A propos de l'effet Maxwell-Lodge, local ou non local Médiation pour une réconciliation

par Jean-Michel LAFFAILLE

Professeur de sciences physiques en MPSI

au lycée BERGSON (Angers)

RÉSUMÉ

Commentaires à propos d'un récent article sur l'effet Maxwell-Lodge et discussion sur le caractère parfois arbitraire des tentations de discrimination entre des descriptions qui sont surtout complémentaires.

Introduction

L'article « Sur un effet physique attribuable uniquement au potentiel vecteur en électromagnétisme classique » [1] commence dès son titre un réquisitoire en faveur du potentiel vecteur. Toutefois, d'une part la description qui y est faite laisse apparaître quelques imprécisions, d'autre part les conclusions qui en sont tirées sont par certains aspects discutables.

Bien que cette démarche aboutisse généralement à un style plus médiocre, j'ai choisi comme pis aller de présenter les commentaires proposés ici en reprenant le plan de l'exposé commenté. Certains arguments (qu'ils soient en accord ou en désaccord) apparaissent en effet de façon précise au sujet d'une affirmation particulière, mais d'autres apparaissent progressivement, comme conclusion d'une démarche s'appuyant sur une suite d'indices dont il me semble utile de montrer la progression.

1. Les descriptions théoriques de l'effet Maxwell-Lodge pour un solénoïde parfait

- L'article évoque la f.e.m. :

$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

induite dans une spire entourant un solénoïde ; il évoque la difficulté conceptuelle découlant de l'influence, sur la spire qui est extérieure, d'un champ $\overrightarrow{B}$ qui n'est non nul qu'à l'intérieur. Ceci est tout à fait acceptable dans une théorie non locale, mais semble « anormal » dans une théorie où l'on cherche à utiliser des « champs » pour regrouper en termes locaux l'influence des interactions à distance.

Ainsi, quand on écrit la force électrostatique entre deux charges :

$$\overrightarrow{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2}\vec{u}_r$$

sous la forme $\vec{F} = q\vec{E}$, en posant :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q'}{r^2}\vec{u}_r,$$

on décrit par un champ électrique local (là où se trouve la charge q qui le subit) l'effet d'une interaction à distance entre q et q'. Le « local » n'est qu'une reformulation d'un phénomène essentiellement non local (comme c'est d'ailleurs la nature de la mécanique quantique) [2].

• L'article remarque alors que cela ne provoque pas de contradiction mathématique, puisque la nullité du champ $\vec{B}$ extérieur conduit à $\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0}$, puis à $E_\theta = \mathrm{Cte}/r$, où la détermination d'une constante d'intégration d'après les conditions aux limites aboutit effectivement aux résultats corrects.

Ceci met en évidence que le champ électrique, dans la spire extérieure au solénoïde, découle du champ magnétique intérieur, par l'intermédiaire des conditions aux limites... c'est-à-dire au niveau des spires du solénoïde. Indépendamment de la discussion sur le caractère local ou non, ce n'est donc pas à l'infini qu'on détermine la constante dans l'expression de E_θ ; ceci mérite d'être retenu dans la discussion qui suit.

• L'article discute une analogie très intéressante (qui n'est pas sans rapport avec l'usage qui en est fait pour décrire les lagrangiens et hamiltoniens) entre potentiel vecteur $\vec{A}$ et quantité de mouvement $\vec{p}$, entre champ électromoteur (dans la situation envisagée) :

$$\vec{E} = -\frac{\mathrm{d}\vec{A}}{\mathrm{d}t}$$

et force :

$$\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}.$$

Une des références citées [3] en propose d'ailleurs différentes extensions et suggère (ce qui est renouvelé dans l'article commenté ici) une utilisation prépondérante du potentiel vecteur dans l'enseignement.

Au passage, tout en étant d'accord sur l'intérêt de ces outils (ne serait-ce par la complémentarité qu'ils apportent par rapport à l'approche « classique » par les champs électro-magnétiques) on peut s'interroger sur la marge de manœuvre limitée dont disposeraient des enseignants commençant à enseigner l'électromagnétisme à un niveau où la mécanique des fluides n'est pas encore sérieusement abordable. Certes, ces outils gagneraient à être un peu plus utilisés (ils le sont déjà plus ou moins dans les classes supérieures). Mais, comme souvent, ce type d'arguments est proposé par des scientifiques de bon niveau, qui de plus ont (au moment où ils le disent) acquis une expérience et un recul considérable sur le sujet, ce qui leur fait perdre de vue que les élèves « normaux » n'en tireraient probablement pas le même profit (se rappeler de toutes ces jolies notions, pourtant « évidentes », de théorie des ensembles grâce auxquelles certaines générations ont été dégoûtées des mathématiques).

L'étude électromagnétique dans l'enseignement secondaire ayant été « plutôt simplifiée », les élèves en première année d'études supérieures n'abordent que timidement la notion de gradient ; faute de pouvoir digérer le rotationnel, ils n'étudient le champ magnétique que par la loi de Biot et Savart, ou la méthode globale du théorème d'Ampère, pour les circuits filiformes. Le programme de seconde année ne peut proposer ni une progression, ni une remise en cause de l'approche, trop brutales ; donc forcément on aboutit à un enseignement dans lequel le potentiel vecteur joue un rôle limité. Il me semble nécessaire de le mettre en valeur, mais les propositions doivent rester dans la limite du raisonnable.

• Les auteurs proposent alors de considérer (dans le cas étudié) le potentiel vecteur comme l'impulsion mécanique qu'un opérateur extérieur doit fournir à une charge pour l'amener à l'infini. Mais (conformément à ce qui précède) ce choix de l'infini comme condition limite n'est pas forcément toujours judicieux... Les symétries du problème suggèreraient plutôt de considérer la limite au niveau des spires du solénoïde ; ceci mérite ici encore d'être retenu pour la suite.

• L'article évoque à ce moment la discussion concernant la nature de la grandeur physique mesurée par le voltmètre : tension ou différence de potentiel ?

Cela me semble appeler deux commentaires : d'une part je crois bien que cela peut dépendre de la jauge considérée (arbitraire) ; d'autre part, même si un voltmètre n'était sensible qu'à la différence de potentiel, il me semble que de toute façon les fils de raccordement utilisés par ce voltmètre seraient sensibles à la tension (en particulier ici le fil constituant la spire extérieure au solénoïde). Donc je pense qu'il faut considérer, de façon générale, que les grandeurs que nous mesurons par l'intermédiaire des voltmètres sont des tensions (ce qui n'exclut pas que dans certains cas, celles-ci se limitent à des différences de potentiel).

2. Liens entre l'effet Maxwell-Lodge et l'effet Aharonov-Bohm

• L'article évoque l'effet Maxwell-Lodge : décalage des franges d'interférences électroniques, pour un dispositif de fentes d'Young entre les fentes duquel on place un solénoïde. La situation est un peu analogue à celle des électrons dans la spire extérieure de la manipulation précédente, sauf qu'ici l'effet est transposé à une expérience d'interférences où ce sont deux parties d'un même faisceau d'électrons qui interagissent avec le solénoïde.

Il est à cette occasion évoqué les recherches sur le champ magnétique de fuite, qui ont conclu que l'effet de celui-ci devait être négligeable (suffisamment pour ne pas pouvoir être responsable du phénomène observé).

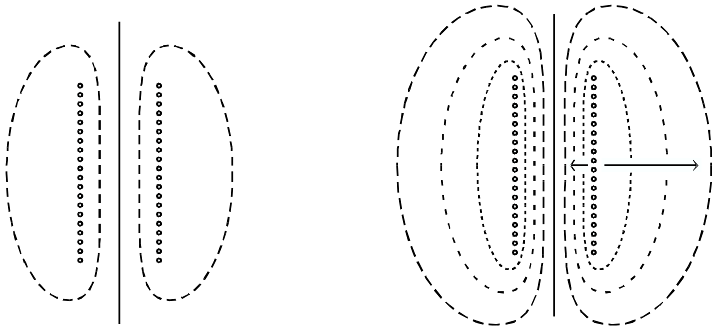
Il me semble alors utile de réfléchir prudemment sur le fait que l'action d'un champ négligeable doive forcément être négligeable, surtout si ce sont ses variations qui importent. Ceux qui construisent des circuits dérivateurs très (trop) performants sont ainsi inévitablement gênés par ces infimes parasites à haute fréquence dont la dérivée est parfois loin d'être négligeable. Ceci réapparaît dans l'étude énergétique qui suit, conjointement à d'autres arguments (la clé de la compréhension est en fait plus subtile : elle est liée justement à l'absence de variation notable).

Mais surtout une distinction apparaît entre le cas de la spire extérieure au solénoïde et celui des interférences d'un faisceau d'électrons. Les électrons d'un faisceau, en mouvement, pourraient être déviés par un champ magnétique de fuite. Au contraire, les électrons de la spire extérieure au solénoïde (qui n'est pas constituée de matériau magnétique) ne seraient en moyenne pas affectés par un tel champ de fuite (le flux sur le bord de la spire contribue de façon négligeable au flux intercepté par cette spire). Il est donc probablement, dans l'étude de l'article commenté, totalement inutile de trop raffiner ce calcul.

3. Discussion sur les aspects géométriques et énergétiques de l'effet Maxwell-Lodge

• L'article aborde ensuite des aspects énergétiques. Il rappelle la relation évoquée par POYNTING entre le flux magnétique et les lignes de champ, fermées (pour celles qui ne vont pas à l'infini), et dont la « densité » est proportionnelle au champ magnétique. L'énergie emmagasinée dans le champ magnétique du solénoïde se propage alors perpendiculairement aux lignes de champ quand l'énergie et la densité des lignes de champ augmentent.

Les auteurs semblent alors penser que les lignes de champ ne se déplacent pas, sous prétexte qu'elles gardent globalement la même forme ; ceci me semble faux et je suis tout à fait d'accord avec POYNTING.



En fait les lignes de champ se resserrent en partant des spires, qui sont à la fois le lieu d'où provient l'énergie électrique qui crée le champ (conformément à l'idée de POYNTING) et les limites qui imposent la constante d'intégration dans le calcul de E_θ envisagé précédemment. Quand le champ augmente, ce n'est pas parce qu'une nouvelle ligne de champ prend la place d'une autre qui lui était identique qu'il n'y a pas de déplacement. L'énergie magnétique du solénoïde réel est en fait « plus ou moins » aussi à l'extérieur (en proportion non négligeable par rapport à l'intérieur), ce qui n'empêche que le champ magnétique extérieur soit négligeable (densité d'énergie négligeable) puisque le volume extérieur est infini…

En outre, on constate qu'inévitablement il y a le même nombre de lignes de champ qui apparaissent à l'intérieur et à l'extérieur. Or, plus le champ magnétique est faible à l'extérieur, plus les parties externes des lignes de champ « consécutives » doivent rester « très écartées », ce qui implique qu'il y en a toujours pratiquement autant « rejetées vers l'infini » qu'il y en a de nouvelles créées au niveau des spires. Ainsi, toute spire extérieure au solénoïde « subit » la variation de flux dans le solénoïde ; qui plus est, plus le champ magnétique est faible, plus le « balayage » des lignes de champ est rapide et l'effet est le même.

Il est alors inutile de me parler du cas du solénoïde infini, pour lequel le champ extérieur est « rigoureusement nul », car cela n'existe pas ; j'envisagerai par contre dans la suite le cas du solénoïde torique (qui soulève une difficulté nécessitant un complément de réflexion). Mais avant cela, d'autres aspects liés à cette partie de l'article méritent d'être évoqués.

• Les auteurs, envisageant ensuite le cas où la spire extérieure est ouverte, semblent penser qu'aucune énergie n'est transmise à l'extérieur ; cela me paraît faux. Il ne faut pas confondre l'énergie transmise par le solénoïde à la spire extérieure et l'énergie qu'il transmet à l'espace pour construire son champ (si on croit à la mécanique quantique, le champ magnétique est une superposition de photons se propageant dans l'espace ; le fait de le décrire dans une jauge qui n'exprime pas de façon directe cette propagation n'y change rien ; ceci sera précisé dans la suite).

Dans le cas de la spire extérieure fermée, le plus gros de l'énergie transmise à l'extérieur est de l'énergie transmise à l'espace (énergie non visible à l'extérieur car très étalée, mais existant tout de même). L'énergie transmise à la spire extérieure est celle qui sert à établir le courant induit, qui crée un champ magnétique induit dont l'énergie se combine avec celle du champ du solénoïde, mais est généralement négligeable en comparaison.

Dans le cas de la spire extérieure ouverte, qui se comporte comme un circuit LC (ou RLC), un courant induit circule même s'il est plus faible à cause de la très faible capacité. L'énergie transmise à cette spire est alors plus faible (et le champ magnétique induit est plus faible), mais cela ne change rien au principe : le plus gros de l'énergie transmise à l'extérieur sert à établir le champ magnétique correspondant.

• Les auteurs envisagent l'analogie, très fructueuse, avec un écoulement de fluide tourbillonnaire. Ils déplorent alors que l'analogie conduise (à leur avis) à ce que la variation du nombre de tubes magnétiques (qu'ils supposent à tort venir de l'infini) implique pour le fluide une vorticité venant de l'infini. Ils insistent alors en précisant le cas de la vidange d'une baignoire, où l'aspiration de l'écoulement augmente la vorticité de l'intérieur (ce qui leur semble contradictoire).

Ce cas est au contraire d'autant plus intéressant qu'il met en lumière le fait que les lignes de champ magnétique se multiplient aussi depuis « l'intérieur » : ici les spires du solénoïde, source de l'énergie conduisant à la formation du champ (la confusion vient d'une mauvaise compréhension des conditions aux limites).

4. La modélisation d'un solénoïde de taille finie

• L'article se propose alors de modéliser un solénoïde ; il commence par discuter les hypothèses et en particulier la propagation d'ondes (approximation de l'ARQS).

Il doit être clair ici que l'absence de retard notable induit par la propagation ne signifie pas absence de propagation. Dans une jauge où l'on décrit les variations du champ comme étant « instantanées », on ajoute (par l'intermédiaire de la condition de jauge) d'autres termes qui décrivent l'équivalent des termes correctifs qui découleraient d'une propagation si l'on traitait le problème dans une jauge où telle serait la description (le modèle apparaît mathématiquement différent mais il décrit la même physique, sinon il n'y aurait pas invariance de jauge). En particulier le déplacement des lignes de champ décrit par POYNTING correspond ici à une propagation (« instantanée »).

Contrairement à ce qui est dit dans les références citées [3, 4], il me semble que le choix de jauge en électromagnétisme ne correspond pas vraiment à une contrainte physique. Evidemment, si l'on représente la « propagation » du potentiel scalaire (par exemple) dans la jauge de Coulomb, il faut ne pas négliger les termes « correctifs » inclus dans la partie décrite par le potentiel vecteur ; sinon on ne respecte pas l'invariance de jauge et le résultat obtenu est incorrect. Si l'on respecte l'invariance, je pense que le choix de jauge correspond au choix d'un mode de description qui « suit » de plus ou moins près les concepts physiques auxquels nous sommes plus habitués : utiliser la jauge de

Coulomb dans une situation où se produit une propagation physiquement nettement visible serait peu judicieux, même si cela conduit mathématiquement aux prédictions correctes pour un dispositif invariant de jauge.

• Les auteurs comparent alors des ordres de grandeurs de différentes contributions du champ magnétique (partie « principale », radiation et fuites), mais cette comparaison est-elle adéquate ?

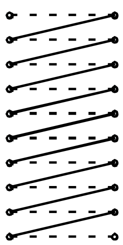
Comme cela a déjà été commenté précédemment, le champ extérieur peut être par certains aspects négligeable et pourtant conduire à un effet non négligeable (pour un champ deux fois plus faible — et qui reste faible — les lignes de champ sont deux fois plus espacées, donc elles défilent deux fois plus et le flux coupé est le même).

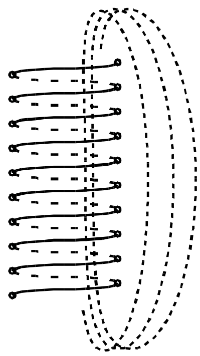
• L'article considère ensuite le solénoïde comme une succession de spires, plus ou moins espacées et inclinées, dont il calcule le potentiel vecteur. Cette modélisation ne me semble pas totalement convaincante.

• Premièrement, un solénoïde vu de côté ne correspond pas à ce qu'en disent les auteurs (schéma dans lequel on se demande d'ailleurs comment sont disposées les spires du côté opposé), mais à une sinusoïde : $\{ x = R\cos(\theta),\ y = R\sin(\theta),\ z = \lambda\theta \}$ donne par élimination :

$$x = R\cos\frac{z}{\lambda} \ \text{ et } \ y = R\sin\frac{z}{\lambda}\cdot$$

Ce modèle (probablement assez approximatif) aboutit à des termes correctifs relativement faibles, mais il n'est testé expérimentalement que par le champ total qui s'en déduit. Or les termes correctifs peuvent être assez mal calculés, en tant que tels, sans que cela puisse se voir sur le champ total si les corrections sont faibles. Ceci ne prouve pas que les calculs correspondants soient dénués d'utilité, mais cela en réduit nettement l'intérêt.





Ceci est d'ailleurs d'autant moins convaincant que le champ quasi nul à l'extérieur est dû entre autres à une compensation entre les côtés opposés des spires, et que l'inclinaison d'une spire circulaire ne respecte pas l'inclinaison opposée des deux côtés d'une spire réelle. Enfin, les auteurs indiquent que cela intervient surtout pour calculer la composante B_θ du champ, or ils ne montrent aucune simulation de cette composante (heureusement qu'ils citent une référence où cela est un peu plus précisé [5]).

Si encore ce mode de calcul était ainsi très simplifié, il serait intéressant au moins pour cela, mais il apparaît que de toute façon il passe ici par un calcul numérique d'intégrales ; n'aurait-il pas été plus simple (quitte à utiliser du calcul numérique) d'utiliser un calcul plus correct modélisant un circuit en hélice avec la loi de Biot et

Savart ? La seule raison (dont je ne suis pas sûr qu'elle soit bien justifiée) vient du fait que les auteurs insistent pour faire le calcul avec le potentiel vecteur, dont ils veulent faire une promotion.

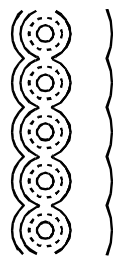
• Deuxièmement, il me semble clair de toute façon (comme l'article le suggère) que l'hélicité des spires donne essentiellement une hélicité analogue des lignes de champ. Or une telle modification est sans effet pour l'interprétation déjà expliquée dans mes commentaires précédents (peu importe que les lignes de champ coupent la spire extérieure légèrement en biais, la correction est du second ordre).

Je sépare pour ma part les fuites en « hélicité » et « longueur + écartement » et non pas comme le font les auteurs en « longueur » et « hélicité + écartement ». L'effet de la longueur a été commenté précédemment et dans ce cas l'écartement n'a qu'une influence secondaire. L'écartement intervient par contre inévitablement pour le solénoïde torique ; c'est la raison de la partie suivante.

5. Cas du solénoïde torique

• Dans le cas du solénoïde torique (je rappelle que j'ignore le cas du solénoïde infini, qui n'existe pas), il est clair que les « fuites » ne peuvent pas provenir du « bouclage » des lignes de champ par les extrémités. Il intervient dans ce cas des fuites entre les spires. A noter que ces fuites existent aussi dans le cas du solénoïde fini, mais elles ne modifient en rien le flux coupé par la spire extérieure. Elles interviennent par contre essentiellement ici puisque sans elles il n'y aurait pas du tout de lignes de champ extérieures.

Dans ce cas, des lignes de champ apparaissent au niveau de chaque spire ; contrairement aux schémas précédents, celui-ci représente quelques fils (grossis) en tirets, et des portions de lignes de champ en traits pleins. Lorsque le champ augmente, les lignes de champ se déplacent vers l'extérieur (selon Poynting) et se raccordent (lorsqu'elles se rejoignent) pour former des lignes de champ internes et externes.



Ces dernières montrent la présence d'un inévitable champ extérieur évanescent à proximité des spires. Ce champ est associé à un nombre de lignes de champ forcément égal à celui des lignes de champ intérieures, ce qui n'empêche pas que le champ « de fuite » extérieur soit « nul », dans la mesure où il suffit pour cela que ces lignes de champ externes s'éloignent d'autant plus vite que le champ est faible. Ici encore on aboutit à un flux coupé identique ; il s'explique par et uniquement par le champ de fuite entre les spires (dans l'interprétation par le champ magnétique).

• Pour présenter le problème autrement, il faut en outre ne pas oublier que les effets du champ total ne sont que la somme des effets des champs des différentes spires. Le fait que la somme des champs des différentes parties du circuit soit nulle, en un point donné, n'implique nullement que la somme de tous les effets électromagnétiques doive être nulle en ce point (d'autant plus qu'on raisonne ici sur un champ magnétique alors qu'il s'agit globalement d'un phénomène électro-magnétique et que ce qui paraît magnétique dans un référentiel peut paraître électrique dans un autre).

Il me semble utile ici d'évoque l'analogie avec un système mécanique soumis à un ensemble de forces (réparties en volume) dont la somme est nulle mais dont la répartition est telle que la somme des moments ne soit pas nulle.

• Tout ceci ne lève pas totalement la difficulté soulignée par l'article. Certes, quel que soit le solénoïde envisagé, on peut se convaincre, par le défilement des lignes de champ au niveau de la spire extérieure, qu'un flux d'énergie est disponible pour agir sur les porteurs de charge et y provoquer un courant électrique. Mais ceci ne découle directement ni du champ, ni de ses variations : le flux d'énergie éventuel se produit en ce lieu avec un champ et des variations négligeables (c'est justement parce que le champ doit être et rester quasi nul que l'énergie doit se propager et que la spire extérieure peut en prélever une partie au passage).

Il peut donc être intéressant d'utiliser aussi la description par le potentiel vecteur, mais il me semble faux de prétendre que la description par le champ magnétique est incorrecte.

6. Conclusions (halte au feu : je suggère une médiation)

• Ma conclusion est d'une part que les phénomènes « électro... » et « ... magnétiques » sont indissociables, d'autre part que ces phénomènes sont *a priori* non locaux. Les réexpressions locales que nous en faisons sont des outils très pratiques mais d'une certaine manière incomplets ; d'où l'intérêt de tous les conserver (sans chercher à forcément discriminer des « bons » et des « mauvais » outils) puisque l'usage montre qu'ils sont parfois « complémentaires ». En électrocinétique, imaginerait-on de suggérer d'abandonner la méthode de Norton sous prétexte que la méthode de Thévenin serait « plus physique ».

• Il me semble encore utile de citer un dernier exemple : l'interaction de deux solénoïdes emboîtés et dont on varie l'enfoncement respectif.

L'approximation du solénoïde « idéalisé » conduit à trouver, sur les spires du solénoïde externe, des forces de Laplace nulles parce que le champ de l'autre solénoïde y est nul. La loi des actions réciproque peut alors semblée respectée puisque, sur les spires du solénoïde interne, on trouve aussi des forces de Laplace nulles à cause des symétries. Ce résultat n'est pas pour autant correct puisque l'expérience montre que ni l'une ni l'autre de ces forces n'est nulle.

Qualitativement, on peut se convaincre que c'est l'inhomogénéité du champ aux extrémités (et bien sûr son existence, indispensable en ce qui concerne le solénoïde externe) qui brise la symétrie et explique les forces de Laplace observées. Cela signifie-t-il qu'il soit impossible de traiter le problème dans l'approximation du solénoïde idéalisé ?

Non : la méthode par l'énergie magnétique permet cela, ce qui montre bien l'intérêt des différentes approches par la richesse de leur complémentarité. En outre, c'est le champ de l'ensemble des deux solénoïdes qui intervient dans la zone de recouvrement, permettant une description plus symétrique de cette énergie qui est une énergie d'interaction (avec un raisonnement d'ensemble, clairement non local).

Références

[1] G. Rousseaux, R. Kofman & O. Minazzoli, *Sur un effet physique attribuable uniquement au potentiel vecteur en électromagnétisme classique*, Bulletin de l'Union des Professeurs de Spéciales, n° 213, janvier 2006.

[2] Inversement, on pourrait même se demander ce qu'est une propriété « locale » ; ce que nous appelons « espace-temps » n'est-il pas simplement une reformulation (éventuellement « artificielle ») d'une sorte de moyenne statistique des interactions dans un Univers essentiellement non local ? Mais ceci est un tout autre débat...

[3] G. Rousseau & E. Guyon, *A propos d'une analogie entre la mécanique des fluides et l'électromagnétisme*, Bulletin de l'Union des Physiciens, n° 841, février 2002.
http://www.udppc.asso.fr/bup/841/0841D107.pdf.

[4] G. Rousseau, *On the Physical Meaning of the Gauge Conditions of Classical Electromagnetism : the Hydrodynamics Anologue Viewpoint*, Annales de la Fondation Louis de Broglie, vol. 28, n° 2, p. 261, 2003.
http://www.ensmp.fr/aflb/AFLB-282/aflb282p261.htm.

[5] O. Minazzoli, *Champ magnétique et potentiel vecteur créés par un solénoïde*, Rapport de stage au LPMC (UMR 6622), septembre 2004, http://mlilom.perso.libello.com.

• Je n'ai hélas pas pu considérer toutes les (nombreuses) références indiquées dans l'article commenté. Certaines, publiées uniquement dans de « prestigieuses » revues ne sont, faute de temps, que difficilement accessibles au profane. D'autres me seront probablement accessibles dans un avenir plus ou moins raisonnable (quand j'aurai le temps). Je ne considère comme efficaces que les quelques unes directement accessibles sur Internet et j'en profite pour renouveler, inlassablement, mon réquisitoire en faveur d'une mise en ligne systématique de toute l'information scientifique (éventuellement après un « délai de primeur » de l'éditeur, qu'on peut proposer de l'ordre de un à trois ans maximum).