



Le champ électromagnétique n'est pas une observable pour la compatibilité électromagnétique

Olivier Maurice

► To cite this version:

Olivier Maurice. Le champ électromagnétique n'est pas une observable pour la compatibilité électromagnétique. 2023. <hal-04140179>

HAL Id: hal-04140179

<https://hal.science/hal-04140179v1>

Preprint submitted on 24 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Le champ électromagnétique n'est pas une observable pour la compatibilité électromagnétique

Olivier MAURICE - AFSCET, CESIR

June 24, 2023

1 Introduction

La compatibilité électromagnétique (CEM) traite de sujets concrets et industriels. Au même titre que l'écologie, c'est une opportunité pour progresser, ce n'est pas une contrainte. Mais le métier s'est forgé sur des pratiques parfois maladroites ou manquant de bases théoriques robustes, conduisant à des erreurs d'interprétations ou d'actions, de la même façon que nous pouvons en déceler en écologie.

Sans doute la plus "impactante" de ces maladroites, car elle se propage toujours, est celle de vouloir parler de la compatibilité électromagnétique en parlant du champ électromagnétique. Quel paradoxe quand nous savons que cette grandeur théorique est directement inaccessible.

Le mot même de *champ* renvoie à une définition vectorielle portant sur un ensemble étendu alors même que lors des échanges employant le mot *champ* nous pensons à une propriété localisée.

Nous allons essayer de montrer sur des cas simples que le champ d'une part ne donne aucune indication sur ses origines, mais d'autre part ne permet pas de conclure sur un risque éventuel de dysfonctionnement en compatibilité électromagnétique vue sous le jour de l'immunité. Nous pourrions évoquer rapidement ensuite le cas des émissions rayonnées ou conduites. Il serait donc temps de parler en potentiels ou en puissance !

Originellement, le champ électromagnétique permettait de se passer de la définition d'une source. Si nous nous rappelons la définition d'une interaction coulombienne entre deux charges q_1 et q_2 alignées et séparées d'une distance r_{12} , la force de Coulomb est définie par :

$$F_{1 \rightarrow 2} = \left| \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \right| \quad (1)$$

Pour déterminer le mouvement de chaque particule nous avons besoin de définir l'autre particule. Or nous pourrions être intéressés par l'étude du mouvement d'une seule particule sans avoir à définir l'autre : nous pouvons dès lors créer un "champ" émis par la particule q_1 et environnant la particule q_2 tel que :

$$E_{2 \leftarrow 1} = \left| \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \right| \quad (2)$$

La force perçue par q_2 étant alors simplement $F_2 = q_2 E_{2 \leftarrow 1}$. C'est très pratique et nous pouvons dès lors nous contenter de décrire *l'ambiance de champ* $E_{2 \leftarrow 1}$ pour calculer F_2 . Mais si nous ne calculons pas F_2 , ce "champ" a-t-il une signification quelconque ? Et sa connaissance donne-t-elle assez d'information pour décider de s'en protéger ou pas ?

C'est tout l'objet de ce papier.

2 Le cas coulombien

Développons un peu notre exemple précédent. Il est clair que nous pouvons obtenir la même intensité (mais aussi propriété vectorielle) de champ électrostatique pour différents couples charge / distance. Il nous suffit d'augmenter la charge Q d'un facteur f^2 pour une augmentation de distance r d'un facteur f pour maintenir constant le rapport Q/r^2 dans notre expression du champ. Il existe donc une infinité de solutions engendrant le même champ électrostatique. Ce constat devrait déjà nous alerter. Caractériser une source par le champ électrostatique créé dans son entourage n'est donc pas une signature intrinsèque. Des milliers (ou plus !) de sources reproduiraient la même mesure de champ.

Nous pourrions alors essayer de fixer des choses : par exemple la distance telle que nous la définissons lors des essais de mesures des émissions rayonnées en CEM. Pouvons-nous parler de signature intrinsèque ?

Pour répondre à cette nouvelle question, il nous faut rentrer un peu plus dans la description de ce champ sous forme d'un modèle. Le modèle pour le champ électrostatique est une capacité. La relation fondamentale entre charge Q et différence de potentiels V (ddp) étant donnée par $Q = CV$. Le champ se développant aux bornes de la capacité est égal au gradient de la ddp. Soit U une source de champ, l'extrémité de la capacité peut être connectée à une résistance de très forte valeur R_∞ sans modifier le champ. Nous trouvons alors si s est l'opérateur de Laplace :

$$E = \frac{U}{1 + sR_\infty C} \quad (3)$$

Où nous voyons que nous ne sommes pas sortis de notre auberge : une même intensité de champ peut être obtenue en jouant alternativement sur la source U ou sur la capacité C . Ainsi avec une forme pointue ou semi-sphérique et en modifiant la source, nous obtiendrions le même champ.

Le champ proche longitudinal peut-être issu de différentes sources et sa connaissance ne suffit pas à déterminer la forme de cette source. Nous comprenons aussi par ce constat que la maîtrise du champ rayonné n'est pas triviale et ne se déduit pas de raisonnements simples liés à la puissance d'une source.

Qu'en est-il du risque lié à l'exposition d'une électronique à ce champ ?

Reprenons notre schéma précédent : une source U_0 d'impédance propre z_0 est couplée en champ proche via une capacité C avec une charge z_L . La connaissance du champ est extraite du gradient du potentiel développé aux bornes de la capacité, à savoir :

$$E = -\text{grad}V = -\frac{J}{sx C} \Rightarrow |E| = \frac{|J|}{\omega x C} \quad (4)$$

où J est le courant de déplacement dans la capacité, s l'opérateur de Laplace, x la longueur des lignes de champ, autrement dit la longueur du couplage capacitif. La puissance active développée aux bornes de la charge (en posant $z_L + z_0 \approx z_L$) est définie par :

$$P = \frac{1}{4} (z_L J J^* + z_L^* J^* J) = \frac{1}{2} \Re(z_L) |J|^2 = \frac{1}{2} \Re(z_L) \omega^2 x^2 C^2 |E|^2 \quad (5)$$

où nous voyons que si nous nous intéressons à la puissance reçue par la charge qui subit l'action du champ, cette dernière dépend certes pour partie du champ, mais aussi de la valeur de la capacité, de la distance et de la fréquence; ainsi que de la partie réelle de l'impédance de charge ! Il est facile d'imaginer que si nous avons deux situations de couplages, l'une avec un champ de 1 V/m, l'autre avec un champ de 100 V/m, pour autant la puissance la plus forte communiquée pourra être celle du champ de 1 V/m : il suffit pour cela que le produit $\Re(z_L) \omega^2 x^2 C^2$ soit vingt mille fois plus fort par exemple que le même produit dans la situation du champ de 100 V/m. Rien que par des différences d'impédances, ce ratio n'est pas difficile à obtenir.

Un effet similaire est obtenu si l'observable est la tension aux bornes de la charge :

$$|U_L| = \omega x C |z_L| |E| \quad (6)$$

Cette fois c'est un écart de 10 que nous cherchons, facilement obtenu rien que par la variation d'impédance.

L'intensité du champ électrique proche n'est en rien un indicateur absolu de l'amplitude de la ddp ou de la puissance communiquée à une charge dans l'environnement de ce champ.

3 Le champ magnétique proche

Le champ magnétique proche se modélise par une réductance. La loi fondamentale des interactions en champ magnétique proche est (J est le courant) :

$$\oint_c d\mathbf{c} \cdot \mathbf{J} = \mathcal{R} \iint_s d\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{B} \quad (7)$$

où \mathcal{R} est la réductance définie par :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s} \quad (8)$$

Si nous faisons la même expérience et mesurons le champ magnétique nous obtenons :

$$B_n = \mu \frac{\eta J}{l} \quad (9)$$

où η résulte de l'intégrale sur les contours des spires qui engendrent le champ du courant qui les traverse. Autrement dit, η est le nombre de tours de la bobine source. Si nous opérons dans le vide, la perméabilité est fixée mais l'intensité du courant J , le nombre de tours η ou la distance de flux l sont variables. Nous nous retrouvons dans la même impasse que pour le champ électrique proche : **la mesure du champ magnétique proche, longitudinal, ne permet pas de connaître la source de ce champ.**

Qu'en est-il du côté du récepteur ?

Imaginons la topologie cellulaire suivante : une première maille engendre le courant J^1 , lequel est associé au champ magnétique de flux $S\mathbf{B}_n$ sur la longueur l . A cette distance, une seconde maille de surface S' perpendiculaire au flux perçoit ce flux; une force électromotrice y est créée de valeur $e_2 = -S'j\omega\mathbf{B}_n$, $S' \leq S$. Si cette seconde maille est d'impédance z_2 , la puissance active qui y est développée est :

$$P_2 = \frac{1}{4} \left(e_2 \frac{e_2^*}{z_2^*} + e_2^* \frac{e_2}{z_2} \right) = \frac{\Re(z_2)}{2} \left| \frac{e_2}{z_2} \right|^2 = \frac{\Re(z_2)}{2} \left| \frac{S'\omega B_n}{z_2} \right|^2 \quad (10)$$

Là aussi, si pour deux intensités de champ dans un rapport 100 ou plus nous avons les rapports $\Re(z_2) S'/|z_2|$ qui varient au-delà en opposition, le champ le plus fort n'engendrera pas la plus grande puissance transmise.

L'intensité du champ magnétique proche ne donne pas d'information absolue sur le risque de perturber une électronique.

4 Champ lointain

La question de savoir si la mesure du champ lointain donne une indication sur sa source est sans objet. Intrinsèquement, le champ lointain est retardé et décorrélé de la source à laquelle il est associé. Donc fondamentalement nous ne pouvons pas relier une mesure de champ lointain à toute définition de source. C'est un problème très compliqué alors qu'il est souvent perçu comme simple. Il faut remonter la ligne de visée pour pouvoir suspecter la source d'un champ lointain. Mais si je mesure un tel champ et que je vois une antenne en face de moi, rien de démontre en l'état que le champ est créé par cette antenne. Il pourrait provenir du fin fond de l'univers !

La mesure d'un champ lointain du fait d'une propriété intrinsèque à ce champ ne peut rien donner d'absolu sur l'origine de sa source.

Maintenant abordons la seconde question : quel rapport entre l'intensité du champ et un risque de perturbation en CEM ?

Le champ lointain est bien modélisé par le potentiel vecteur dans la jauge de Coulomb. Nous avons pour un courant J en source :

$$d\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} d|J|G\mathbf{u}_t \quad (11)$$

avec G la fonction de Green :

$$G = \left(\frac{\exp(-s\frac{r}{c})}{r} \right) \quad (12)$$

La force électromotrice induite sur un circuit par l'environnement de ce champ est définie par la loi de Maxwell-Faraday :

$$e_A = - \oint_c d\mathbf{c} \cdot s\mathbf{A} \quad (13)$$

Cette formule très élégante suffit déjà à porter notre démonstration. Imaginons une surface Φ dont c est le bord : $c = \partial\Phi$. La normale à Φ , n_S est telle que $\mathbf{n}_S \cdot \mathbf{A} = \Phi A$. alors dans ce cas $e_A = 0$ et ce, quelle que soit l'amplitude A !

Je vais maintenant fabriquer un dispositif très peu sensible à tout champ lointain. Je prends une fente qui sélectionne une certaine polarisation du champ. Si derrière cette fente je dispose une maille perpendiculaire au champ qui peut être transmis comme dans notre calcul précédent, je ne couplerai aucune force électromotrice sur cette maille (c'est le principe en optique de deux polariseurs à 90° en série qui bloquent la lumière).

Considérons maintenant un circuit récepteur d'impédance propre z . La puissance active développée dans ce circuit par l'induction du champ est donnée par :

$$P_A = \frac{1}{4} \left(e \frac{e^*}{z^*} + e^* \frac{e}{z} \right) = \frac{1}{2} \frac{\Re(z)}{|z|} \left| \oint_c d\mathbf{c} \cdot s\mathbf{A} \right|^2 \quad (14)$$

Nous avons déjà discuté de la variation du terme en module au carré suivant la correspondance entre les directions du circuit récepteur et du champ. L'autre dépendance de la puissance transmise vient du rapport de la partie réelle de l'impédance et du module de la même impédance. Prenons une impédance de la forme $R + j\omega L$ alors :

$$\frac{\Re(z)}{|z|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Si ce rapport est faible, le produit par la force peut être inférieur à une situation où ce rapport serait fort avec une force plus faible. Nous retrouvons le fait établi que l'intensité du champ n'implique pas l'intensité de la perturbation.

L'intensité du champ lointain n'a pas de rapport absolu avec l'amplitude de la perturbation induite dans une électronique.

5 Quelles sont les "bonnes" observables ?

Comme nous l'avons vu au travers de quelques exemples, les observables pertinentes pour analyser l'état de perturbation d'une électronique sont les ddp (différences de potentiels), courant et puissance ou énergie. Pas le champ électromagnétique, quel qu'il soit.

Une conséquence importante de cela concerne les simulations électromagnétiques via des logiciels travaillant sur un espace de Maxwell maillé. Sortir des valeurs de champ n'apporte aucune information pour étudier les risques en CEM. Il faut mailler soit des capteurs, soit des circuits canoniques sur lesquels nous pourrions prélever une ddp aux bornes d'une charge de mesure branchée sur ces éléments. De plus nous avons pu vérifier à diverses occasions qu'il est extrêmement difficile de correctement post-traiter les valeurs de champ communiquées par ces outils numériques. D'une part parce qu'ils ne précisent pas la nature du champ (champ proche ou lointain), d'autre part parce que le traitement d'une collection de valeurs dans un volume donné reste un exercice compliqué. A contrario il est assez simple aujourd'hui de mailler une liaison chargée dans le volume étudié et d'extraire la ddp développée aux bornes de cette charge.

Lors de la réalisation de simulations en électromagnétisme, basées sur des "codes de Maxwell" maillés, il faut introduire dans le maillage celui d'une liaison physique chargée pour prélever aux bornes de ses charges les ddp ou puissances. Quelqu'un pourrait objecter qu'une liaison constitue aussi un récepteur particulier. Mais il est facile de multiplier ce type de

récepteur et malgré les difficultés restantes, l'exploitation des résultats sous ces conditions est sans comparaison avec la complexité de celle partant d'extractions de valeurs de champ, car lorsque nous allons vouloir interpréter les résultats nous allons retomber dans les biais abordés précédemment.

6 Et les essais de qualification en CEM ?

Les choix d'installation des électroniques dans le cadre des essais de CEM étaient basés sur une idée de *représentativité* de l'essai comparativement à l'usage du produit sur système. Quelle erreur nous n'avons pas fait là ! Et pour finir de convaincre les plus septiques, je vais donner un dernier exemple. Précisons auparavant que nous considérons ici les essais en immunité, ceux en émissions sont plus faciles à exploiter, même s'il ne sont pas forcément plus pertinents.

Nous avons vu que la force électromotrice induite dans un circuit dépendait de l'intégration curviligne du potentiel vecteur sur ce circuit. Or si cette intégration vectorielle dépend de la polarisation du champ, elle dépend aussi de sa phase, et suivant cette dernière nous pouvons trouver une force positive ou négative. Or dans les circuits électroniques le nombre de non linéarités de type diode est gigantesque. De fait la réponse à la polarisation du champ ne suffit pas à reproduire tous les cas de couplages : il faudrait en plus maîtriser la phase du champ.

Nous comprenons après ce dernier exemple que la notion de représentativité en électromagnétisme perd de son sens. Nous ne savons pas être représentatif. Et la première conséquence est que, lorsqu'un équipement a subi avec succès les épreuves de CEM malheureusement nous n'avons en rien démontré qu'il serait non perturbé sur système. Cela démontre avant tout une qualité dans le travail de conception en CEM et un niveau de tenue à un environnement défini. C'est pourquoi souvent les électroniques ayant passé ces tests en conformité présentent moins ou pas de défauts sur système. Mais la pratique nous contredit, ce n'est pas une démonstration : sur tous systèmes les responsables de CEM ont toujours été tentés de durcir les exigences en espérant couvrir le risque de perturbation. En vain, l'existence de ces défaillances persiste, quelles que soient les exigences. Alors n'ont-elles aucune utilité ? Non, elles forcent à un travail de conception pour la CEM qui soit cohérent des environnements opérationnels; mais il ne faut pas exploiter les résultats des essais de qualification au-delà de leur domaine de validité.

Les essais de qualification en CEM ne garantissent pas la conformité de l'électronique aux besoins sur système.

C'est de cette tentative vaine de représentativité que vient le problème. De plus, nous ne connaissons même pas les seuils de vulnérabilité des équipements à l'issue de ces essais. Nous travaillons à l'envers. Si nous connaissions les seuils de défaillances des électroniques à différentes natures de bruit nous pourrions ensuite assez facilement remonter aux contraintes induites dans un environnement système particulier et en déduire s'il y a risque à l'usage ou pas.

Travailler sur des exigences en champ ne fait que démultiplier les degrés de liberté, la complexité, et décroît drastiquement la probabilité de couverture du besoin. En injectant des bruits sur les signaux fonctionnels nous maîtriserions l'injection et les conditions d'apparition des défauts. Nous pourrions dès lors même en déduire nos marges, ce qui n'est pas le cas actuellement.

7 Conclusion

Pouvons-nous nous passer du champ électromagnétique ? Feynman a essayé mais n'y est pas arrivé¹ ... Ce champ est le messenger incontournable entre des éléments de matière. Et dès qu'un courant de particules chargées s'agite un peu quelque part, il rayonne un champ dont infrarouge qui transmet à tout l'univers son état thermique.

Nous savions depuis longtemps qu'il n'y a pas une corrélation directe entre l'intensité du champ et le risque de perturbation, néanmoins nous sommes souvent tentés d'user d'une telle relation, ce qui simplifierait les analyses.

Il reste un fait : si dans une situation électromagnétique nous augmentons l'amplitude du champ d'interaction, nous augmentons la contrainte ramenée sur l'électronique. La variation relative d'amplitude du champ dans une même situation électromagnétique est un indicateur du risque de perturbation. Mais pas en absolu.

Même si le couplage est faible, l'augmentation de contrainte se traduit en augmentation de la force électromotrice induite. Les électroniques étant fortement non linéaires, ces surplus de niveaux engendrent des changements de comportements variés. Néanmoins nous pouvons entendre qu'en l'absence d'assez d'information, la probabilité de perturber une électronique augmente avec le niveau de champ d'interaction, mais nous l'avons montré, cela ne suffit pas à démontrer la couverture du besoin.

Il y a souvent des discussions sur les marges prises en CEM, certains intervenants dans la chaîne de conception désirant les réduire, argumentant qu'elles sont trop fortes. Dans de nombreux cas nous comparons des situations incomparables : tel niveau de champ n'a pas créé de perturbation en essai, donc sur système où le champ est plus faible, il n'y a pas de risque. Ces affirmations sont rigoureusement fausses et si elles sont souvent non contredites, cela ne constitue en rien une démonstration, pire, réduire les marges sur la base de constats portés sur les essais de qualification conduirait à des prises de risques au niveau du système.

Toute électronique doit être durcie pour ne pas être perturbée par le premier petit photon qui passe. De plus dans tous les cas nous avons pu constater que cet exercice de durcissement était un révélateur efficace des défauts de conceptions, y compris fonctionnelles. Mais quel niveau de robustesse doit-on atteindre ? Car il faut bien émettre un cahier des charges au départ ! Quelles que soient les normes actuelles, elles présentent toutes des gabarits similaires. J'aurais donc tendance à dire et ce avec tout le retex des 40 années au cours desquelles elles se sont construites, qu'il faut les garder en l'état. Elles sont un guide pour la conception des électroniques. Après quoi, il faudrait s'orienter vers des tests de caractérisation de performance plus que de qualification normative comme nous l'avons discuté. Ces tests permettant de plus de conclure sur l'adéquation du produit aux gabarits communiqués dans le cahier des charges.

Une chose est sûre : la CEM a de beaux jours devant elle, et comme l'écologie, elle est une formidable opportunité.

"Une partie dit que quelque chose produit un champ. L'autre partie dit que quelque chose subit un champ". Richard FEYNMAN.

¹"An history of light and matter"