

**Zeitschrift:** L'Enseignement Mathématique  
**Herausgeber:** Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique  
**Band:** 4 (1958)  
**Heft:** 1: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

**Artikel:** SUR LE PRINCIPE DE FERMAT  
**Autor:** Quan, Pham Mau  
**Kapitel:** 2. Inductions électromagnétiques et équations de MAXWELL.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-34626>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 27.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

distribution énergétique est faite par le tenseur d'impulsion-énergie  $T_{\alpha\beta}$ , suivant des schémas de type hydrodynamique. On dit qu'un domaine  $D_4$  de l'espace-temps est occupé par une distribution énergétique schématisée sous forme de *fluide*, si sur le domaine  $D_4$  sont définis

- 1) un champ de scalaire  $\rho$  dit *densité propre* du fluide,
- 2) un champ de vecteur unitaire orienté dans le temps  $\vec{u}$  dit *vecteur vitesse unitaire* dont les trajectoires sont appelées les lignes de courant du fluide.

On appellera *repère propre* en un point  $x$  du domaine  $D_4$  un repère orthonormé dont le premier vecteur orienté dans le temps coïncide avec le vecteur vitesse unitaire  $\vec{u}$  et dont les trois autres vecteurs orientés dans l'espace définissent le tri-plan  $\pi_x$  orthogonal à  $\vec{u}$  qu'on appelle *espace associé* à la direction de temps  $\vec{u}$ .

Le repère propre précédent joue le rôle d'un repère galiléen local par rapport auquel la matière est au repos. Il suffit d'écrire, dans ce repère, les équations relatives à la matière au repos. Puis, par un changement de repère, on en déduit l'expression générale invariante des équations relativement au repère naturel associé à un système de coordonnées locales quelconque. Inversement, l'interprétation physique des équations se fait relativement au repère propre dans l'espace tangent au point considéré. On peut aussi considérer un espace-temps de la relativité restreinte rapporté à un système de coordonnées galiléennes réduites dans lequel la métrique a pour expression

$$ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2$$

où  $x^0 = ct$ ,  $c$  désignant la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

## 2. Inductions électromagnétiques et équations de MAXWELL.

La théorie de MAXWELL pour la matière fait intervenir un champ électromagnétique variable avec le temps, défini par quatre vecteurs d'espace: champ électrique  $\vec{E}$  et induction

magnétique  $\vec{B}$ , champ magnétique  $\vec{H}$  et induction électrique  $\vec{D}$ . Le champ électromagnétique ainsi défini est régi par les équations de MAXWELL qui peuvent s'écrire dans un système d'unités convenables, relativement à un repère lié à la matière au point considéré

$$(2.1) \quad \begin{cases} \text{rot } \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \\ \text{div } \vec{B} = 0 \end{cases}$$

$$(2.2) \quad \begin{cases} \text{rot } \vec{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{I} \\ \text{div } \vec{D} = \delta \end{cases}$$

Ces équations établissent le lien entre les champs et inductions  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  d'une part et la densité de charge  $\delta$  et le courant de conduction  $\vec{I}$  d'autre part. Ces diverses quantités sont de plus liées par les relations

$$(2.3) \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$(2.4) \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$(2.5) \quad \vec{I} = \sigma \vec{E}$$

où  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  représentent respectivement le pouvoir diélectrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du milieu considéré. Le milieu est dit *isotrope* si  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  sont des scalaires. C'est ce que nous supposons dans la suite.

La représentation vectorielle précédente n'est bien adaptée qu'à l'étude des transformations consistant en un déplacement purement spatial et un changement d'origine pour le temps. Pour avoir une représentation tensorielle indépendante du mode de repérage dans la variété espace-temps  $V_4$ , on peut généraliser les équations de MAXWELL de la manière suivante.

Considérons un domaine  $D_4$  de l'espace-temps  $V_4$  occupé par un milieu matériel chargé et conducteur, siège des phénomènes électromagnétiques. Soit  $x$  un point de  $D_4$  et  $R$  le repère propre associé. En admettant que les équations rigoureuses du champ électromagnétique se réduisent localement dans le repère propre  $R$  aux équations classiques (2.1), (2.2) nous

sommes amenés à introduire deux tenseurs antisymétriques d'ordre 2,  $H_{\alpha\beta}$  et  $G_{\alpha\beta}$ , dont les composantes relatives au repère propre sont

$$(H_{\alpha\beta}) = \begin{pmatrix} 0 & E_1 & E_2 & E_3 \\ -E_1 & 0 & B_3 & -B_2 \\ -E_2 & -B_3 & 0 & B_1 \\ -E_3 & B_2 & -B_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (G_{\alpha\beta}) = \begin{pmatrix} 0 & D_1 & D_2 & D_3 \\ -D_1 & 0 & H_3 & -H_2 \\ -D_2 & -H_3 & 0 & H_1 \\ -D_3 & H_2 & -H_1 & 0 \end{pmatrix}$$

et vérifient les relations

$$(2.6) \quad G_{0i} = \varepsilon H_{0i} \quad \mu G_{ij} = H_{ij}.$$

Sur ces formules et dans la suite, les indices latins prennent les valeurs 1, 2, 3 tandis que les indices grecs prennent les valeurs 0, 1, 2, 3.

Nous introduisons les tenseurs adjoints  $\overset{*}{G}_{\alpha\beta}$  et  $\overset{*}{H}_{\alpha\beta}$  définis par

$$(2.7) \quad \overset{*}{H}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \eta^{\alpha\beta\gamma\delta} H_{\gamma\delta} \quad \overset{*}{G}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \eta^{\alpha\beta\gamma\delta} G_{\gamma\delta}$$

où  $\eta_{\alpha\beta\gamma\delta}$  est le tenseur complètement antisymétrique attaché à la forme élément de volume de  $V_4$ . Les relations (2. 6) peuvent alors s'écrire sous la forme invariante

$$(2.8) \quad G_{\alpha\beta} u^\alpha = \varepsilon H_{\alpha\beta} u^\alpha \\ \mu \overset{*}{G}_{\alpha\beta} u^\alpha = \overset{*}{H}_{\alpha\beta} u^\alpha.$$

Ces relations sont appelées les *équations de liaison*. Elles montrent que les deux champs de tenseurs  $H_{\alpha\beta}$  et  $G_{\alpha\beta}$  ne sont pas indépendants l'un de l'autre. On peut exprimer les  $G_{\alpha\beta}$  en fonction des  $H_{\alpha\beta}$ . Un calcul donne

$$(2.9) \quad G_{\alpha\beta} = \frac{1}{\mu} H_{\alpha\beta} + \frac{1 - \varepsilon \mu}{\mu} (H_{\sigma\alpha} u^\sigma u_\beta - H_{\sigma\beta} u^\sigma u_\alpha).$$

Cela posé, le champ électromagnétique doit satisfaire aux équations de MAXWELL qui s'écrivent dans la variété espace-temps

$$(2.10) \quad \frac{1}{2} \eta^{\alpha\beta\gamma\delta} \nabla_\alpha H_{\beta\gamma} = 0$$

$$(2.11) \quad \nabla_{\alpha} G^{\alpha}_{\beta} = J_{\beta}$$

où  $J_{\beta}$  est le vecteur courant électrique généralisé. En tenant compte des valeurs des composantes de  $\vec{J}$  dans le repère propre, on est conduit à faire l'hypothèse

$$(2.12) \quad J_{\beta} = \delta u_{\beta} + \sigma u^{\alpha} H_{\alpha\beta}.$$

Le vecteur  $\vec{J}$  possède ainsi une composante  $\delta \vec{u}$  colinéaire à  $\vec{u}$  et une composante  $\Gamma_{\alpha} = u^{\rho} H_{\rho\alpha}$  orthogonale à  $\vec{u}$ . La première représente le courant de convection et la seconde, le courant de conduction.  $\delta$  sera appelé *densité propre de charge électrique*.

Les équations (2. 10) peuvent encore s'écrire

$$\nabla_{\alpha} H_{\beta\gamma} + \nabla_{\beta} H_{\gamma\alpha} + \nabla_{\gamma} H_{\alpha\beta} = 0 ;$$

Elles expriment les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'il existe localement un vecteur  $\varphi_{\alpha}$  tel que  $H_{\alpha\beta}$  soit son rotationnel

$$H_{\alpha\beta} = \partial_{\alpha} \varphi_{\beta} - \partial_{\beta} \varphi_{\alpha}.$$

Enfin, on démontre que les vecteurs

$$(2.13) \quad \mathcal{E}^{\delta} = \frac{1}{2} \eta^{\alpha\beta\gamma\delta} \nabla_{\alpha} H_{\beta\gamma} \quad \mathcal{O}_{\beta} = \nabla_{\alpha} G^{\alpha}_{\beta}$$

qui figurent aux premiers membres des équations (2. 10), (2. 11) vérifient les identités

$$(2.14) \quad \nabla_{\alpha} \mathcal{E}^{\alpha} = 0 \quad \nabla_{\alpha} \mathcal{O}^{\alpha} = 0$$

dites conditions de conservation relatives aux équations de MAXWELL. Elles entraînent la conservation du courant électrique

$$(2.15) \quad \nabla_{\alpha} J^{\alpha} \equiv \nabla_{\alpha} (\delta u^{\alpha} + \sigma u_{\rho} H^{\rho\alpha}) = 0 .$$

### 3. L'intégration des équations de MAXWELL.

En relativité générale, les équations de l'électromagnétisme sont constituées par l'ensemble des équations de MAXWELL et des équations d'EINSTEIN auquel s'ajoutent les conditions de