

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

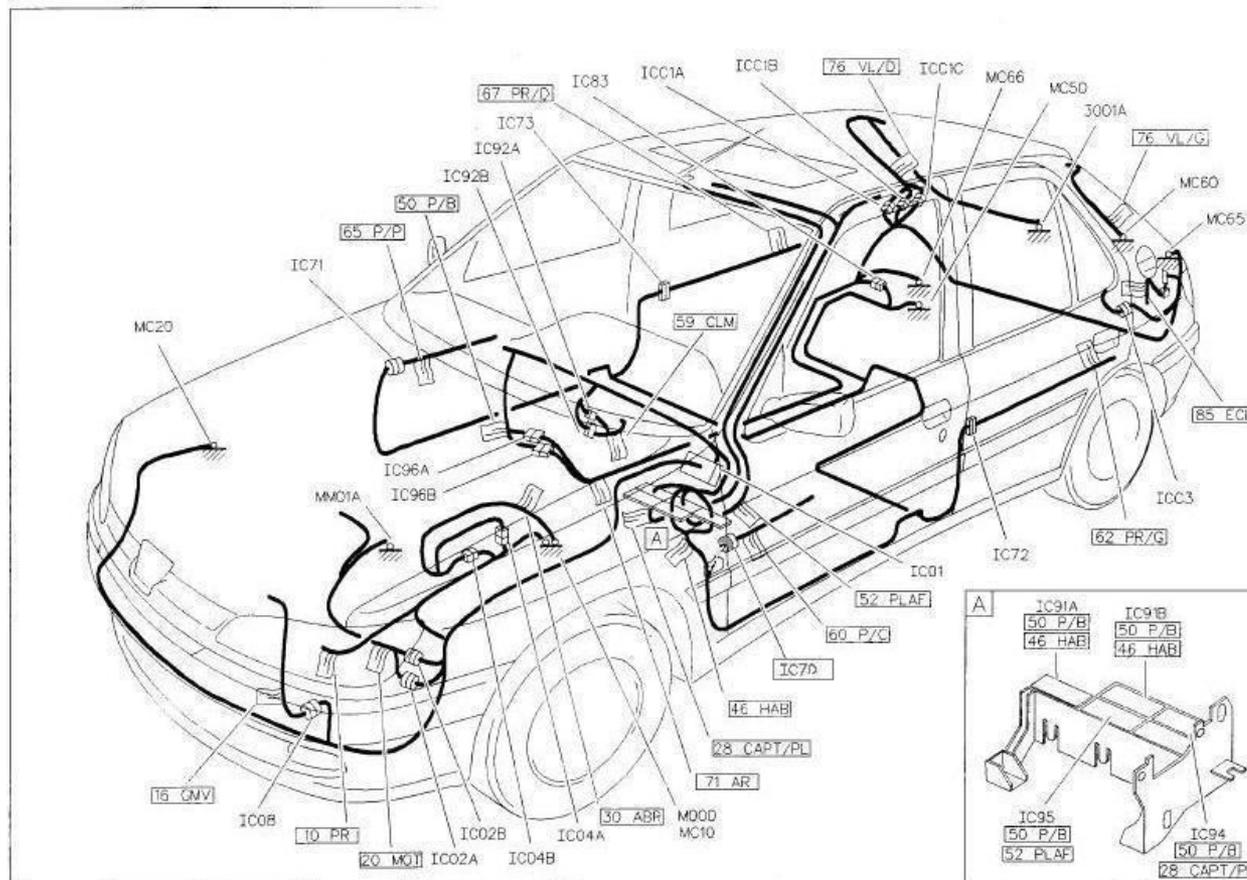
INTRODUCTION

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 communiquant, 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

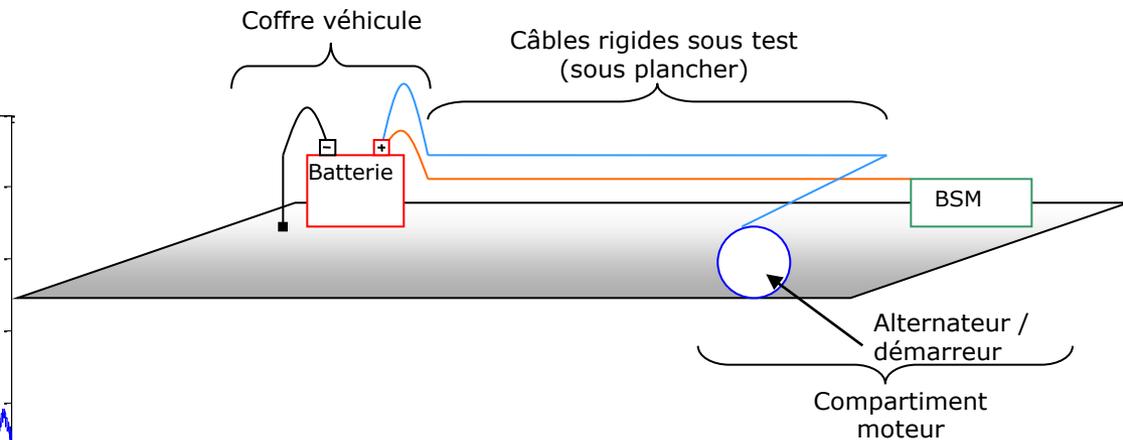
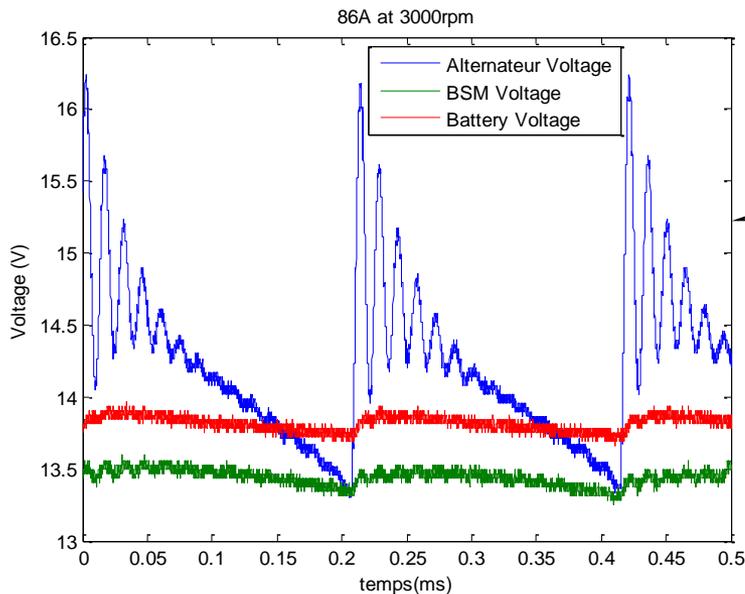
- Nouveaux perturbateurs
 - Lampe à iode, « 14+X », ...
 - Mise à jours d'anciens perturbateurs
 - Essuie-glace

- 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

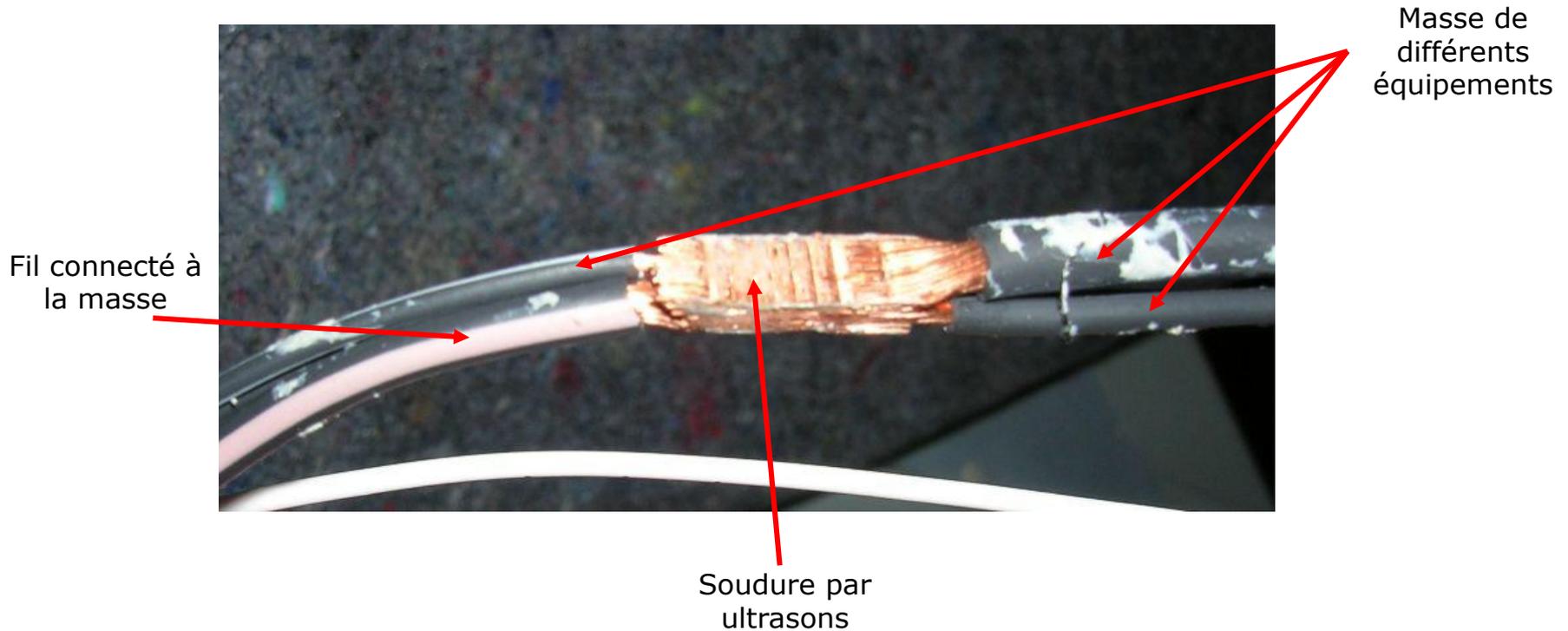
- Ce terme désigne
 - Les parties métalliques de la carrosserie
 - Les fils reliés à ces parties métalliques
 - La cosse (généralement négative) de la batterie

- Usages de base
 - Référence de tension
 - Conducteur de retour

- Aspect économique important

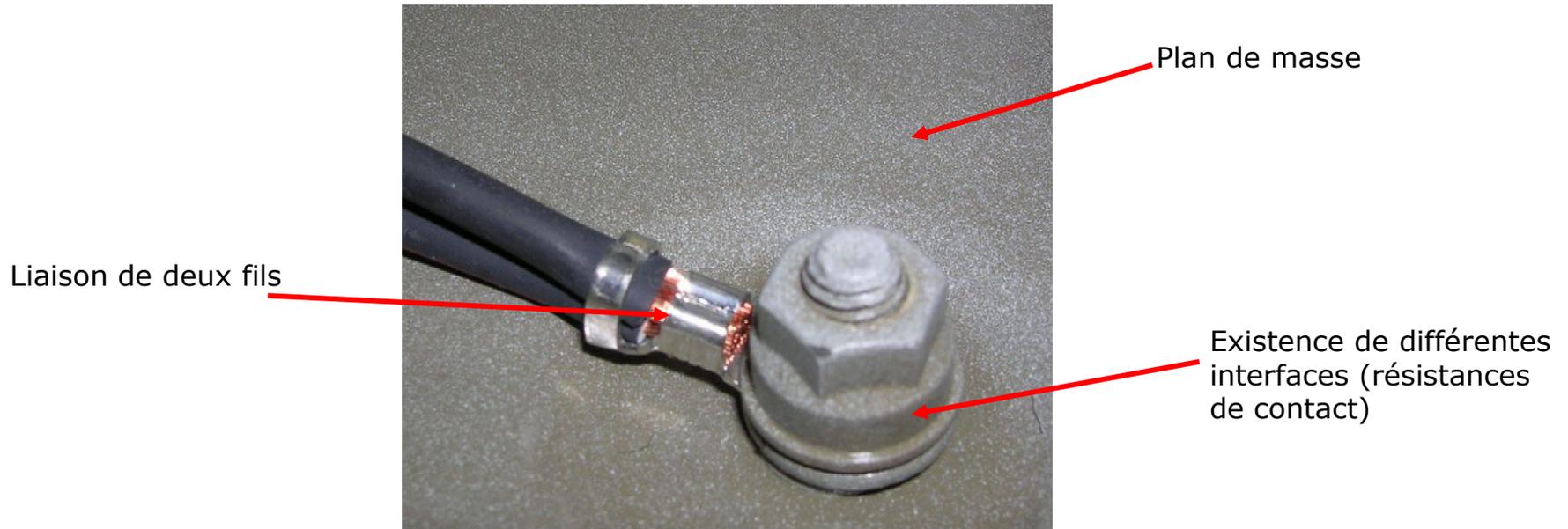
La masse : Contrainte économique (1)

- 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

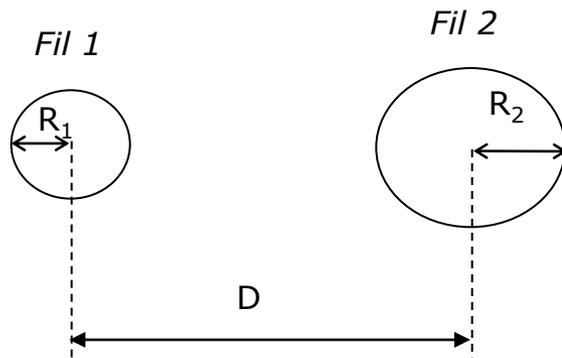
$$Z = \frac{\frac{1}{\sigma\delta}(1+j)}{\tanh\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\delta}\right)(1+j)\right]} \text{ avec } \begin{cases} \delta \text{ épaisseur de peau} \\ \sigma \text{ conductivité du matériau} \\ t \text{ épaisseur du matériau} \end{cases}$$

⇒ L'application de ces formules ne sera pas facile

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

Couplages capacitifs : expression

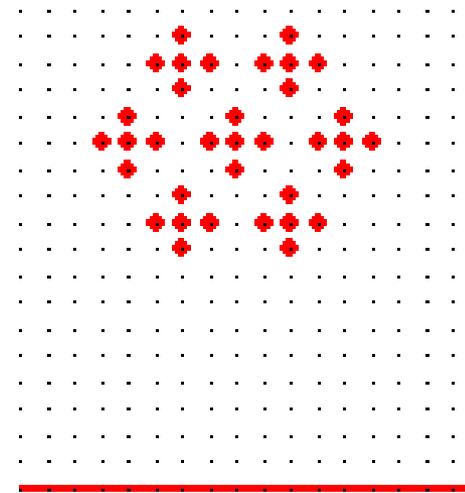
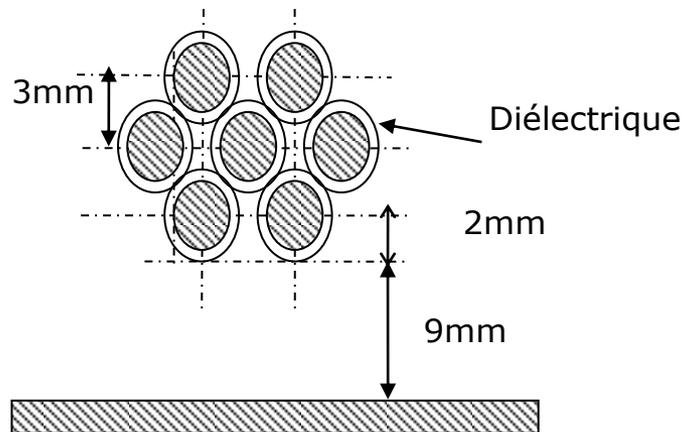
- Existence d'un couplage capacitif



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

Couplages capacitifs : Ordre de grandeur

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



Couplages capacitifs : Ordre de grandeur

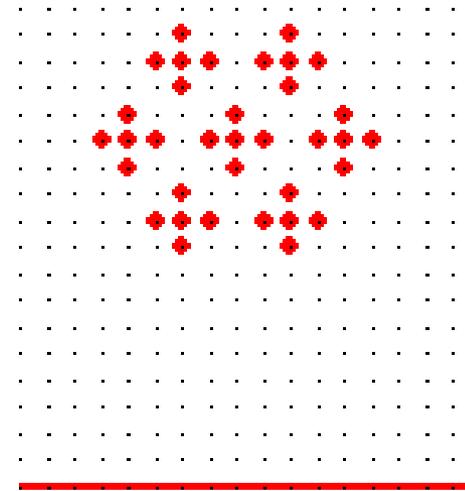
- ▣ Faisceau automobile à 7 fils
 - Application d'un logiciel de différences finies (FD2D)

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

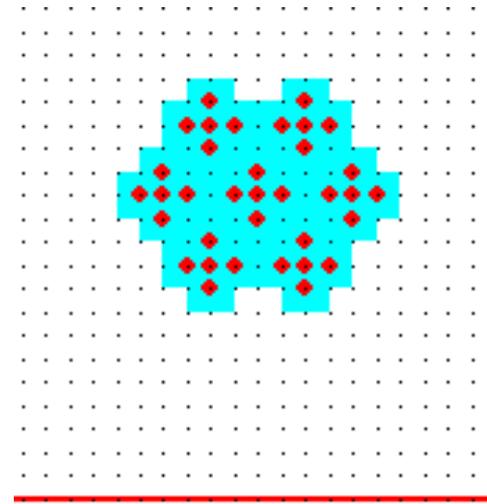
- ▣ Faisceau automobile à 7 fils
 - Application d'un logiciel de différences finies (FD2D)

Avec isolant :

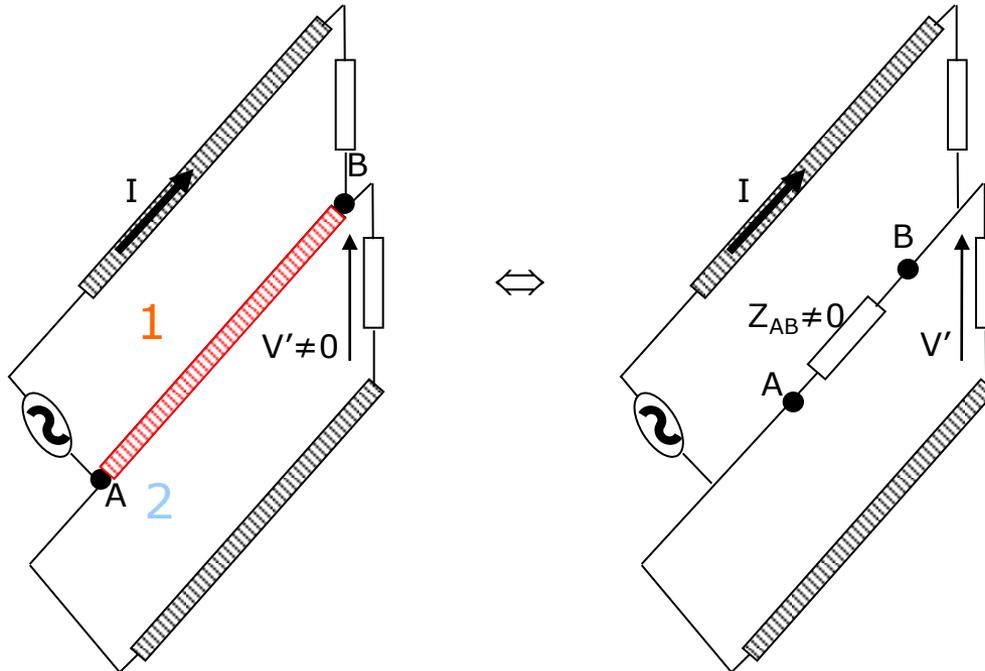
Fils extérieurs / masse : 5 pF/m

Entre fils accolés : 45 pF/m

Fil intérieur / masse : 0,15 pF/m



Couplages par impédance commune



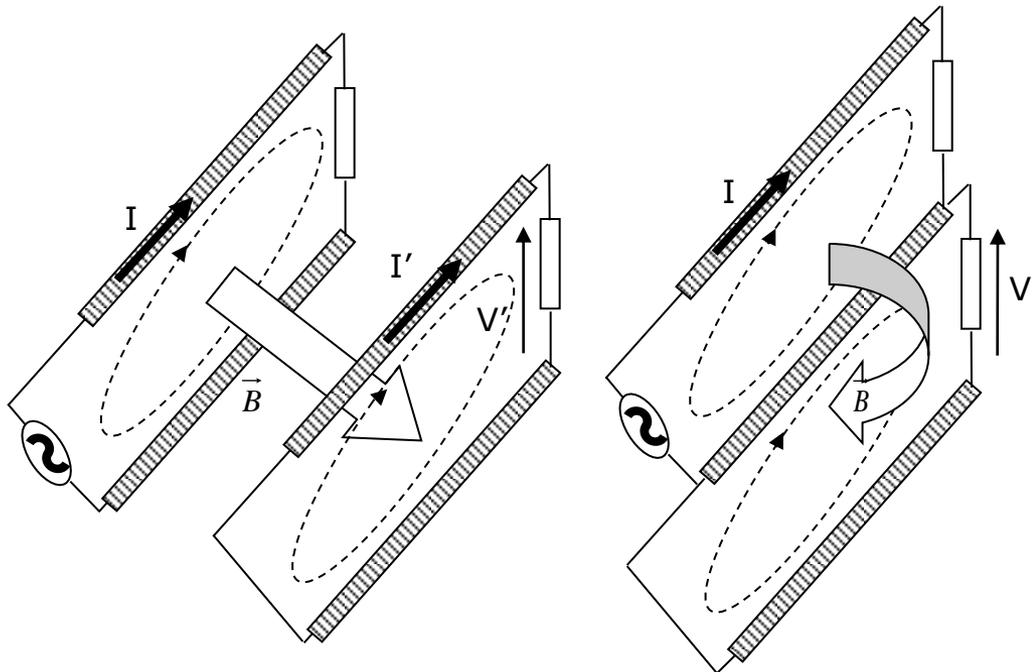
La boucle **1** dispose d'une partie commune avec le circuit **2**

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

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 $\approx 1\mu\text{H}/\text{m}$.
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

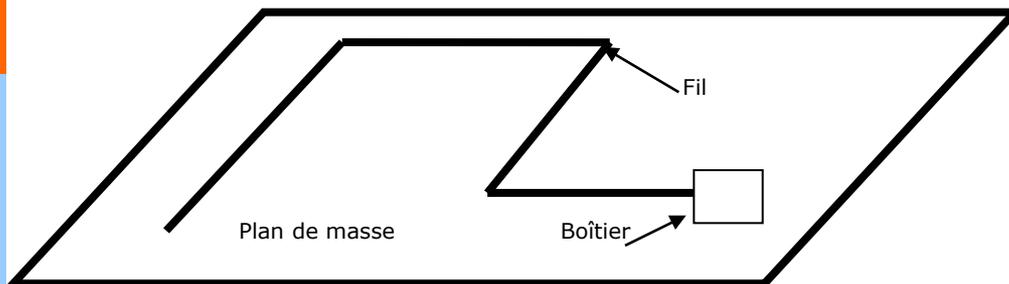
Méthodologie développée

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

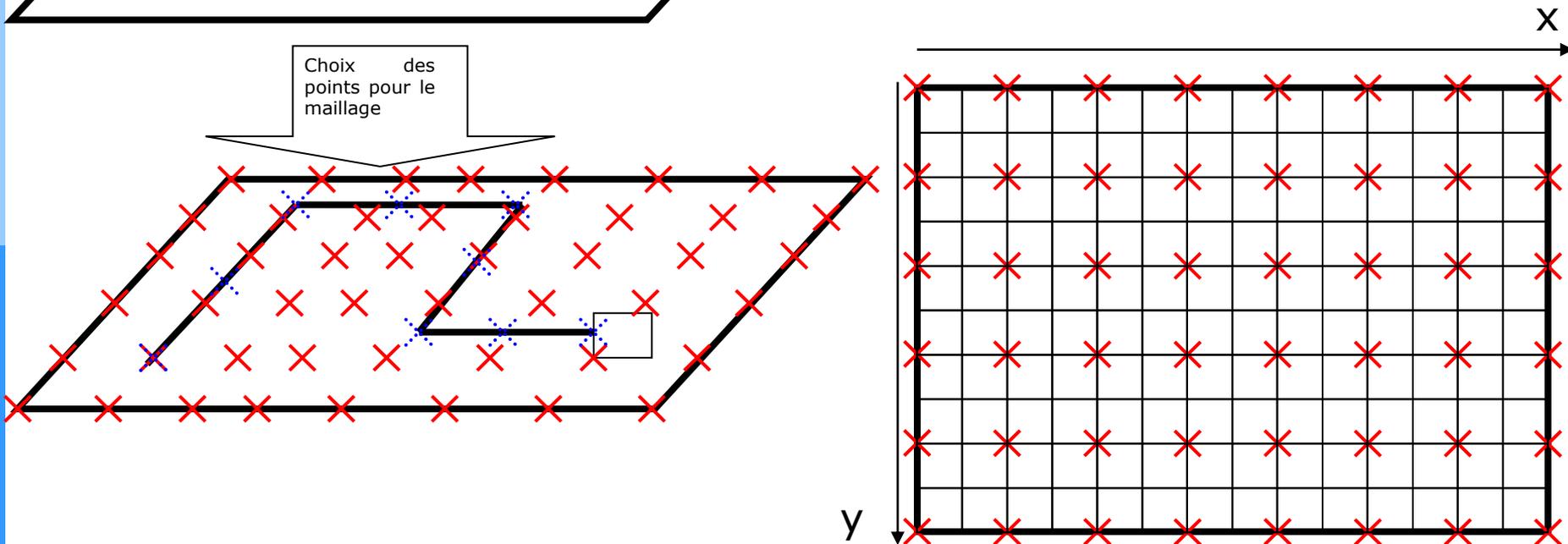
- Pour l'application de la méthode PEEC, on commence par positionner les nœuds où seront obtenus les résultats



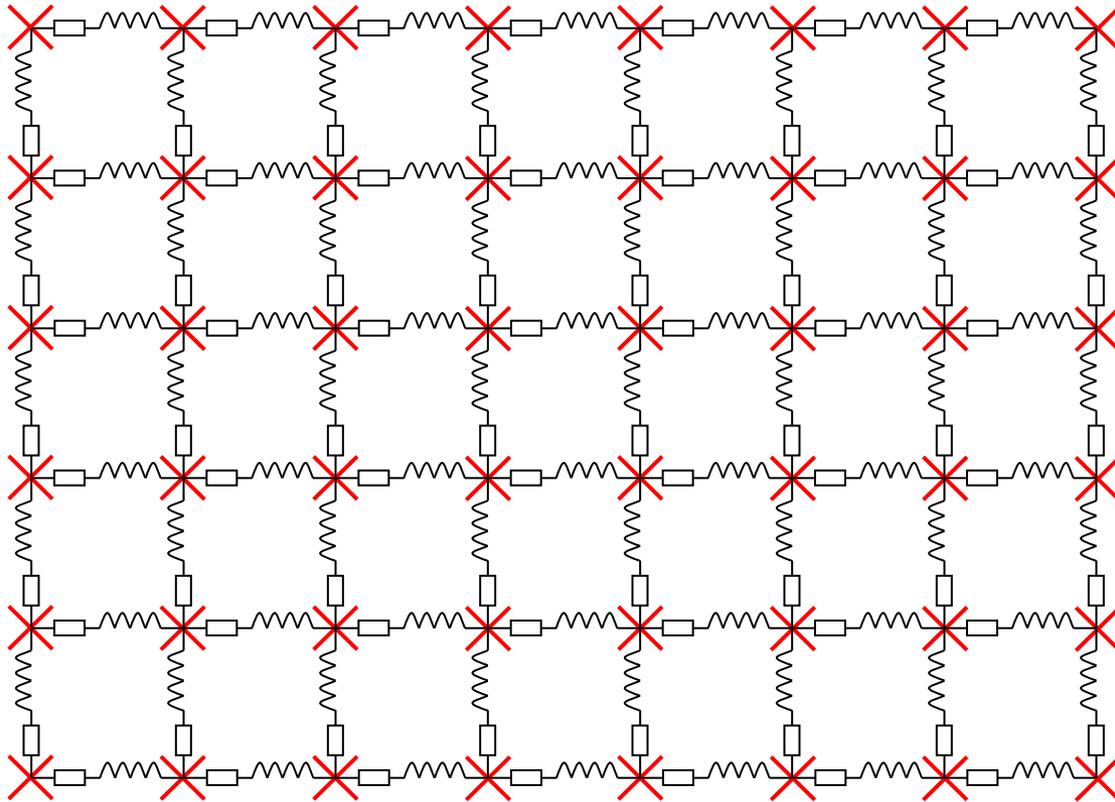
Ces nœuds servent de base à la décomposition en cellules de la structure

Selon l'axe des X

Et selon l'axe des Y



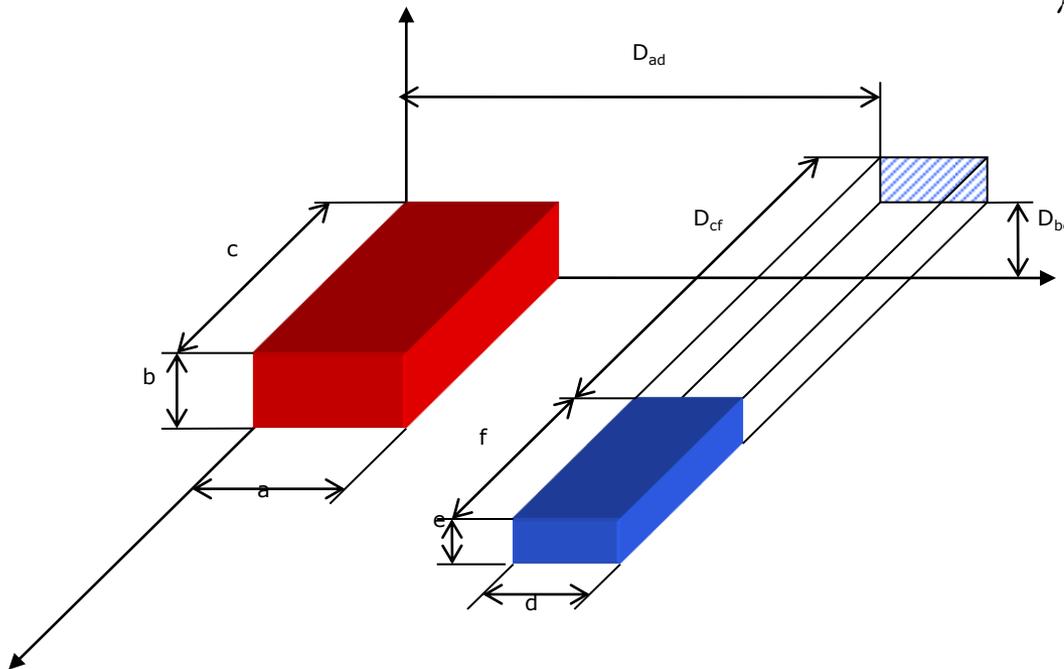
La Méthode PEEC : discrétisation



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 :

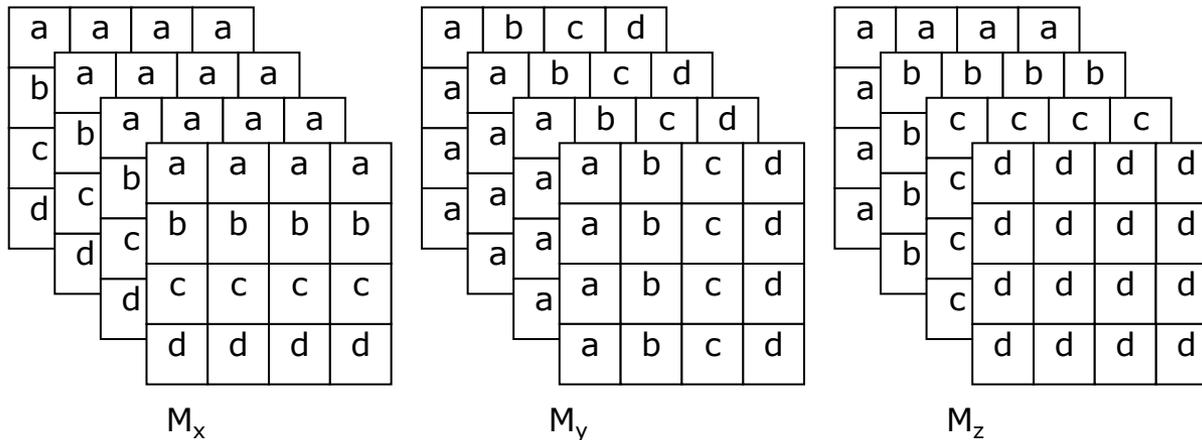
$$l_{p\gamma in} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 (-1)^{i+j+k+1} \left[f(x_i, y_j, z_k) \right] \quad (\text{Eq 2})$$

- 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 ± 1
 - Sommation de la totalité des cases

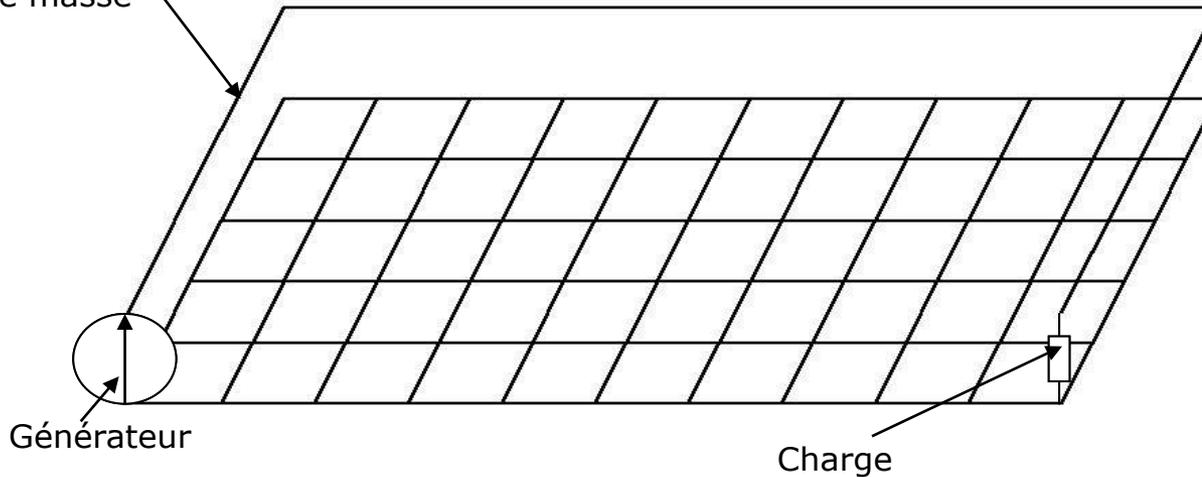
Le Code Développé : gestion des calculs

- 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

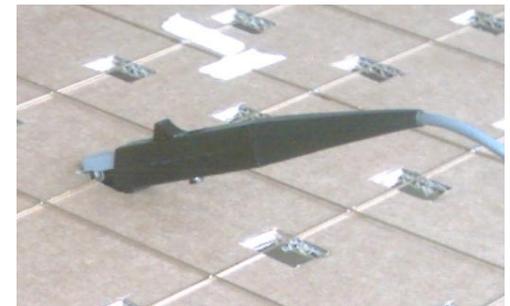
Les cas tests : présentation

- 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

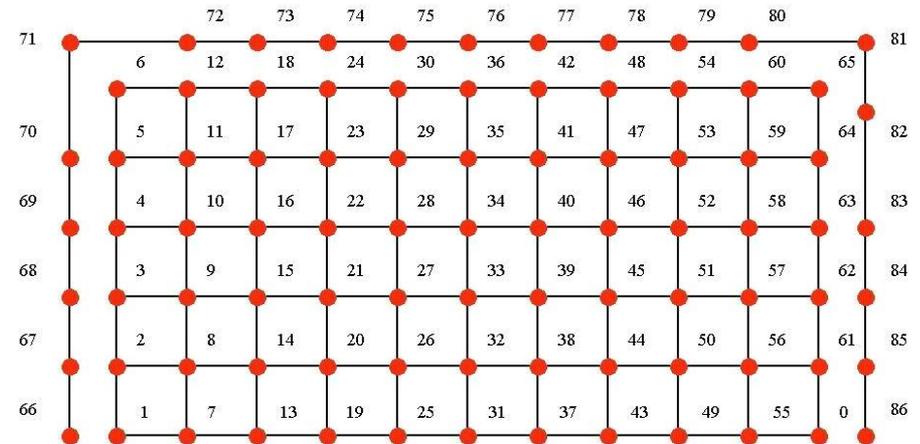
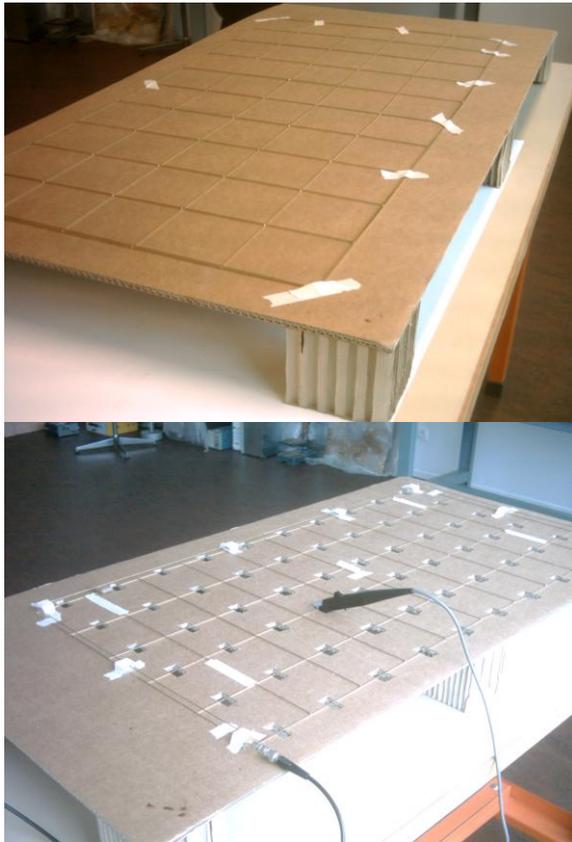


mesure du courant en tout point du plan de masse



Les cas tests : topologie

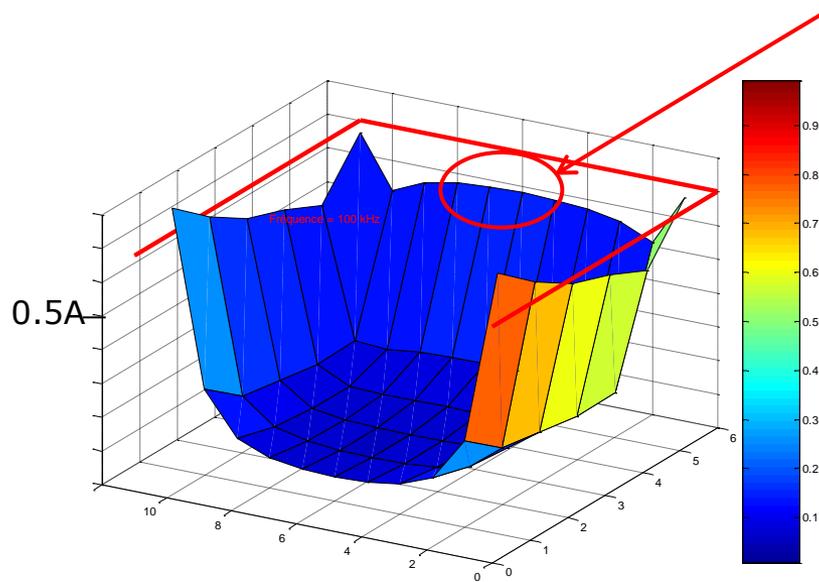
□ Mesures / Simulations



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

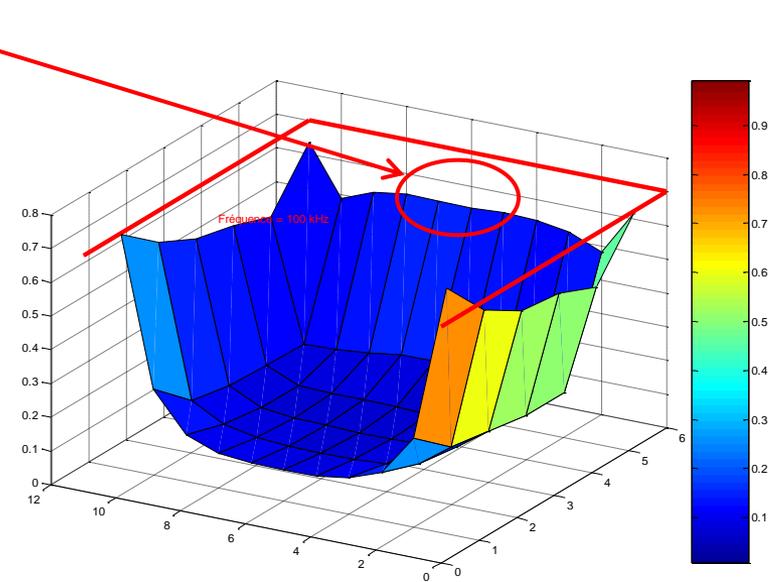
Les cas tests : comparaison mesure-simulation

□ à 100kHz



Répartition des courants

Simulation

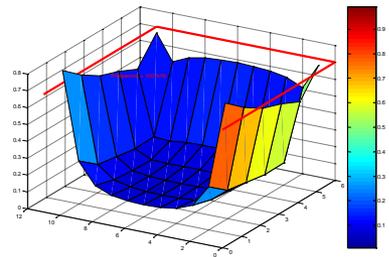
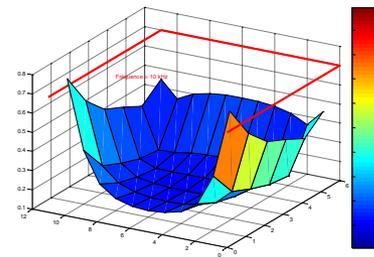
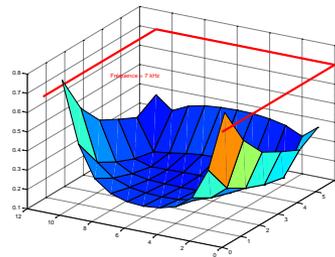
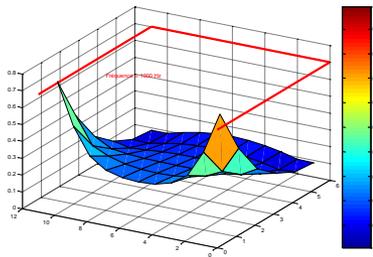


Répartition des courants

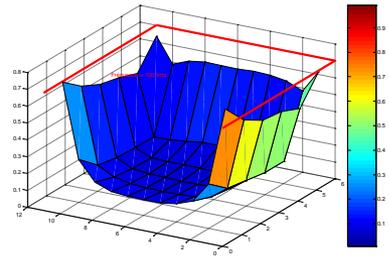
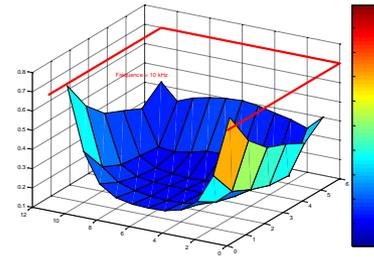
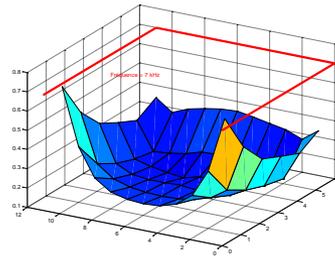
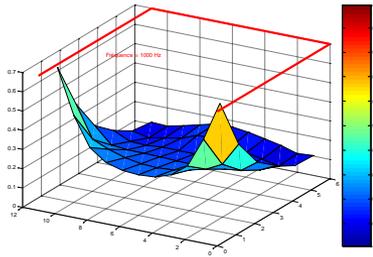
Mesure

Les cas tests : comparaison mesure-simulation

Simulations



Mesures



1kHz

7kHz

10kHz

100kHz

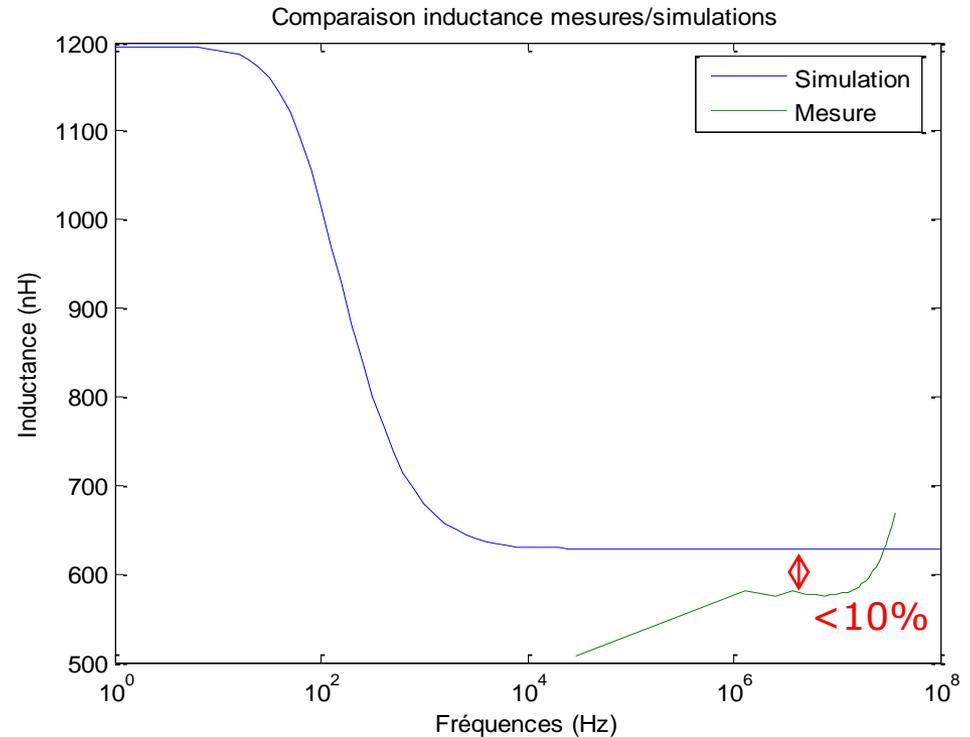
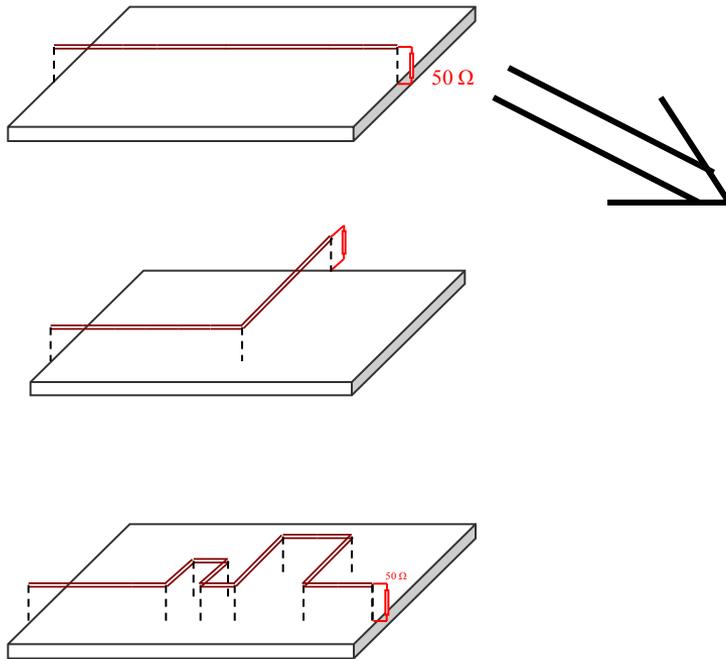
Les cas tests : Bilan sur la masse grillagée

- ❑ 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

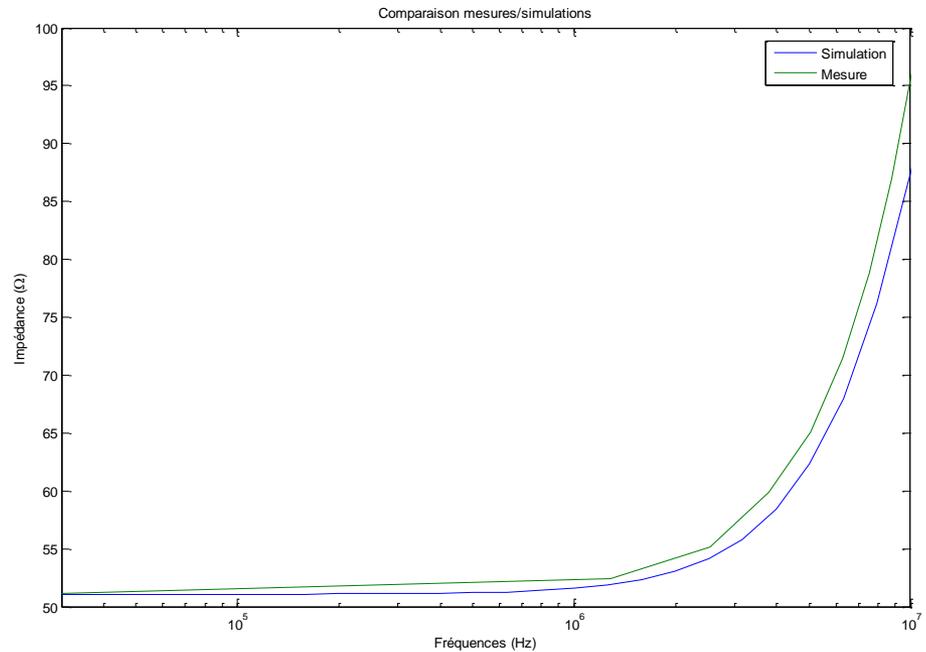
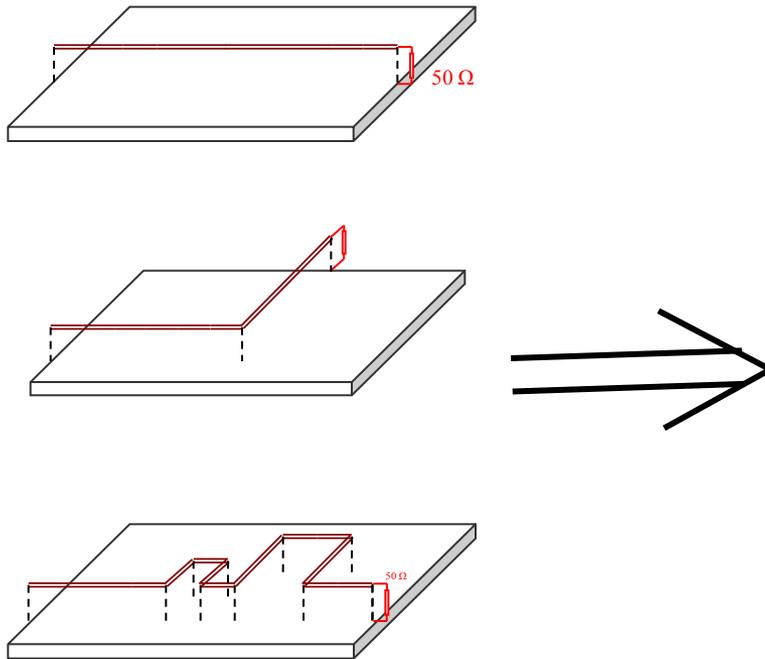
Test sur plan de masse



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

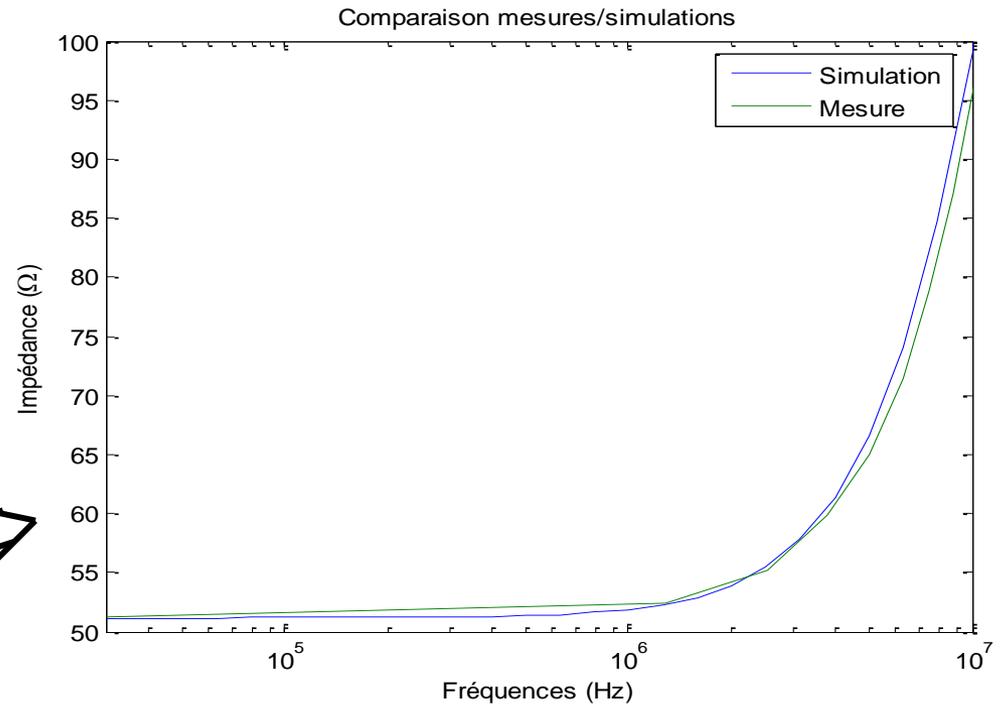
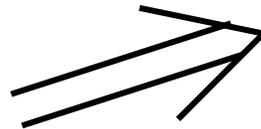
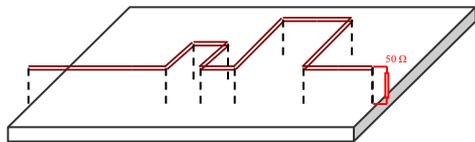
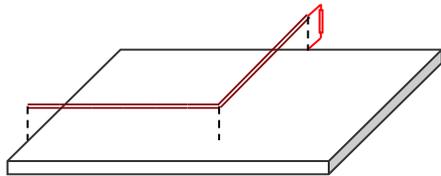
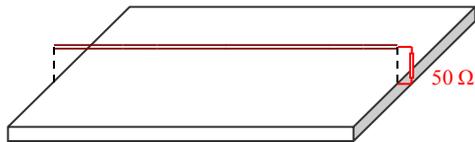
Test sur plan de masse



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

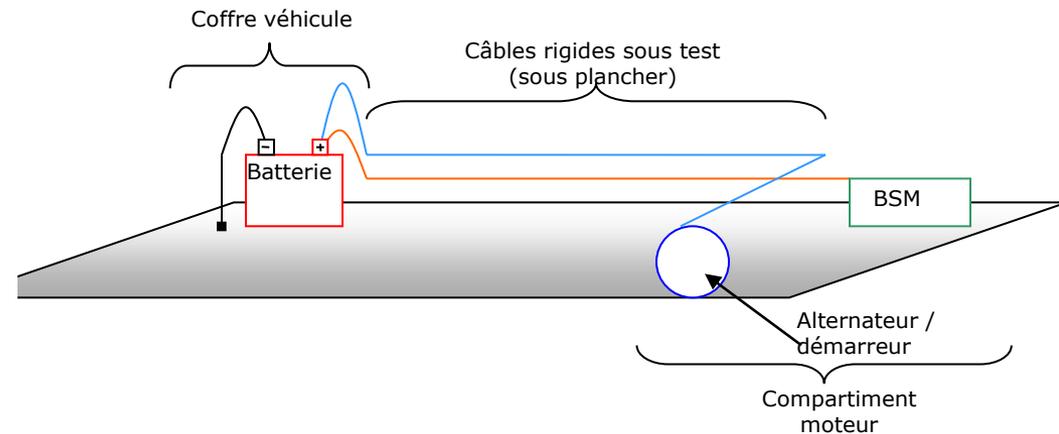
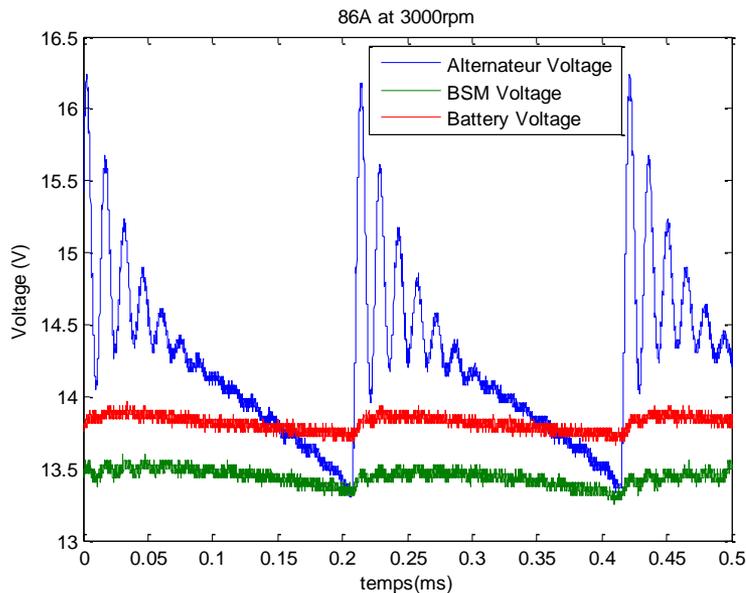
- Validation de l'outil de simulation
 - Bonne concordance entre mesures et simulations
 - Difficulté à trouver des appareils de mesures adéquats
 - Impossible de constater le changement de parcours des courants sur les mesures
 - Liaison aisée avec Spice
 - Gain en rapidité par rapport à d'autres codes 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

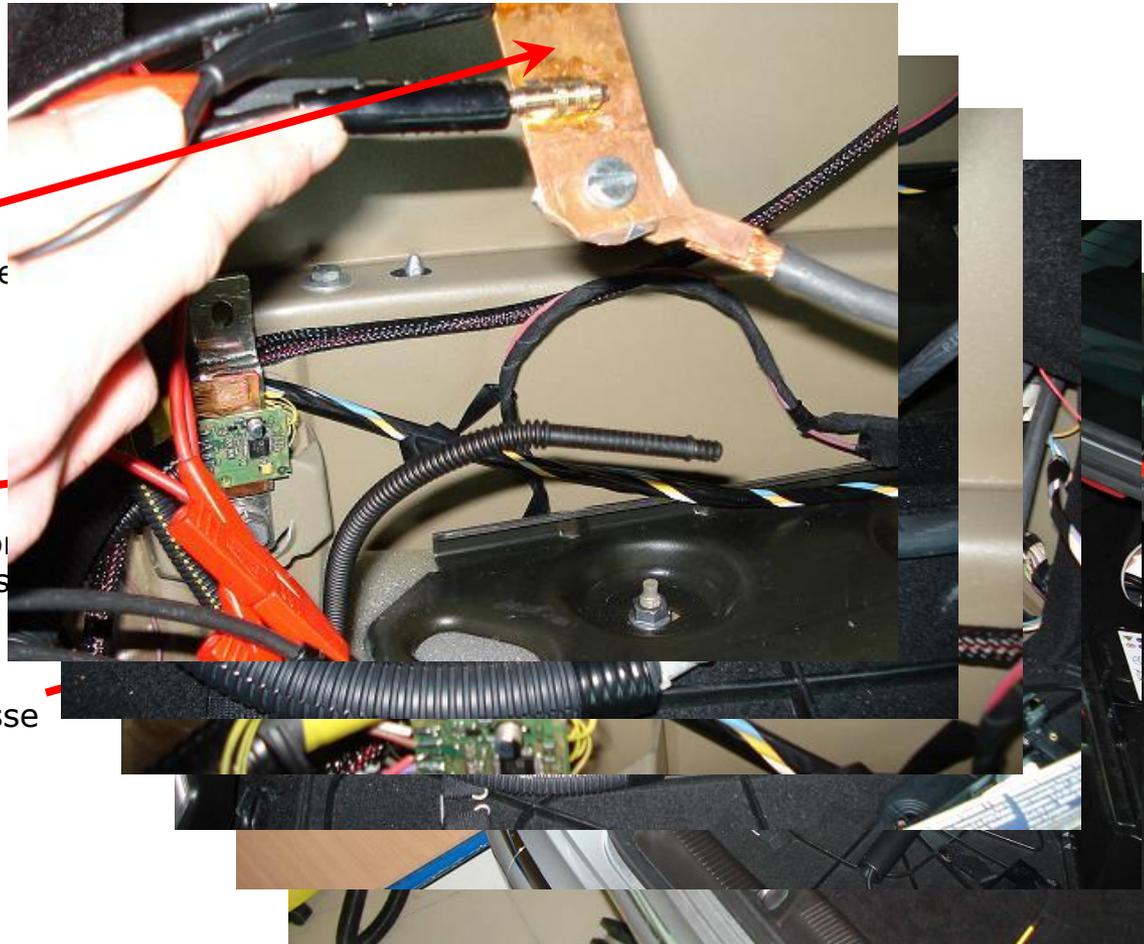
Mesures Fréquentielles : le set-up

□ Mesures fréquentielles sur véhicule

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

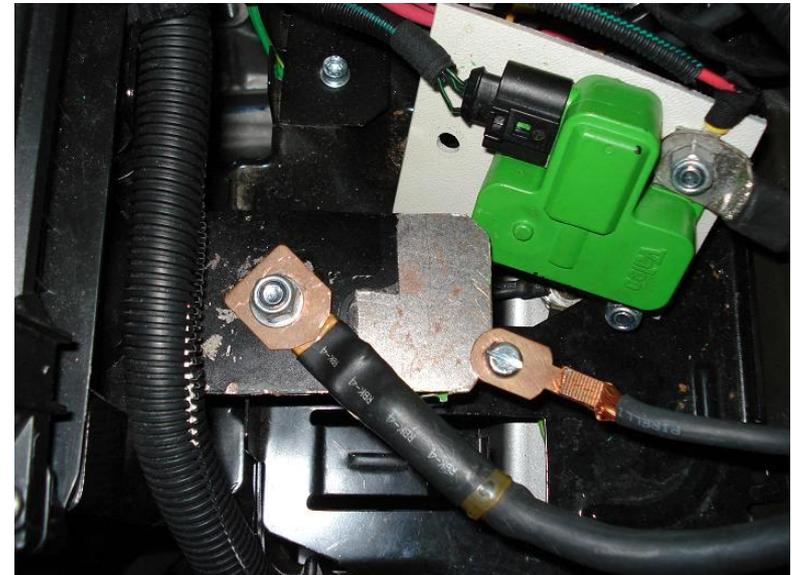
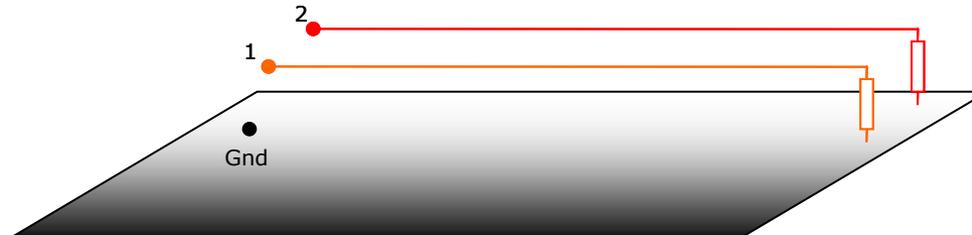
On enlève la batterie et on place
un analyseur d'impédance à sa
place
Les connexions à la batterie sont
remplacées par des connexions
spécifiques à l'analyseur

Connexion à la masse



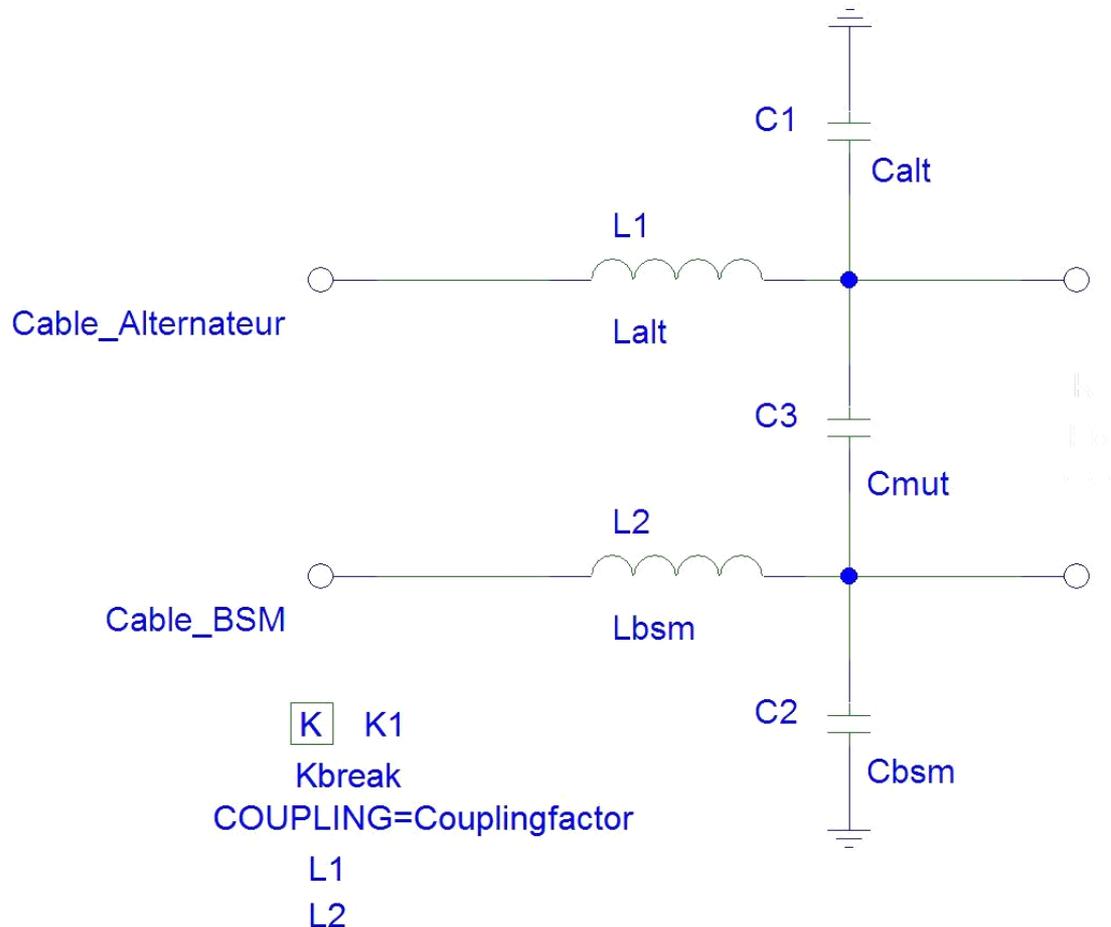
Mesures Fréquentielles : la méthodologie

- 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

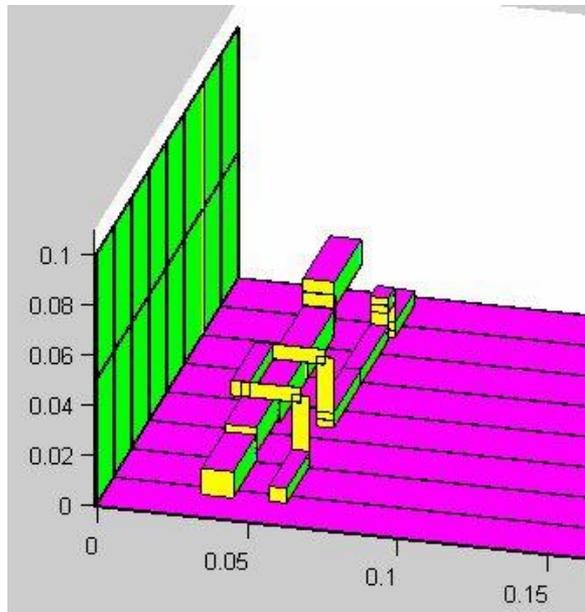
- Accès difficile sur les différentes parties
- Contacts « défectueux »
- Capacités extrêmement faibles (quelques centaines de picofarad au plus)

Simulations fréquentielles : les contraintes

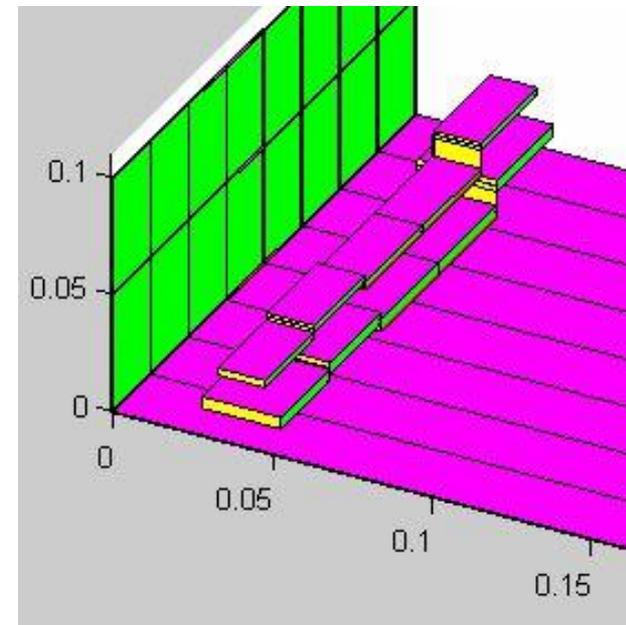
- ❑ Peu de vues en coupe
- ❑ Position relative des fils inconnue
- ❑ Faisceau alternateur inconnu
- ❑ Carrosserie supposée parfaite (sans défaut)
 - ⇒ Hypothèses sur tous les paramètres inconnus
- ❑ Nécessité de connaître les valeurs des condensateurs

Simulations fréquentielles : modèle inductif

- Définitions graphiques pour les bus-barres (PEEC)



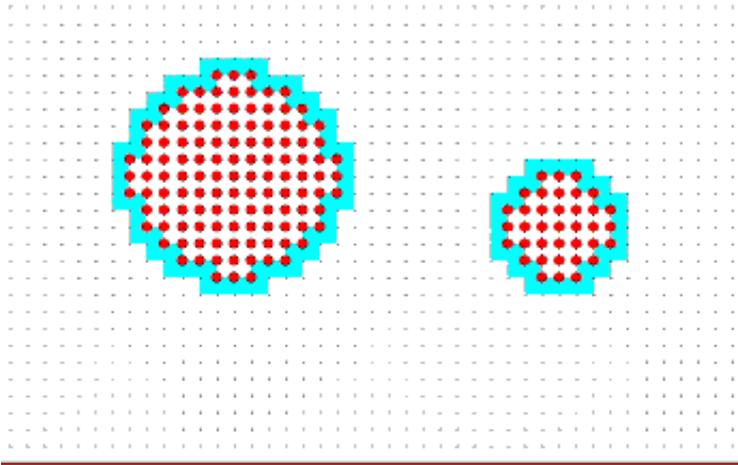
Bus barre circulaire (celui mesuré)



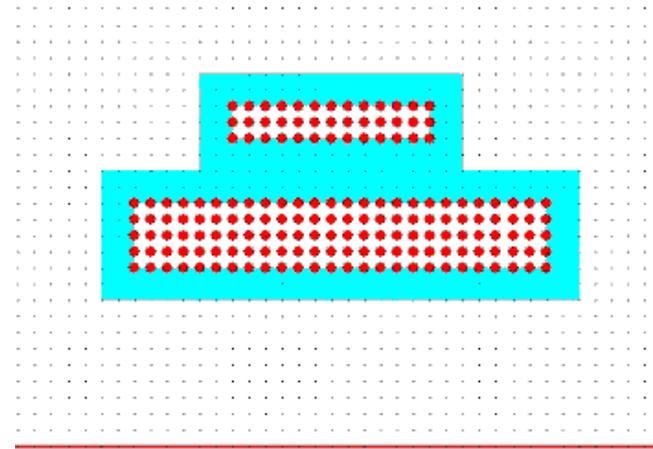
Bus barre plat

Simulations fréquentielles : modèle capacitif

- Définitions graphiques pour les bus-barres (FD2D)



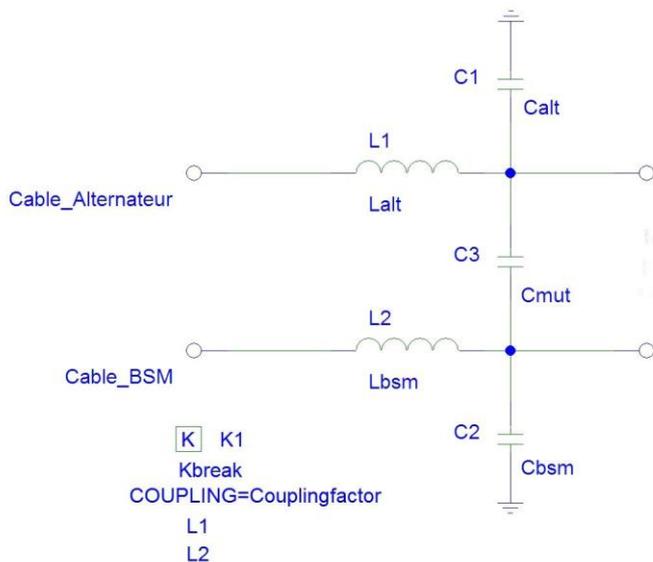
Bus barre circulaire (celui mesuré)



Bus barre plat

Simulations fréquentielles : le schéma électrique

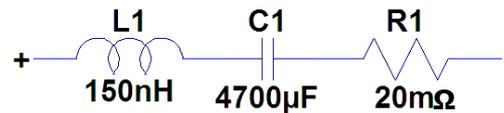
- Application de la même approche qu'en mesure pour obtenir le schéma équivalent



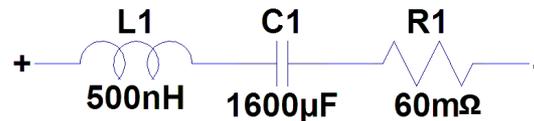
Valeur	Mesure	Simulation
Inductance fil BSM	2,73μH	2,83μH
Inductance fil Alternateur	2,31μH	2,28μH
Mutuelle entre fils	1,03μH (k=41%)	0,9μH (k=35,4%)
Capacité entre fil BSM et masse	142pF	139pF
Capacité entre fil Alternateur et masse	197pF	200pF
Capacité entre fils	15pF	79pF

Simulations fréquentielles : terminaisons

- Modélisations complémentaires
 - BSM (condensateur de filtrage intégré)



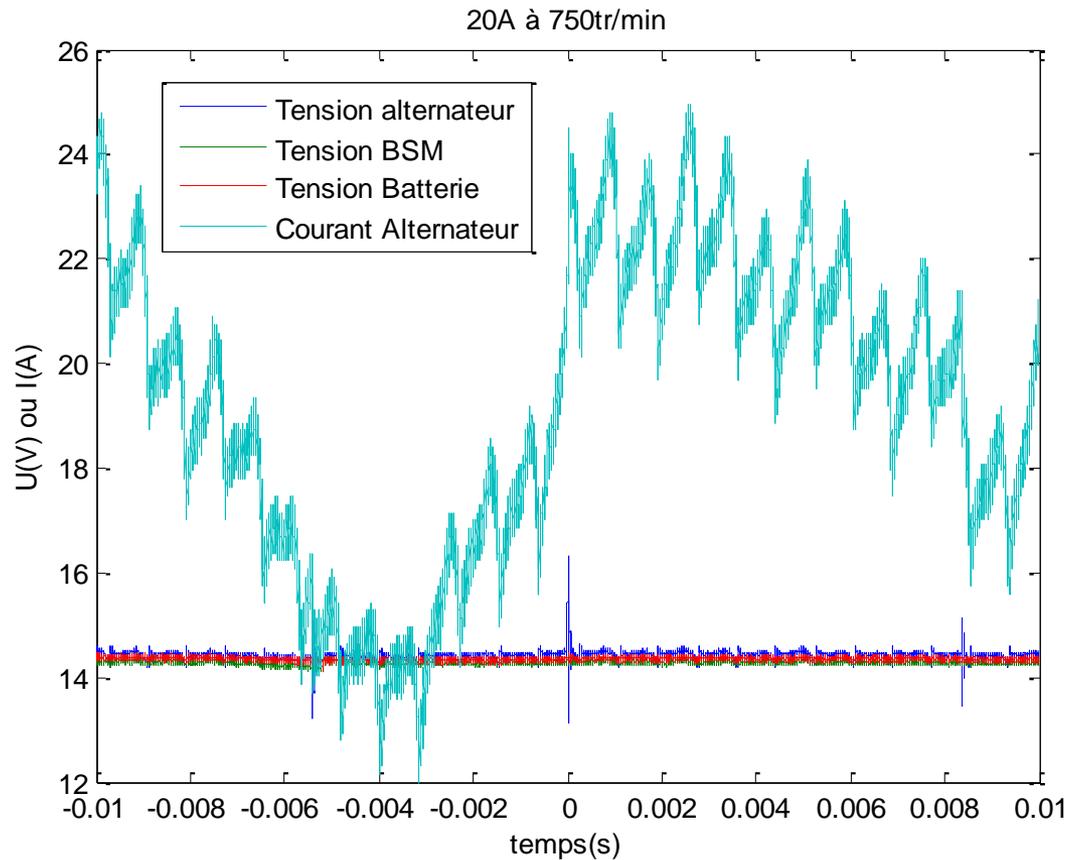
- Batterie (comportement proche d'un condensateur)



Application Automobile Mesures Temporelles

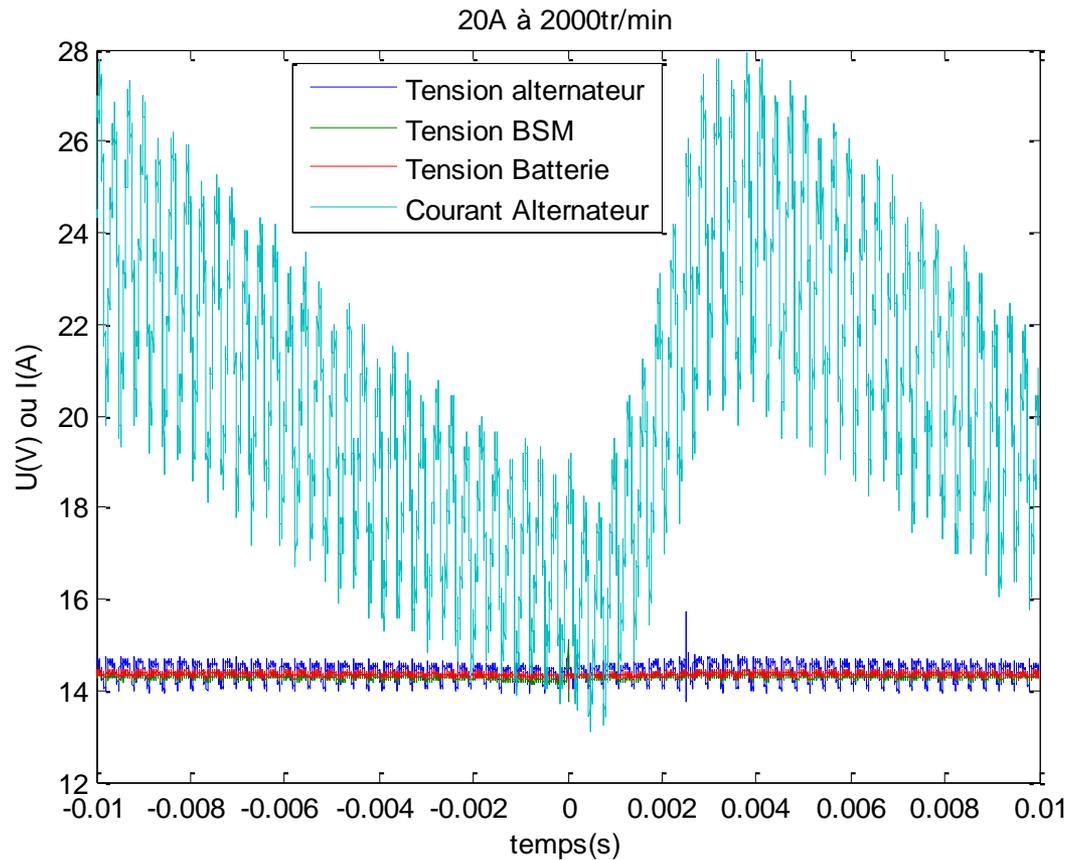
Mesures Temporelles : mesures brutes

- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants



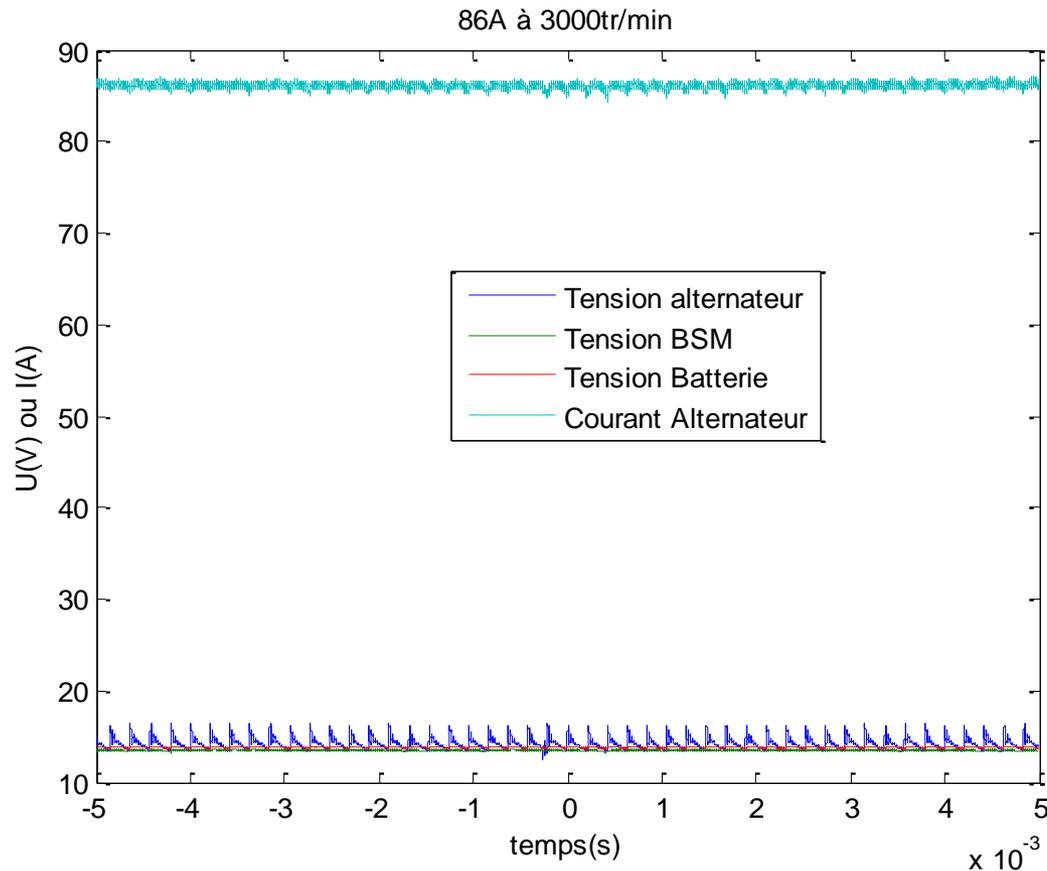
Mesures Temporelles : mesures brutes

- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants



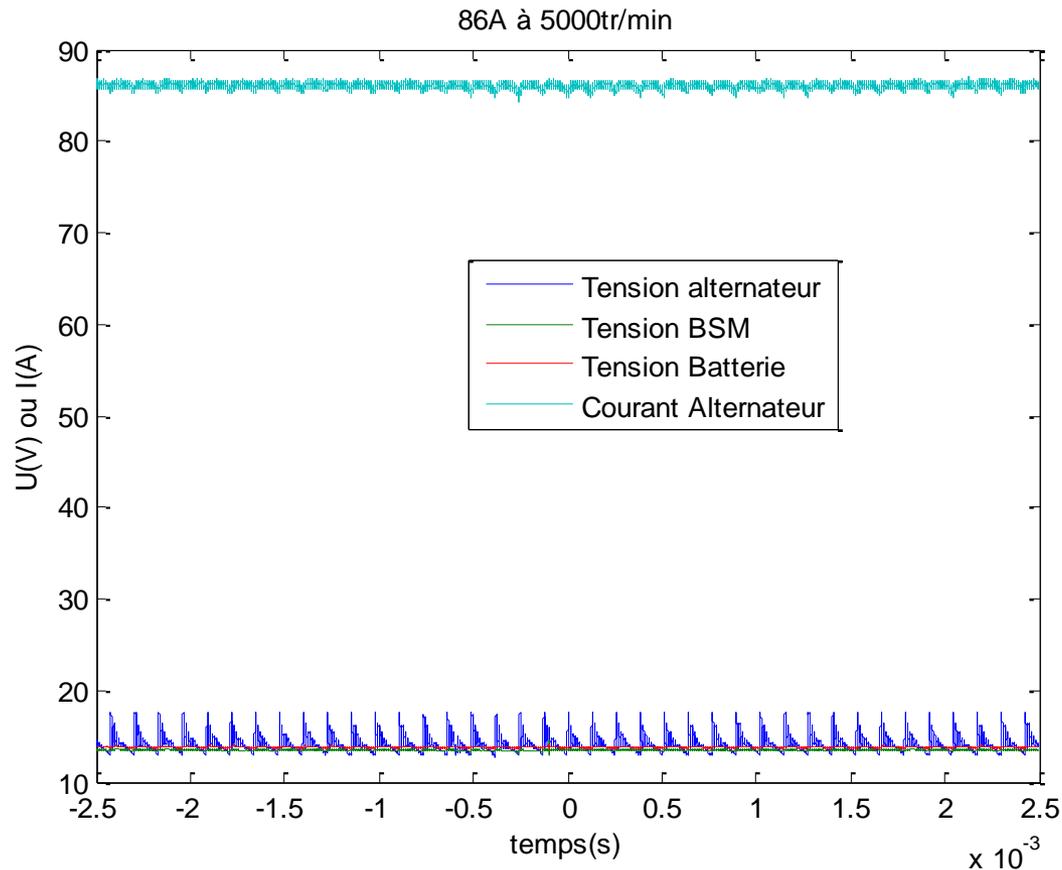
Mesures Temporelles : mesures brutes

- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants



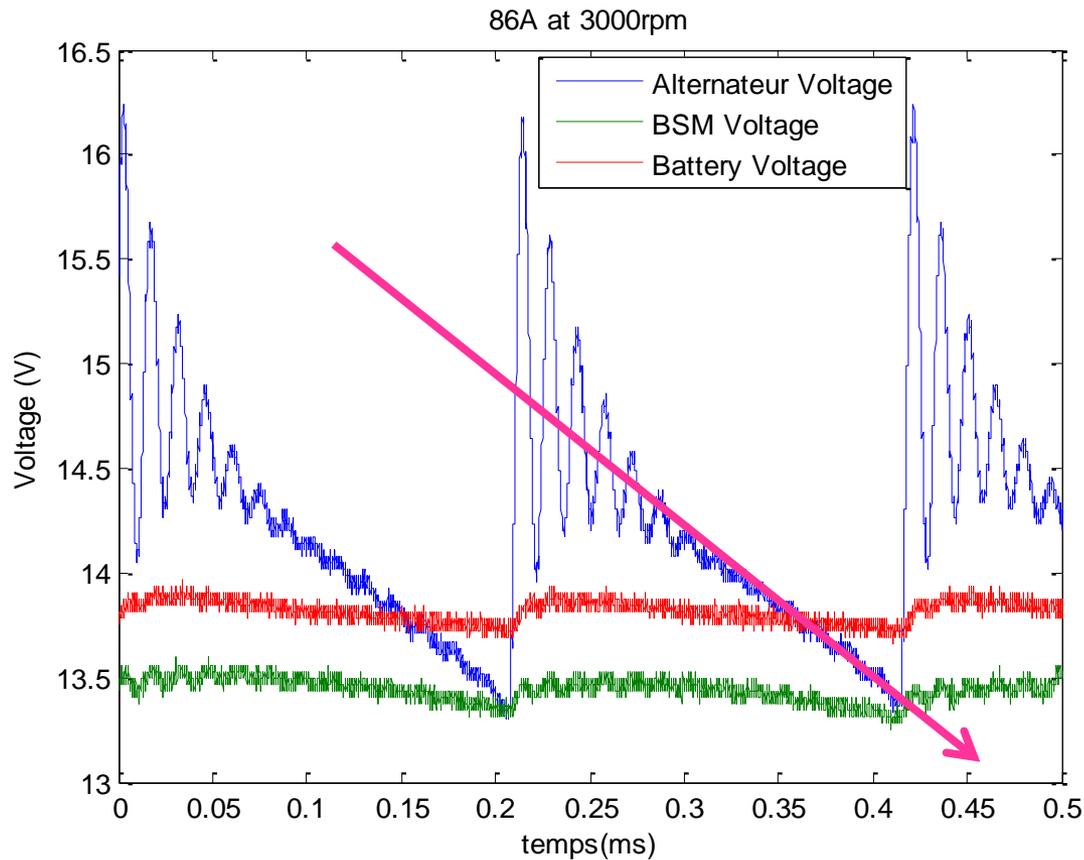
Mesures Temporelles : mesures brutes

- ▣ Mesures selon régimes moteurs et courants



Mesures Temporelles : constat

- Point commun des mesures : des oscillations amorties



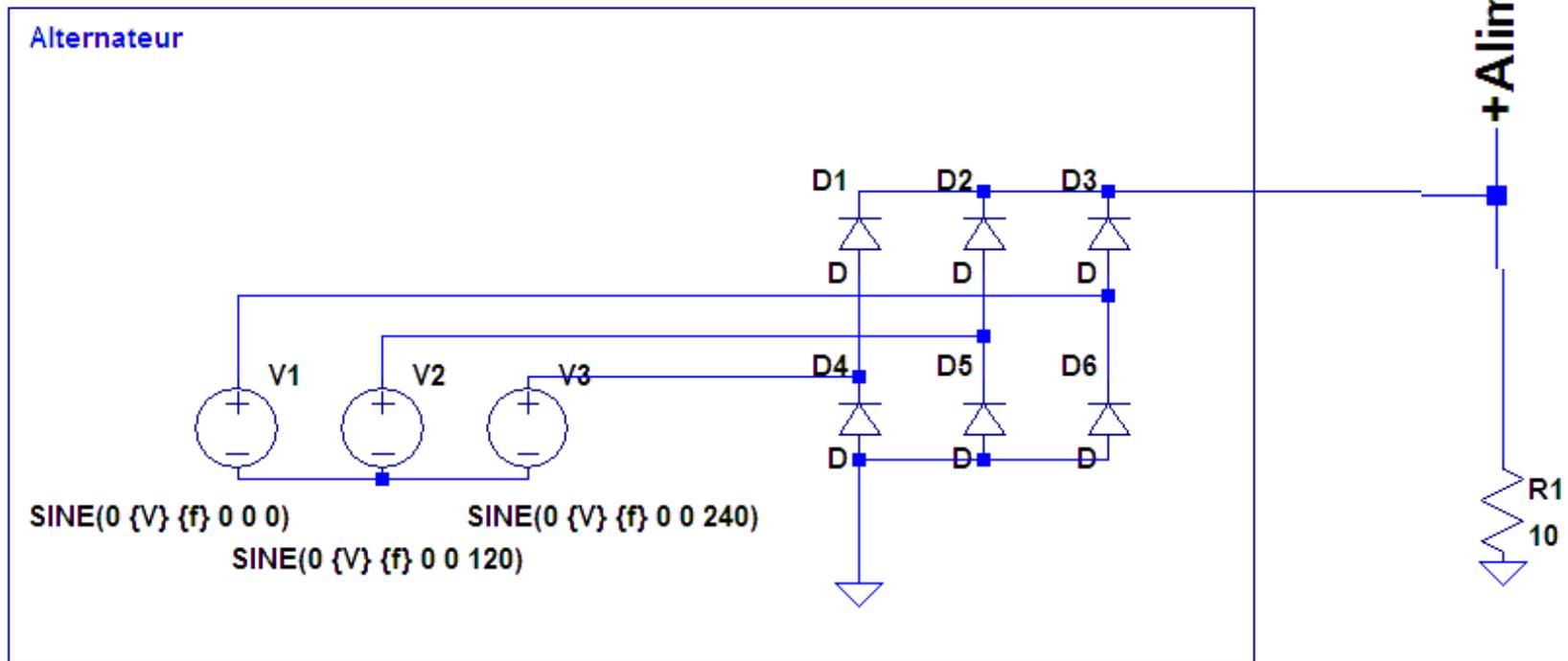
une oscillation amortie apparaît

L'alternateur en est la source

→ Création d'un équivalent électrique

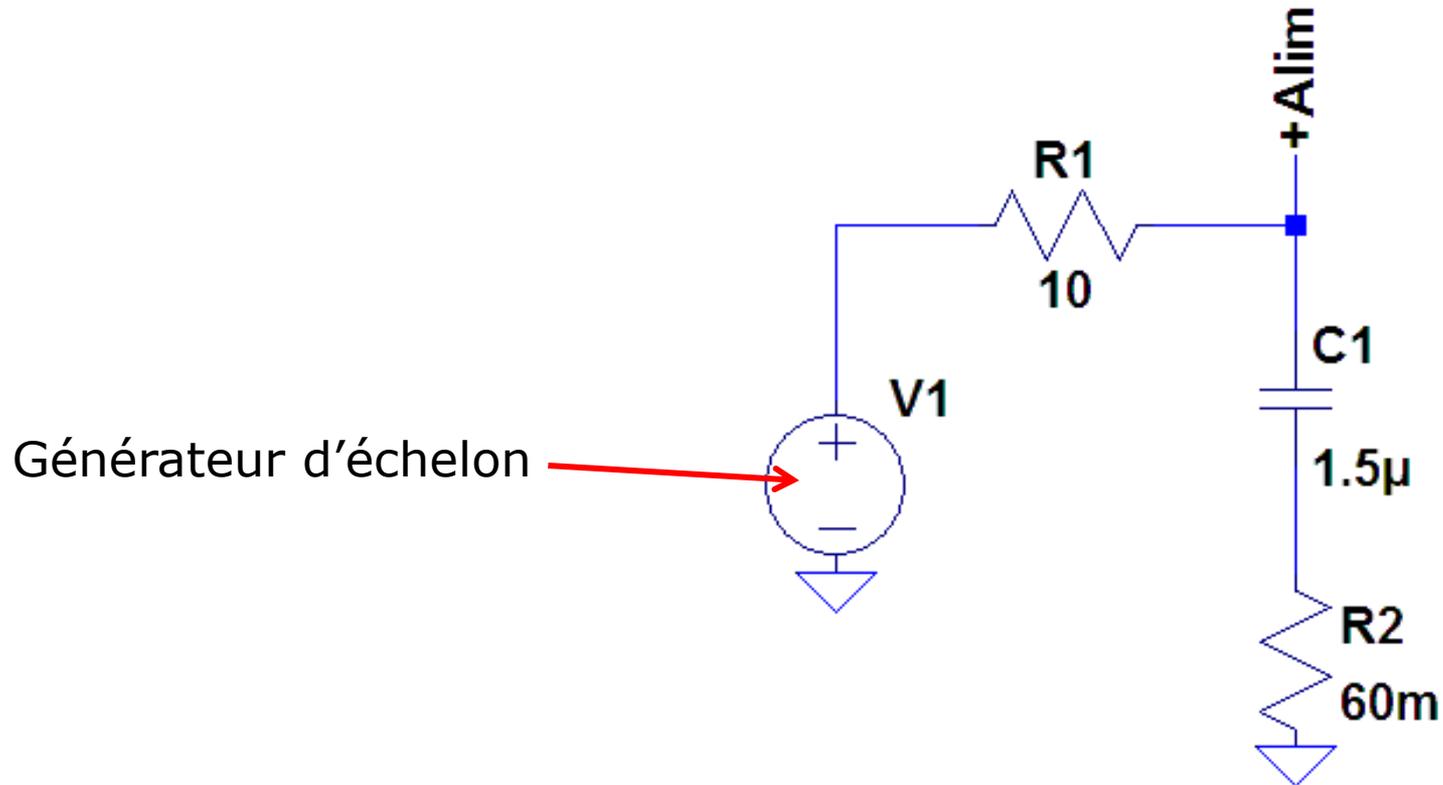
Simulations Temporelles : l'alternateur (1)

- Source équivalente à un alternateur



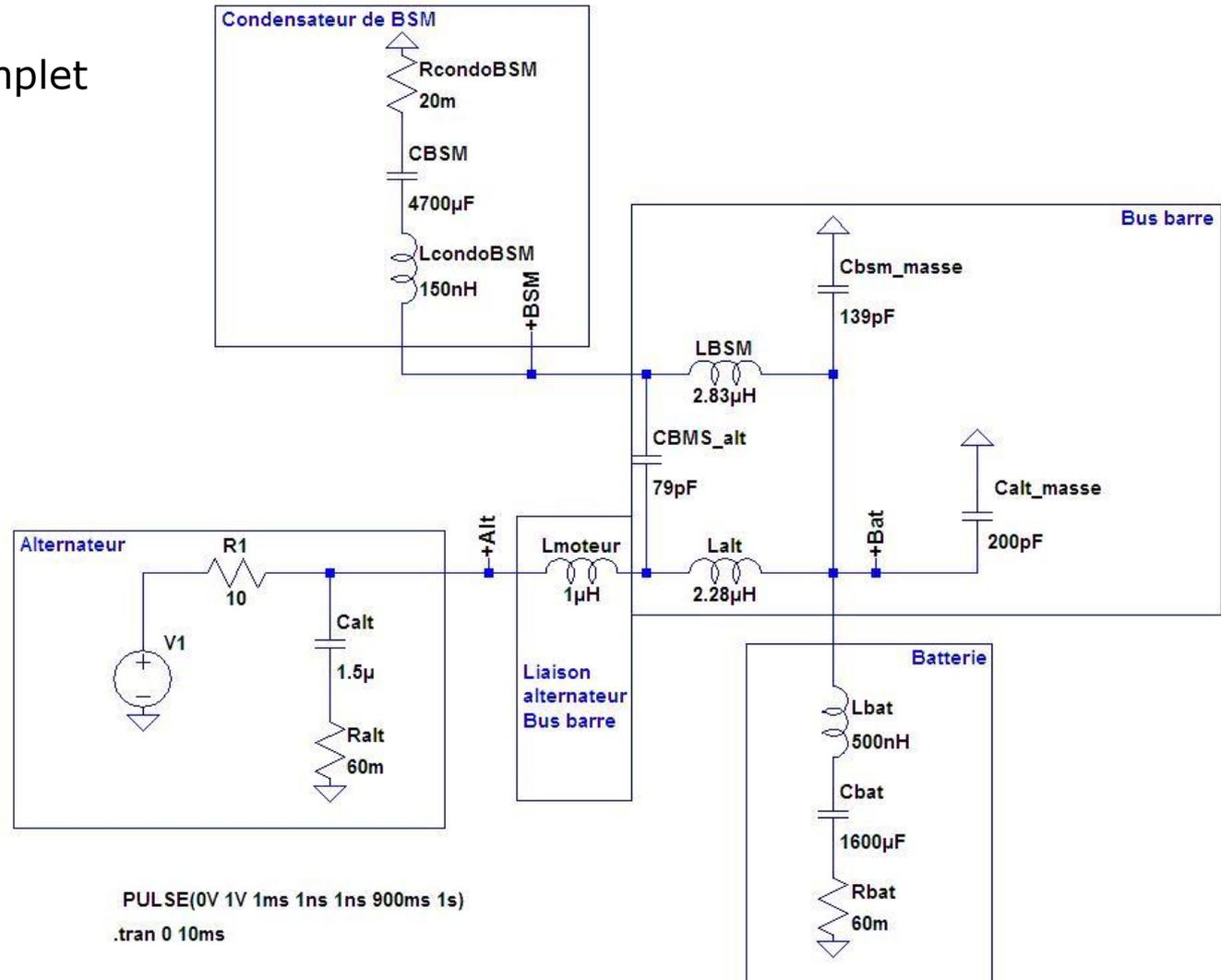
Simulations Temporelles : l'alternateur (2)

- Source équivalente à un alternateur



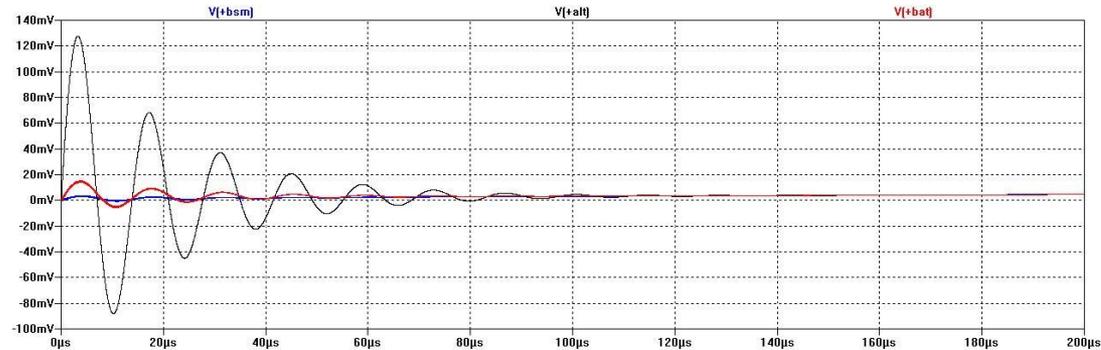
Simulations Temporelles

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 YAHY (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...