

Proposition d'une théorie pour la CEM

Olivier MAURICE

Responsable études amonts CEM et responsable du site de Trappes, GERAC

Une théorie :

« ensemble d'explications, de notions ou d'idées sur un sujet précis pouvant inclure des lois et des hypothèses, induites par l'accumulation de faits prouvés par l'observation ou l'expérience ». (source Wikipédia)

Proposition :

écrire une théorie pour la CEM basée sur l'analyse tensorielle des réseaux étendue¹

- ✓ définitions de base
- ✓ hypothèses (postulats)
- ✓ se doter d'un formalisme, description d'un système – définition : tenfold
- ✓ transformateurs, propagateurs et évolution
- ✓ Commencer la théorie : lois sur la construction, l'évolution, la vie des systèmes
- ✓ échelles et référentiels de travail
- ✓ environnements & différents types d'interactions
- ✓ loi de la CEM – version faible
- ✓ loi de la CEM – version forte

Définitions de base (les principales)

système :

un système est un agencement d'éléments (composants, ...) qui assure une fonction (biologique, sociale, etc.). Un système peut être embarqué dans un autre système (par exemple un téléphone portable). Un système est au minimum autonome (au sens faible), au plus capable de reproduction et de pensée (systèmes complexes).

échelle :

on parle de changement d'échelle lorsqu'une équation physique associée à un élément d'un système doit être changée pour traduire les évolutions de cet élément et ne peut plus seulement être re-paramétrée (càd que les valeurs de ses paramètres sont changées).

Hypothèses - postulats

La puissance est l'invariant (ou le débit d'énergie). Quelle que soit l'échelle ou le référentiel de travail, la puissance développée ou consommée par un système est indépendante de sa description.

un système ne peut être simultanément décrit comme assemblage d'éléments appartenant des référentiels différents.

L'évolution d'un système respecte les lois de l'entropie de l'information et de la thermodynamique.

On suppose le système comme ayant un comportement qui s'inscrit avec un incertain raisonnable dans le cadre des lois physiques connues à l'époque de sa modélisation. Dans le cas contraire les lois établies ne sont plus démontrées dans le cas général.

Description d'un système - *tenfold*

Définition :

Un système ou élément (ou électronique ou composant) peut être représenté par une liste de 3 ensembles d'objets mathématiques.

Un premier ensemble T décrit la topologie du système projeté sur un complexe cellulaire (graphe comprenant des sommets, branches, mailles, moments, réseaux, cordes, paires de sommets).

Un deuxième ensemble g est constitué de tenseurs d'impédances (généralisés) appelés **métrique**.

Un troisième ensemble E est constituée de vecteurs et covecteurs de sources d'énergies.

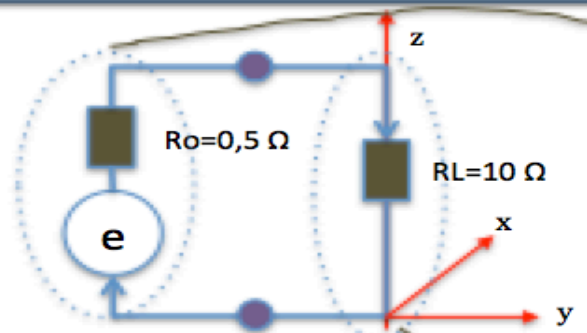
Cette liste est appelée un tenfold et noté

$$\check{u} = (T, g, E)$$

Description d'un système - *tenfold*

Exemple simple de tenfold :

Tenfold du système et ses transformations.



$$T = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix} \end{array} \right\}$$

$$g = \begin{bmatrix} R_0 & 0 \\ 0 & R_L \end{bmatrix} \quad E = [e, 0]$$

$$\ddot{u} = (T, g, E)$$

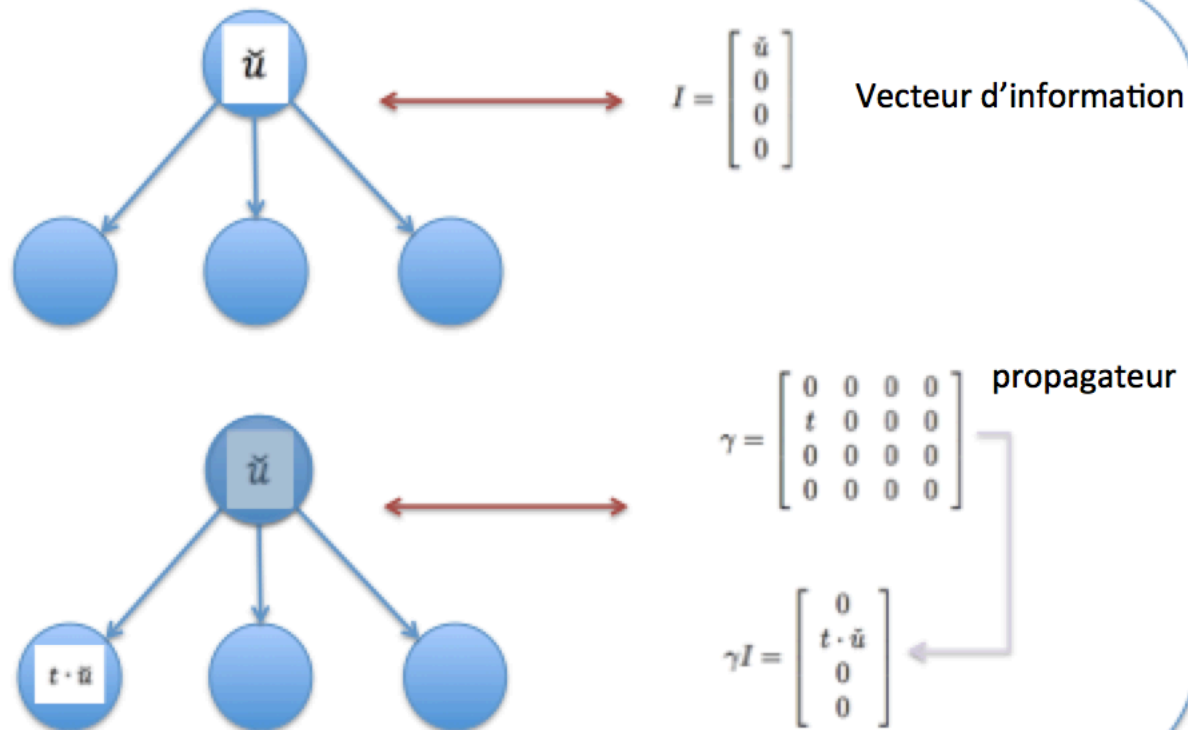
Une lampe à incandescence branchée sur une pile



transformateurs, propagateurs & évolution

Un transformateur permet de transformer un tenfold. Il peut modifier sa topologie, sa métrique et ses sources.

$$\check{t} \cdot \check{u}_0 \rightarrow \check{u}_1$$



Commencer la théorie : lois sur la construction, l'évolution, la vie des systèmes

Définition :

Un élément est un tenfold. Un système ou une partie d'un système S se construit en deux temps :

1. somme directe des tenfolds éléments ;
2. transformation pour traduire les couplages entre les éléments.

$$\check{u}_0 \oplus \check{u}_1 \oplus \check{u}_2 \oplus \dots = \bigoplus_i \check{u}_i$$

$$S = \check{t} \cdot (\bigoplus_i \check{u}_i)$$

La construction peut se faire par étape :

$$S = \check{T} \cdot [\check{t}_1 \cdot (\bigoplus_i \check{u}_i) \oplus \check{t}_2 \cdot (\bigoplus_{k \neq i} \check{u}_{k \neq i}) \oplus \dots]$$

Commencer la théorie : lois sur l'évolution, la vie des systèmes

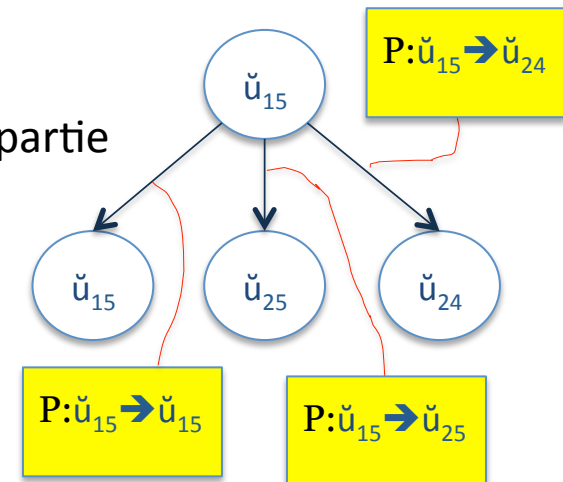
Axiome 1 :

Un système original, une fois constitué à une probabilité d'existence de 1 (information complète). Ses évolutions vers différents états sont pondérées de probabilités de réalisations.

Axiome 2 :

Une gamma matrice est un propagateur qui contient pour partie les transformateurs transformant les tenfold d'un état i vers un état k et les probabilités pour qu'un tenfold aille d'un état i vers un état k .

$$\gamma \supset \check{t}_{ij}, p_{ij}$$



Définition : la vie (mission) d'un système se traduit par l'application successive de propagateurs à un tenfold origine et une information complète de départ. Toute mission est stochastique.

Commencer la théorie : lois sur l'évolution, la vie des systèmes

alcool + ADH → acétaldéhyde + ALDH → acétate

$$\check{u}_{\text{acetate}} = \gamma_2 \gamma_1 \check{u}_{\text{alcool}}$$

Equation de la vie CEM d'un système

La mission de tout système se modélise sous la forme d'une équation d'état au temps B pour un état initial au temps A qui est :

$$\check{u}_B = \gamma_{B,B-1} \dots \gamma_{B-N,A} \check{u}_A$$

Echelles et référentiels de travail

La notion de référentiel est celle de la relativité : point important en électromagnétisme.

La notion d'échelle permet de fixer la validité des fonctions utilisées pour les impédances pour des domaines donnés. Si il y a changement d'échelle, ces lois ne sont plus valables.

Exemples : ligne coaxiale, équations des télégraphistes (même avec pertes) =>

$$\lambda \gg \phi \text{ (diamètre du coaxial)}$$

Un changement d'échelle n'est pas un changement de référentiel, c'est une modification des lois physiques macroscopiques applicables (voire microscopique au sens de la systémique).

Par exemple il ne faut pas oublier que tous les outils basés sur la résolution des équations de Maxwell sont à l'échelle des champs macroscopiques. Ils ne peuvent permettre de prédire le comportement des particules (équations de Maxwell – Lorentz). Les degrés de liberté des particules sont nuls – on leur impose les axes conducteurs.

Environnements & interactions

Règle :

En CEM, l'environnement électromagnétique radiatif est un transformateur qui n'agit que sur la composante « sources » des tenfolds (il n'impacte pas les structures).

Bestiaires des interactions :

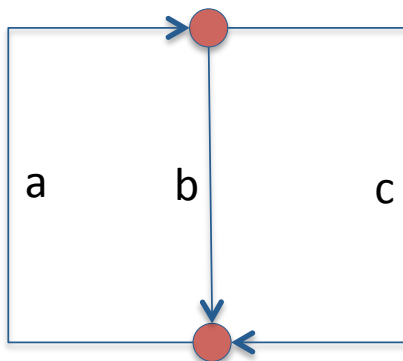
- diffusion (couplage par impédance commune, ...) ;
- ondes guidées (intégrité de signal, hyper, ... mais pas de la CEM) ;
- champ proche (composantes en $1/r^n$, $n>1$: diaphonie, capacitif, mutuelles, ...) ;
- champ rayonné (pertes par rayonnement) ;
- particules (ions lourds, ...)

Diffusion

Définition :

Une interaction par diffusion est une branche partagée entre deux flux différents dans la topologie du complexe cellulaire modélisant le système analysé.

Le résultat est un tenfold dont la métrique dans l'espace des mailles comporte des termes extra-diagonaux de types réels ou imaginaires négatifs.



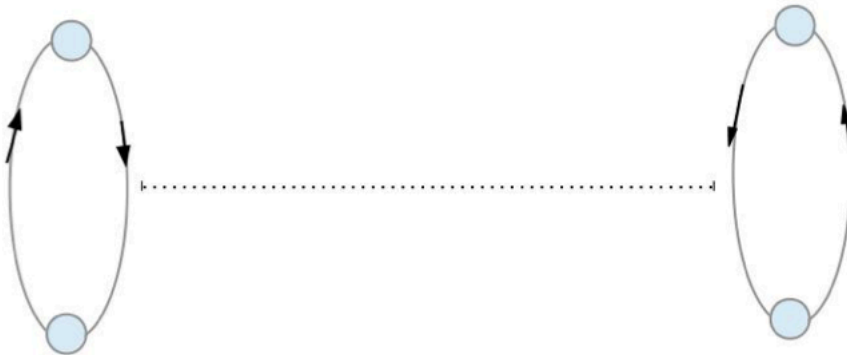
$$\Rightarrow g \approx \begin{bmatrix} a + b & -b \\ -b & b + c \end{bmatrix}$$

Ondes guidées

Définition :

Un échange d'énergie par ondes guidées répond à un modèle de Branin.

Exemple pour une ligne :



$$g = \begin{bmatrix} R_0 + Z_c & (R_L - Z_c) e^{-\tau p} \\ (R_0 - Z_c) e^{-\tau p} & R_L + Z_c \end{bmatrix}$$

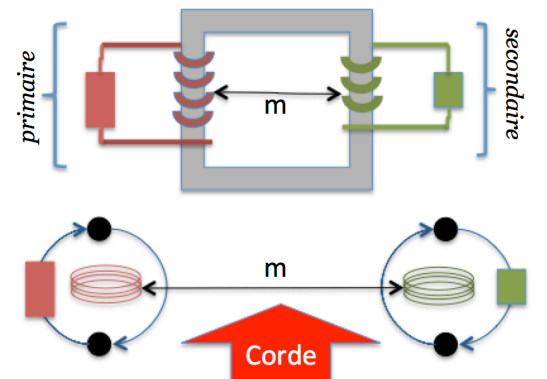
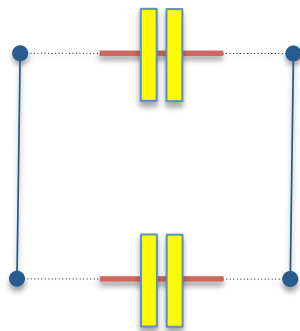
Champ proche

Définition :

Une interaction de champ proche est une interaction en champ libre qui n'engendre pas de pertes par rayonnement dans l'expression de l'interaction.

2 types importants pour la CEM :

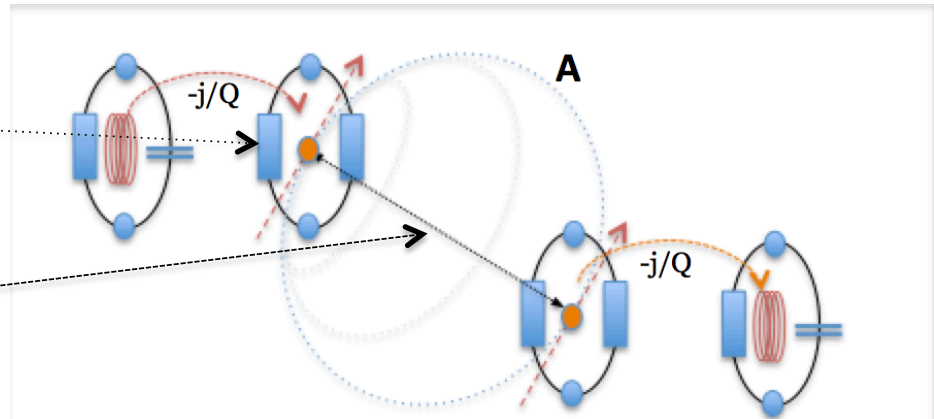
- ❑ l'interaction capacitive (branche capacitive qui est un terme diagonal dans la métrique dans l'espace des branches)
- ❑ l'interaction par mutuelle inductance (corde entre mailles dans la métrique dans l'espace des mailles)



Champ rayonné

résistance de rayonnement

corde



Le moment est le vecteur tangent à l'espace de rayonnement infini



$$R = \frac{1}{i_0^2 2\pi^2} \iint d\theta d\phi s(i_0^2) \quad \text{s en W/m}^2$$

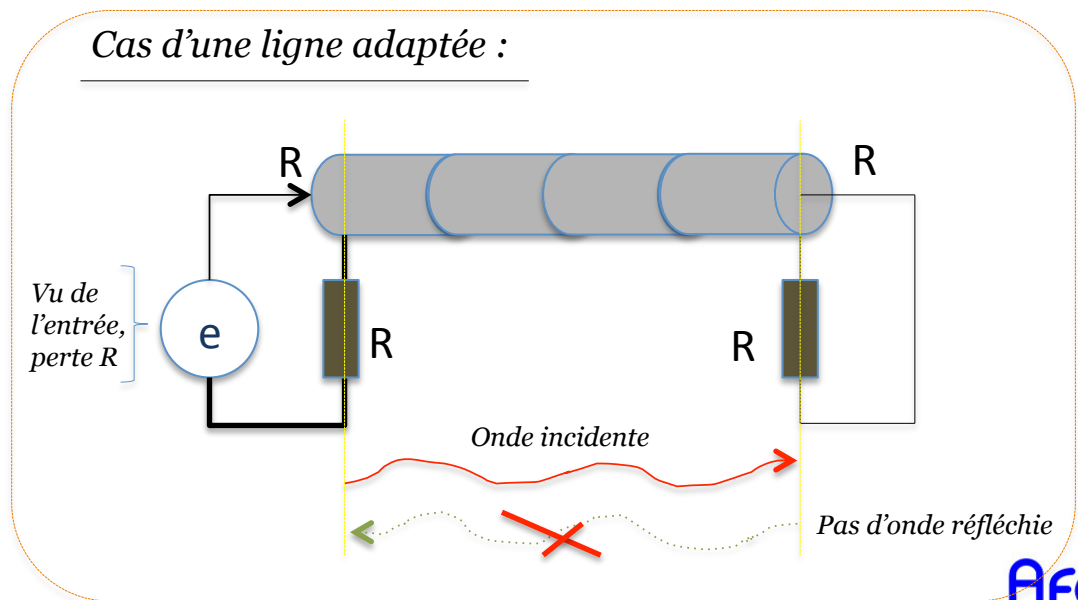
$$z_{21} = \frac{e_2}{k^1} = \sqrt{R_{11} R_{22} A_r(\theta, \phi) [G_{\theta, \phi, \theta', \phi'}] A_t(\theta', \phi')}$$

Champ rayonné

Définition :

Une interaction de champ rayonné s'identifie par la perte de rayonnement engendrée au niveau de l'émetteur de champ. La part d'énergie transportée par le champ et créant la résistance de rayonnement est un processus non symétrique.

processus similaire (bien
que non équivalent) :



Loi de la CEM – version faible

Les règles, hypothèses et définitions précédentes ont permis de démontrer dans ce cadre la formule suivante pour le matériel en CEM :

$$\mathcal{R}(n) = \alpha \left\{ \frac{R_{\mu\nu} y^{\mu\sigma} y^{\nu\zeta} e_{\sigma} e_{\zeta}}{S(n)} \right\} = \alpha \left\{ \frac{T_{\sigma\zeta} F^{\sigma\zeta}}{S(n)} \right\}$$

Risque de perturbation

sources d'agressions EM

fonction de transmission de l'énergie incidente vers les composants

fonction de transcription du niveau vers un chiffrage de risque

Seuil de sensibilité des composants

Loi de la CEM – version faible

Ce modèle suppose que l'on est à topologie invariante et fonctionnel déterministe, ce qui impose les limites suivantes :

- pas de destruction des composants ou modification de modèle
- pas de changement dans le comportement logiciel
- pas d'intervention de facteur humain

Loi de la CEM – version forte

La version forte fait appel à la méthode « xTAN » qui couple théorie des jeux et analyse tensorielle des réseaux. Son observable est une espérance de gain qu'il faut exprimer pour un critère donné (qui sera donné ici par la sûreté de fonctionnement et ses objectifs de disponibilité de la fonction).

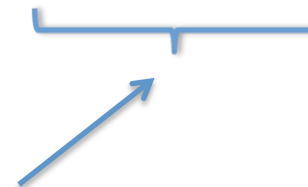
dépassement du seuil hardware
de sensibilité

probabilité
bayésienne



$$\mathcal{R}(n) = P(S(\check{u}_B) > S_0(\check{u}_B) | \underbrace{\gamma_{B,B-1} \gamma_{B-1,B-2} \dots \gamma_{B-N,A}}_{\text{évolution du système au cours de sa vie électromagnétique}} \check{u}_A)$$

évolution du système
au cours de sa vie
électromagnétique



état initial du système



Conclusion

Ecrire une théorie permet de dépasser le simple concept de règles et d'établir des lois qui sont pérennes et indépendantes de l'évolution des technologies, sauf à ce que les formulations mathématiques appliquées ne deviennent elles-mêmes obsolètes.

Par exemple la loi de la CEM dans sa version faible constitue déjà un guide pour décider des actions CEM à mener en priorité au niveau d'un système.

Cette ébauche de théorie demande à être validée, complétée, et ce sur un laps de temps à horizon infini ! La théorie de la mécanique de Newton est ainsi aujourd'hui bien délimitée.

Le métier de la CEM progresse toujours au niveau des outils théoriques et pratiques et peu, voire régresse sur le terrain. Ce constat peut provenir du fait que les approches par formules simples et règles établies pour les premières technologies électroniques ne sont plus exploitables avec les électroniques modernes très changeantes, mélangeant communication, puissance, etc. La mise au point d'une théorie est une voie pour transmettre les fondamentaux invariants aux étudiants et conforter des approches à même de répondre à la complexité des systèmes de demain, pour une utilisation rationnelle et maîtrisée des codes « 3D » ainsi que des prédictions CEM robustes partant d'analyses théoriques analytiques incorporant des expériences virtuelles et non de règles intuitives ou d'usage systématique de simulations qui n'apportent pas de compréhensions maîtrisées des phénomènes électromagnétiques impliqués.