



**Projet Carnot VATHIVAC (collaboration CEVAA/IRSEEM-ESIGELEC)**  
**Modélisation multiphysique des connecteurs de puissance : Principe et premières illustrations**

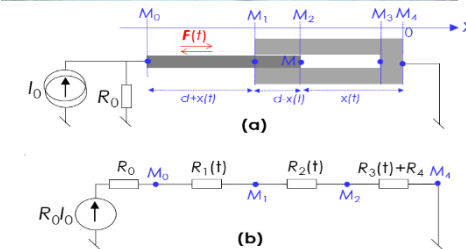
Entité : CEVAA  
Groupe 6NAPSE



Adresse : 2 Rue J. Fourier, Technopôle Madrillet  
Contact : Tanguy DAVIN / Nicolas MERLETTE  
tanguy.davin@gmail.com / n.merlette@groupe-6napse.com

Entité : IRSEEM **irseem**  
ESIGELEC **ESIGELEC**

Adresse : Avenue Galilée, Technopôle du Madrillet  
Contact : Moncef KADI  
moncef.kadi@esigelec.fr



- Problématiques multiphysiques dans le domaine des connecteurs de puissance utilisés dans l'aéronautique
- Le projet VATHIVAC s'est attaché à étudier les contraintes **électriques, mécaniques et thermiques**
- Approche basée sur :
  - ✓ essais expérimentaux
  - ✓ méthodes numériques
- Exploration de l'approche ATR (Analyse Tensorielle des Réseaux)

**Thématiques concernées :**

- Fiabilité des composants de puissance
- ✓ Fiabilité des technologies liées à la connectique
- Connaissances et moyens d'investigations sur les matériaux « électriques »
- ✓ Fiabilité des systèmes mécatroniques
- Fiabilité du packaging des électroniques miniaturisées
- ✓ Dissipation thermique pour une meilleur fiabilité
- ✓ Fiabilité des assemblages électroniques



## MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DES CONNECTEURS DE PUISSANCE : PRINCIPE ET PREMIÈRES ILLUSTRATIONS

### 1/ Contexte et objectifs

- Contexte

- Objectifs du projet

### 2/ Premiers constats expérimentaux

### 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

- Contexte de modélisation

- Principe méthodique

- Mise en équation

### 4/ Application à un exemple stationnaire électro-thermique

- Description de la configuration Pin/socket

- Premiers résultats

### 5/ Conclusions et perspectives

### 6/ Publications

# 1/ Contexte et objectifs : problématique des connecteurs

## VibrAtions, Temperature and High Voltage Analysis for Connectors

Modélisation des connectiques sous contraintes vibratoires, thermiques et de haute tension



[Yazaki]

[Amphenol]

### ■ Besoins des connecteurs dans l'industrie du Transport :

- Performance (bande passante) ↗
- Tenue en tension, vibrations, températures ↗
  - Etudes des perturbations électro-magnéto-thermo-mécaniques

### ■ Objectifs :

- Développement d'expérimentations à vocation normative à terme et respectant des contraintes avec maîtrise des mesures
- Développement des modèles théoriques pour décrire les phénomènes physiques
- Mise au point de méthodes de simulation multiphysique avec durée de calcul répondant aux objectifs industriels
  - Fournir des modèles multiphysiques en fonction des effets combinés des perturbations
  - Etablir les états critiques des connecteurs



Paire de collier  
de batterie



## MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DES CONNECTEURS DE PUISSANCE : PRINCIPE ET PREMIÈRES ILLUSTRATIONS

- 1/ Contexte et objectifs
  - Contexte
  - Objectifs du projet
- 2/ Premiers constats expérimentaux
- 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)
  - Contexte de modélisation
  - Principe méthodique
  - Mise en équation
- 4/ Application à un exemple stationnaire électro-thermique
  - Description de la configuration Pin/socket
  - Premiers résultats
- 5/ Conclusions et perspectives
- 6/ Publications

## 2/ Premiers constats expérimentaux : Chocs sur connecteurs

### 2/ Etudes expérimentales

- Connecteurs à 3 pins avec fils de transition testés dans le cadre du projet VATHIVAC



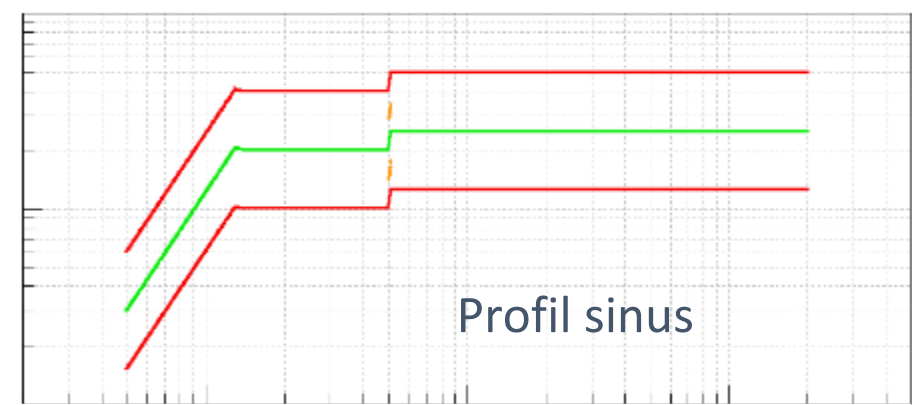
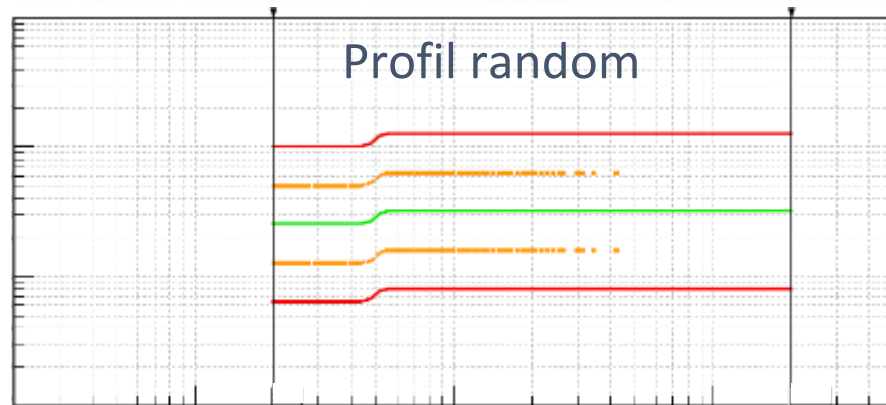
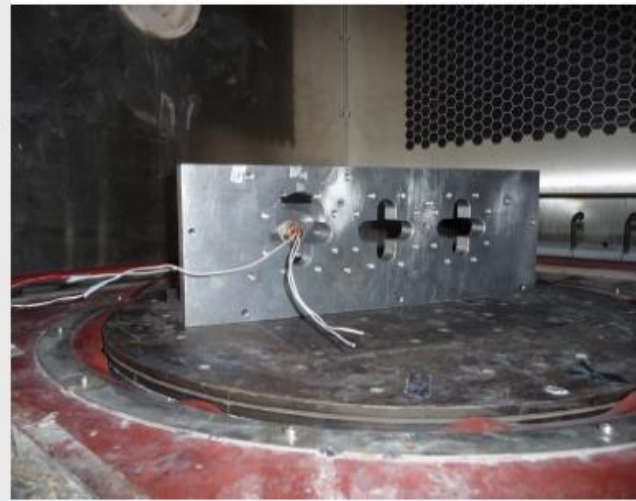
- Deux approches expérimentales mises en œuvre :
  - Tests mécano-thermiques menés par CEVAA
  - Tests électriques et RF menés par l'ESIGELEC



## 2/ Premiers constats expérimentaux : Chocs sur connecteurs (CEVAA)

### Conditions expérimentales

- Excitation sinus/random @ Tamb et 90 ° C

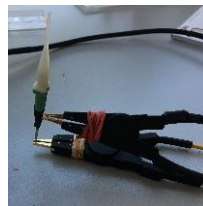


➔ Aucune microcoupure détectée sur l'ensemble des essais

## 2/ Premiers constats expérimentaux : Autres essais sur connecteurs (IRSEEM)

### ▣ Conditions expérimentales

#### ▣ 1/Mesure de résistance de contact avec RLC-mètre

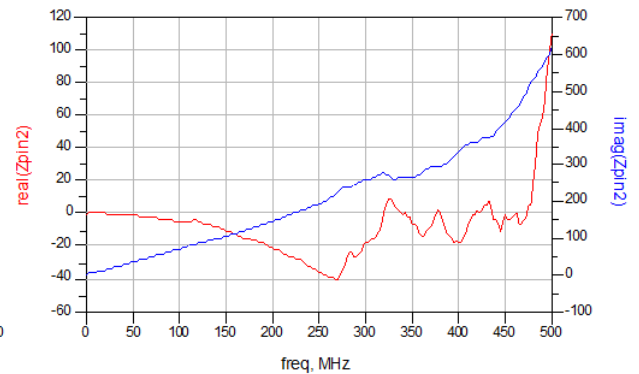
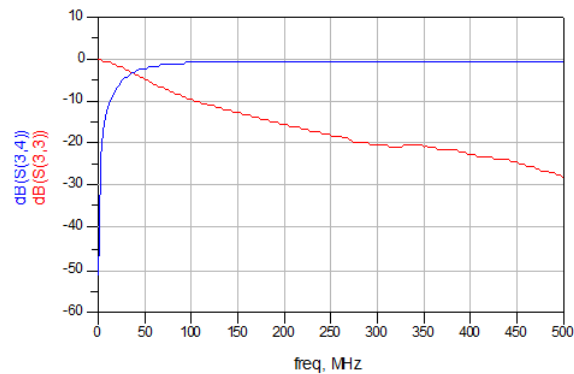
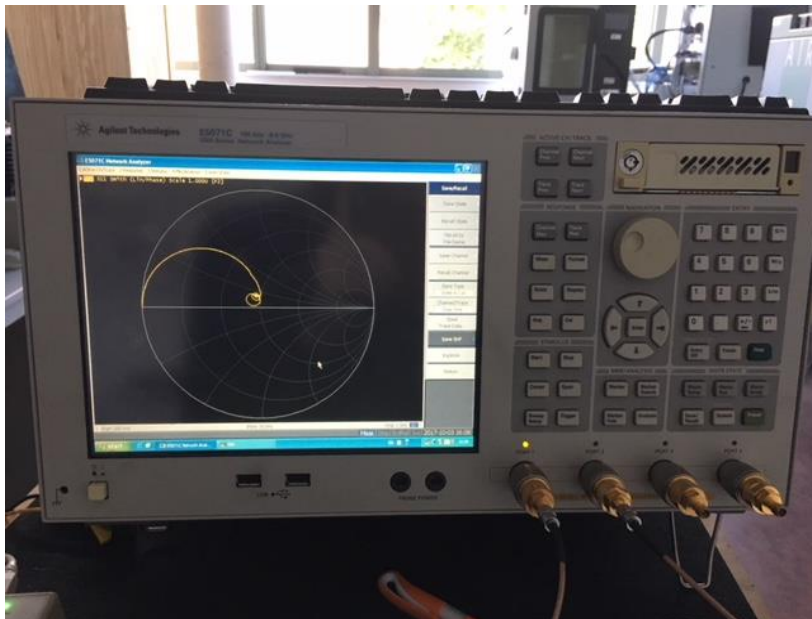
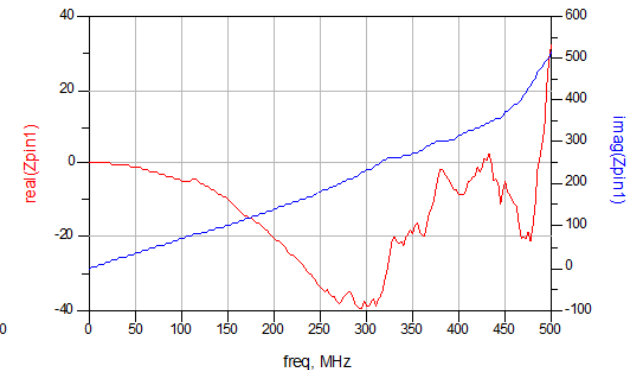
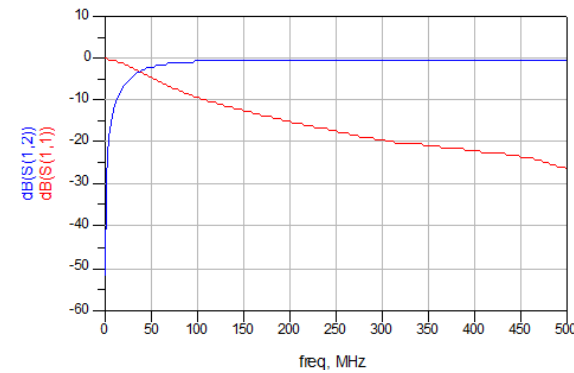


Description	Valeurs
Résistance de contact de l'outil de caractérisation	2,1 mΩ
Résistance de contact de l'ensemble outil de caractérisation + connecteur PIN 1	8,54 mΩ

# 2/ Premiers constats expérimentaux : Autres essais sur connecteurs (IRSEEM)

▣ Conditions expérimentales suivant des contraintes

▣ 2/Mesure d'impédance complexe avec VNA



➔ Comportement inductif



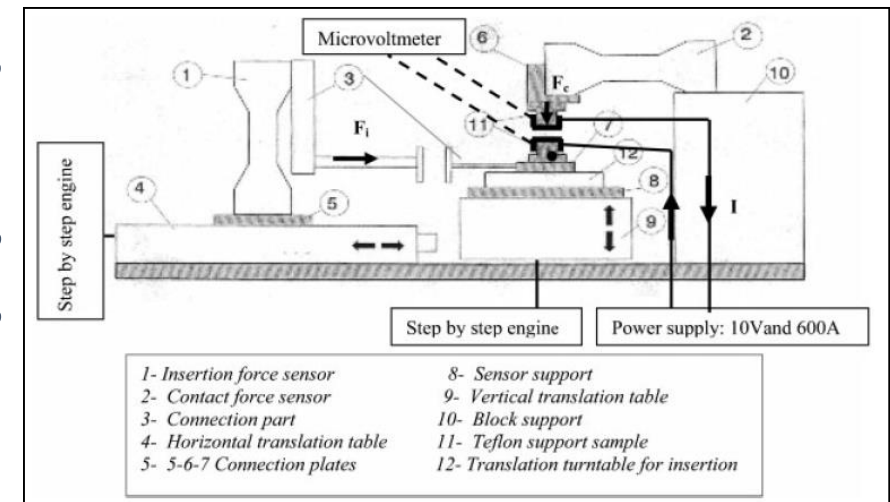
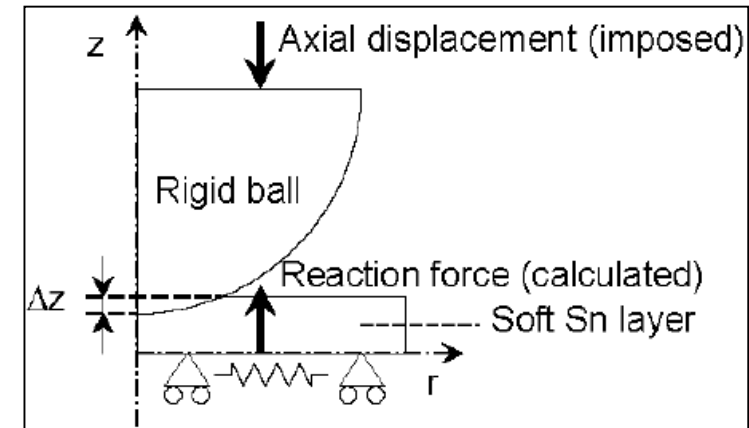


## MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DES CONNECTEURS DE PUISSANCE : PRINCIPE ET PREMIÈRES ILLUSTRATIONS

- 1/ Contexte et objectifs
  - Contexte
  - Objectifs du projet
- 2/ Premiers constats expérimentaux
- 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)
  - Contexte de modélisation
  - Principe méthodique
  - Mise en équation
- 4/ Application à un exemple stationnaire électro-thermique
  - Description de la configuration Pin/socket
  - Premiers résultats
- 5/ Conclusions et perspectives
- 6/ Publications

# 3/ Contexte de modélisation : Etat de l'art

- Etudes [1-3] à base des simulations numériques existantes mais insuffisamment précises et souples dans l'intégration des phénomènes complexes représentatifs d'un élément des Systèmes Cyber Physiques (CPS)
- En environnement complexe, ces systèmes sont susceptibles de subir des contraintes multiphysiques
  - Couplages non linéaires entre forces électriques sous haute tension et forces mécaniques sous vibrations, etc...



[1] F. Ossart, F. et al., (2007, September). Electro-mechanical modelling of multilayer contacts in electrical connectors. In *Electrical Contacts-2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* (pp. 1-8). IEEE.

[2] El Abdi, R. et al., (2008). Contact resistance study of high-copper alloys used in power automotive connectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222 (8), pp. 1375-1383.

[3] Mazzucco, G., et al. (2016). Modelling a coupled thermo-electro-mechanical behaviour of contact elements via fractal surfaces. *Modelling and Simulation in Engineering, Hindawi*, ID5219876, pp. 1-15.

# 3/ Contexte de modélisation : Etat de l'art

- Grand nombre des travaux concernant la caractérisation des composants électroniques face à des contraintes multiphysiques ont porté sur des MEM's.
- Des études analytique et expérimentale ont été réalisées sur l'aspect conduction et résistances de contact, mais sans considérer des signaux hautes tensions rapides.
- Enfin les travaux portant sur la sollicitation à la fois mécanique, électrique et thermique sont rares et portent sur des techniques originales mais de portée industrielle faible.

# 3/ Contexte de modélisation : objectifs

- Enjeux économiques du projet VATHIVAC : amélioration du temps de conception des connecteurs utilisés dans les équipements aéronautiques et automobiles
  - Réduire le coût de conception
  - Réduire les risques de fiabilité
- Traiter quelques problématiques concernant l'analyse, la modélisation et la caractérisation des différentes sortes de connectiques pour :
  - Répondre aux besoins des industries aéronautiques et automobiles de caractérisation des connectiques face aux perturbations électro-magnéto-thermo-mécaniques
  - Développer des modèles théoriques donnant aux ingénieurs une compréhension accrue des phénomènes physiques induits par l'usage des connectiques pour les véhicules plus électriques répondant aux besoins en tenue en tension, vibration et fiabilité
  - Mettre au point des méthodes de simulation multiphysique avec durée de calcul répondant aux objectifs industriels



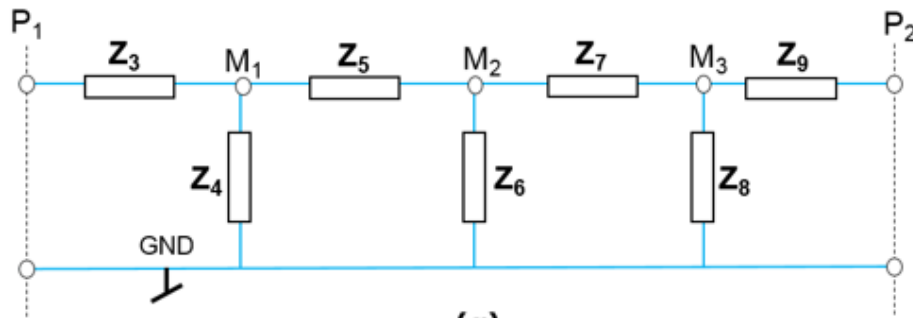
### 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

- L'ATR est un formalisme non conventionnel initié par Kron (1930) pour analyser les systèmes complexes multi-échelle.
- Ce formalisme, non familier pour les ingénieurs, a été remis à jour par O. Maurice (1990) depuis quelques décennies pour analyser la CEM des systèmes complexes.
- L'ATR consiste à représenter un système dans un espace ou univers constitué de différents objets mathématiques algébriques (branches, nœuds, mailles, réseau, moments ...).

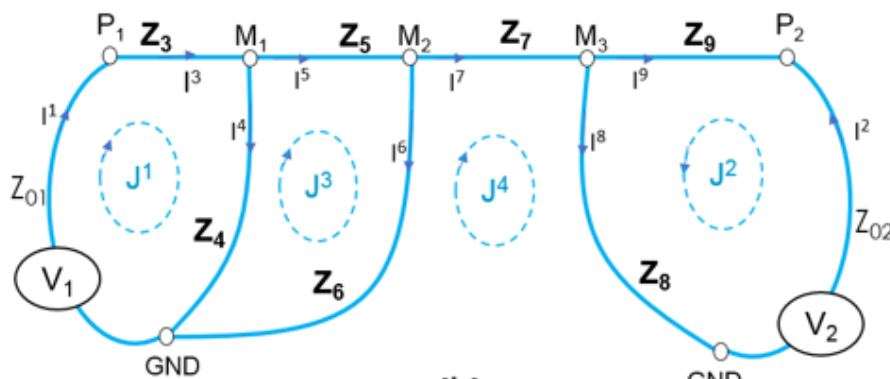
# 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

## 2/ Principe de la représentation ATR

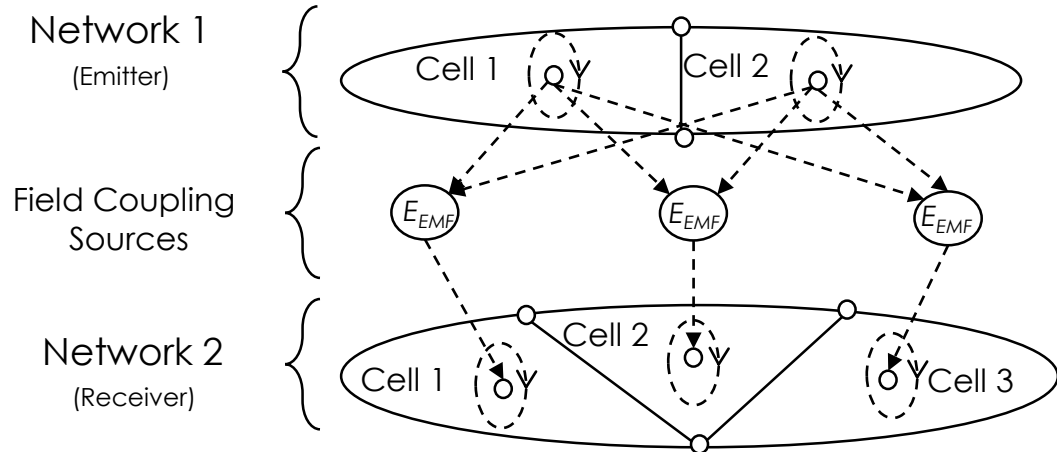
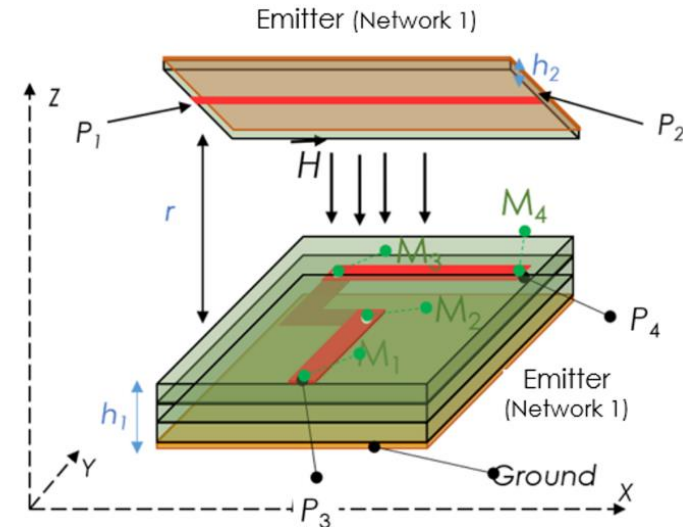
Circuit à deux ports



(a)



(b)



Thèse de Christel CHOLACHUE NGOUNOU, Univ de Rouen, IRSEEM, Oct 2020

Thèse de Zhifei XU, Univ de Rouen, IRSEEM, Mars 2019

# 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

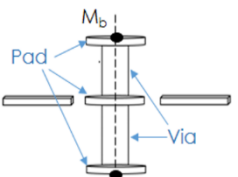
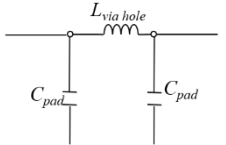
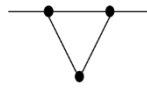
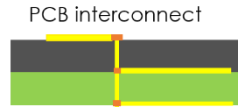
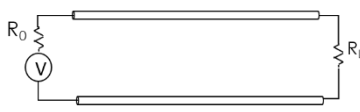
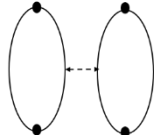

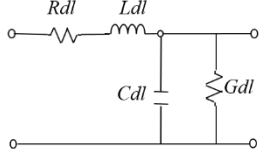
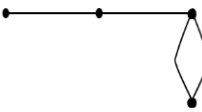

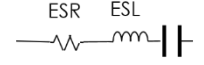
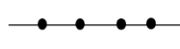
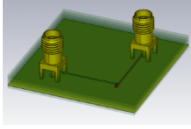
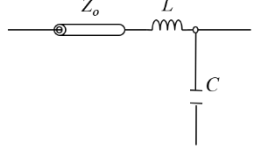
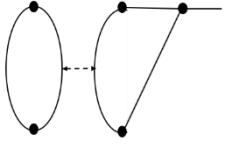
## 2/ Principe de la représentation ATR

Spaces	Electrical topology	Tensorial relations	Transformation formalism
Voltage difference		$J^\alpha = i^\beta - y^{\alpha\beta} u_\beta$	$I^i = C_\alpha^i i^\alpha$ $Y^{\tilde{ij}} = C_\alpha^i y^{\alpha\beta} C_\beta^j$
Node pairs		$I^i = Y^{ij} U_j$	
Branch currents		$u_k = e_k - z_{kp} i^p$	$E_i = C_i^\alpha e_\alpha$ $Z^{ij} = C_i^\alpha z_{\alpha\beta} C_j^\beta$
Mesh currents		$E_k = z_{kp} I^p$	
Moments		$m^a = S_\omega^a J^\omega$	$M_p = S_t^a \alpha_{\omega t} S_p^a$
Networks		$m^i = \eta_\alpha^j m^a$	$M_{tp} = S_t^a \eta_\alpha^b \alpha_{ab} \eta_\omega^a S_p^\omega$

Thèse de Zhifei XU, Univ de Rouen, IRSEEM, Mars 2019

# 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

## 2/ Principe de la représentation ATR

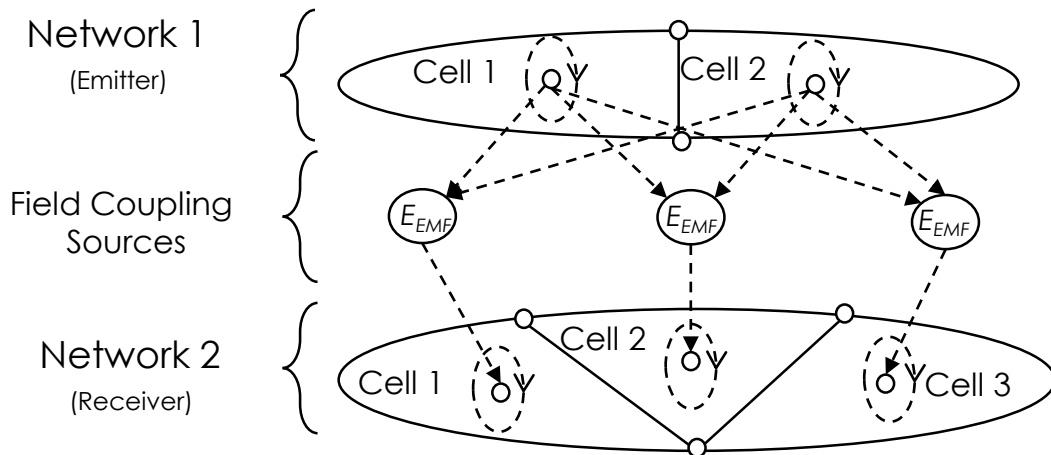
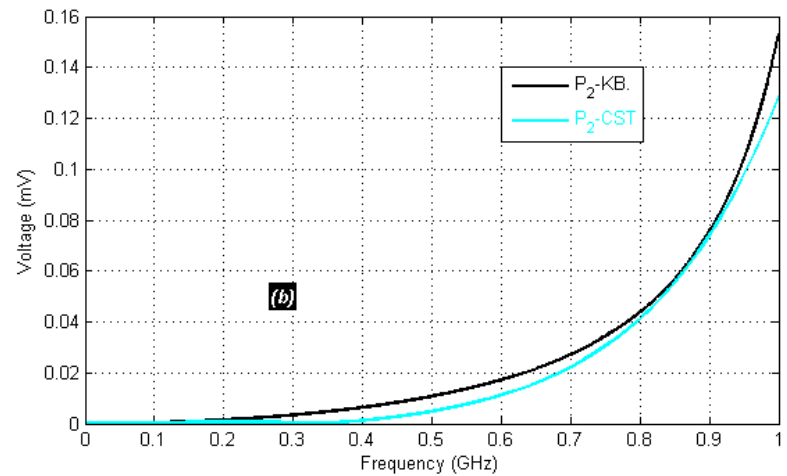
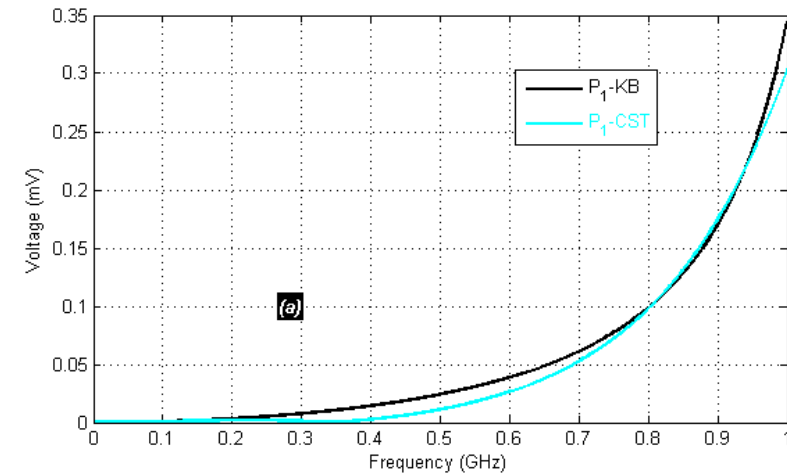
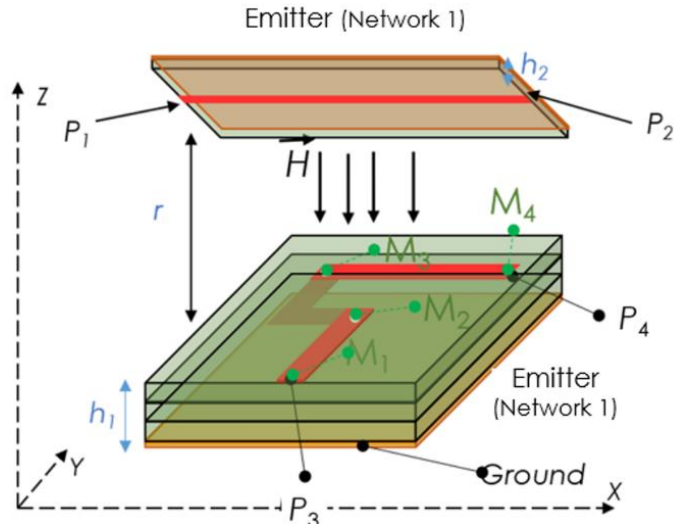
Structures	Equivalent Circuit	Equivalent Topology	Fundamental tensors
			$\begin{bmatrix} Z_{pad} & -Z_{pad} & 0 \\ -Z_{pad} & Z_{via\_hole} + 2Z_{pad} & -Z_{pad} \\ 0 & -Z_{pad} & Z_{pad} \end{bmatrix}$
			$\begin{bmatrix} R_1 + Z_c & (-Z_c + R_2)e^{-\theta} \\ -(Z_c - R_1)e^{-\theta} & R_2 + Z_c \end{bmatrix}$
			$\begin{bmatrix} Rdl + Ldl + Cdl & -Cdl \\ -Cdl & Cdl + Gdl \end{bmatrix}$
			$[Z_{ESR} + Z_{ESL} + Z_C]$
			$\begin{bmatrix} Z_c & (-Z_c + Z_L + Z_C)e^{-\theta} \\ -Z_c e^{-\theta} & Z_L + Z_C + Z_c \end{bmatrix}$

Thèse de Zhifei XU, Univ de Rouen, IRSEEM,  
Mars 2019



# 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

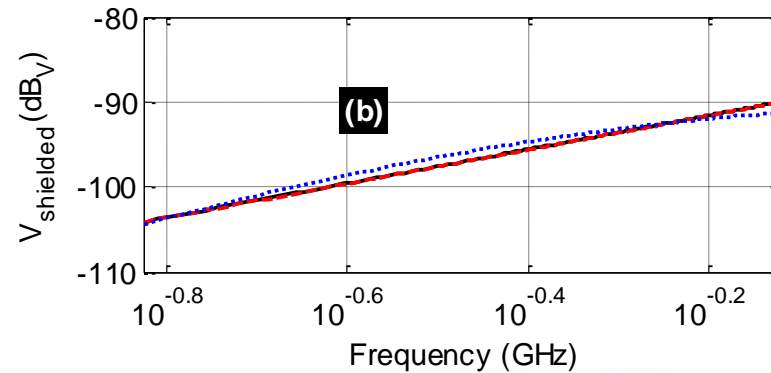
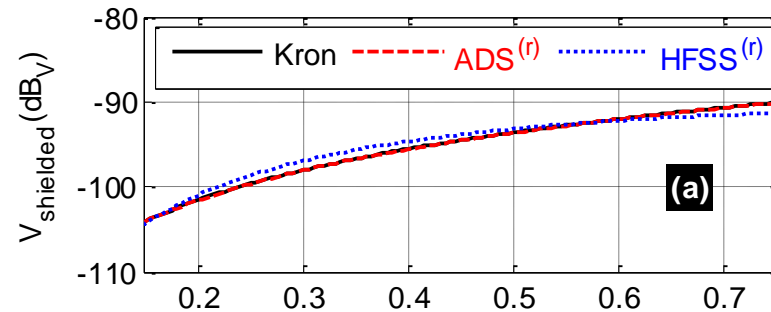
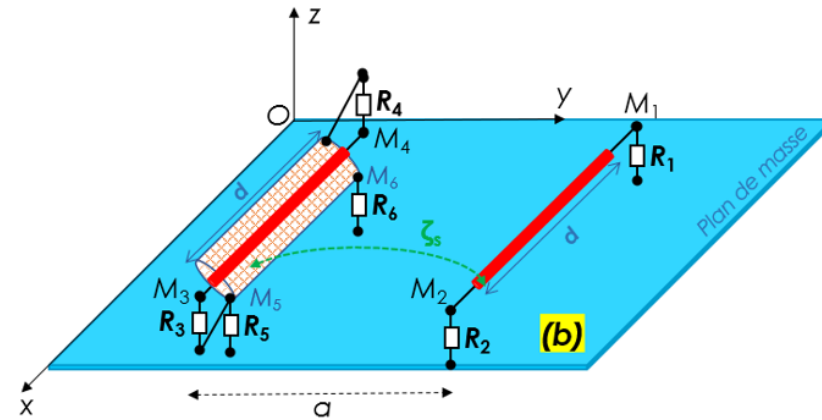
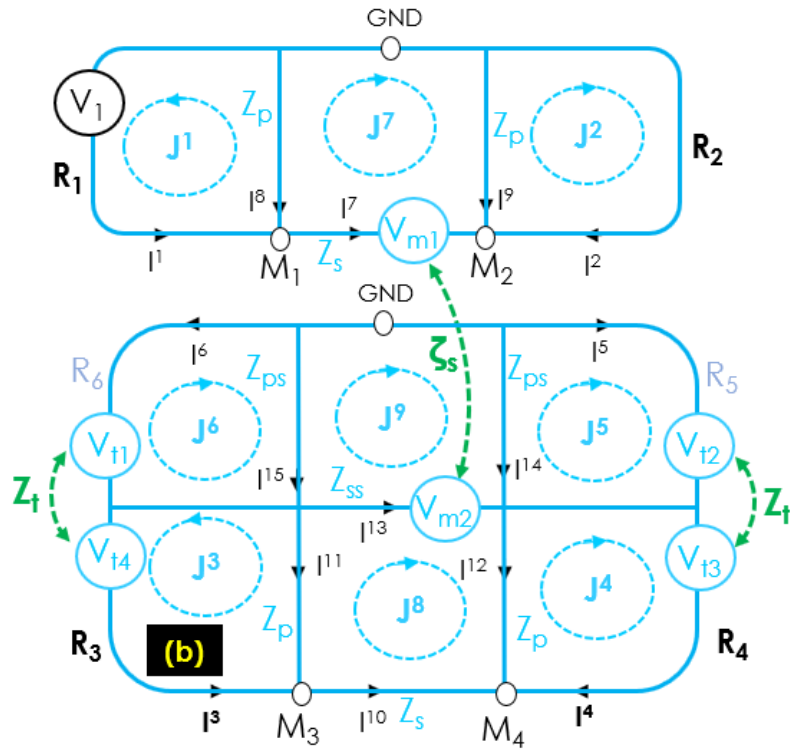
## 2/ Résultats illustratifs



Thèse de Zhifei XU, Univ de Rouen, IRSEEM, Mars 2019

# 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)

## 2/ Résultats illustratifs



Thèse de Christel CHOLACHUE NGOUNOU,  
Univ de Rouen, IRSEEM, Oct 2020



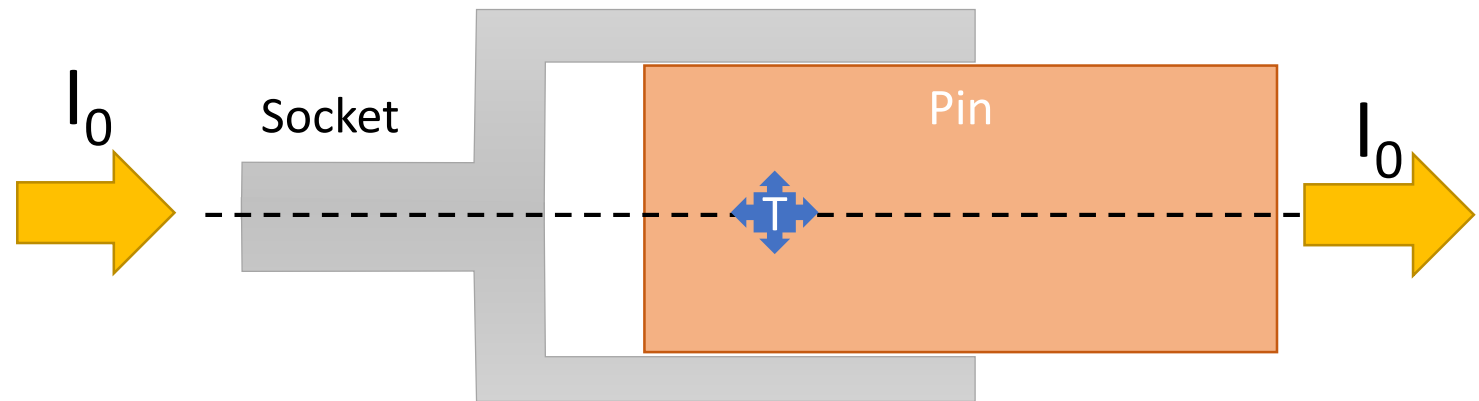
## MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DES CONNECTEURS DE PUISSANCE : PRINCIPE ET PREMIÈRES ILLUSTRATIONS

- 1/ Contexte et objectifs
  - Contexte
  - Objectifs du projet
- 2/ Premiers constats expérimentaux
- 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)
  - Contexte de modélisation
  - Principe méthodique
  - Mise en équation
- 4/ Application à un exemple stationnaire électro-thermique
  - Description de la configuration Pin/socket
  - Premiers résultats
- 5/ Conclusions et perspectives
- 6/ Publications

# Description de la configuration Pin/socket

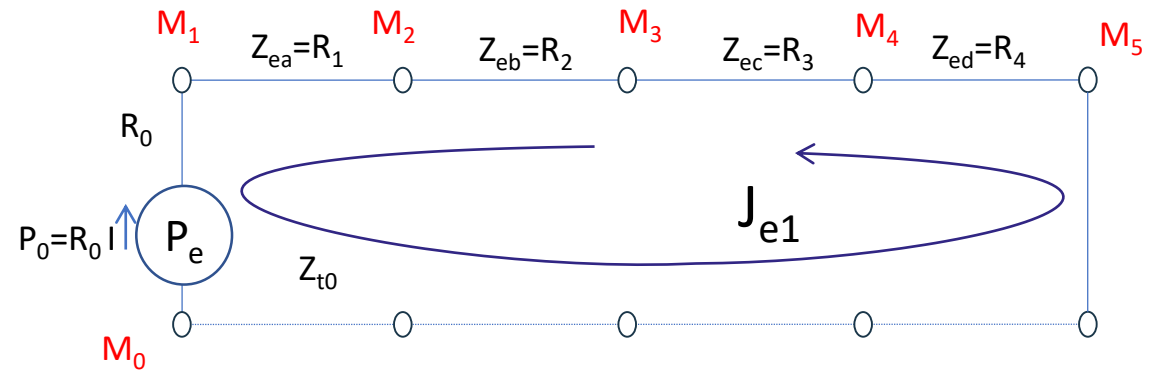
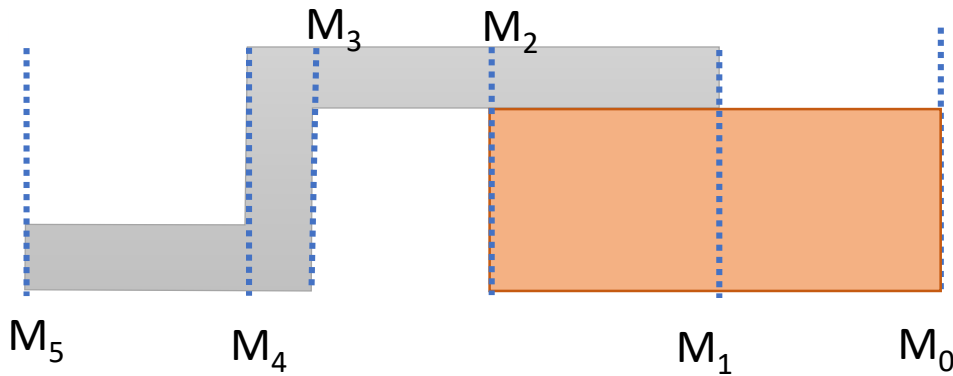
- Objectif : décrire les effets multiphysiques E-T dans un connecteur : contact de la pinoche-tulipe
  - Effets de température sur la performance électrique du connecteur

Socket (tulipe)





# Détails de la mise en équation (Electrique)



## Step 1 : analyse topologique

Espace des Branches :  $B=5$ , source  $U$ , flux (puissance)  $P$ , impédance  $Ze_\alpha = Re$

Espace des Mailles :  $M=1$ , source  $U$ , flux (puissance)  $Q$ , impédance  $Ze^\omega$

## Step 2: Description des variables dans l'espace des branches

$$Ze_\alpha = R_e = \rho^{el} \frac{L}{S}$$

## Step 3 : Connectivité et variables dans l'espace des mailles

$$Ce_\omega^\alpha = [1;1;1;1;1]$$

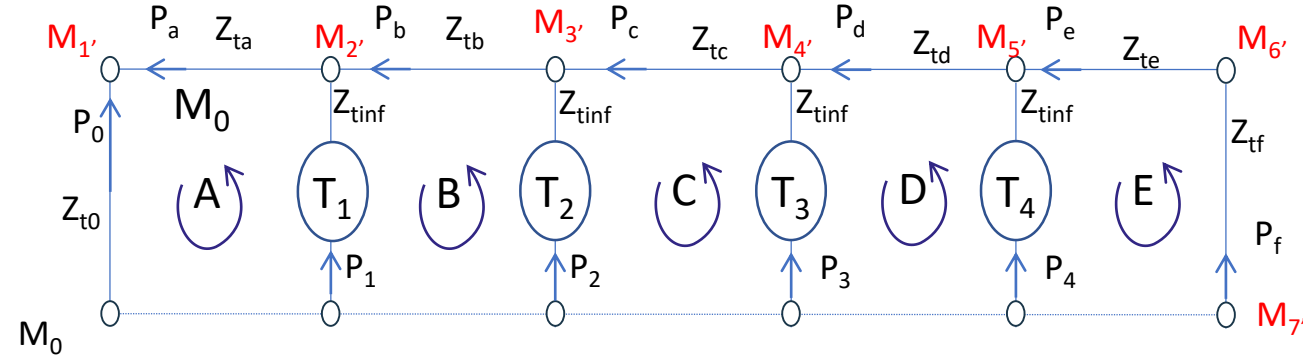
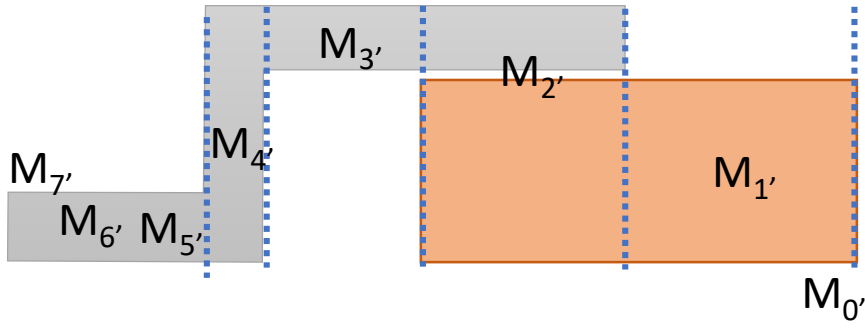
$$Ze^\omega = Ce_\omega^{\alpha t} * Ze_\alpha * Ce_\omega^\alpha$$

## Step 4: Résolution pour $U_\alpha$



$$\left\{ \begin{aligned} U_{source} &= [U_0, 0, 0, 0, 0] \\ U_\omega &= Ce_\omega^{\alpha t} * U_{source}^t \\ Q_\omega &= Ze^{\omega-1} * U_\omega \\ Pe_\alpha &= Ce_\omega^\alpha * Q_\omega \\ U_\alpha &= Ze_\alpha * Pe_\alpha \end{aligned} \right.$$

# Détails de la mise en équation (Thermique)



## Step 1 : analyse topologique

Espace des Branches :  $B=11$ , source  $T_\alpha$ , flux (puissance)  $P_\alpha$ , impédance  $Zt_\alpha = Rt$

Espace des Mailles :  $M=5$ , source  $T_\omega$ , flux (puissance)  $Q_\theta$ , impédance  $Zt^\omega$

## Step 2: Description des variables dans l'espace des branches

$$Zt_\alpha = \text{diag}(Zt_\infty \ Zt_\infty \ Zt_\infty \ Zt_\infty \ Zt_0 \ Zt_a \ Zt_b \ Zt_c \ \dots \ Zt_f) \text{ où } Zt_{a,b,c,d,e,f} = \frac{L_i}{k_i \cdot S_i} \text{ (axial)}$$

## Step 3 : Connectivité et variables dans l'espace des mailles

$$Ct_\omega^\alpha = \text{mat}(11,5)$$

$$Zt^\omega = Ct_\omega^{\alpha t} * Zt_\alpha * Ct_\omega^\alpha$$

## Step 4: Résolution pour $T_\alpha$



$$\left\{ \begin{aligned} T_{source} &= [Pe_1 \cdot Zt_\infty, Pe_2 \cdot Zt_\infty, Pe_3 \cdot Zt_\infty, Pe_4 \cdot Zt_\infty, 0 \dots 0] \\ T_\omega &= Ct_\omega^{\alpha t} * T_{source}^t \\ Q_\omega &= Zt^{\omega-1} * T_\omega \\ Pt_\alpha &= Ct_\omega^\alpha * Q_\omega \\ T_\alpha &= Zt_\alpha * Pt_\alpha \end{aligned} \right.$$

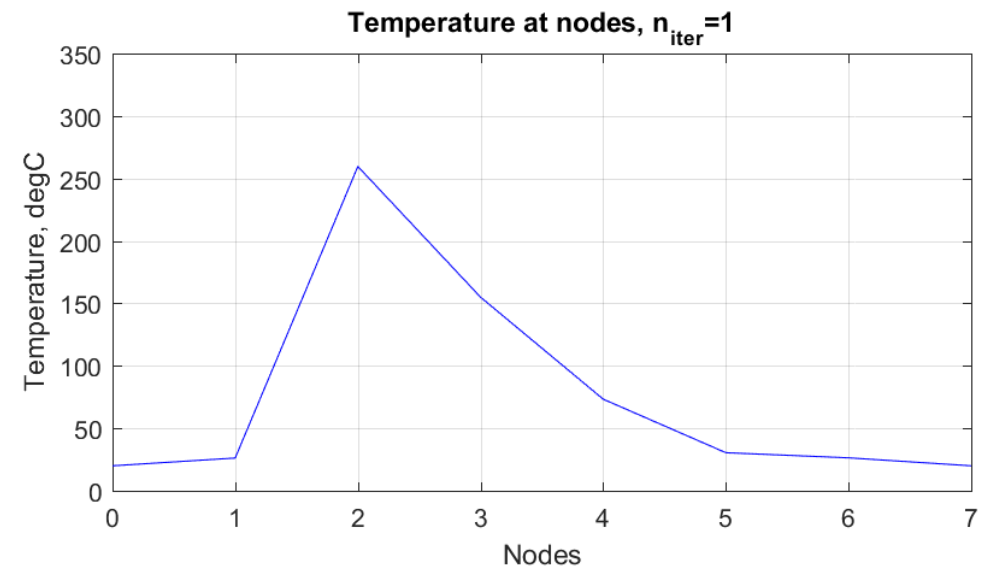
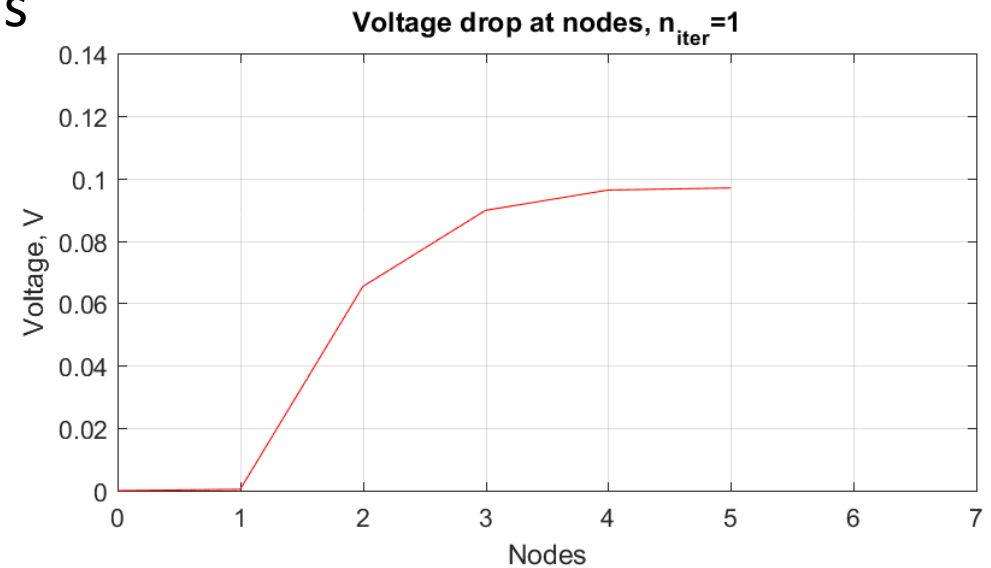
# Résultats aux nœuds (Electrique & Thermique)

## Profils obtenus des variables aux nœuds

Electrique : Potentiel total par cumul des potentiels  $\Delta U_\alpha$

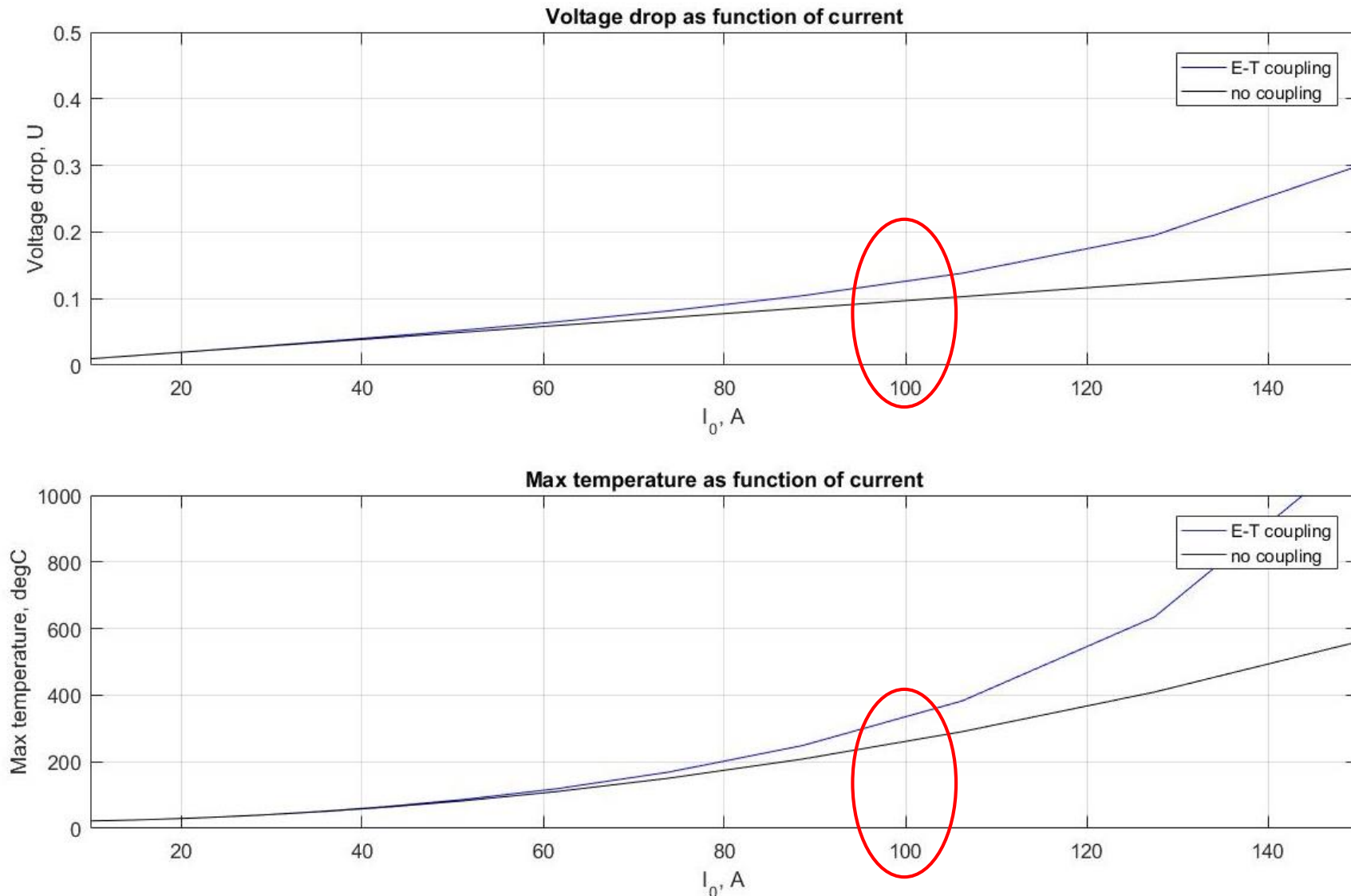
Thermique : Température recalculée à partir des différences  $\Delta T_\alpha$

Condition :  $I_0 = 100 \text{ A}$



# 1<sup>er</sup> couplage Electro-Thermique $P_{th}(U)$ , $\rho^{el}(T)$

## Influence de prise en compte du couplage



# 1<sup>er</sup> couplage Electro-Thermique $P_{th}(U), \rho^{el}(T)$

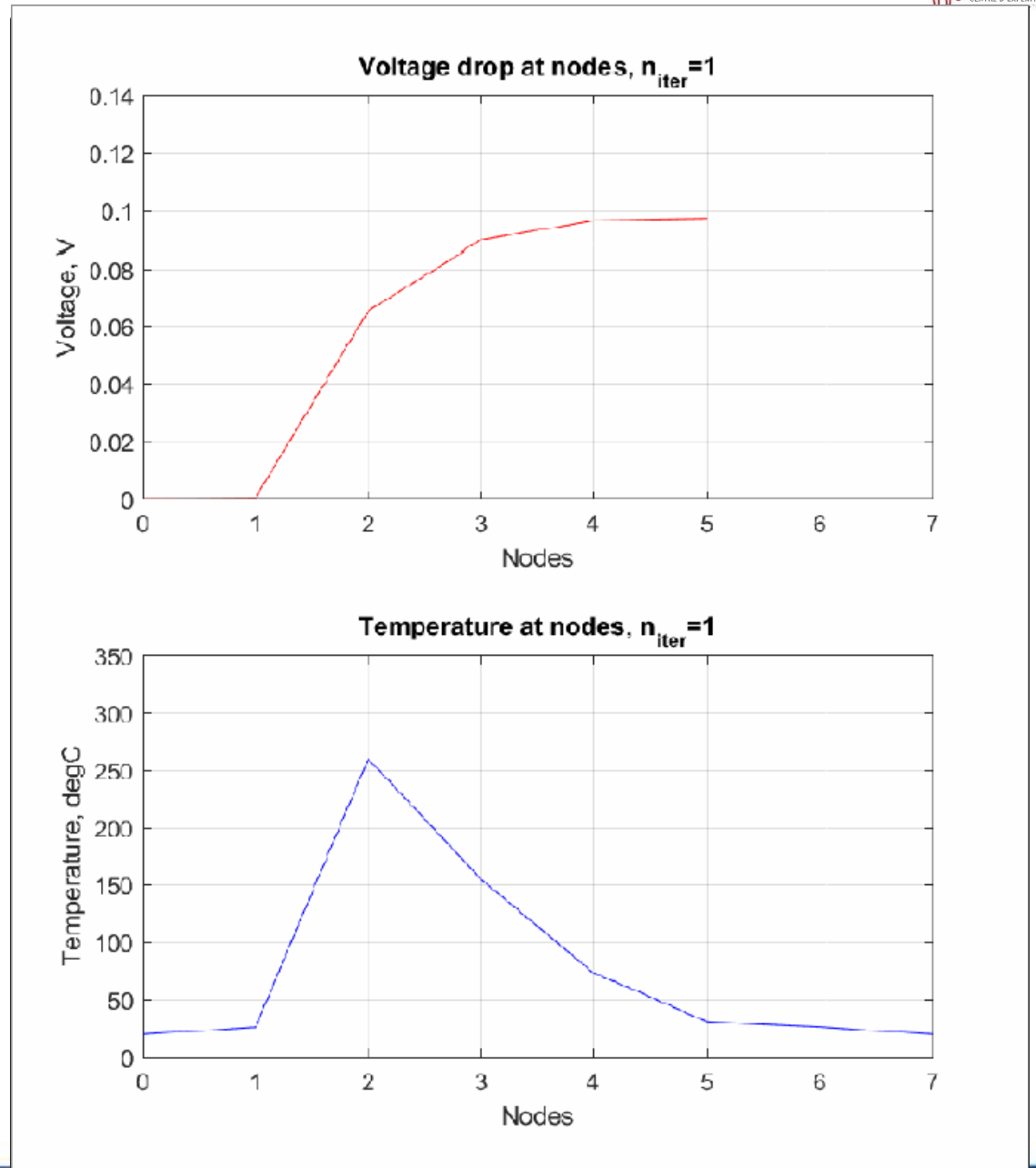
▣ Couplage dit « faible »  
 (itérations successives)

▣  $\rho^{el}(T)$

$$Ze_{\alpha} = R_e = \rho^{el}(T) \frac{L}{S}$$

▣  $P_t(U)$

$$T_{source} = [Pe_1 \cdot Zt_{\infty}, Pe_2 \cdot Zt_{\infty}, Pe_3 \cdot Zt_{\infty}, Pe_4 \cdot Zt_{\infty}, 0 \dots 0]$$





# 1<sup>er</sup> couplage Electro-Thermique $P_{th}(U)$ , $\rho^{el}(T)$

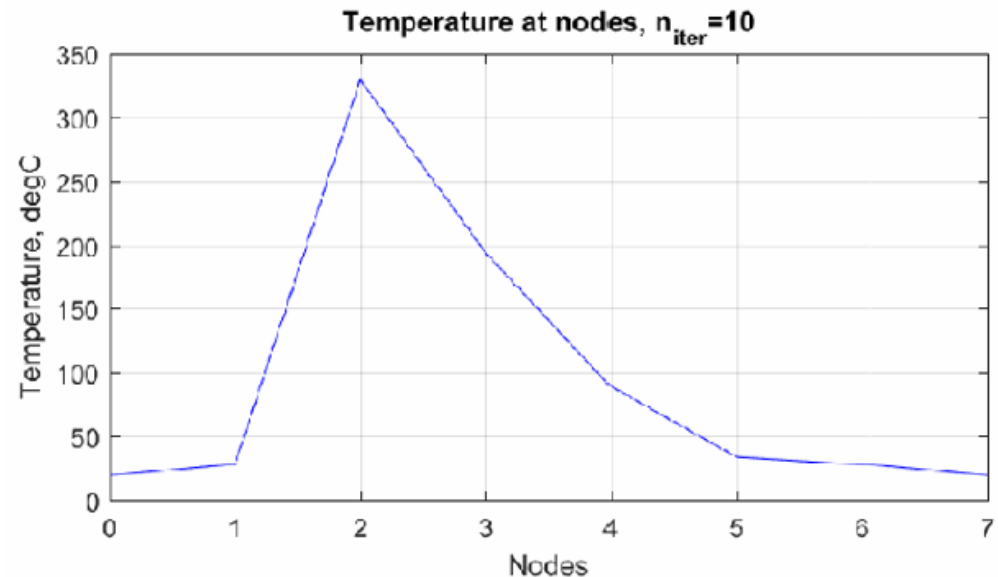
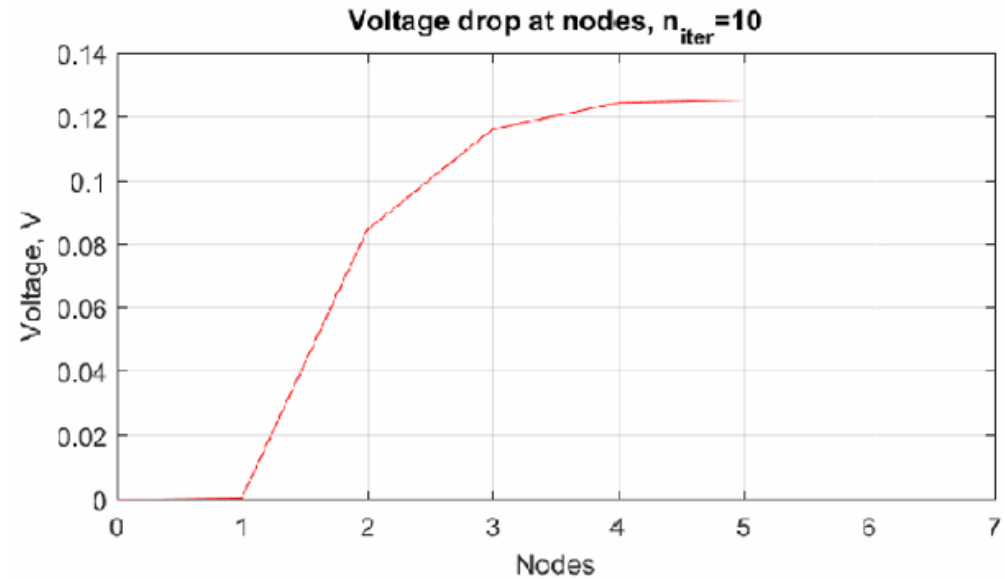
▣ Couplage dit « faible »  
(itérations successives)

▣  $\rho^{el}(T)$

$$Ze_{\alpha} = R_e = \rho^{el}(T) \frac{L}{S}$$

▣  $P_t(U)$

$$T_{source} = [Pe_1 \cdot Zt_{\infty}, Pe_2 \cdot Zt_{\infty}, Pe_3 \cdot Zt_{\infty}, Pe_4 \cdot Zt_{\infty}, 0 \dots 0]$$





## MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DES CONNECTEURS DE PUISSANCE : PRINCIPE ET PREMIÈRES ILLUSTRATIONS

- 1/ Contexte et objectifs
  - Contexte
  - Objectifs du projet
- 2/ Premiers constats expérimentaux
- 3/ Définition de l'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR)
  - Contexte de modélisation
  - Principe méthodique
  - Mise en équation
- 4/ Application à un exemple stationnaire électro-thermique
  - Description de la configuration Pin/socket
  - Premiers résultats
- 5/ Conclusions et perspectives
- 6/ Publications

# Conclusion & Perspectives

## Conclusions

- ▀ Etudes expérimentales et théoriques des connecteurs à pinoche-tulipe réalisés
  - ▀ Connecteurs robustes : aucune défaillance face aux chocs vibratoires
  - ▀ Variation de  $R_c$  considérables pour certains niveaux de vibration
- ▀ Formalisme de l'ATR intéressante pour prise en compte des phénomènes multiphysiques pour des résultats de premier ordre

## Perspectives

- ▀ Sur notre première application d'un élément pinoche-tulipe :
  - ▀ Couplage fort
  - ▀ Régime transitoire
  - ▀ ...
- ▀ Les résultats du projet VATHIVAC sont actuellement exploités pour des nouveaux projets de recherche avec des partenaires académiques/industriels du transport

# Publications

## ■ Revues internationales à comité de lecture « ISI web of science »

1. B. Ravelo, “Multiphysics TAN Modelling of Uniaxial Vibration Loaded Pin-Socket Electrical Contact”, IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, Vol. 3, No. 1, Dec. 2018, pp. 50-57.
2. B. Ravelo, “Multiphysics Analysis of Pin-Socket Electrical Dynamic Contact Susceptibility Under Vibration Stress”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 61, No. 2, Apr. 2019, pp. 344-351.
3. B. Ravelo, N. Peyret, O. Penas and T. Davin, “Multiphysics Analysis of Hemi-Spherical Bulk Conductor Hertzian Contact Under Uniaxial Mechanical Load”, IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, DOI 10.1109/JMMCT.2019.2923878, June 2019.
4. Blaise Ravelo, Benoît Agnus, Stephane Carras, Tanguy Davin, Cauer Ladder Inspired Kron-Branin Modelling of Thermal 1D Diffusion, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, DOI: 10.1109/TCSII.2019.2902220, February 2019

## ■ Communications (conférences) internationales & nationales

1. C. Cholachue and B. Ravelo, “SNR Kron-Branin Model of Braided Shielded Coaxial Cable under Burst Striking”, Proc. of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019), 2-6 Sept. 2019, Barcelona, Spain, pp. 1-6.
2. C. Cholachue, B. Ravelo et B. Laurent, “Modèle Kron-Branin de blindage cylindrique en interaction avec un champ magnétique uniforme”, Proc. of 19ème Colloque international sur la compatibilité électromagnétique (CEM 2018), 9-11 Juillet 2018, Paris, France, pp. 1-6.
3. C. Cholachue, B. Ravelo et O. Maurice, « Calcul Analytique Rapide De Matrice S d’un Connecteur a Multiports via les Espaces de Branche, de Maille et de Port par le Formalisme de Kron », Proc. Workshop MS2C : Modélisation systémique de systèmes cyber-physiques, Poitiers, France, 7 Juin 2019, pp. 1-6.

Intervenants :

**Moncef KADI, Tanguy DAVIN**



Remerciements spéciaux à :

**Blaise RAVELO, Olivier MAURICE**

## MERCI DE VOTRE ATTENTION