

L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME

Michel Ney

*Laboratoire d'Électronique et des Systèmes de Télécommunications
(LEST, CNRS)*

*GET-ENST-Bretagne/Université de Bretagne Occidentale
Brest*



Plan

- ✓ **Que devient l'électromagnétisme dans les cursus?**
- ✓ **Comment est perçu l'électromagnétisme par les élèves?**
- ✓ **Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?**
- ✓ **Outils d'aide à l'enseignement (EAO) de l'électromagnétisme.**
- ✓ **Conclusion et perspectives.**

Que devient l'électromagnétisme dans les cursus?

- ✓ Il n'existe pas beaucoup d'articles sur l'enseignement de l'électromagnétisme. On peut mentionner quelques articles de synthèse dans les pays anglo-saxons:
- « Teaching electromagnetics around the world: A survey »
F.J. Rosenbaum, IEEE Tran. Edu., 33, no 1, pp. 22-34, 1990
 - « Teaching beginning electromagnetics students to meet the modern challenges in EE »
C.-L. J. Hu, Proc. ICEE, paper 221, 1997.
 - « A new approach in teaching electromagnetism: How to teach EM to all levels from freshman to graduate and advanced levels students »
N. Anderson, M. Mina, Proc. Of the Amer. Soc. For Eng. Edu., Session 3632, 2003.

Que devient l'électromagnétisme dans les cursus?

- ✓ D'une manière générale, sa part diminue:
 - => **Diminution des heures de cours en général**
 - => **Foisonnement de nouveaux cours dans les disciplines liées aux TIC**
- ✓ Désintérêt en général des disciplines fondamentales (e.g. physiques et mathématiques):
 - => **Trop complexes**
 - => **Relativement moins d'opportunités professionnelles**
- ✓ Les directions de la formations considèrent de plus en plus les élèves potentiels comme un marché:
 - => **Cursus très flexible à court terme selon la « mode »**

Comment est perçu l'électromagnétisme par les élèves?

✓ D'une manière générale:

=> **Exige trop de maths!**

=> **On ne voit pas à quoi cela peut servir (ingénieurs)!**

=> **Exige relativement trop de travail (travail vs. notes)!**

=> **C'est une discipline ringarde!**

✓ Même les applications (pourtant d'actualité) ne soulèvent pas ou peu de curiosité sauf par leurs aspects plus médiatiques:

=> **Antennes, satellites**

=> **Radars**

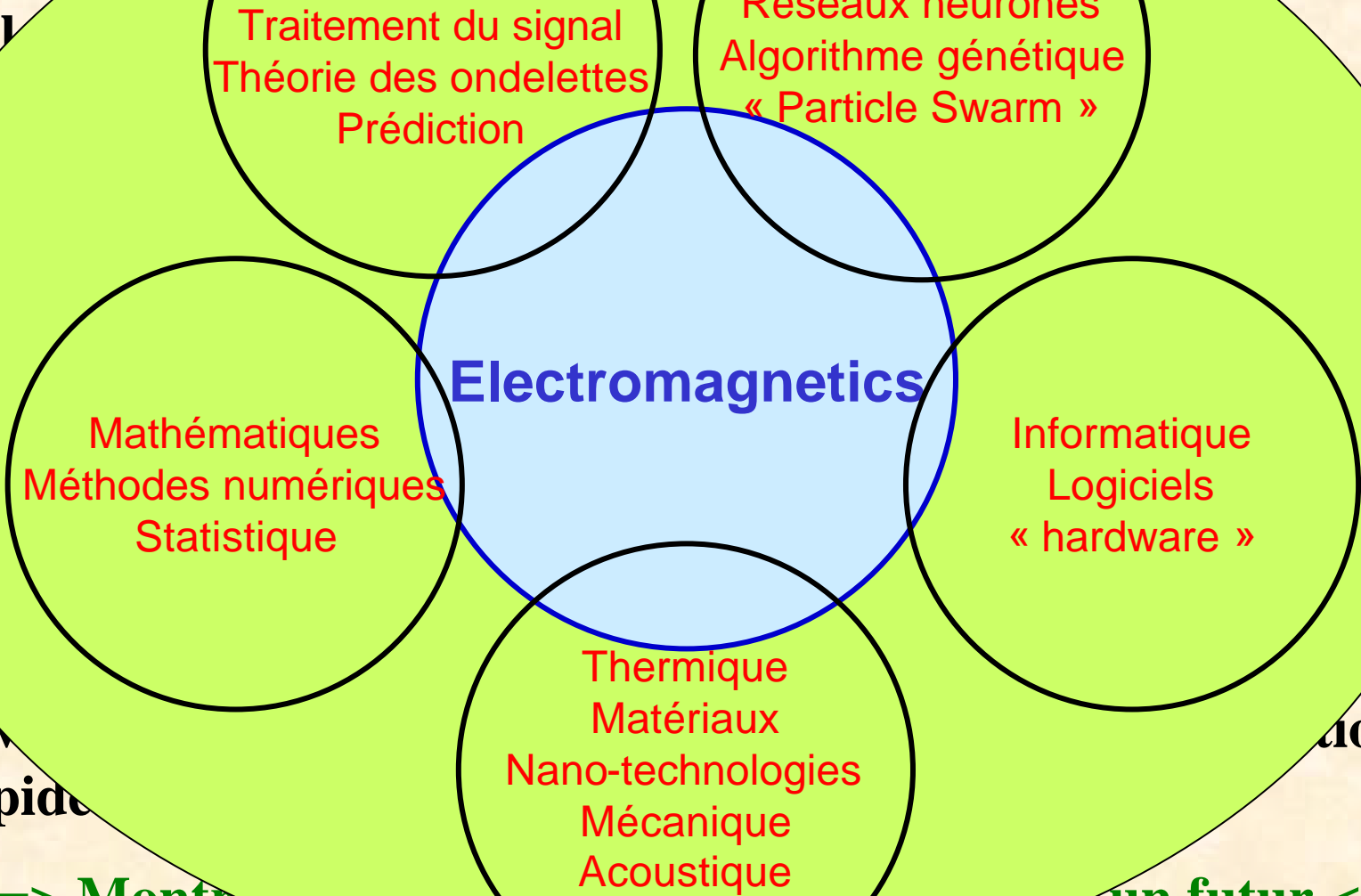
✓ L'électromagnétisme, même comme culture scientifique générale, n'en vaut pas la peine!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Un cours doit absolument commencer par positionner l'électromagnétisme par rapport aux applications:
=> Lister les domaines où l'électromagnétisme est pertinent!
- ✓ Décrire quelques exemples où l'électromagnétisme est requis:
=> CEM, télécommunications (téléphone mobile)!
- ✓ Évoquer les synergies de l'électromagnétisme avec les autres domaines.
- ✓ Montrer l'essor de l'électromagnétisme grâce au développement des méthodes numériques et dû à l'évolution rapide des calculateurs.
=> Montrer que l'électromagnétisme possède un futur <=

Y-a-t'il une meilleure approche de l'électromagnétisme?

✓ Un cœur
l'électromagnétisme



✓ Développement
rapide

=> Montre un futur <=

Sujets dans lesquels l'électromagnétisme est pertinent:

- Antennes
- Propagation d'ondes
- Composants hyperfréquences et millimétriques
- Diffraction et diffusion
- Distribution de puissance
- Machines électriques, traction
- Astronomie
- Médecine
- Physique nucléaire
- Compatibilité électromagnétiques
- Imagerie, télé-détection
- Radars, capteurs
- Polarimétrie
- Optique
- Caractérisation des matériaux
- Instrumentation
- Télécommunications

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Il y a plusieurs démarches proposées pour l'enseignement de l'électromagnétisme:

Calcul vectoriel → Statique → Conditions de continuité



Électrodynamique ← Onde plane ← Champs dans la matière

- ✓ Cette démarche suit plus ou moins le chemin historique de l'électromagnétisme.
- ✓ Dans certaines facultés de physique nord-américaines, le champ magnétique est introduit par la relativité restreinte:
=> Une variante anachronique mais intéressante et élégante de montrer le bien-fondé de la théorie Maxwellienne!

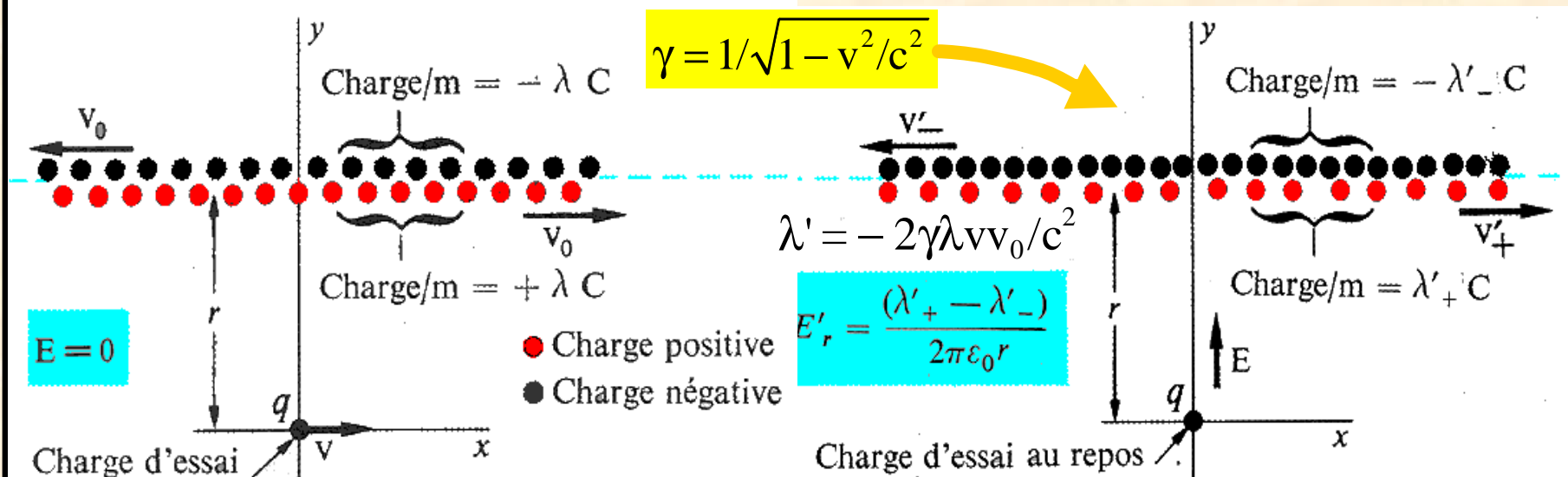
Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

Champ magnétique: un point de vue relativiste!

Leigh Page (1884-1952), Yale University (1912)

Référentiel du laboratoire

Référentiel lié à la charge test



Force de Lorentz

Force de Coulomb observée

$$F_y = \frac{q\lambda v v_0}{\pi\epsilon_0 r c^2} = \frac{qvI}{2\pi\epsilon_0 r c^2} = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$$

$$F'_y = q E'_r = q \frac{\gamma\lambda v v_0}{\pi\epsilon_0 r c^2}$$

$$F_y = \frac{F'_y}{\gamma}$$

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Autre approche:

Équations de Maxwell → Conditions de continuité



Statique (cas particulier) ← Puissance, énergie



Champs dans la matière → Électrodynamique

✓ Cette démarche donne les aspects fondamentaux dans le cas général et montre la statique comme un cas particulier:

=> La difficulté réside dans la présentation des équations de Maxwell aux élèves, qui peuvent être perdus dès les premières heures de cours!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ L'introduction d'un cours d'électromagnétisme est une étape cruciale pour la perception de la matière par les élèves:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{N}} \wedge \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} & \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t) \\ \tilde{\mathbf{N}} \wedge \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) & \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0\end{aligned}$$

- ✓ Elles s'appuient sur des décennies d'expériences, observations et le travail intellectuel d'illustres précurseurs tels que de Coulomb, Ampère, Ørsted, Faraday pour n'en citer que quelques uns:

=> Comment restituer les fondements de ces équations à des élèves, déjà rebutés par les maths, en quelques heures?!..

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ S'il existe beaucoup de références sur l'enseignement de l'électromagnétisme, très peu d'alternatives sont proposées par rapport aux schémas classiques.
- ✓ Il existe un grand centre pour l'enseignement de l'électromagnétisme « Center for Computer Applications in Electromagnetic Education » (CAEME):

=> Promouvoir les outils informatiques pour l'assistance à l'enseignement de l'électromagnétisme:

- **Simulateurs EM (FEM, FDTD, MoM) simplifiés.**
- **Expériences simulées.**
- **Vidéo d'expériences ou de cours.**

<http://www.ece.utah.edu/centers/index.html>

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Étant donné le nombre d'heures en diminution constante pour l'enseignement de l'électromagnétisme, l'efficacité peut espérer compenser (du moins partiellement) cette tendance:

=> Les outils de simulation (à défaut d'expériences réelles) sont incontournables pour espérer relever ce défi!

- ✓ Pour être en phase avec le cheminement intellectuel amenant aux équation de Maxwell, un cours d'électromagnétisme devrait commencer par une brève introduction historique:

=> Décrire le raisonnement découlant des grandes expériences...

=> Montrer un cheminement possible de Maxwell pour introduire la densité de courant de déplacement...

=> Démythifier les opérateurs vectoriels!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Un exemple d'enseignement de l'électrodynamique pour un tronc commun (basé sur 15h cours + 10h TD):
 - Motivations: Les applications de l'électromagnétisme
 - Bref historique menant aux équations de Maxwell
 - Conditions de continuité (**pas** par les distributions)
 - Puissance et énergie
 - Champs dans la matière
 - Équation d'onde homogène:
 - Guide (équations fondamentales, diagramme de dispersion).
 - Modes TEM, Modes quasi-TEM, théorie des lignes.
 - Guide rectangulaire et guide diélectrique plat.
 - Équation d'ondes non homogène: Potentiels A et f
 - Rayonnement (doublet, brève introduction aux antennes).
- ⇒ Introduction aux méthodes numériques (FEM, DF) ⇐

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Exemple de bref rappel historique:

$$F \propto \frac{qq'}{d^z} \pm 5\%$$

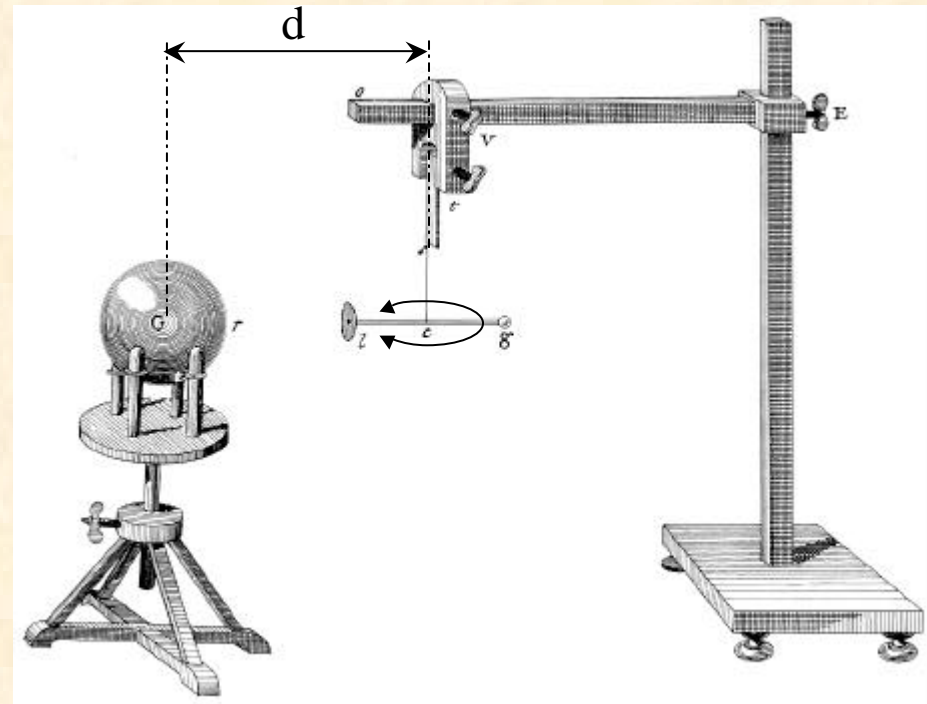
• Des expériences modernes ont montré que $z = 2 \pm 10^{-9}$!



$z = 2$ est maintenant admis comme postulat

=> Équation de Poisson et de façon équivalente la loi de Gauss:

$$\Phi_D = \oiint_S \epsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = Q_{\text{nette}}$$



Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

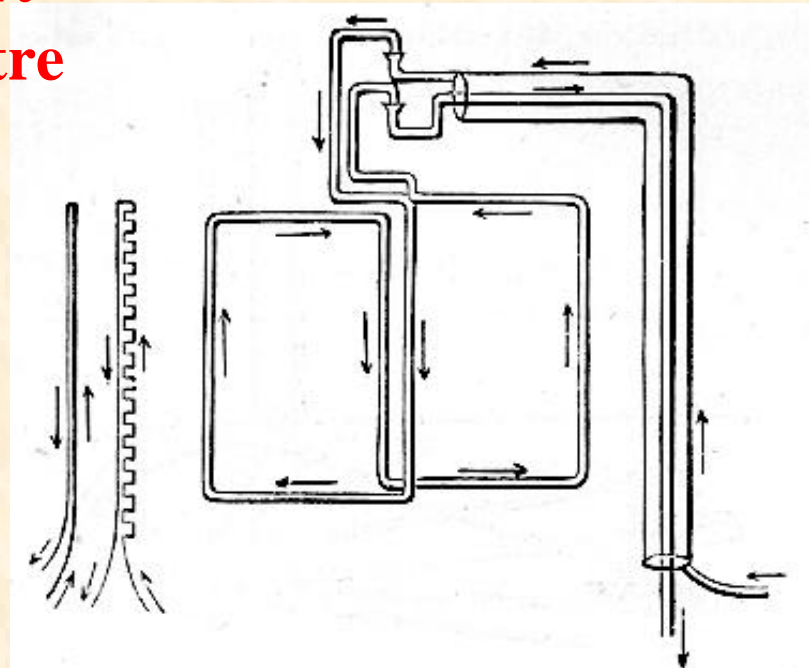
✓ Exemple de bref rappel historique (suite):

- Oersted, Ampère, Biot & Savart travaillent sur l'interaction entre les courant galvanique.



Ampère utilise le concept du champ magnétique et sa fameuse loi (1820):

$$f_{mm} = \oint_C \mathbf{H} \circ d\mathbf{l} = I_{net}$$

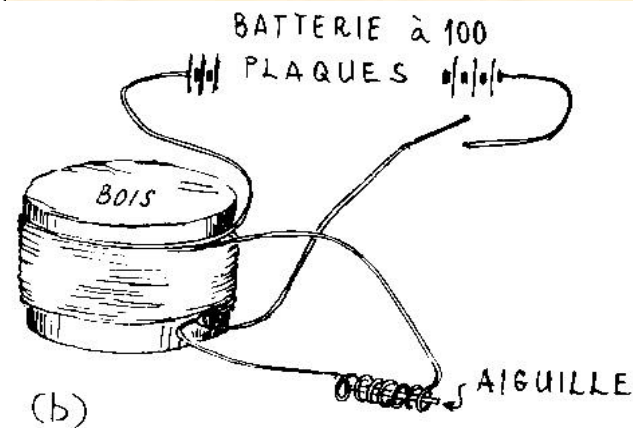
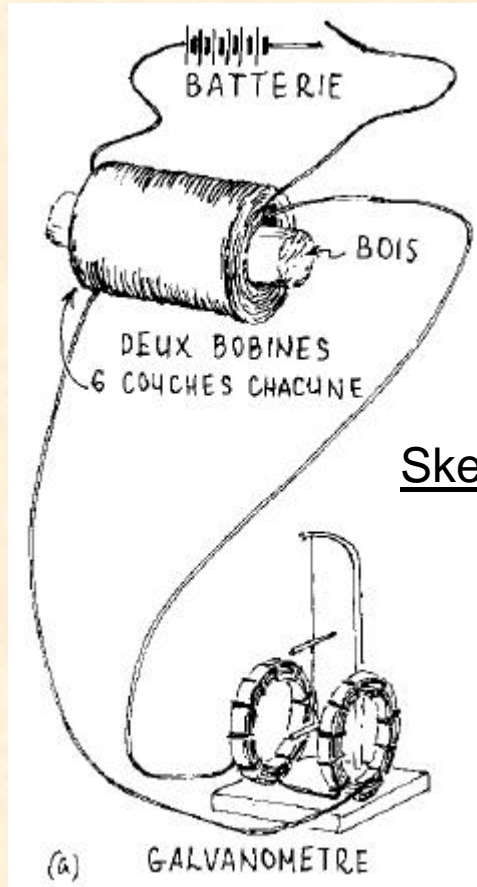


Balance astatique conçue by Ampère

=> L'électricité et le magnétisme sont encore considérés comme des phénomènes de nature différente!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Exemple de bref rappel historique (suite):



(a) Sketches d'expériences
de Faraday

$$\text{fem} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$



**Expérience mise en
équation par Maxwell**

- Faraday eut l'idée qu'un courant pouvait être induit par un autre courant!
- Ce n'est qu'après plusieurs essais qu'il trouve que l'aiguille ne bouge que lors de l'enclenchement du circuit primaire (1831)!

=> Le courant n'est induit que lorsque le flux (lignes de force) varie temporellement!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Exemple de bref rappel historique (suite):

- **Maxwell fait le point sur les expériences sur l'électricité et le magnétisme:**

- - La loi de circuit d'Ampère connue sous forme intégrale.
 - Des travaux de Poisson, la loi de Gauss et ensuite la loi de conservation du flux magnétique sont établies sous forme intégrales.
 - Neumann a introduit le potentiel vecteur magnétique pour résoudre des problèmes magnétostatiques.
 - L'équation de Laplace est résolue pour la solution de problèmes électrostatiques avec conducteurs.
 - Ohm a établi expérimentalement sa fameuse loi: $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$.

**=> Tout semble établi pour l'électro- et magnéto-statique.
Seule l'expérience dynamique de Faraday n'est pas encore mise en équation!**

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Exemple de bref rappel historique (suite):

- Les équations de l'électricité et du magnétisme pouvaient alors se résumer (en notation moderne) comme suit:

$$\text{fem} = \oint_C \mathbf{E} \circ d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \circ \mathbf{n} da = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

$$\text{fmm} = \oint_C \mathbf{B} \circ d\mathbf{l} = \iint_{\Sigma} \mathbf{J} \circ \mathbf{n} da = I_{\text{net}}$$

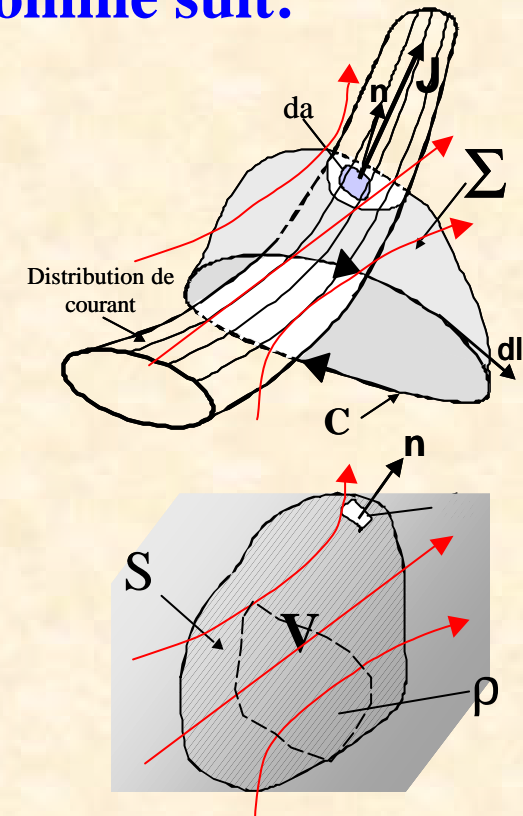
$$\Phi_D = \oiint_S \varepsilon \mathbf{E} \circ d\mathbf{s} = \iiint_V \rho dv = Q_{\text{nette}}$$

$$\Phi_B = \oiint_S \mathbf{B} \circ d\mathbf{s} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{Absence de charge nettes « magnétiques »}$$

=> Modèle continu de la matière:

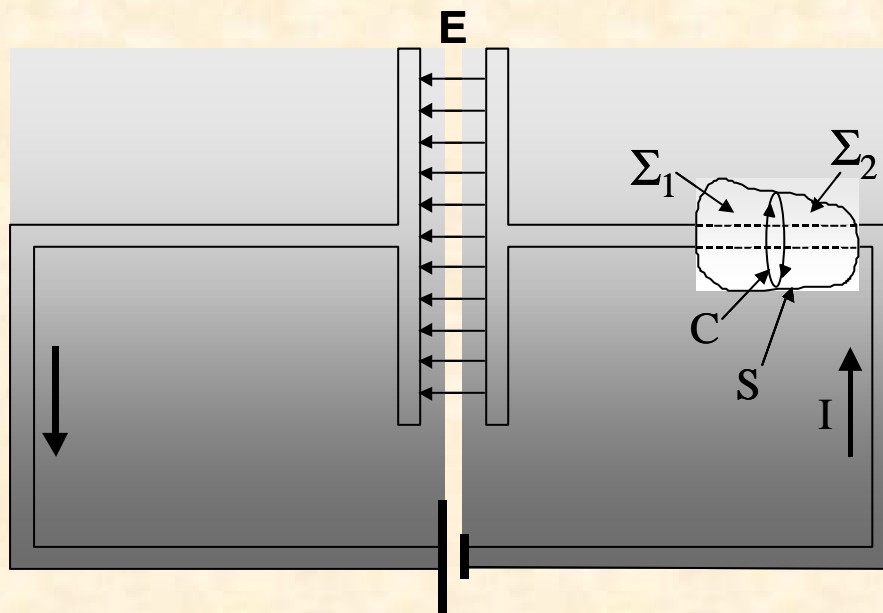
J: densité de courant (charges libres) en A/m²

r: densité volumique de charges (libres) en C/m³



Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Exemple de bref rappel historique (suite):
 - Les résultats de Faraday fascinent Maxwell et celui-ci entreprend les travaux qui mèneront à l'électromagnétisme.
 - La démarche qui mène Maxwell à introduire le déplacement n'est pas connue.
 - Une idée d'explication postérieure à Maxwell a été proposée:



- La loi d'Ampère mise en défaut par l'expérience (théorique) du condensateur:

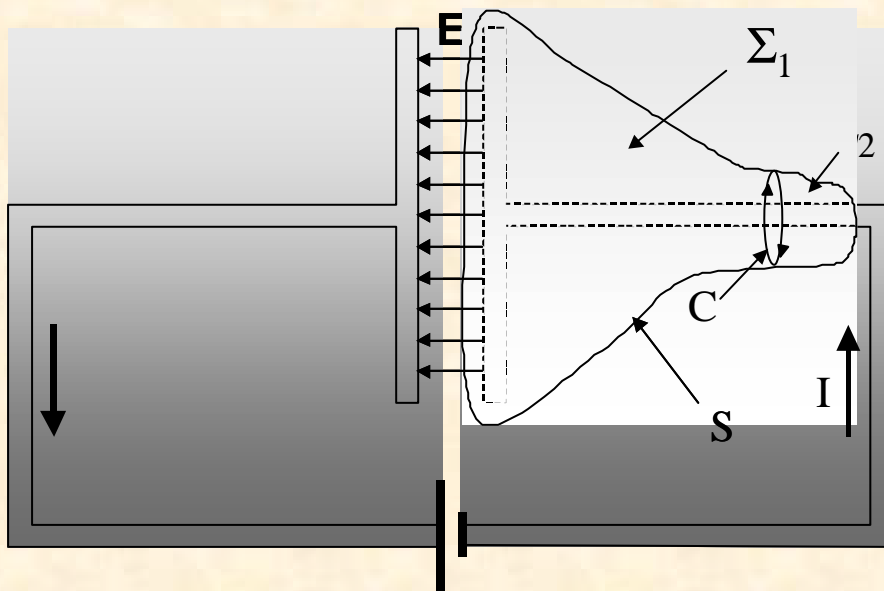
$$\mathbf{I}_{\text{total}} = \mathbf{I} + \mathbf{I}_{\text{déplacement}}$$



La variation temporelle de flux du champ électrique doit être prise en compte!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Exemple de bref rappel historique (suite):
 - Les résultats de Faraday fascinent Maxwell et celui-ci entreprend les travaux qui mèneront à l'électromagnétisme.
 - La démarche qui mène Maxwell à introduire le déplacement n'est pas connue.
 - Une idée d'explication postérieure à Maxwell a été proposée:



- La loi d'Ampère mise en défaut par l'expérience (théorique) du condensateur:

$$I_{\text{total}} = I + I_{\text{déplacement}}$$



La variation temporelle de flux du champ électrique doit être prise en compte!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Maxwell met en équations les lois de l'électromagnétisme en 1873 par son livre « Treatise on electricity and magnetism » .

=> Elles se résument en 20 équations scalaires impliquant champs potentiels et quaternions, écriture alors à la mode!

- ✓ Heaviside et Hertz les mettent sous la forme mathématique compacte que nous connaissons grâce au développement de la théorie de opérateurs:

=> La forme locale se trouve à l'aide des théorèmes de Stokes et d'Ostrogradski appliqués sur les formes intégrales:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{N}} \wedge \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} & \tilde{\mathbf{N}} \wedge \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \\ \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0 & \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t)\end{aligned}$$

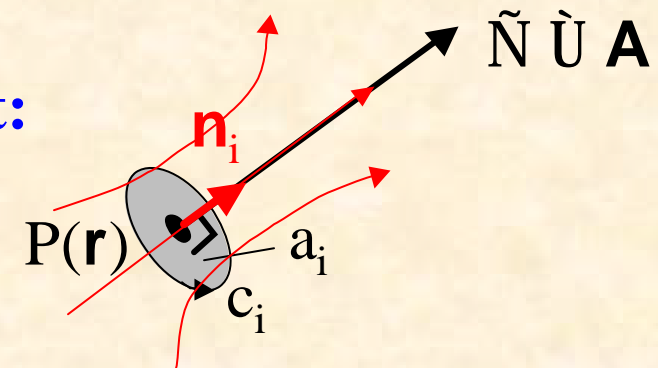
=> La présence de la matière n'apparaît pas explicitement!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Les opérateurs illustrent localement les lois intégrales:

- Le rotationnel de \mathbf{A} est une fonction vectorielle qui s'illustre parfaitement:

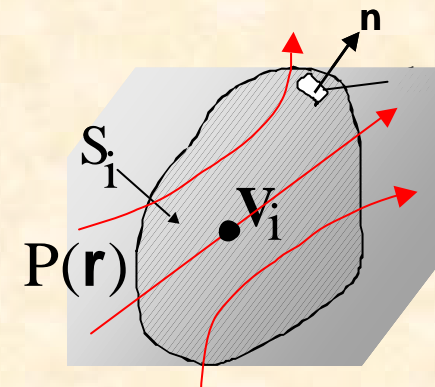
$$(\tilde{\mathbf{N}} \wedge ?) \circ \mathbf{n} = \lim_{a_i \rightarrow 0} \frac{\oint_{c_i} ? \circ d\mathbf{l}}{a_i}$$



=> Quantifie l'aspect local tourbillonnaire de la fonction \mathbf{A} !

- La divergence de \mathbf{A} est une fonction scalaire qui s'illustre par le flux local de \mathbf{A} par unité de volume:

$$\tilde{\mathbf{N}} \circ ? = \lim_{V_i \rightarrow 0} \frac{\oiint_{S_i} ? \circ \mathbf{n} da}{V_i}$$



=> Quantifie la présence locale d'une source distribuée!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

✓ Cependant, les équations de Maxwell contiennent des secrets:

- En prenant la divergence des 2 termes de la loi de Faraday:

$$\tilde{\mathbf{N}} \circ \tilde{\mathbf{N}} \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{B} = 0 \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{B} = f(\mathbf{r})!$$

=> $f(\mathbf{r}) = 0$ confirme l'inexistence de charges « magnétiques »!

=> Montre que deux lois fondamentales sont dépendantes!

- En prenant la divergence des 2 termes de la loi d'Ampère:

$$\tilde{\mathbf{N}} \circ \tilde{\mathbf{N}} \wedge \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{D} + \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{J} = 0 \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{N}} \circ \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

=> Débouche sur le principe de la conservation de la charge!

✓ Il y a en général 16 inconnues scalaires et seulement 7 équations indépendantes: Il faut 9 équations supplémentaires!

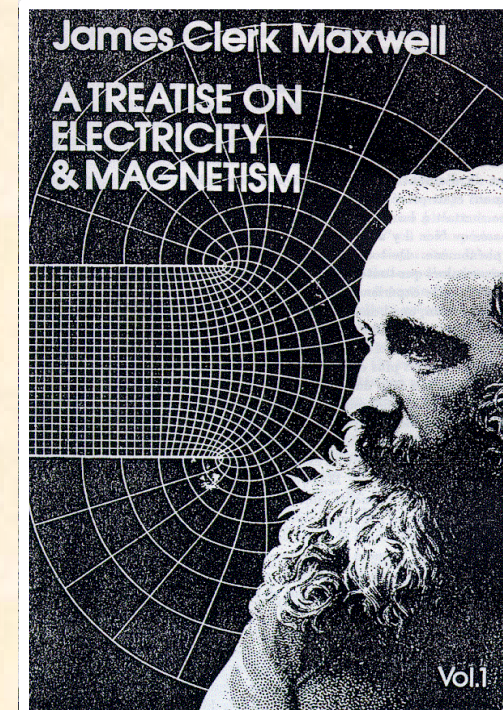
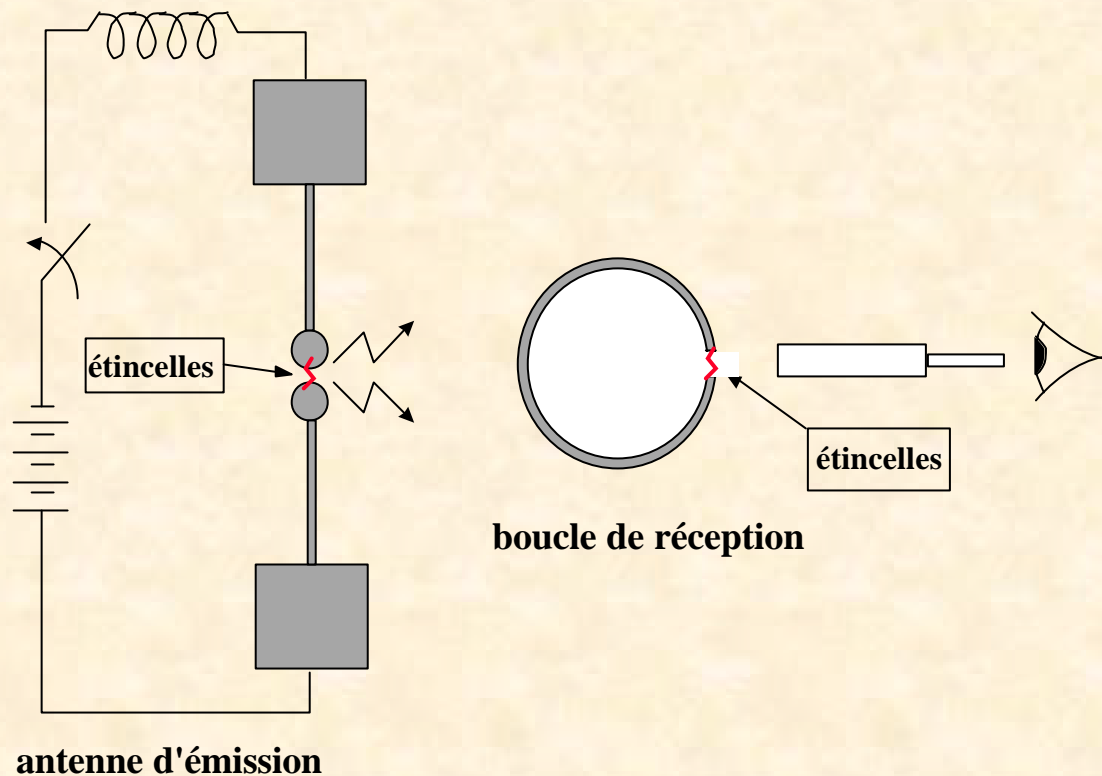
=> Fournies par les relations constitutives: B-H, D-E et J-E!

Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- La consécration: Expérience de Hertz (1888), 9 ans après la mort de Maxwell:

=> Confirme l'existence d'ondes!

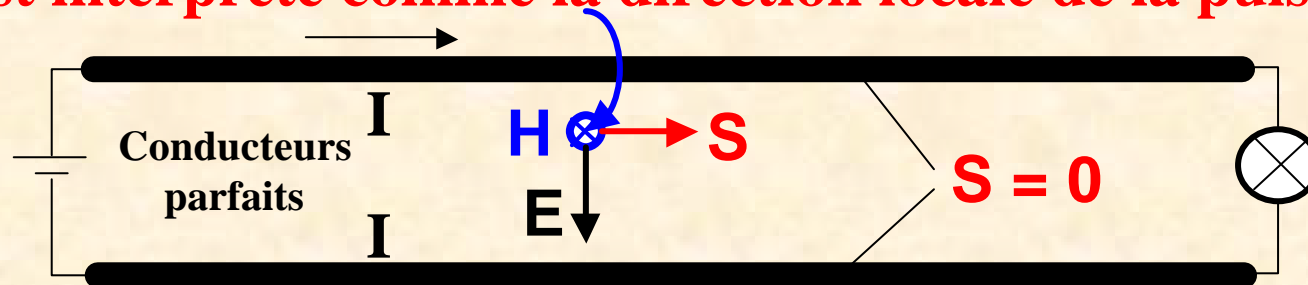
=> 1ère expérience d'antennes (~ 1 GHz)!



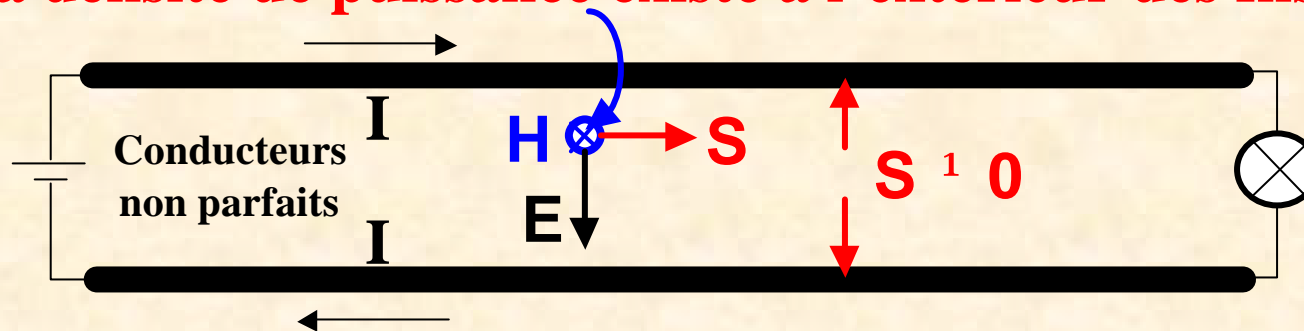
Y-a-t'il une meilleure façon d'enseigner l'électromagnétisme?

- ✓ Le vecteur de Poynting $\mathbf{S} = \mathbf{E} \wedge \mathbf{H}$, bien que très utile, montre des paradoxes à cause de son caractère vectoriel:

=> Est interprété comme la direction locale de la puissance!



=> La densité de puissance existe à l'extérieur des fils



**=> Il existe une composante de \mathbf{S} entrant dans les conducteurs:
Un flux entre dans les fils pour compenser les pertes!**

- L'échange de puissance EM est bien mieux illustrée par les flux:

=> Théorème de Poynting <=

Outils d'aide à l'enseignement de l'électromagnétisme...

- ✓ Nous pouvons trouver un certain nombre de simulateurs (2D) permettant l'illustration des phénomènes tels que:

- Lignes de champs statiques (FEM, MoM)

- Phénomènes de propagation (FEM, MoM, FDTD, TLM)

=> Rares sont ceux vraiment dédiés à l'enseignement!

- ✓ Généralement, les logiciels d'EAO sont des annexes aux livres utilisés pour l'enseignement (Amérique du Nord)

=> La plupart ne permet que l'illustration d'un groupe d'applications et offre peu de flexibilité à l'utilisateur!

- ✓ Il existe une exception avec un simulateur TLM téléchargeable: www.faustcorp.com/products/index.html

=> L'utilisateur peut construire ses propres exemples!

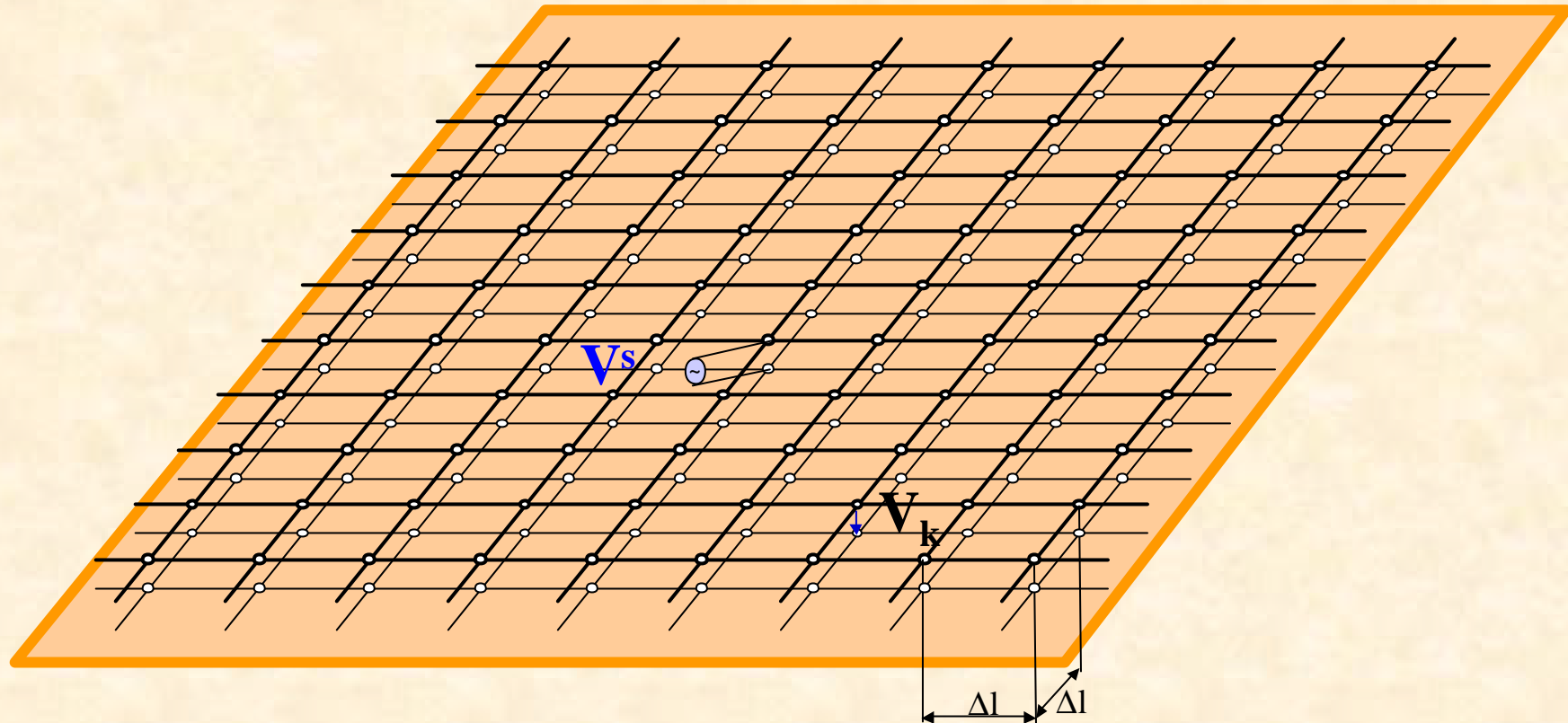
=> Electrodynamique seulement mais combien parlante! <=

Outils d'aide à l'enseignement de l'électromagnétisme...

TLM-2D: Expérience de Kron (1943)

Réseaux de lignes de transmission bifilaires connectées en parallèle

=> Tensions aux soudures (nœuds) communes!

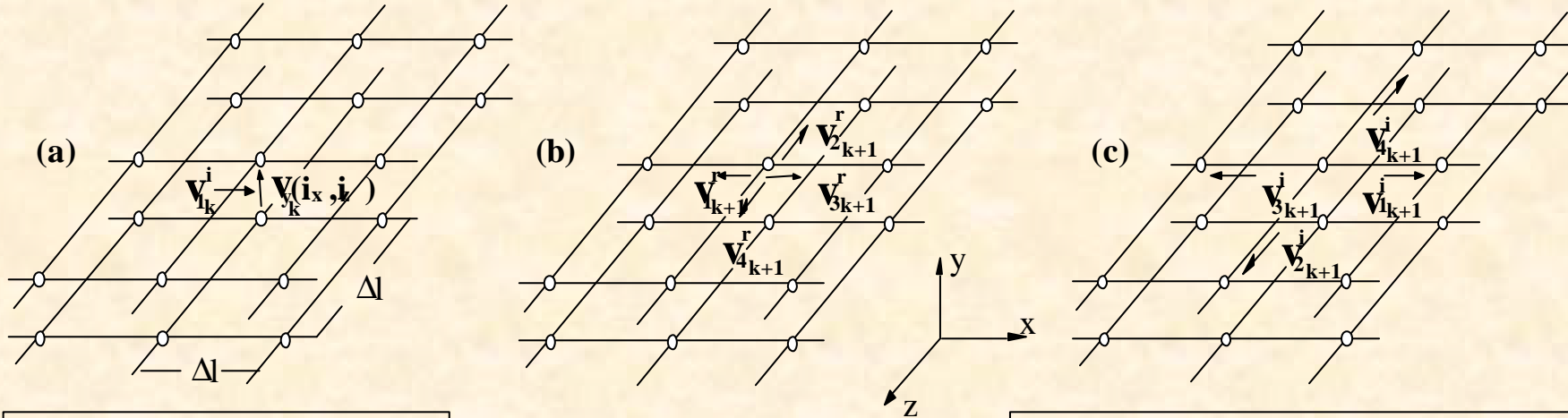


Le relevé de la tension des nœuds V_k donne approximativement des fronts d'ondes circulaires!

Condition: $\Delta l \ll l_0$

Outils d'aide à l'enseignement de l'électromagnétisme...

Fondement de la TLM: Algorithme 2D



(a) **Initiation**
Tension de ligne
impulsionnelle
incidente

(b) **Dispersion**
Tensions de ligne
réfléchies des nœuds

(c) **Échange**
Tensions de ligne incidentes
aux nœuds adjacents pour la
prochaine itération

Johns et Beurle
(1971)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_{k+1}^r = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_k^i$$

$$\begin{aligned} V_{3,k+1}^i(i_x-1, i_z) &= V_{1,k+1}^r(i_x, i_z) \\ V_{4,k+1}^i(i_x, i_z-1) &= V_{2,k+1}^r(i_x, i_z) \\ V_{1,k+1}^i(i_x+1, i_z) &= V_{3,k+1}^r(i_x, i_z) \\ V_{2,k+1}^i(i_x, i_z+1) &= V_{4,k+1}^r(i_x, i_z) \end{aligned}$$

Outils d'aide à l'enseignement de l'électromagnétisme...

- ✓ Quelques applications suggérées parmi des centaines:
 - Notion de ligne de transmission: VLF, RF
 - Transitoires sur ligne de transmission: CC, désadaptée
 - Charge rapportée: Domaine temporel
 - Modes TE_{n0} dans un guide rectangulaire: TE_{10} , f_c , TE_{20}
 - Dispersion: TEM, ligne dispersive
 - Guide diélectrique, rayonnement: $f > f_c$, $f < f_c$, discontinuité
 - CEM: Couplage champ-ouvertures
 - Antenne: Réflecteur parabolique, défocalisée
 - Non linéarité: Diviseur de fréquence

Conclusion et perspectives

- ✓ L'électromagnétisme est une discipline qui est en déclin dans les cursus des écoles d'ingénieurs, voire des universités:
 - Mauvaise presse par les difficultés mathématiques!
 - Discipline qui ne semble pas avoir de débouchés!
- ✓ Et pourtant....
 - => La complexité, la miniaturisation des dispositifs exigent une demande croissante de modèles fiables de prédiction!
 - => La discipline est en synergie avec de nombreux domaines!
- ✓ C'est par un enseignement de base efficace, très orienté sur les concepts illustrés dynamiquement qu'elle sera pérennisée:
 - => Il faut informer les élèves dès le début du cours sur les métiers de l'électromagnéticien!
 - => « Last but not least »: convaincre les DF d'établissements! <=