

# AFSCET

## Res-Systemica

Revue Française de Systémique  
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 20, printemps 2020

Modélisation systémique  
de systèmes cyber-physiques

**Res-Systemica, volume 20, article 02**

Calcul analytique rapide de matrice  $S$  d'un conducteur  
à multiports via les espaces de branche, de maille  
et de port par le formalisme de Kron

Christel Cholachue, Blaise Ravelo, Olivier Maurice

7 pages

contribution reçue le 14 mars 2020



Creative Commons

# CALCUL ANALYTIQUE RAPIDE DE MATRICE S D'UN CONNECTEUR A MULTIPTS VIA LES ESPACES DE BRANCHE, DE MAILLE ET DE PORT PAR LE FORMALISME DE KRON

C. Cholachue<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Federal-Mogul Systems  
Protection SAS, Crépy en Valois,  
France  
christel.cholachue@tenneco.com

B. Ravelo<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Université de Normandie  
UNIROUEN, ESIGELEC,  
IRSEEM EA 4353, 76000 Rouen  
France

O. Maurice<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Ariane Group, Route de  
Verneuil, Les Mureaux  
France

**Résumé** – Les dispositifs passifs multiports constituent un des éléments clés des systèmes électroniques et électriques modernes. Ces dispositifs sont fréquemment représentatifs des connecteurs et des faisceaux des câbles. L'étude analytique des ces dispositifs sur une bande de fréquence suffisamment large nécessite des approches rigoureuses comme les matrices de répartition. Une méthode particulièrement nouvelle, qui n'a jamais été élaborée auparavant est établie pour le calcul analytique des matrices pour une structure passifs à n-ports. La méthode est basée sur le formalisme Kron et met en œuvre des représentations des courants et des tensions dans les espaces de branche, de maille et de port. La pertinence de la méthode a été vérifiée sur plusieurs circuits électroniques localisés sur des bandes de fréquences super-larges de DC à plusieurs GHz.

**Mots-clés** : Dispositifs passifs, calcul analytique, paramètres S, formalisme de Kron, circuits multiports, application super-large bande

## 1. Introduction

Avec l'augmentation incessante de la densité d'intégration, les dispositifs électroniques à multiports sont omniprésents dans les systèmes électroniques et électriques modernes. Les connecteurs et les faisceaux des câbles sont des exemples de ces dispositifs qui sont actuellement incontournables dans les systèmes comme les voitures et les avions [1-2]. Mais, la fiabilité [3] de ces dispositifs vis-à-vis des perturbations indésirables comme les émissions de Compatibilité Electromagnétique (CEM) restent des questions ouvertes et attirent attentivement l'attention des chercheurs dans les ingénieries automobile et aéronautique, et beaucoup d'autres domaines. De ce fait, la prédiction des performances de ces dispositifs constitue un défi au sein des ingénieurs concepteurs et fabricants [4].

De nos jours, plusieurs approches ont été déployées face à ce défi technique. Des approches expérimentales sont traditionnellement appliquées par des industrielles pour pouvoir respecter les normes, comme les DO-160 [5], établies en fonction des environnements d'application. Mais, les approches expérimentales sont souvent onéreuses notamment en cas de non succès en phase préliminaire. Les tests expérimentaux peuvent être non praticables pour certains cas des systèmes comme les engins spatiaux ou les lanceurs qui sont destinés à être fonctionnels sans passer par des phases de test normalisée avec obligation de réussite en un premier essai. C'est la raison pour laquelle que des approches virtuelles basées sur des simulations ont gagné le terrain avec l'âge d'or actuel des numériques et disponibilités PC de calcul ultra-rapide et forte capacité mémoire depuis la fin des années 80. D'énormes succès ont été constatés grâce à des outils de simulation émergents comme SPICE®, HFSS® d'Ansys®, CST MWS® de Dassault System® et ADS® de Keysight Technologies®. Ces outils quasi-cultes d'ingénierie électroniques modernes ont été adoptés par plusieurs communautés d'ingénierie comme les hyperfréquences, la microélectronique ou encore la CEM comme outils standards pour l'analyse virtuelle des structures électroniques comme les dispositifs multiports incluant les connecteurs et les faisceaux de câblage électrique. Malgré ces succès enthousiastes des simulateurs EM, les utilisateurs sont fréquemment confrontés à des limites notamment pour les analyses paramètres S des connecteurs multiports sur une bande de fréquence de DC à plusieurs gigahertz.

## 2. Etat de l'art sur la méthode de Kron

### 2.a. De l'Origine à la CEM

Aux vues de cette limite, nous cherchons à mettre au point des approches, moins habituels s'appuyant sur une démarche jusqu'à présent moins conventionnels à base du formalisme de Kron du laboratoire de recherche de General

Electric de New-York, initié depuis les années 30 [6]. L'Analyse Tensorielle des Réseaux a été utilisé par Kron pour modéliser des machines électriques (Fig. 1) [6].

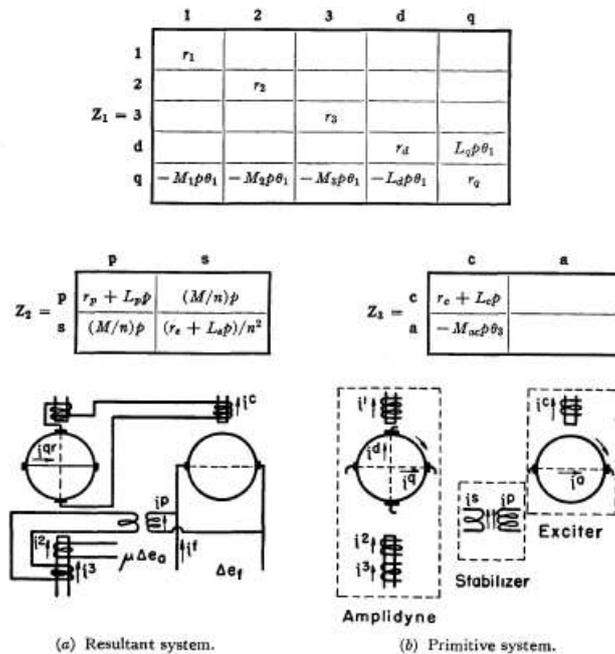


Fig. 1 : Schéma de régulateur amplidyne de tension [6].

Le formalisme a été enrichi par Branin [7] du laboratoire de l'IBM dans les années 60 pour la modélisation des lignes de transmission (LT) sans pertes. L'approche temporelle de Branin illustrée par le diagramme caractéristique de la Figure 2 consiste à introduire des f.é.m des couplages entre les mailles de source et de charge en tenant compte du délai de propagation.

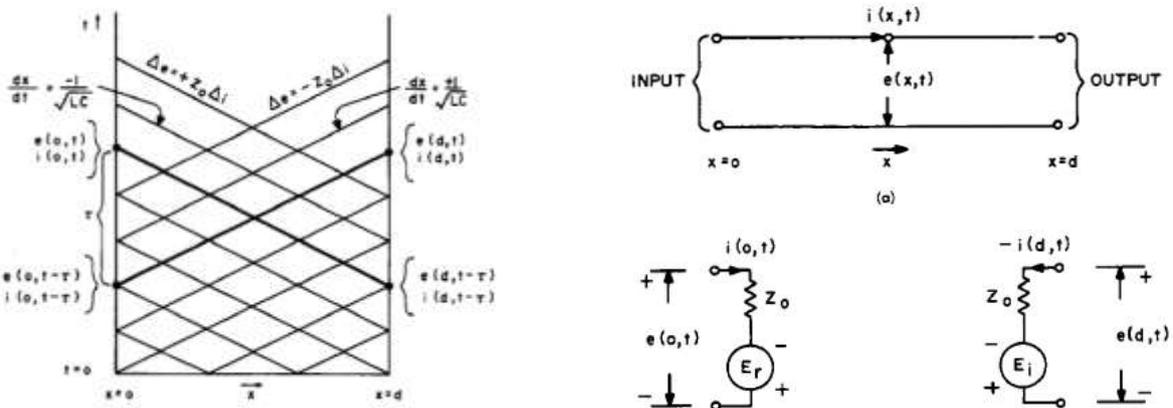


Fig. 2 : Courbes caractéristiques d'une LT uniforme (à gauche) et graphe de Branin (à droite) [7].

Le formalisme de Kron modifié a été développé par Olivier Maurice pour traiter des problèmes CEM des systèmes complexes depuis les années 90 [8]. En mettant en œuvre le concept d'Analyse Tensorielle des Réseaux (ATR) étendues (x-TAN en anglais), Olivier Maurice nous a permis de modéliser des comportements CEM conduits et rayonnés simultanément [8-9] des différents dispositifs électriques et électroniques opérant en basse fréquence (BF) et aussi bien en très haute fréquence (THF) jusqu'à plusieurs dizaines de gigahertz.

### 2.b. Vers l'Analyse de la Matrice de Répartition

La méthode de Kron incorporant le modèle des LT initié par Branin nous permis de modéliser des interconnexions des circuits imprimés (Fig. 3) [10] avec une rapidité et précision suffisamment efficace pour des applications industrielles.

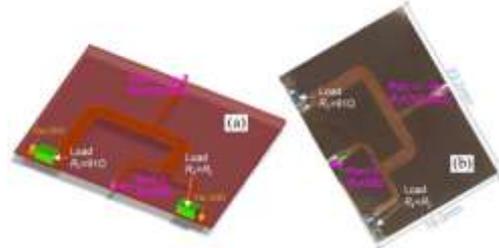
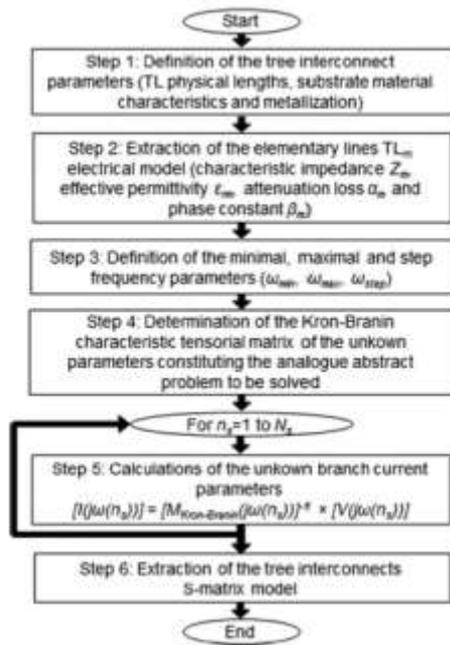


Fig. 3 : Organigramme de la modélisation Kron-Branin (KB) pour l'analyse d'une interconnexion Y-Y [10].

Mais, notre approche de calcul des paramètres de répartition était initialement applicable à uniquement à des circuits à deux ports d'accès. Ce qui était fastidieuse pour plus le cas des circuits à plusieurs ports. Pour surmonter cette difficulté, nous avons fait évoluer notre approche pour pouvoir extraire directement l'ensemble des matrices S des structures à n-ports [11-12] d'une manière extrêmement rapide et suffisamment simple avec la bonne maîtrise des orthographe et des grammaires du langage ATR.

### 3. Etude applicative au connecteur à multi-pinoche

#### 3.a. Description du connecteur à multi-pinoche

Comme preuve de concept de notre modèle de Kron, nous allons considérer la structure multiport du connecteur Souriau [2] montré par la Figure 4. Pour mesurer la résistance de contact de ce connecteur, on a considéré le montage de la figure 4(b). La mesure HF de ce connecteur se fait généralement en paramètres S avec un analyseur de réseau (VNA). Mais, ces paramètres devront se prédire également via des simulateurs commerciaux généralement assez coûteux ou analytiquement via des méthodes comme celle de Kron.

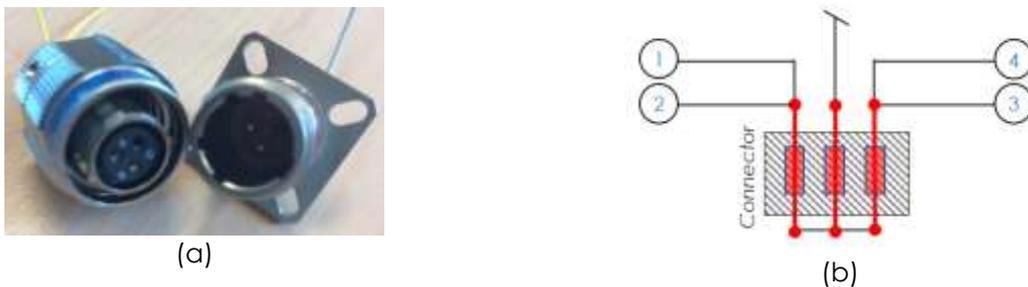


Fig. 4 : (a) Connecteurs Souriau [2] mâle et femelle, et (b) schéma de montage pour mesurer la résistance de contact.

#### 3.b. Circuit équivalent

Pour pouvoir calculer les paramètres S de notre connecteur, nous avons considéré le schéma de la figure 4. Pour une dimension physique significative par rapport à la longueur d'onde du signal à la fréquence maximale, on peut considérer le circuit distribué de la Figure 4(a). Dans la présente étude, on se limite à l'approche circuit localisé de la Figure 4(b). Notre circuit est alimenté par deux sources de tension  $e_1$  et  $e_2$ . On peut noter  $M_k$ ,  $sM_{k,l}$  ( $k = \{1,2,3\}$ ) la branche représentant la connexion pin-socket qui connecte également la source d'entrée supposée avec l'impédance interne  $Z_{k,s}$

et l'impédance de charge de sortie  $Z_{k, l}$  ( $k = \{1,2\}$ ) comme indiqué dans le Tableau 1. Le lien de signal est représenté par  $M_{1s}M_{1l}$  et  $M_{2s}M_{2l}$ . Le lien représente le réseau terrestre  $M_{3s}M_{3l}$ .

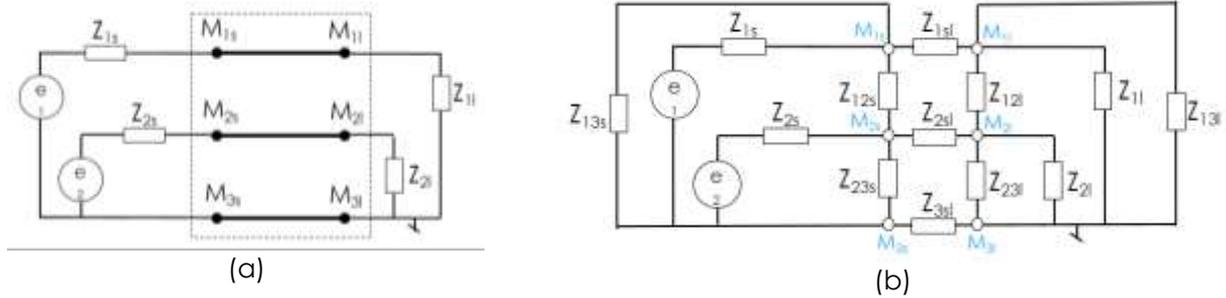


Fig. 5 : Circuits équivalents multiports distribué (a) et localisé (b) du connecteur de la Figure 4.

Configuration	Nodes	Impedance
<b>Branch</b>	$M_{1s}M_{1l}$	$Z_{1sl}$
	$M_{2s}M_{2l}$	$Z_{2sl}$
	$M_{3s}M_{3l}$	$Z_{3sl}$
<b>Input coupling</b>	$M_{1s}M_{2s}$	$Z_{12s}$
	$M_{1s}M_{3s}$	$Z_{13s}$
	$M_{2s}M_{3s}$	$Z_{23s}$
<b>Output coupling</b>	$M_{1l}M_{2l}$	$Z_{12l}$
	$M_{1l}M_{3l}$	$Z_{13l}$
	$M_{2l}M_{3l}$	$Z_{23l}$

Tableau 1 : Désignation des impédances constituant le circuit de la Figure 4(b).

### 3.c. ATR pour Circuit Connecteur

Par hypothèse, nous supposons que le connecteur fonctionne avec des signaux basse fréquence dont la longueur d'onde est largement supérieure à sa longueur physique. Avant de procéder à l'ATR, il est primordial de définir les paramètres topologiques du Tableau 2.

Désignation	Nombre des branches	Nombre des mailles	Nombre des ports
Valeur	$B$	$M$	$p$

Tableau 2 : Paramètres topologiques du circuit de la Figure 4(b).

Par conséquent, le circuit équivalent électrique peut être simplement représenté par des impédances localisées.

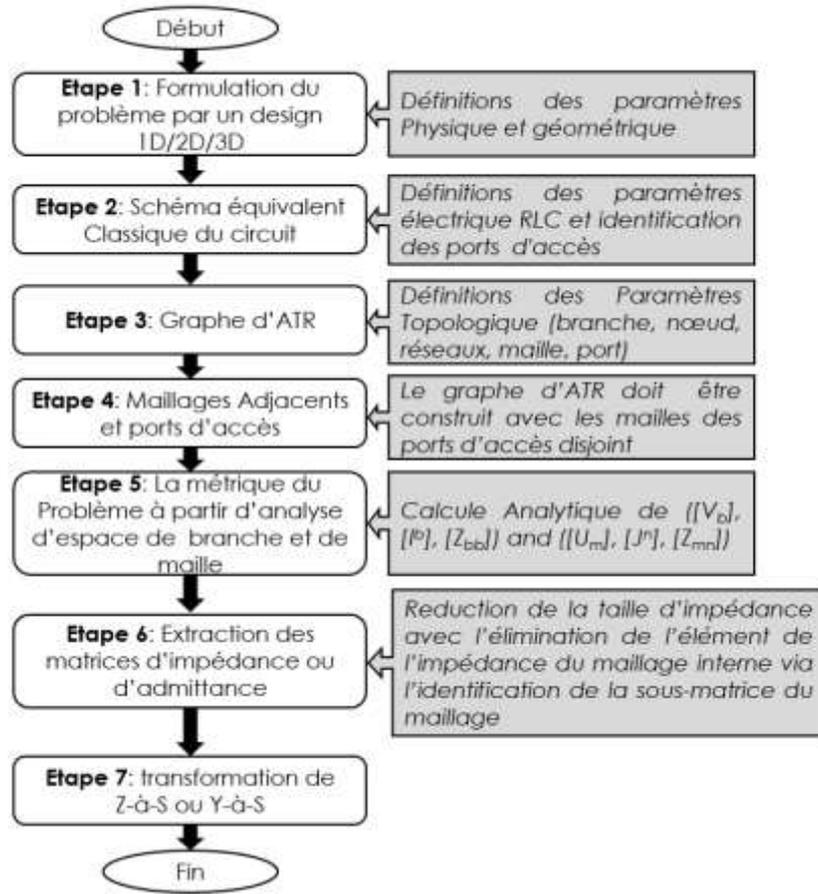
- L'analyse dans l'espace de branche consiste à écrire la covariable de source de tension  $U^a$  et la contravariable des courants de branche  $I^b$  avec  $a$  et  $b$  de  $\{1,2,\dots,B\}$ . En se référant au graphique de la Fig. 4, on peut écrire :
  - o La transposition de la source de tension :



$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[S_{matrix}] = ([Z_{matrix}] - Z_0 [1_P]) \times ([Z_{matrix}] + Z_0 [1_P])^{-1} \quad (6)$$

Ensuite, la métrique de problème réduite peut être obtenue à partir de la matrice de connectivité de branche à maille. La figure 6 nous montre l'organigramme de la méthode.



**Fig. 6 : Organigramme de la méthode d'extraction rapide des paramètres S par le formalisme de Kron**

. Connaissant la matrice impédance les impédances de contact et de couplage du connecteur peuvent être déterminées.

$$[Z(j\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{11}(j\omega) & \cdots & Z_{p1}(j\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1p}(j\omega) & \cdots & Z_{pp}(j\omega) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

#### 4. Conclusion

Une approche de calcul des paramètres de répartitions des dispositifs multiports est introduit. Une brève description de la méthode est présentée. Un cas d'application de l'analyse d'un connecteur à six ports est considéré comme preuve du concept.

## Références

- [1] Available online, Accessed 20 March 2017, Automotive Connectors, <http://www.hhc-autoterminal.com/terminal.shtml?gclid=Cj0KEQjAuJXFBRDirIGnpZLE-N4BEiQAqV0KGpbur2COTOZPSfeeWzJLwbWpb0pSt7DfUrit4DMIE9caAoai8P8HAQ>
- [2] Available online, Accessed 24 Feb. 2018, <https://www.radiall.com/products/multipin-aerospace-connectors/modular-connectors.html>
- [3] R. S. Mroczkowski, “*A perspective on connector reliability*”, in Proc. of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, (Electrical Contacts 2004), Seattle, WA, USA, 23-23 September 2004, pp. 1-28.
- [4] Y.-Y. Luo, J.-Y. Yang, Y.-L. Ren, Y.-L. Zhang and W.-J. Li, “*Simulation and experimental study on plug and pull characteristic of electrical connector contact*”, Chin. J. Eng. Design, vol. 24, no. 2 (195), pp. 168-173, 2017.
- [5] RTCA DO-160E, “Environmental conditions and test procedures for airborne equipment,” RTCA Inc., 2004.
- [6] G. Kron, *Tensor Analysis of Networks*, Wiley, New York, Chapman & Hall, London, 1939.
- [7] F. H. Branin, “*Transient analysis of lossless transmission lines*”, Proc. of the IEEE Letters, 1967, pp. 2012-2013.
- [8] O. Maurice, « *La compatibilité électromagnétique des systèmes complexes* », Hermes-Lavoisier, 2007.
- [9] O. Maurice, A. Reineix, P. Durand, and F. Dubois, « *Kron’s method and cell complexes for magnetomotive and electromotive forces* », Int. J. Applied Mathematics, vol. 44, no. 4, 2014, pp. 183-191.
- [10] B. Ravelo and O. Maurice, “*Kron-Branin Modeling of Y-Y-Tree Interconnects for the PCB Signal Integrity Analysis*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 59, No. 2, Apr. 2017, pp. 411-419.
- [11] C. Cholachue, B. Ravelo, and A. Simoens, “*Fast S-Parameter TAN Model of n-Port Lumped Structures*”, IEEE Access, Soumis pour publication, 2019, pp. 1-10.
- [12] C. Cholachue, Z. Xu, B. Ravelo, A. Simoens, O. Maurice, and Y. Liu, “*Full S-Parameters TAN Model of Loop Probe Near-Field Coupling onto Shielded Coaxial Short-Cable*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Soumis pour publication, 2019, pp. 1-10.