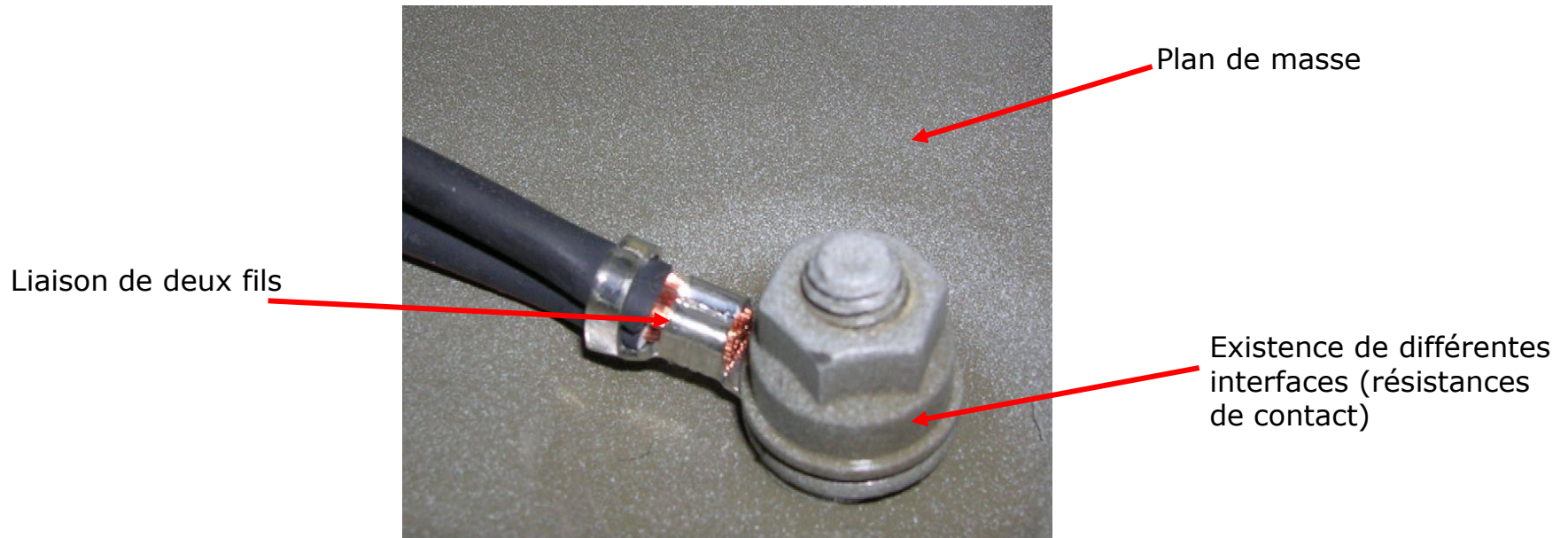
# La masse : Contrainte économique (1)

- Limitation de la « quantité de cuivre »
  - Création d'épissure



# La masse : Contrainte économique (2)

- Limitation du nombre de connexions
  - Chaque cosse permet de connecter plusieurs fils



# La masse : épaisseur de peau

- L'épaisseur de peau est caractérisée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \text{ avec } \begin{cases} \omega \text{ pulsation} \\ \mu \text{ perméabilité} \\ \sigma \text{ conductivité} \end{cases}$$

- Dans le cadre spécifique d'un plan de masse de retour

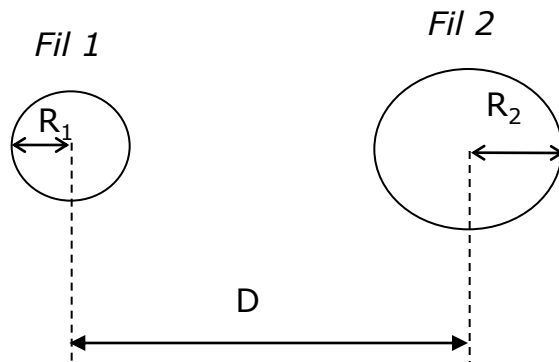
$$Z = \frac{\frac{1}{\sigma\delta}(1+j)}{\tanh\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\delta}\right)(1+j)\right]} \text{ avec } \begin{cases} \delta \text{ épaisseur de peau} \\ \sigma \text{ conductivité du matériau} \\ t \text{ épaisseur du matériau} \end{cases}$$

⇒ L'application de ces formules ne sera pas facile

⇒ L'outil développé devra pouvoir tenir compte de ces phénomènes

# Couplages capacitifs : expression

- Existence d'un couplage capacitif

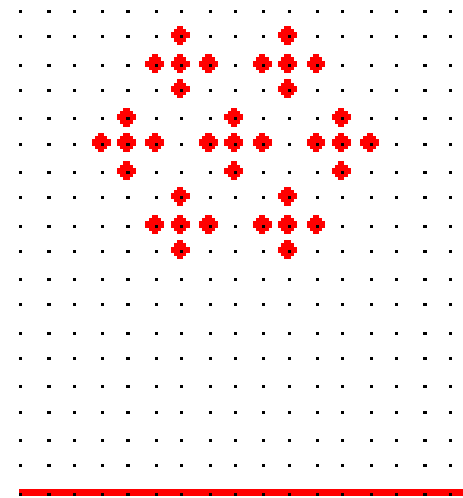
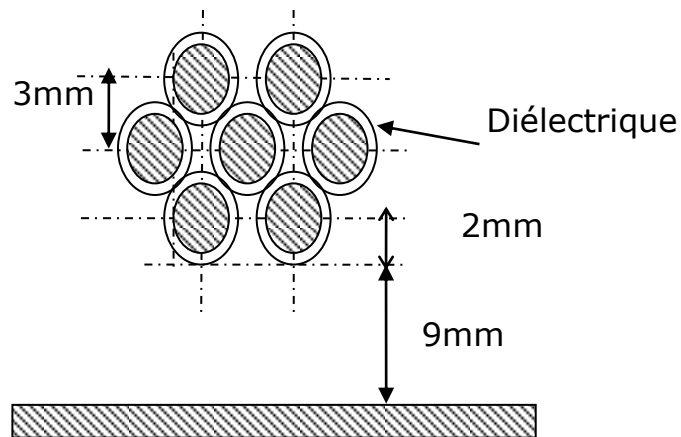


$$C/l = \frac{2\pi\epsilon}{\operatorname{argch}\left(\frac{D^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2}\right)}$$



# Couplages capacitifs : Ordre de grandeur

- ▣ Faisceau automobile à 7 fils
  - Application d'un logiciel de différences finies (FD2D)



# Couplages capacitifs : Ordre de grandeur

---

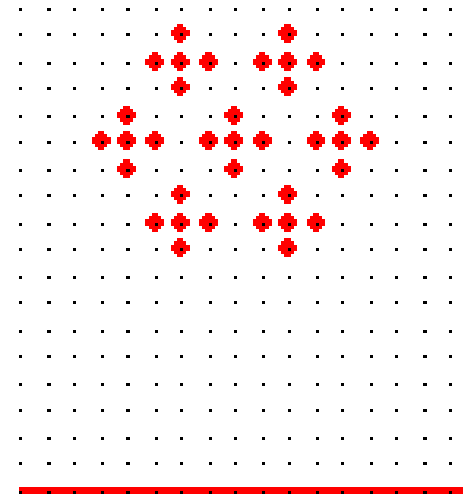
- ▣ Faisceau automobile à 7 fils
  - Application d'un logiciel de différences finies (FD2D)

Sans isolant :

Fils extérieurs / masse : 5 pF/m

Entre fils accolés : 9 pF/m

Fil intérieur / masse : 0,15 pF/m



# Couplages capacitifs : Ordre de grandeur

---

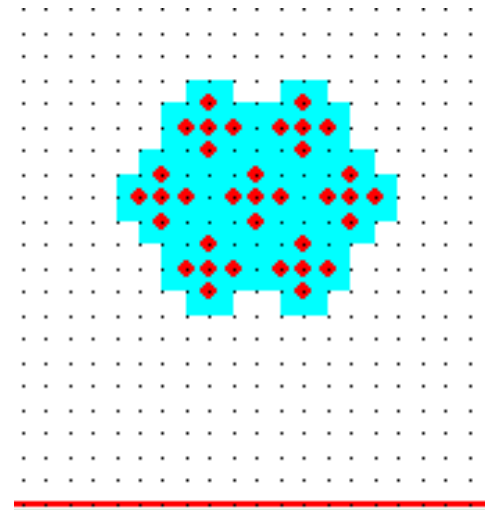
- ▣ Faisceau automobile à 7 fils
  - Application d'un logiciel de différences finies (FD2D)

Avec isolant :

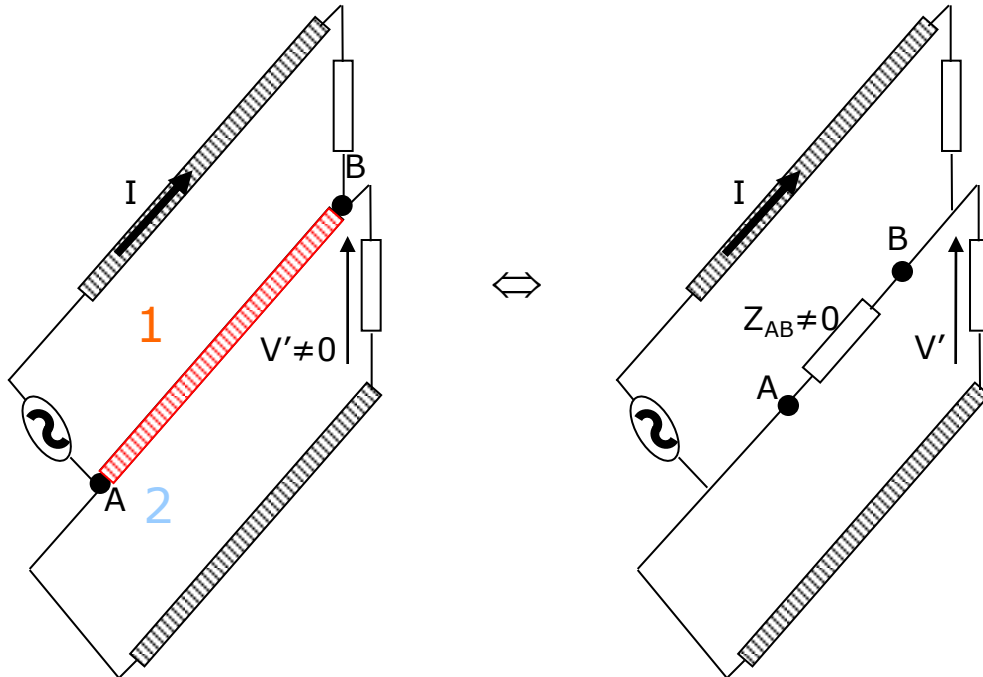
Fils extérieurs / masse : 5 pF/m

Entre fils accolés : 45 pF/m

Fil intérieur / masse : 0,15 pF/m



# Couplages par impédance commune



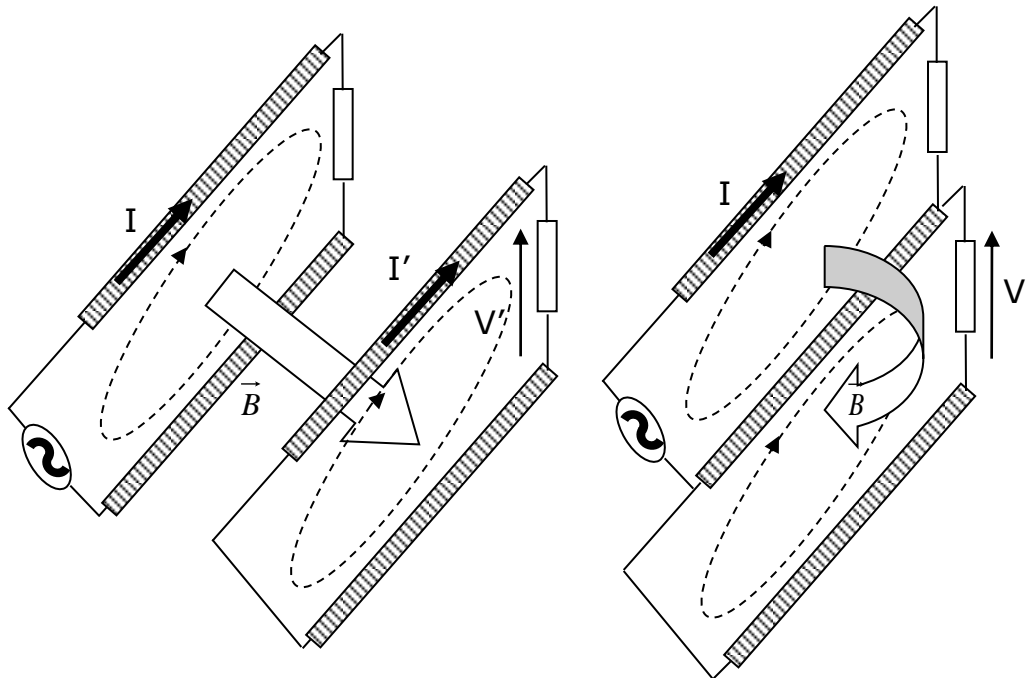
La boucle 1 dispose d'une partie commune avec le circuit 2

$$\rightarrow Z_{AB} : V' = Z_{AB} * I$$

Pour les plans de masse,  $Z_{AB}$  est constituée de R, de L et de M

R:  $\approx 100\mu\Omega$  pour la masse ;  $\approx 1m\Omega$  pour les goujons.

# Couplages inductifs



Un circuit forme une boucle

⇒ génération d'un champ magnétique

Les autres circuits sont baignés dans ce champ magnétique

⇒  $V'$  générée selon la loi de Faraday.

⇒  $V'$  génère un courant

Idem si une partie est commune

Inductance des fils  $\approx 1\mu\text{H/m}$ .  
Coefficient de couplage de 1 à 80%

**Le couplage par impédance commune est indissociable du couplage inductif**

# Les couplages : Bilan

---

- Faisceau de 4m de long
  - $L \approx 4\mu\text{H}$  ;  $R \approx 1\text{m}\Omega$  ;  $C \approx 20\text{pF}$
- Résonance du fil :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \approx 18 \text{ MHz}$$

- Résonance du fil connecté aux équipements (de l'ordre du micro Farad)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_{Termination}}} \approx 80 \text{ kHz}$$

- Oscillations constatées de l'ordre de la centaine de kHz
- Compréhension des phénomènes
  - Maîtrise des inductances des fils prioritaire
  - Gestion des capacités des fils peu importante

---

# Méthodologie développée

# La Méthode PEEC

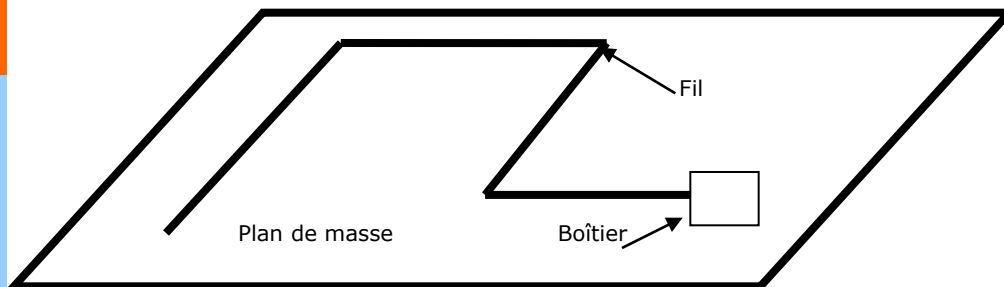
---

- La méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit)
  - Méthode proposée par Ruehli en 1974
  
- Transformation d'une géométrie en circuit électrique équivalent
  
- Avantages
  - La masse est un conducteur classique
  - Accès au courant en tous points
  - Résultat sous forme d'un circuit électrique



# La Méthode PEEC : discrétisation

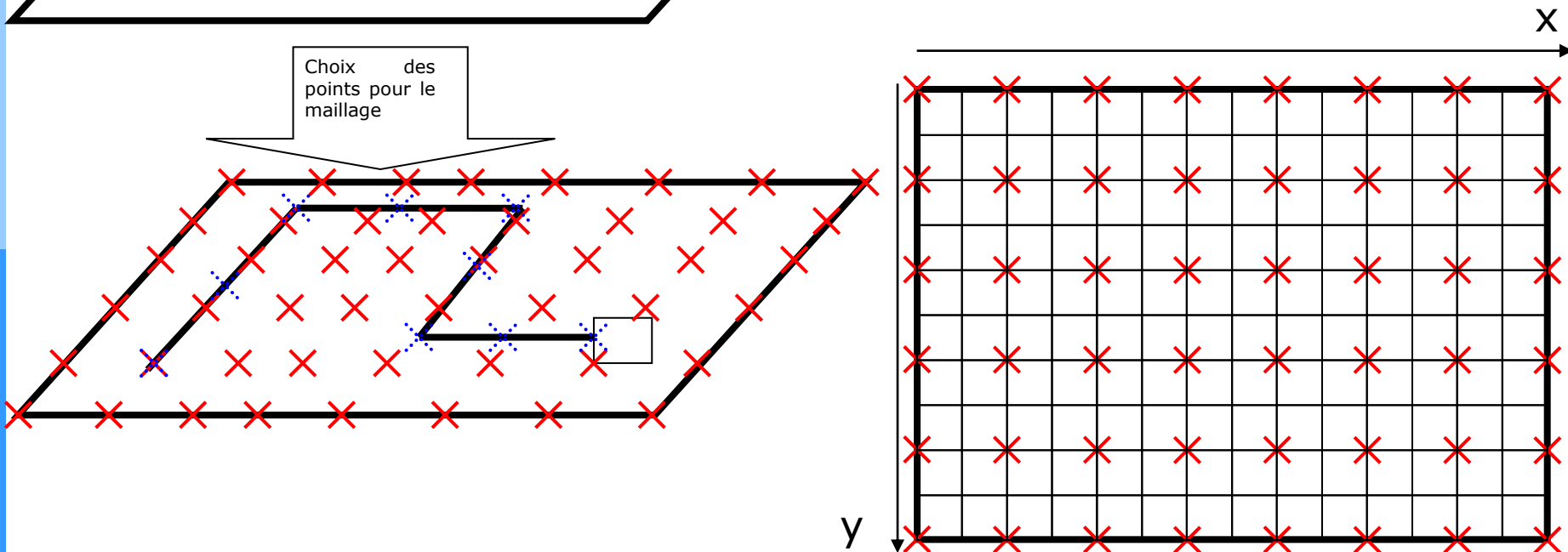
- Pour l'application de la méthode PEEC, on commence par positionner les nœuds où seront obtenus les résultats



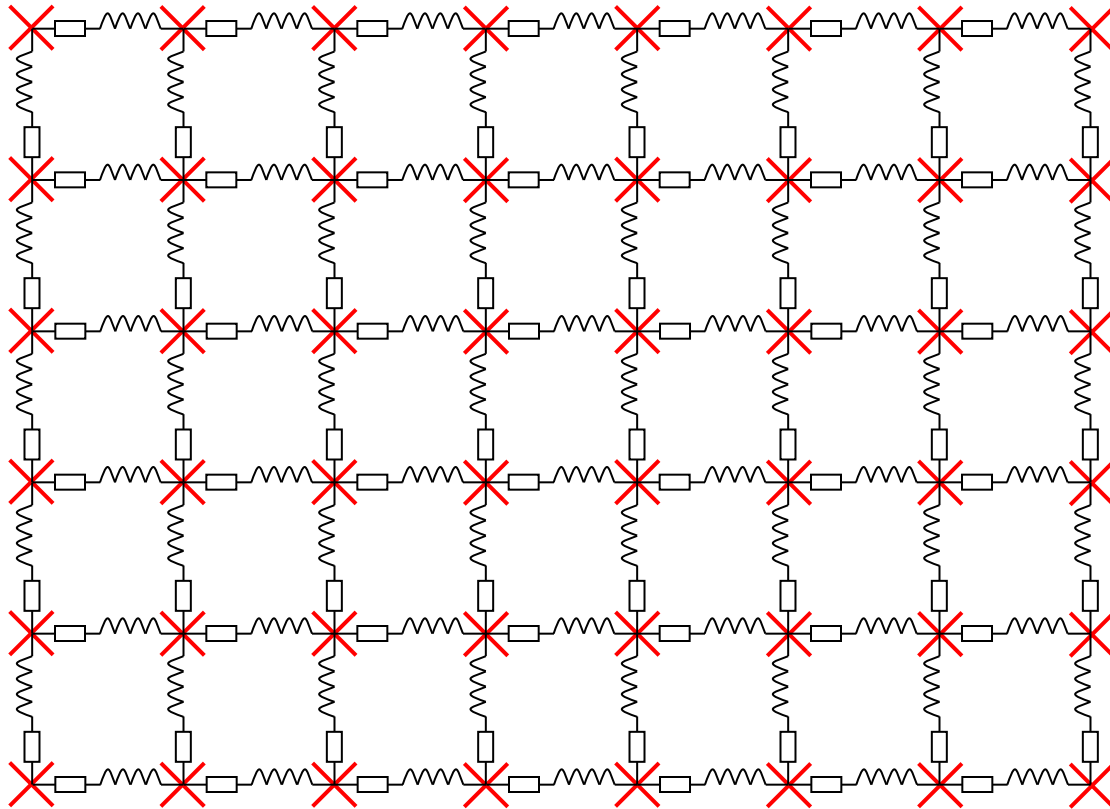
Ces nœuds servent de base à la décomposition en cellules de la structure

Selon l'axe des X

Et selon l'axe des Y



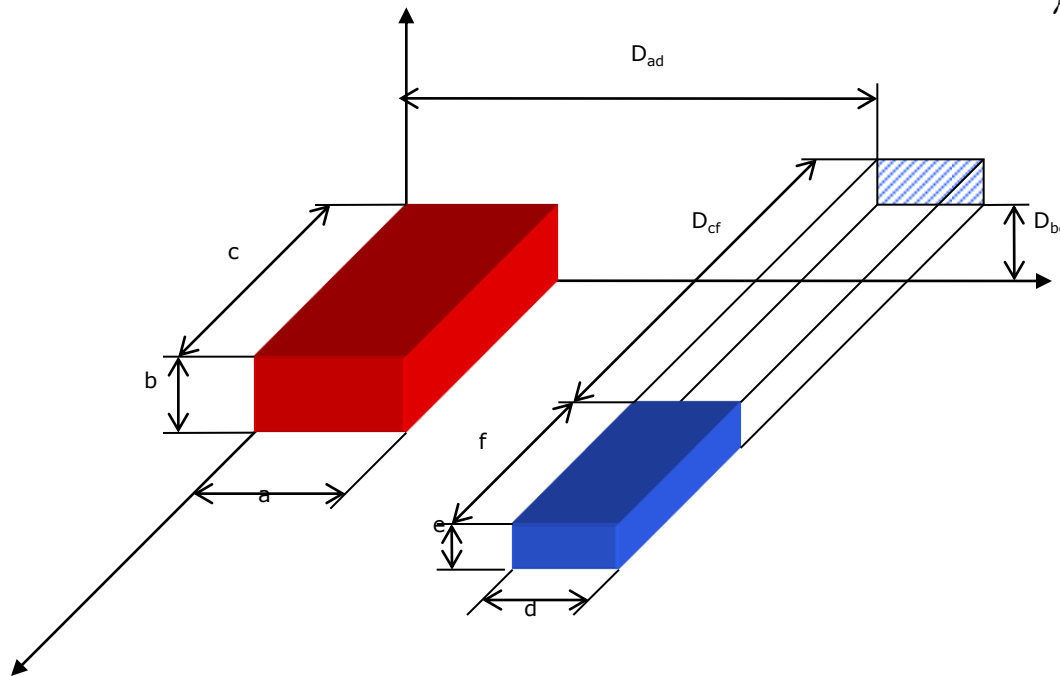
# La Méthode PEEC : discrétisation



# La Méthode PEEC : calcul des inductances

- Chaque paire de cellules interviendra dans un calcul de primitive

$$L_{\gamma in} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi a_{\gamma m} a_{\gamma i}} \int_{V_{\gamma i}} \int_{V_{\gamma m}} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' dV \quad (\text{Eq 1})$$



Obtention des inductances mutuelles et également des inductances propres en prenant les volumes identiques

Les parties résistives seront obtenues en appliquant la loi d'Ohm sur les cellules

# Le Code Développé : traitement des données

- Structuration des données compatible avec les langages de haut niveau (calcul matriciel)
  - Structure à calculer :

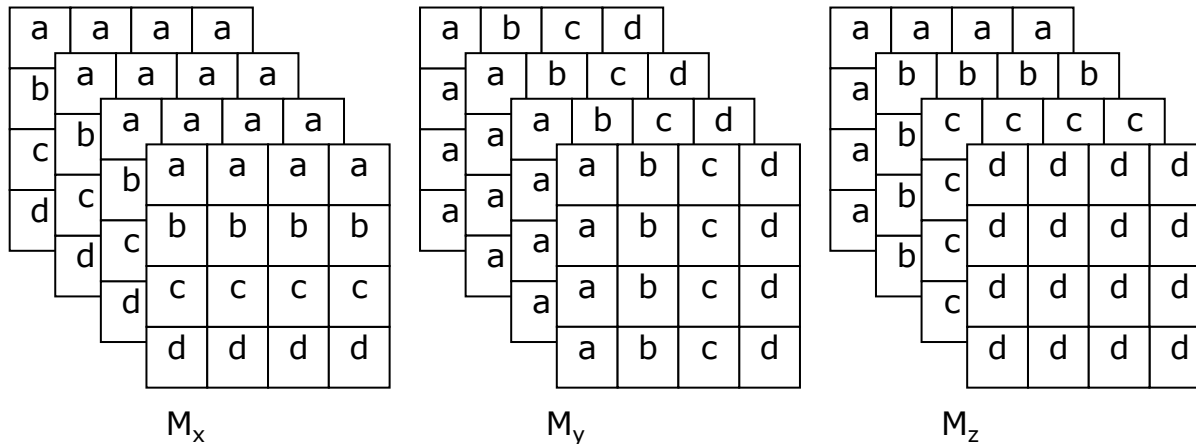
$$l_{p\gamma in} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 (-1)^{i+j+k+1} \left[ f(x_i, y_j, z_k) \right] \quad (\text{Eq 2})$$

- f étant la fonction primitive de l'intégrale précédente
- Forme initiale inadaptée à un calcul matriciel
- $\Rightarrow$  Transformer les données sous la forme de matrices

# Le Code Développé : optimisation

## Optimisation

- Conception de fonctions fonctionnant avec des matrices



- Toutes les combinaisons sont présentes
- Résultat sous forme de matrices
  - Attribution des coefficients  $\pm 1$
  - Sommation de la totalité des cases

# Le Code Développé : gestion des calculs

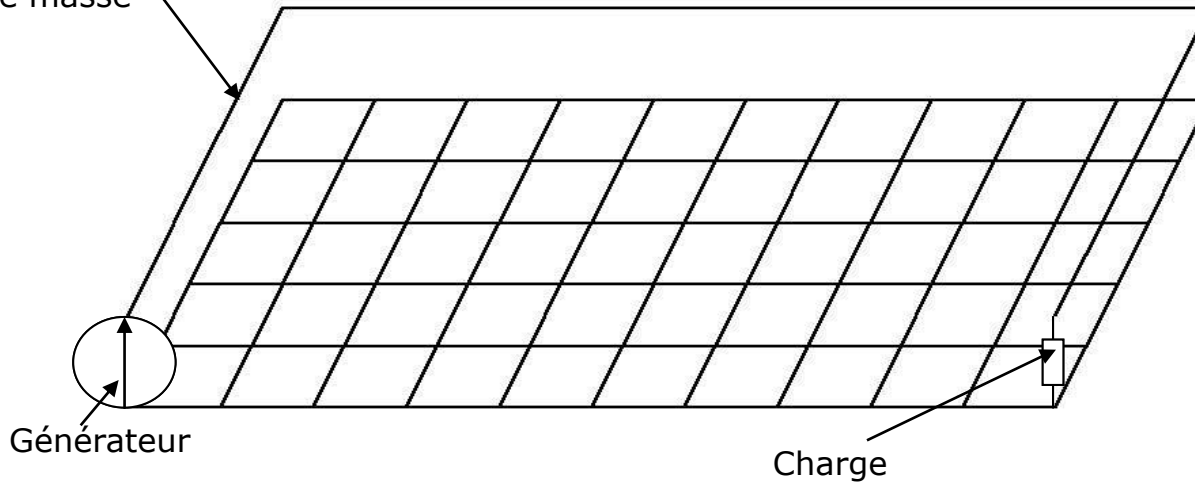
---

- Homogénéisation des calculs
  - Singularités des calculs (cf. Eq 1)
    - Si points communs entre deux cellules
    - Si cellules confondues
      - Inductance propre
  - Application systématique des calculs
    - Apparition d'erreurs
    - Toutes les erreurs forcées à zéro
    - Calculs ininterrompus
  - Calculs isotropiques

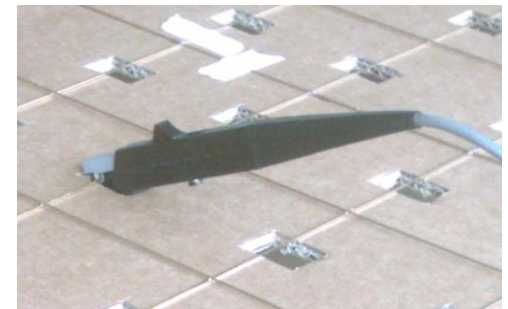
# Les cas tests : présentation

- Test sur grillage
  - Le plan de masse simulé par un grillage ouvert
  - Fil circulant au-dessus

Fil d'injection du courant dans le plan de masse

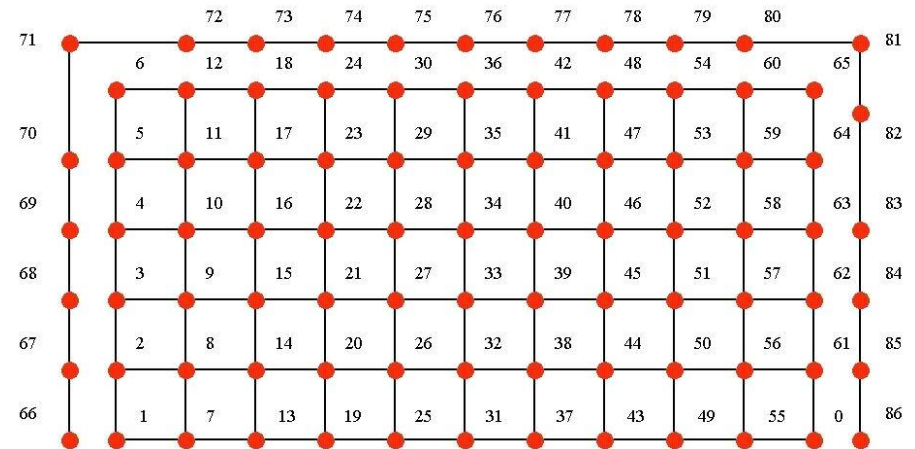
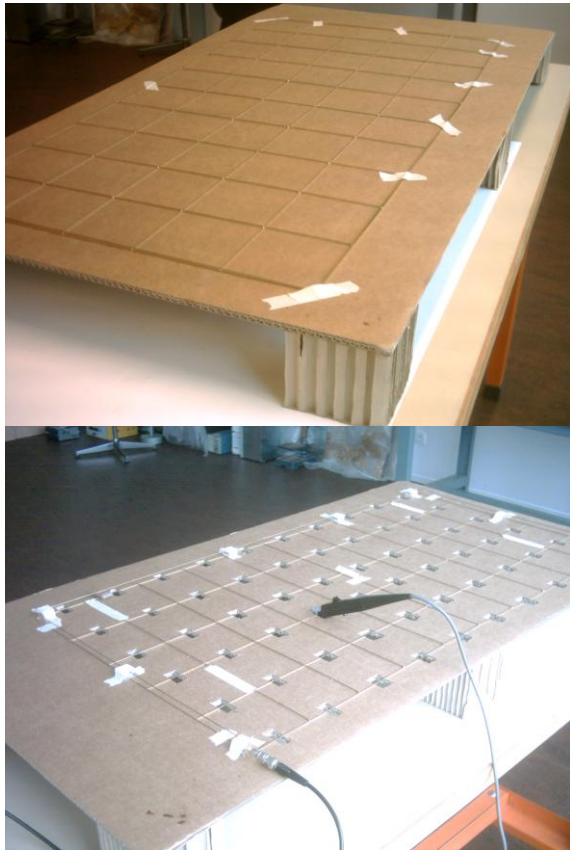


mesure du courant en tout point du plan de masse



# Les cas tests : topologie

## □ Mesures / Simulations

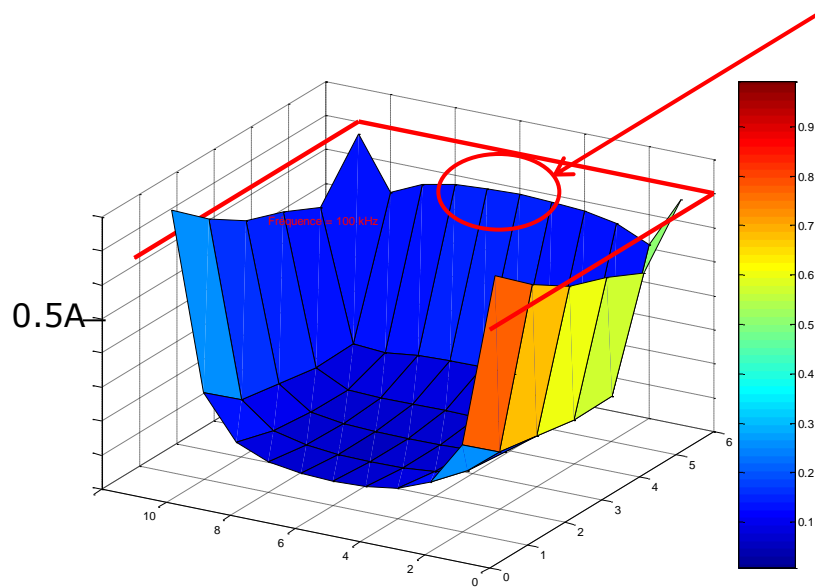


Il s'agit de connaître la répartition des courants dans le pseudo plan de masse pour les fréquences inférieures au MHz



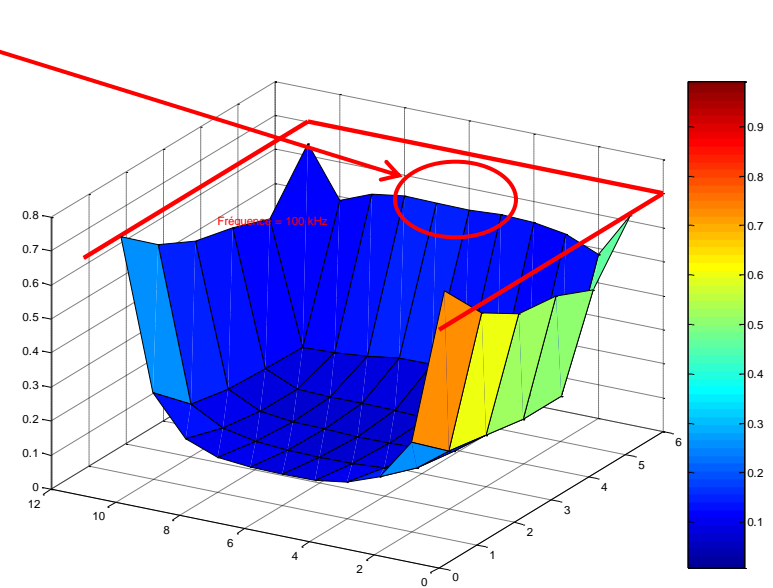
# Les cas tests : comparaison mesure-simulation

□ à 100kHz



Répartition des courants

Simulation

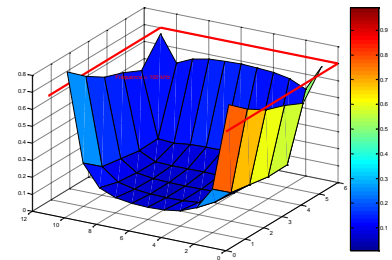
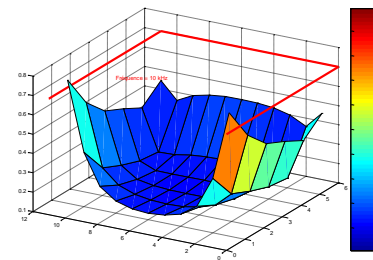
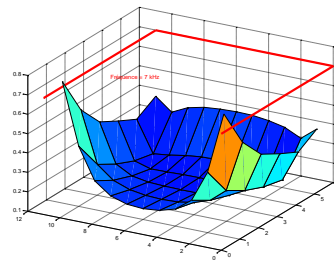
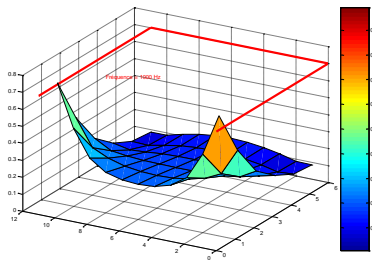


Répartition des courants

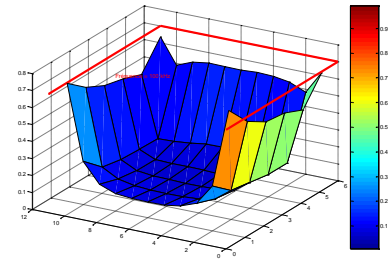
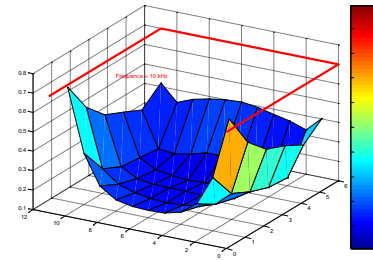
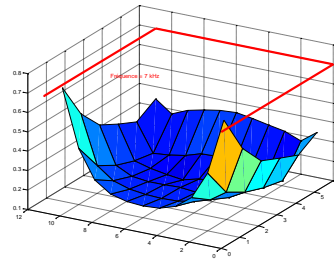
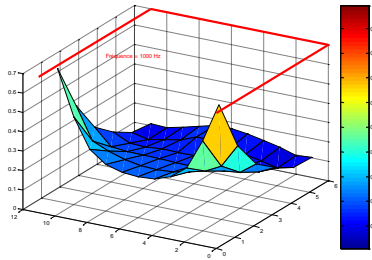
Mesure

# Les cas tests : comparaison mesure-simulation

## Simulations



## Mesures



1kHz

7kHz

10kHz

100kHz

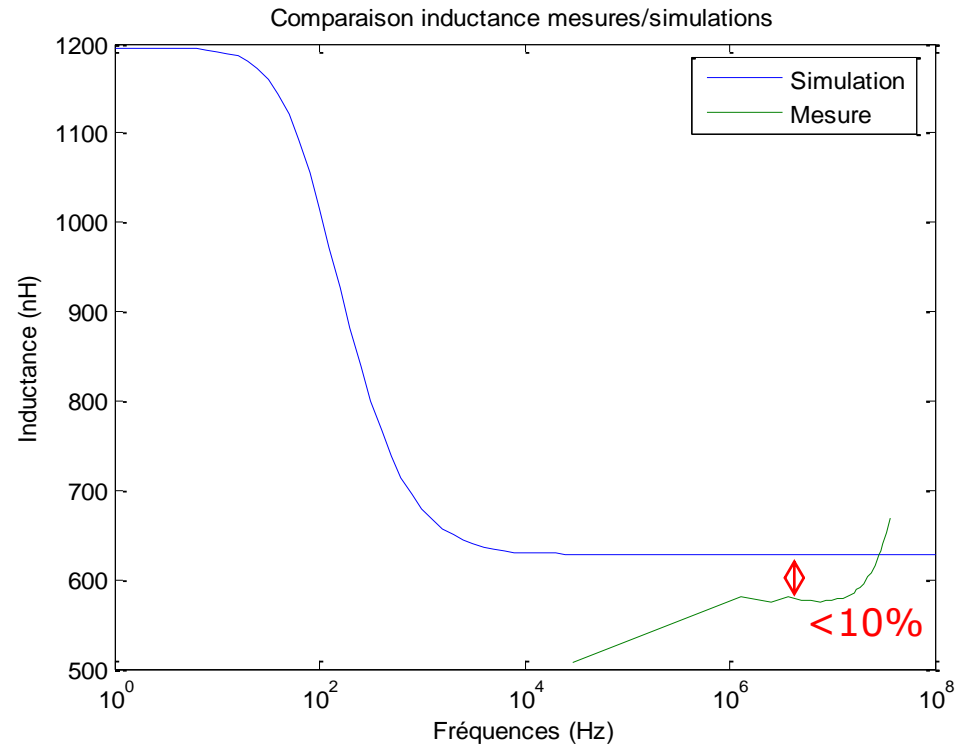
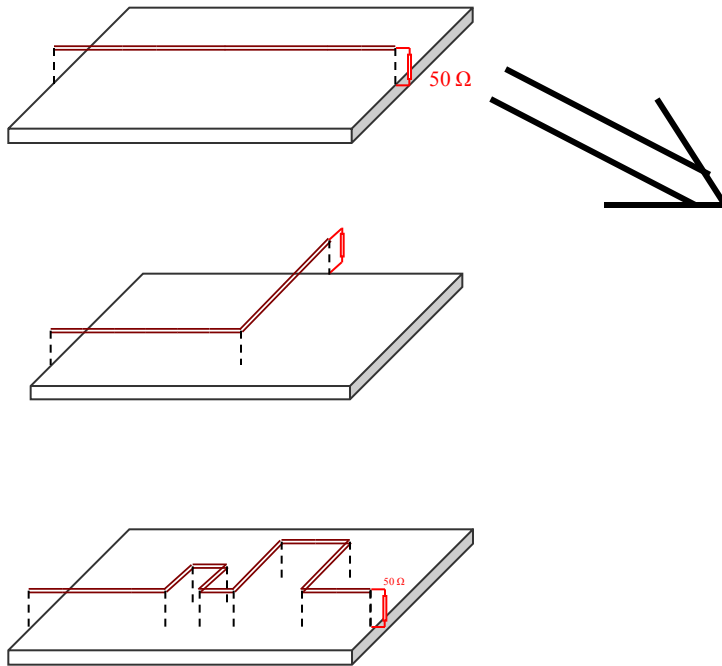
# Les cas tests : Bilan sur la masse grillagée

---

- ❑ Comportement fréquentiel identique en simulation et en mesure
  - La répartition des courants à plus hautes fréquences n'évolue pas
  - La répartition des courants à plus basses fréquences n'évolue pas
    - ❑ ⇒ Existence de « chemins de courant » privilégiés
  
- ❑ Les résultats obtenus avec le logiciel développé sont en très bonne concordance avec les mesures
  - Validation sur plan de masse

# Les cas tests : fil au-dessus d'un plan de masse

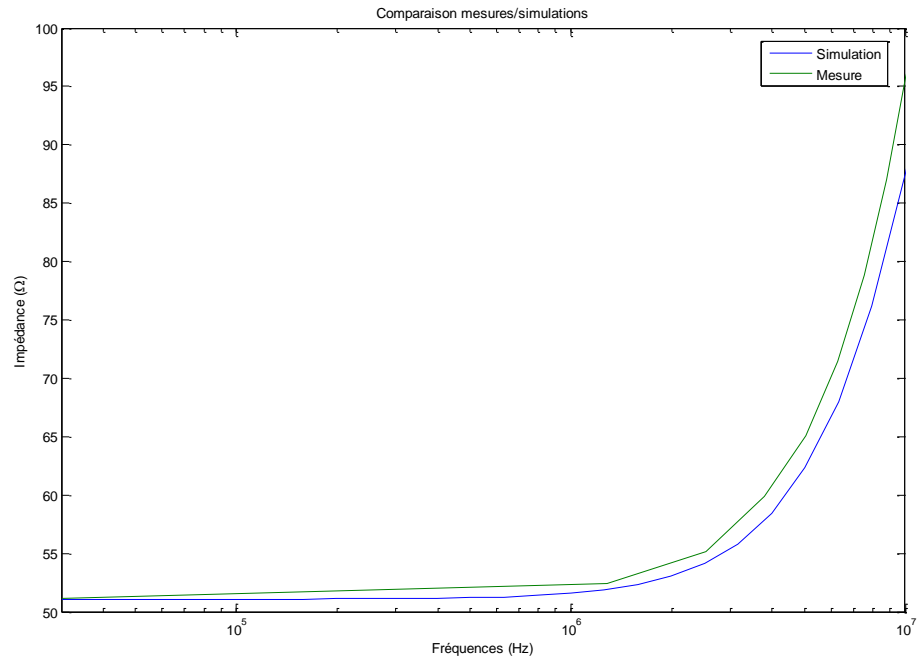
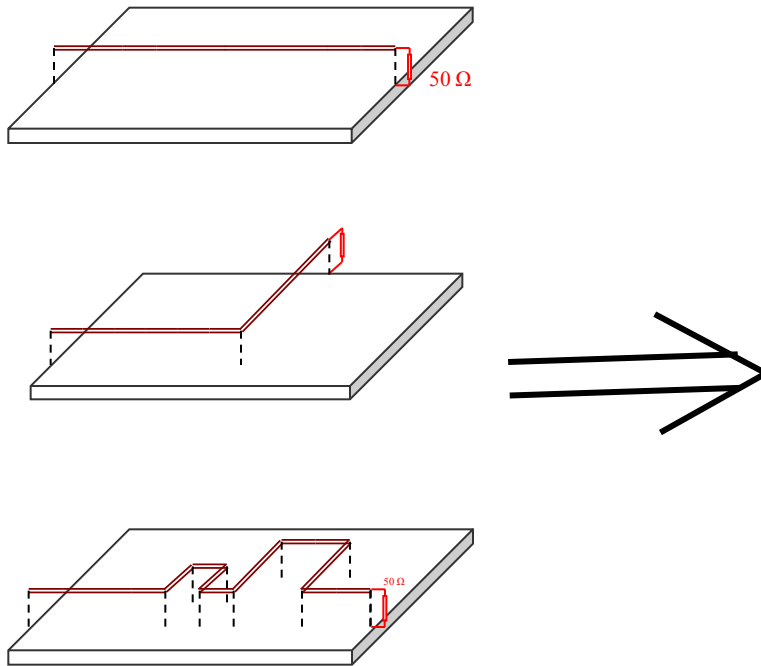
## Test sur plan de masse



Problème de mesure : L'appareil de mesure ne peut pas descendre suffisamment bas en fréquence

# Les cas tests : fil au-dessus d'un plan de masse

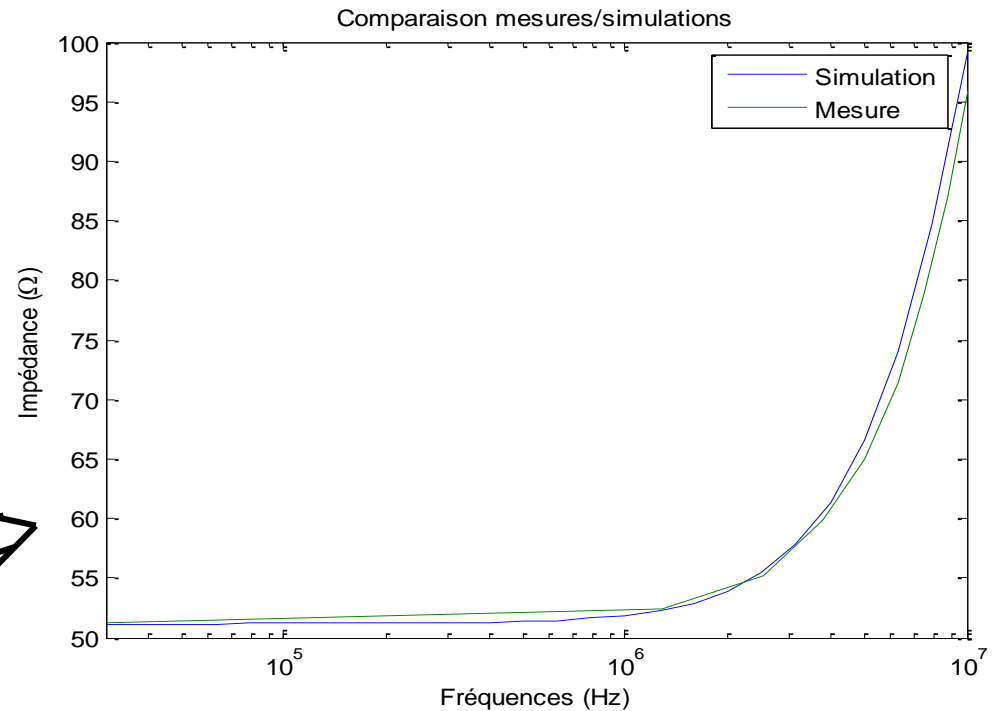
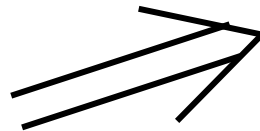
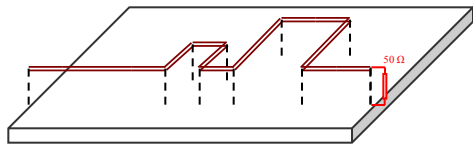
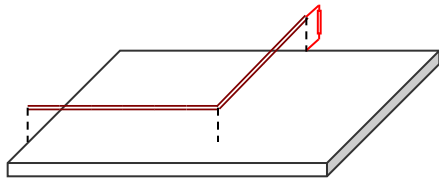
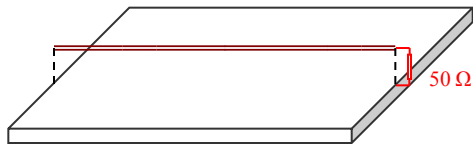
## Test sur plan de masse



Bonne concordance, maillage insuffisant dû au changement de direction

# Les cas tests : fil au-dessus d'un plan de masse

## Test sur plan de masse



Bonne concordance

# Les cas tests : bilan

---

- Validation de l'outil de simulation
  - Bonne concordance entre mesures et simulations
  - Difficulté à trouver des appareils de mesures adéquats
    - Impossible de constater le changement de parcours des courants sur les mesures
  - Liaison aisée avec Spice
  - Gain en rapidité par rapport à d'autres codes PEEC
  
- Application de l'outil sur un cas réel
  - Étude des oscillations présentes sur un véhicule automobile

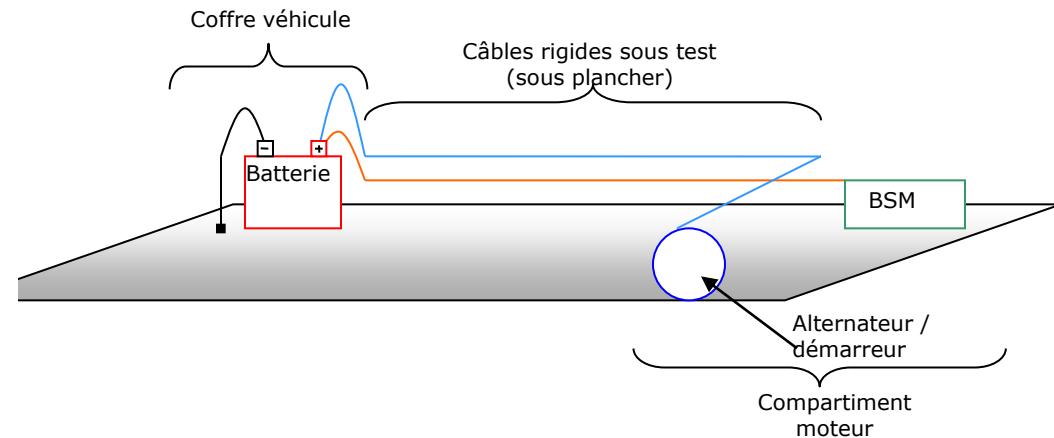
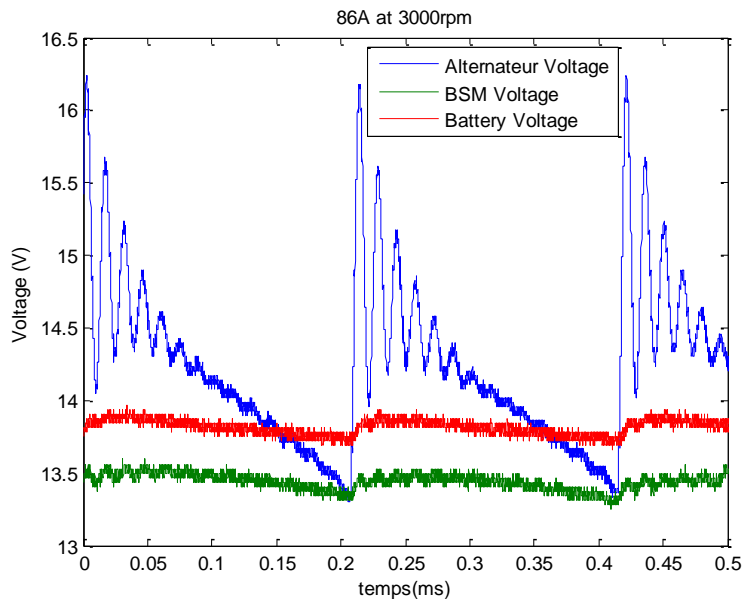
---

# Application Automobile Mesures fréquentielles



# Application automobile

- Compréhension des phénomènes créant les oscillations aux bornes d'un bus-barre



- Le facteur le plus difficile à maîtriser est le bus barre lui-même
  - Mesures spécifiques sur véhicule

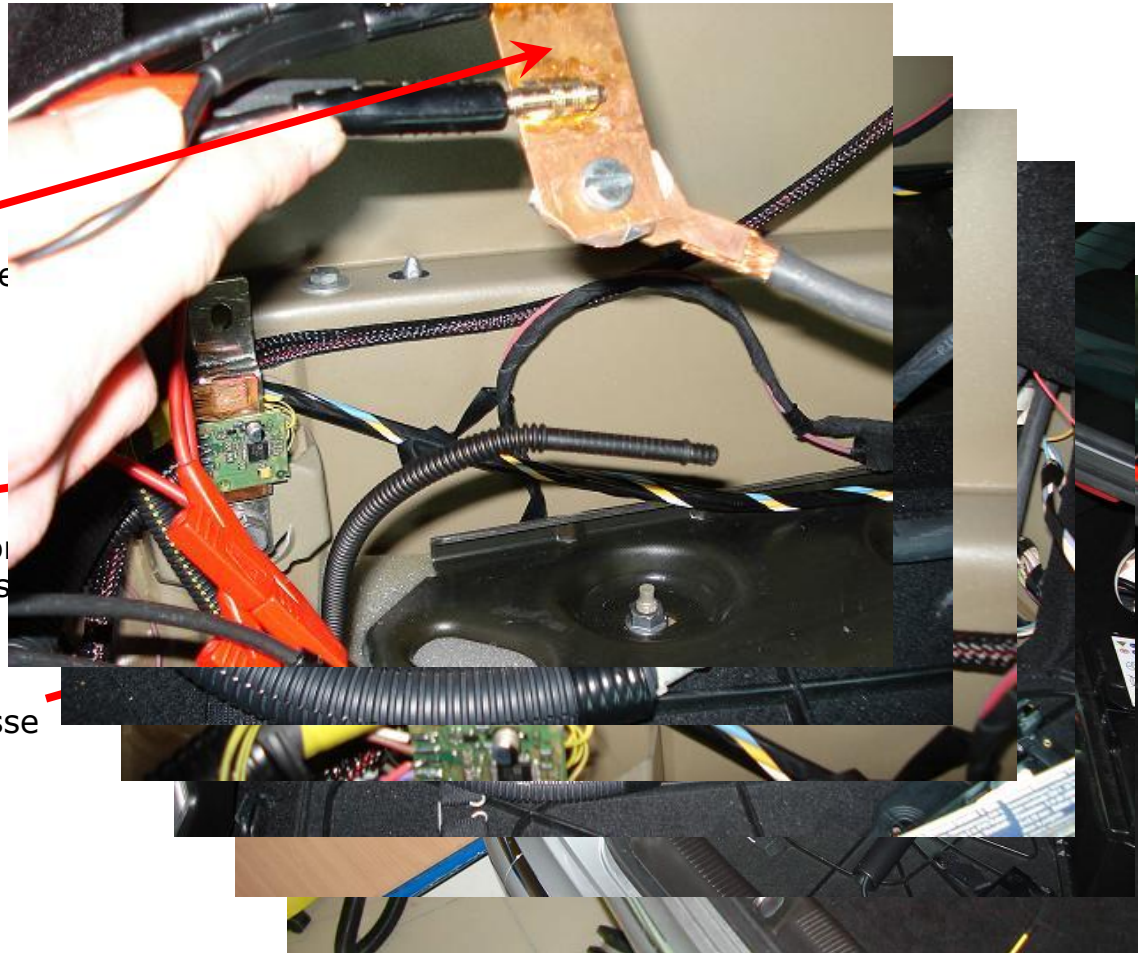
# Mesures Fréquentielles : le set-up

## □ Mesures fréquentielles sur véhicule

Connexion sur fil BSM  
Position de la batterie à l'origine

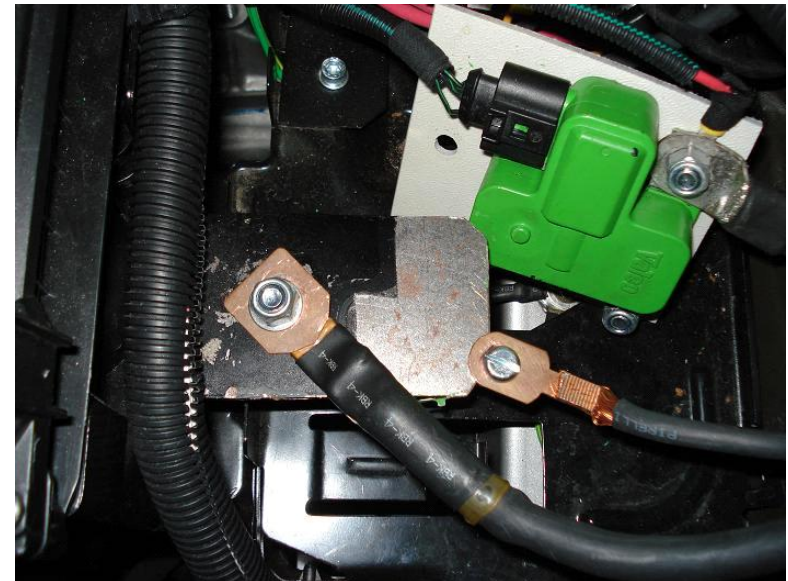
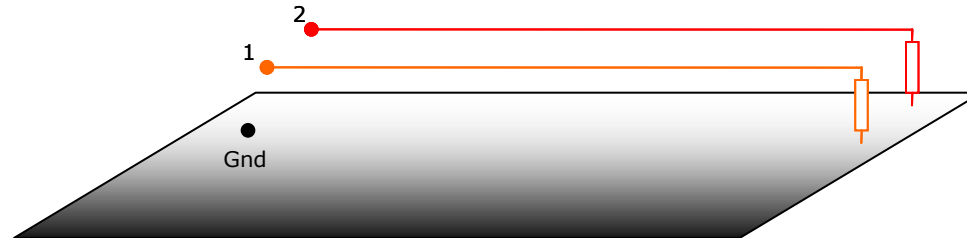
On enlève la batterie et on place  
un analyseur d'impédance à sa  
place  
les connexions à la batterie sont  
remplacées par des connexions  
spécifiques à l'analyseur

Connexion à la masse



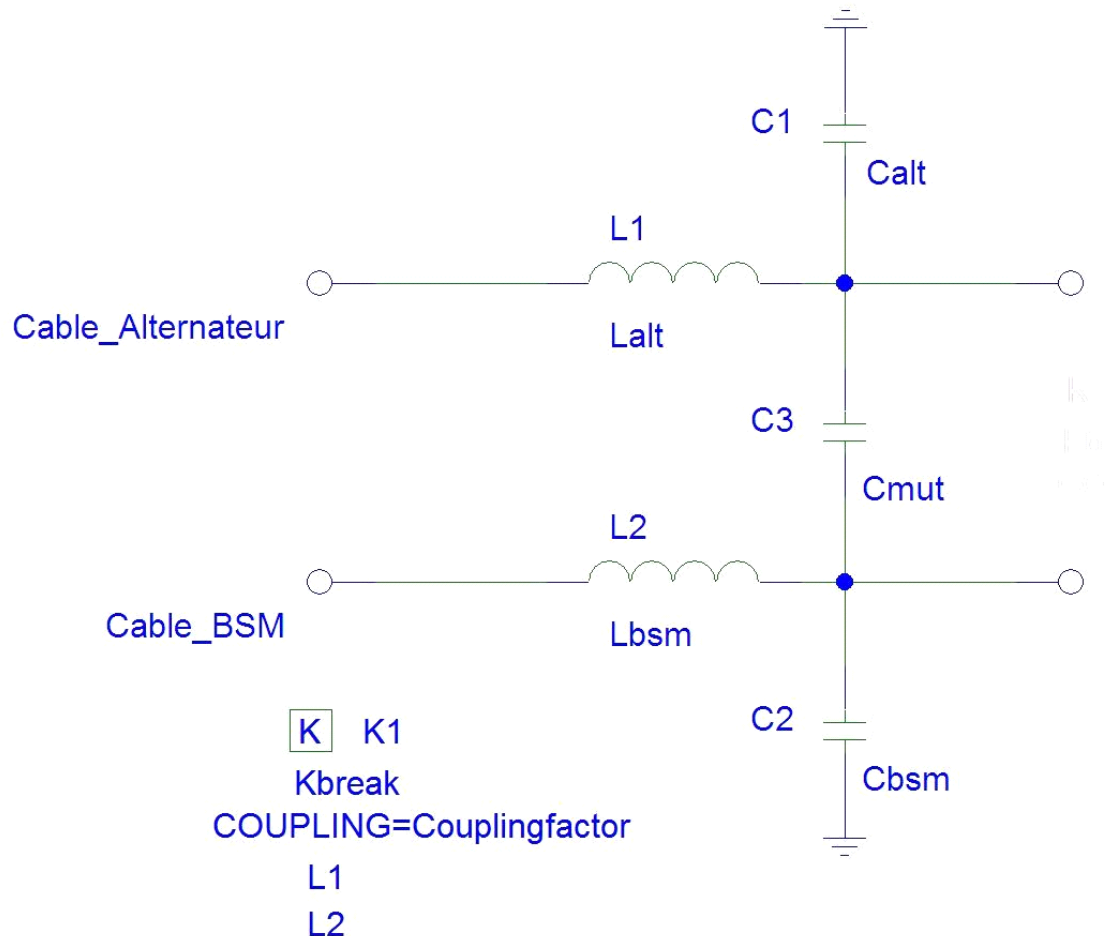
# Mesures Fréquentielles : la méthodologie

- Changement des charges de terminaison du côté moteur



# Mesures Fréquentielles : la méthodologie

- Changement des charges de terminaison du côté moteur



# Mesures Fréquentielles : bilan

---

## □ Difficultés rencontrées

- Accès difficile sur les différentes parties
- Contacts « défectueux »
- Capacités extrêmement faibles (quelques centaines de picofarad au plus)



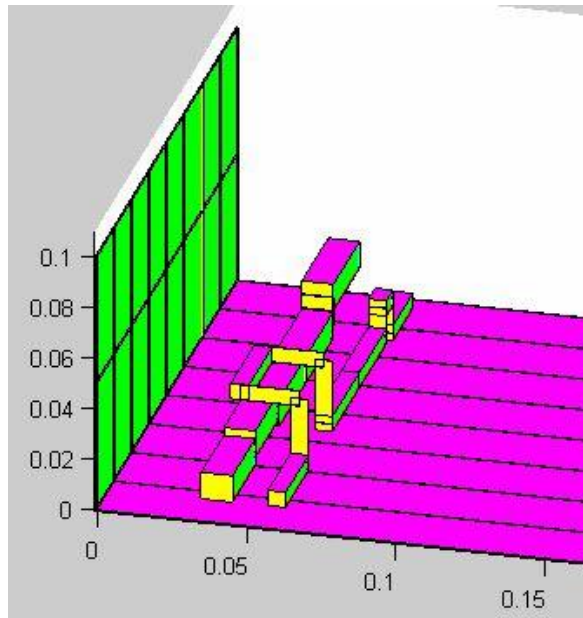
# Simulations fréquentielles : les contraintes

---

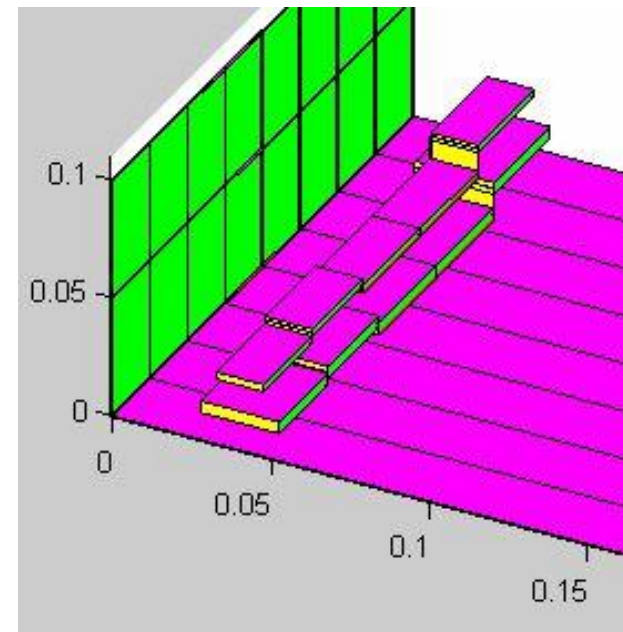
- ❑ Peu de vues en coupe
- ❑ Position relative des fils inconnue
- ❑ Faisceau alternateur inconnu
- ❑ Carrosserie supposée parfaite (sans défaut)  
⇒ Hypothèses sur tous les paramètres inconnus
- ❑ Nécessité de connaître les valeurs des condensateurs

# Simulations fréquentielles : modèle inductif

- Définitions graphiques pour les bus-barres (PEEC)



Bus barre circulaire (celui mesuré)

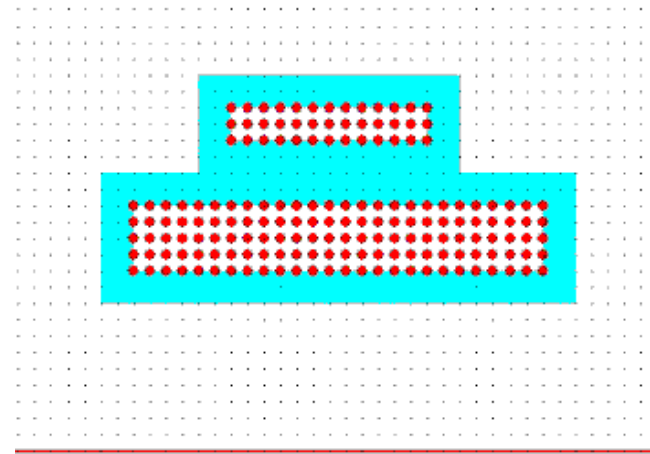
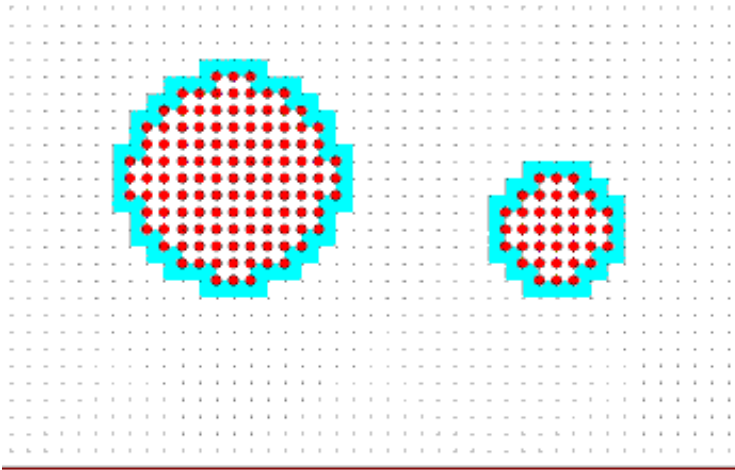


Bus barre plat



# Simulations fréquentielles : modèle capacitif

- Définitions graphiques pour les bus-barres (FD2D)

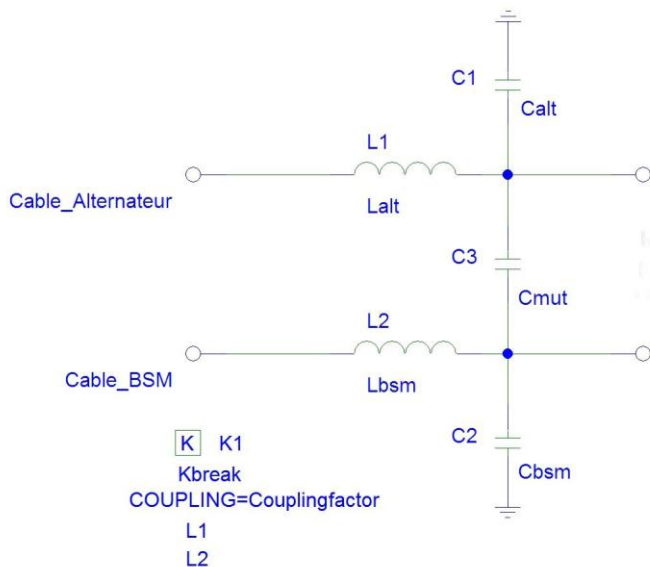


Bus barre circulaire (celui mesuré)

Bus barre plat

# Simulations fréquentielles : le schéma électrique

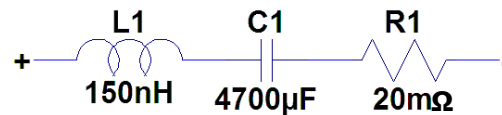
- Application de la même approche qu'en mesure pour obtenir le schéma équivalent



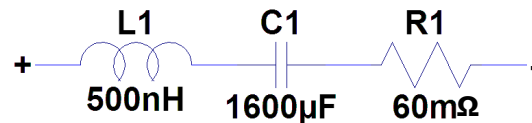
Valeur	Mesure	Simulation
<b>Inductance fil BSM</b>	<b>2,73μH</b>	<b>2,83μH</b>
<b>Inductance fil Alternateur</b>	<b>2,31μH</b>	<b>2,28μH</b>
<b>Mutuelle entre fils</b>	<b>1,03μH (k=41%)</b>	<b>0,9μH (k=35,4%)</b>
<b>Capacité entre fil BSM et masse</b>	<b>142pF</b>	<b>139pF</b>
<b>Capacité entre fil Alternateur et masse</b>	<b>197pF</b>	<b>200pF</b>
<b>Capacité entre fils</b>	<b>15pF</b>	<b>79pF</b>

# Simulations fréquentielles : terminaisons

- Modélisations complémentaires
  - BSM (condensateur de filtrage intégré)



- Batterie (comportement proche d'un condensateur)

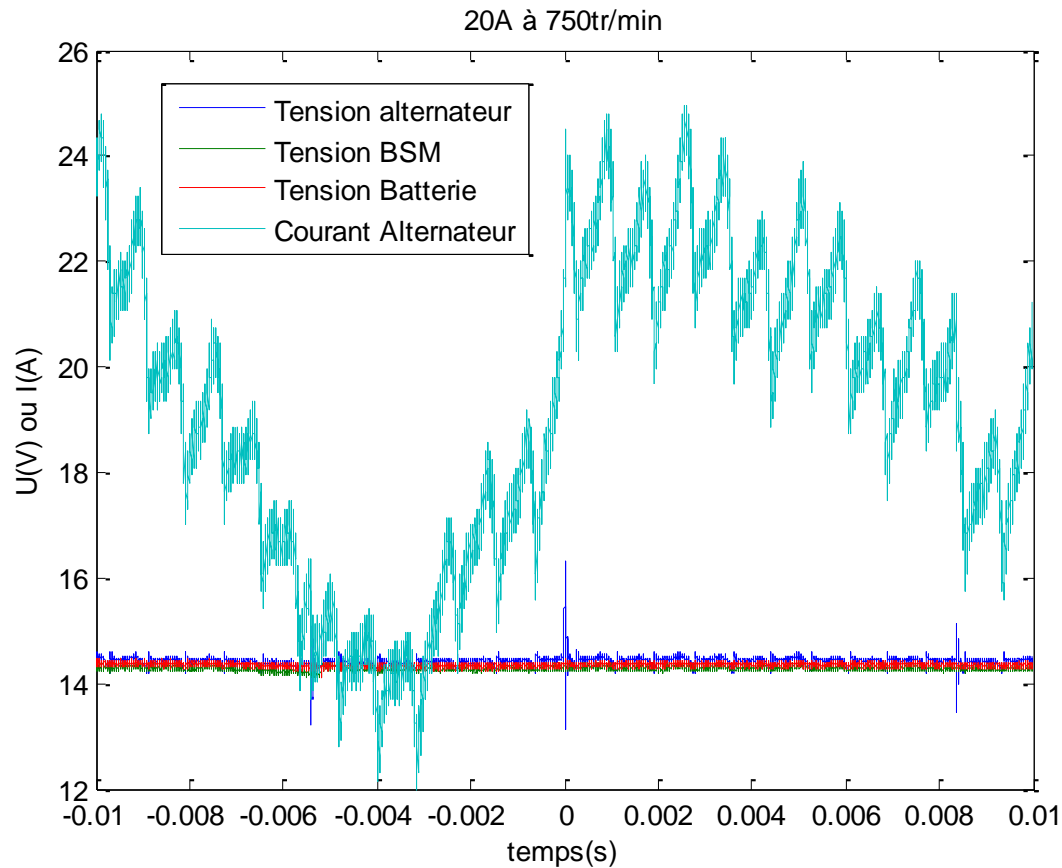


---

# Application Automobile Mesures Temporelles

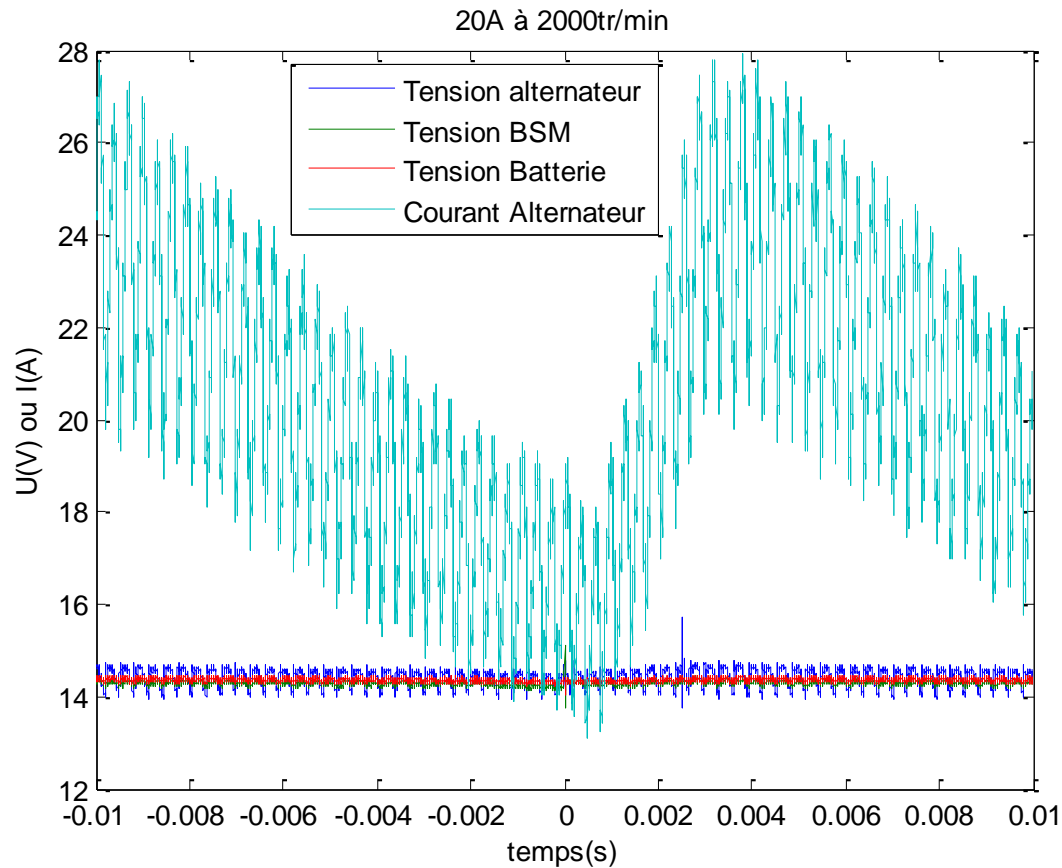
# Mesures Temporelles : mesures brutes

- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants



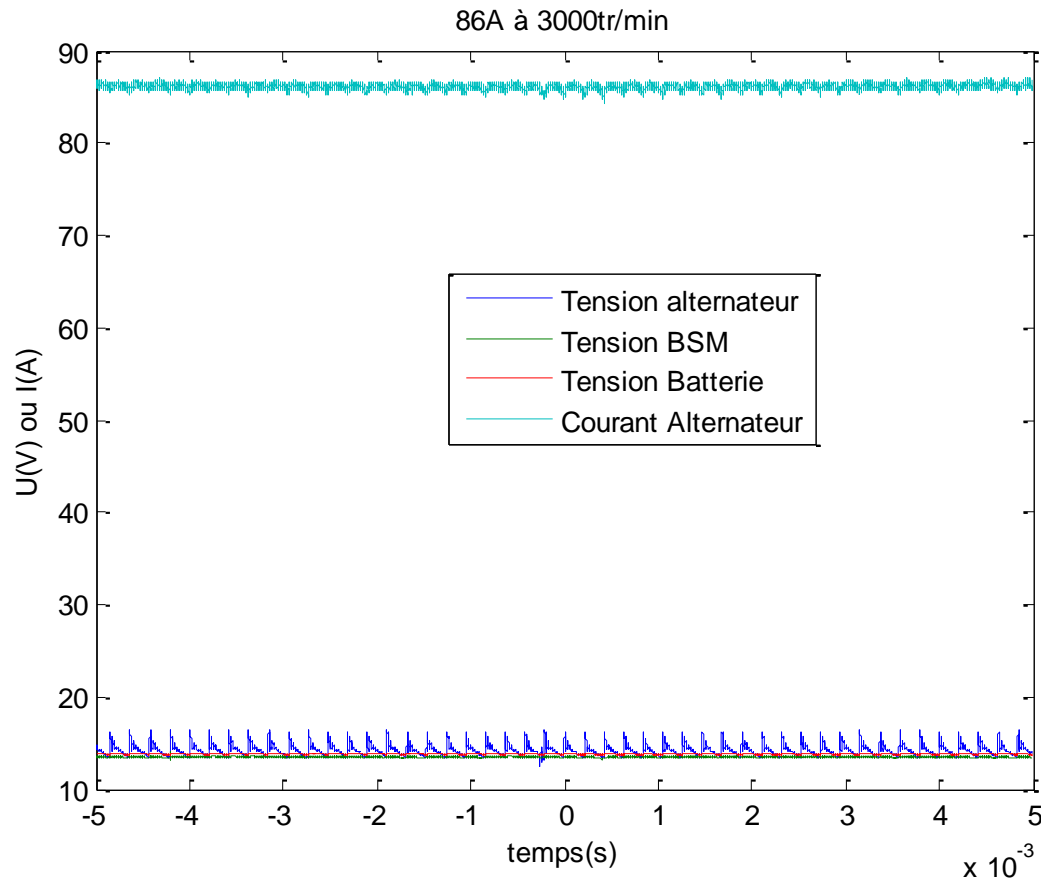
# Mesures Temporelles : mesures brutes

- Mesures selon régimes moteurs et courants



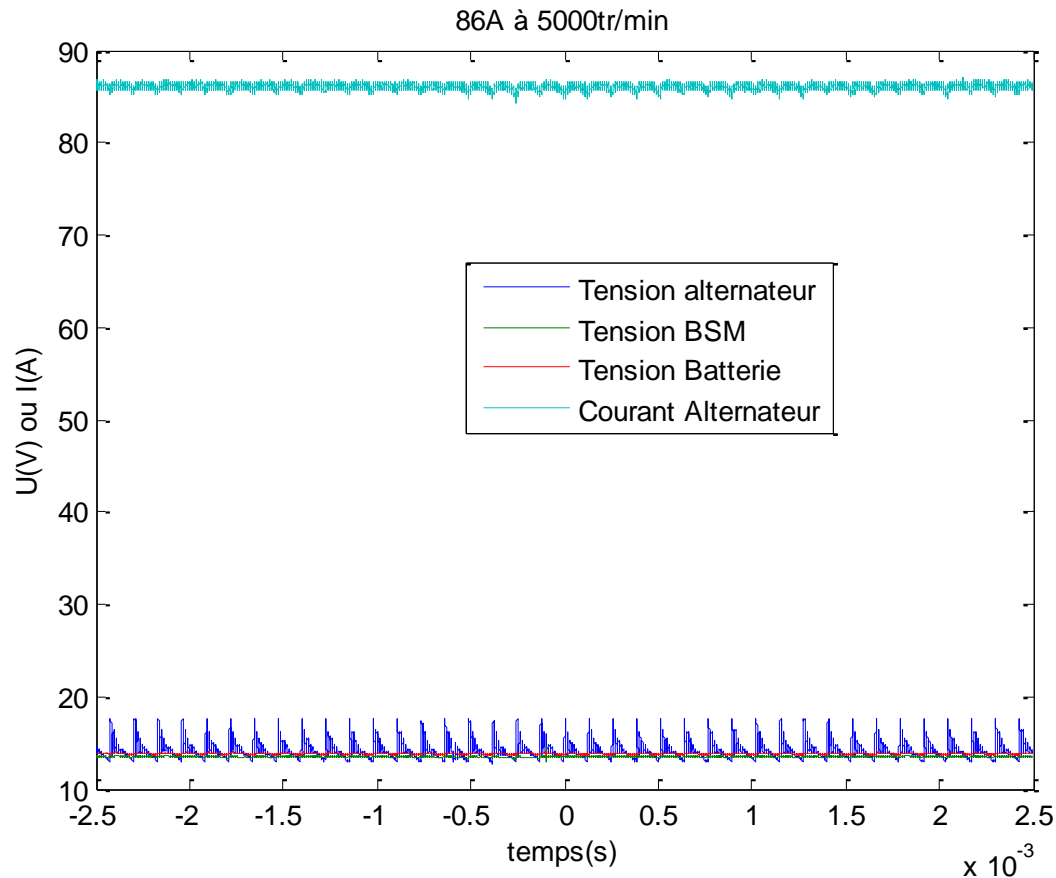
# Mesures Temporelles : mesures brutes

- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants



# Mesures Temporelles : mesures brutes

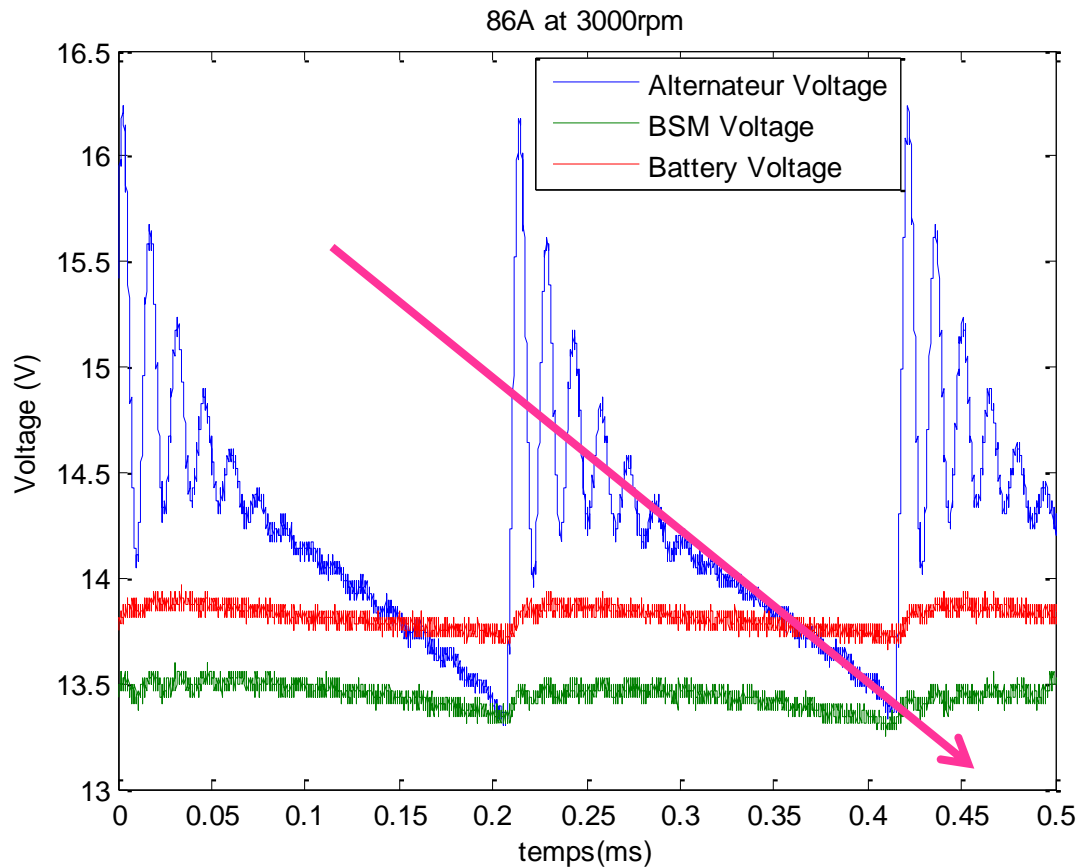
- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants





# Mesures Temporelles : constat

- Point commun des mesures : des oscillations amorties



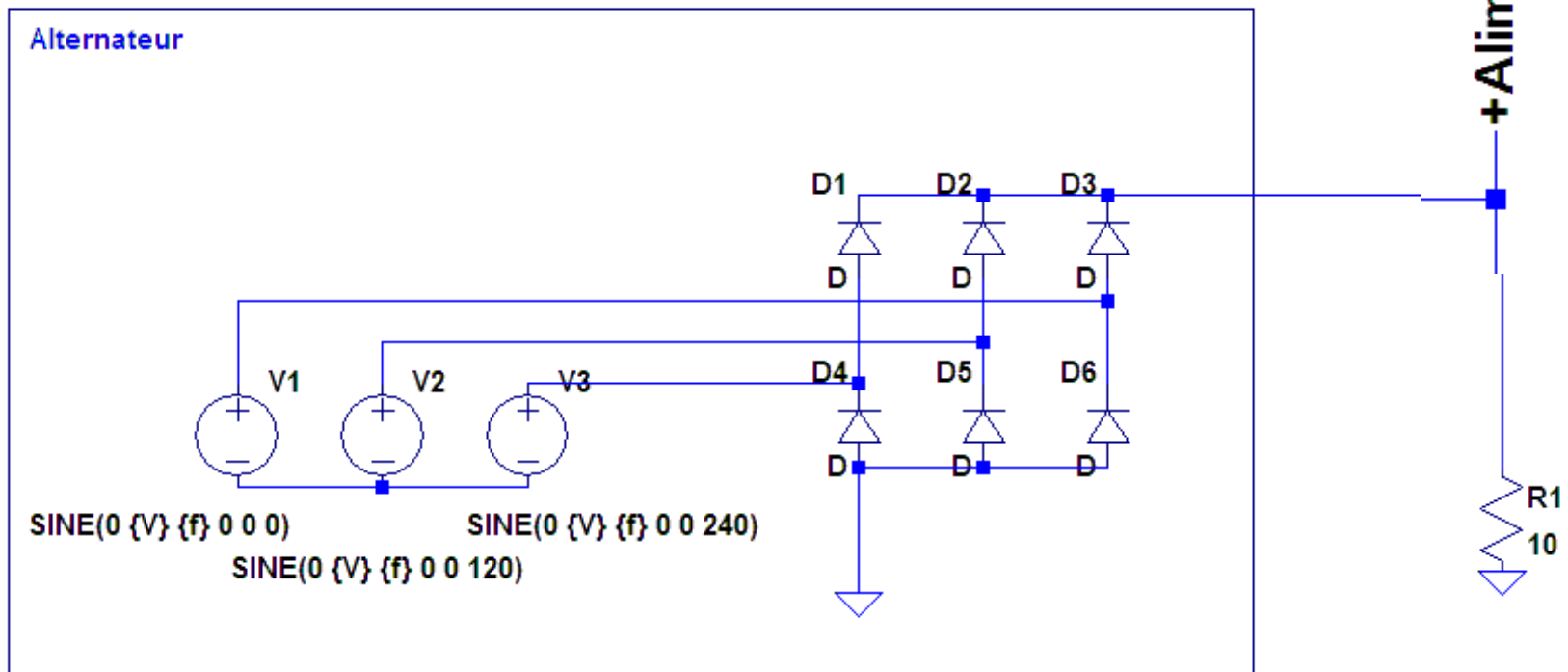
une oscillation amortie apparaît

L'alternateur en est la source

→ Création d'un équivalent électrique

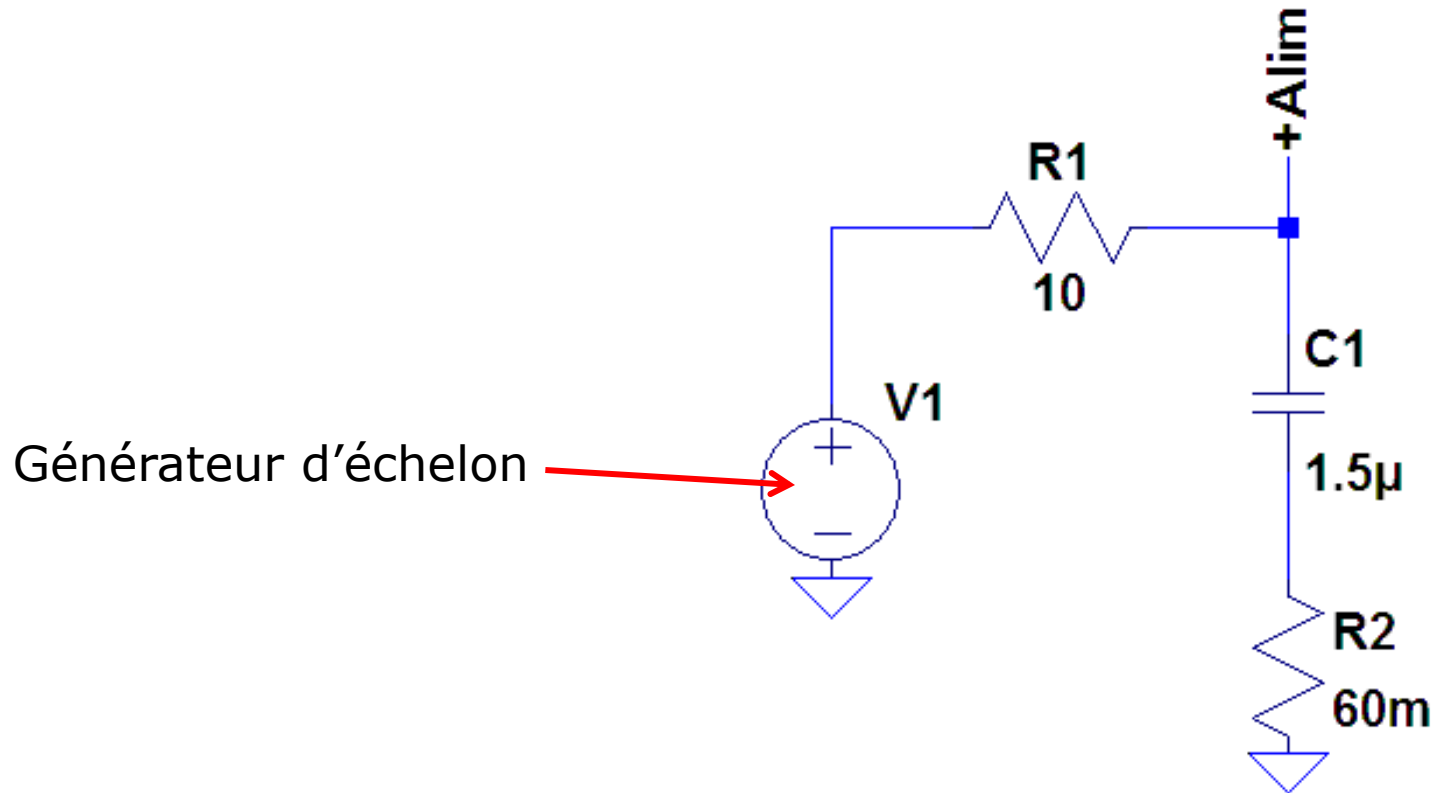
# Simulations Temporelles : l'alternateur (1)

- Source équivalente à un alternateur



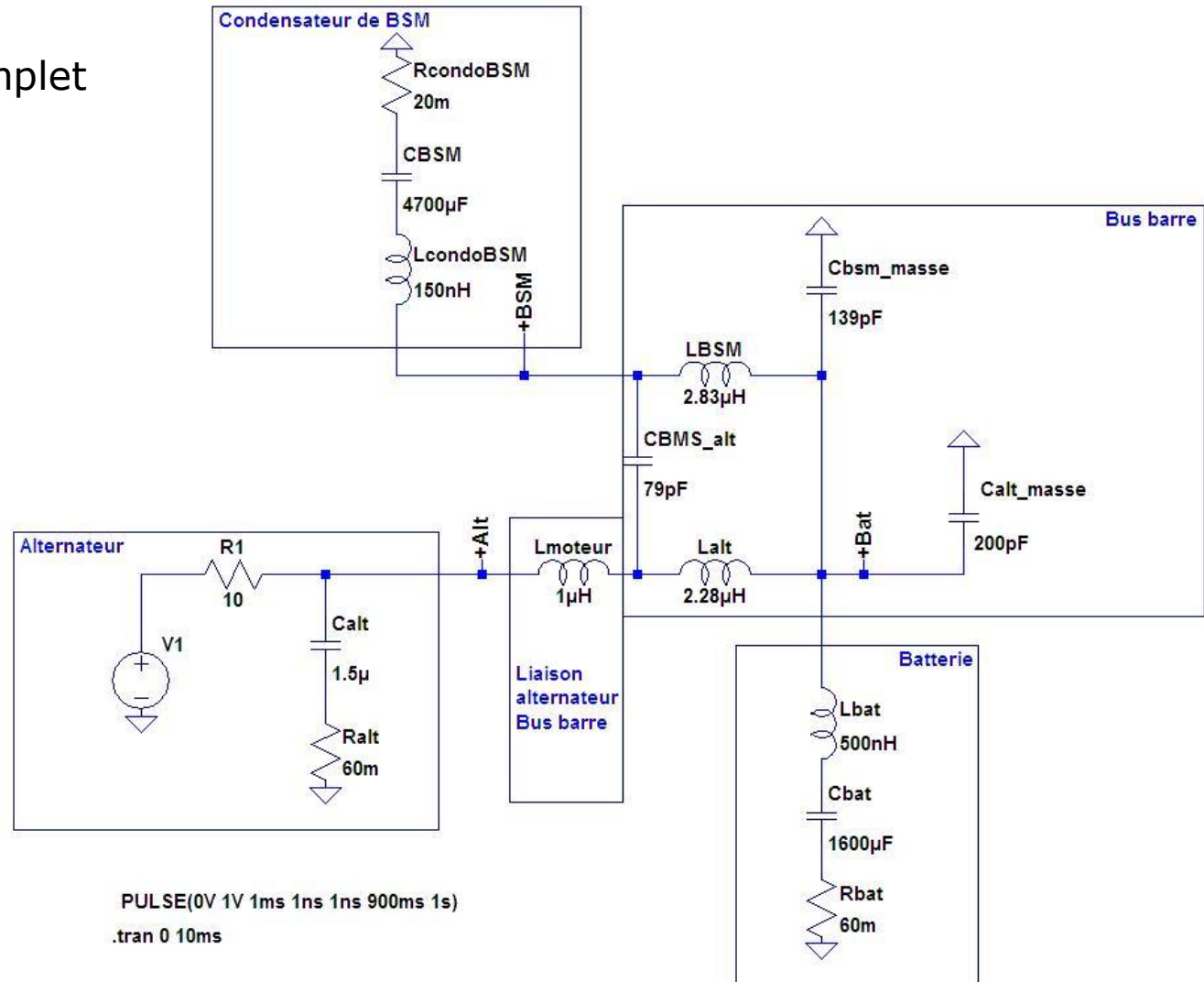
# Simulations Temporelles : l'alternateur (2)

- Source équivalente à un alternateur



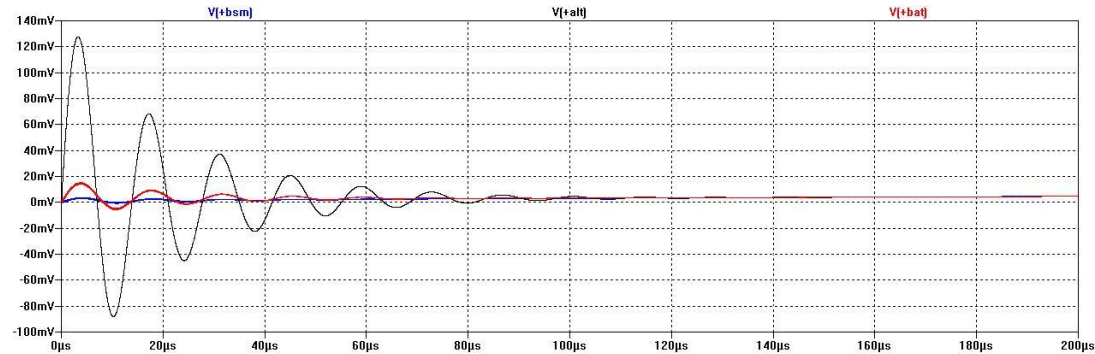
# Simulations Temporelles

## Montage complet



# Simulations Temporelles

## □ Résultats :



## □ Obtention :

- Tensions maximales
- Fréquence d'oscillation

## □ Possibilités

- Tester sur des types de profil virtuel

Modèle	Tension alternateur pour 1V	Tension parasite BSM	Ratio
Bus barre d'origine	127 mV	3,5 mV	2,76 %
Bus barre plat à 9 mm	119 mV	4,5 mV	3,78 %
Bus barre plat à 5 mm	114 mV	4,5 mV	3,95 %

---

# Conclusion / Perspectives

# Conclusion (1)

---

- ❑ Réalisation d'un logiciel de simulation
  - Basé sur la méthode PEEC
    - ❑ Permet de prendre en compte les phénomènes liés aux plans de masse
  - Permet des calculs rapides
    - ❑ Optimisation des calculs par un pré conditionnement matriciel
  - S'interface avec des logiciels circuits usuels
    - ❑ Spice est utilisé par le code

# Conclusion (2)

---

- Méthodologie de mesures fréquentielles
  - Extraction de paramètres équivalents de circuit
    - Condensateurs
    - Batteries
    - Faisceaux
- Méthodologie de mesures temporelles
  - Extraction de paramètres équivalents de circuit
    - Alternateur



# Conclusion (3)

---

- Possibilité d'avoir une estimation des perturbations en fonction de paramètres géométriques
  - Validation de nouvelles topologies
    - ▣ Comparaison entre topologies
  - Détermination de contraintes
    - ▣ Hauteur minimale
    - ▣ Taille de fil minimum ou maximum
    - ▣ ...

# Perspectives (1)

---

- Extension en fréquence des modèles générés
  - Prise en compte des effets capacitifs
    - Restriction de la simulation des plans de masse aux seuls parcours des courants
    - Application de condensateurs entre fil et parcours
  - Validation par mesure et simulation
    - Résultat très prometteur jusqu'à 800MHz pour un plan de masse de 1m\*2m
  - Thèse d'Islem YAHI (depuis septembre 2005)

# Perspectives (2)

---

- Obtenir les champs électromagnétiques rayonnés
  - Récupération des paramètres géométriques et des résultats de simulation
    - Calcul des champs proches
      - Champs électriques
      - Champs magnétiques
    - Calcul des champs lointains
  - Validation par des mesures sur banc de mesure champ proche
    - Utilisation du banc champ proche de grande dimension de l'IRSEEM
  - Thèse de Wissem YAHYAOUI (depuis septembre 2007)

- 
- Merci de votre attention...