

Électromagnétisme

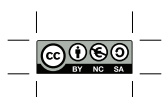
Iannis Aliferis

École Polytechnique de l'Université Nice Sophia Antipolis
Polytech'Nice Sophia
Parcours des Écoles d'Ingénieurs Polytech, 2^e année, 2012–2013

<http://www.polytech.unice.fr/~aliferis>






Introduction	2
Plan du cours	3
Règles du jeu / conseils	4
Un tout petit peu d'histoire...	5
Qu'est-ce qu'on fait ici?	6
Forces gravitationnelle et électrique	7
L'É/M est partout!	8
Champs électromagnétiques	9
Comment ça marche?	10
Champ électrostatique	11
Analyse vectorielle: champ, flux	12
La notion de champ	13
Coordonnées cartésiennes	14
Coordonnées cylindriques	15
Coordonnées sphériques	16
Vecteurs	17
Le produit scalaire: une projection	18
Vecteurs unitaires	19
[Extra] Le vecteur de position \vec{r}	20
Coordonnées cartésiennes (bis)	21
Champ scalaire	22
Champ vectoriel	23
Flux d'un champ vectoriel (intro)	24
Flux d'un champ vectoriel	25
Loi de Gauss (électrostatique)	26
Analyse vectorielle 2: divergence	27
Couper un volume en morceaux...	28
Divergence	29
Loi de Gauss (électrostatique): forme locale	30
Calcul de la divergence	31
Théorème de la divergence (1)	32
Théorème de la divergence (2)	33

Loi de Gauss: intégrale vers locale	34
Superposition	35
Le principe de superposition: $\vec{I} + \vec{I} = \vec{2}$	36
Exemple de superposition: deux plans infinis	37
Visualisation de champs vectoriels	38
Deux approches	39
Un autre regard sur le flux (et la divergence)	40
Lignes de champ en électrostatique	41
Travail dans un champ électrostatique: potentiel	42
Le travail de A vers B (1)	43
Le travail de A vers B (2)	44
De quoi dépend $W_{A \rightarrow B}$?	45
Du travail au potentiel	46
Potentiel: le travail par charge	47
Travail: charge \times ddp	48
Potentiel créé par une charge ponctuelle	49
Du champ électrostatique au potentiel	50
Du potentiel au champ électrostatique	51
Analyse vectorielle 3: gradient	52
Le gradient d'un champ scalaire	53
Le gradient dans les trois systèmes de coordonnées	54
Du champ au potentiel: un raccourci	55
Analyse vectorielle 4: circulation, rotationnel	56
Couper une surface en morceaux...	57
Rotationnel	58
Rotationnel du champ électrostatique	59
Calcul du rotationnel	60
Le rotationnel en coordonnées cartésiennes	61
Le rotationnel en coordonnées cylindriques	62
Le rotationnel en coordonnées sphériques	63
Énergie électrostatique	64
Charge ponctuelle	65
Ensemble de N charges (1)	66
Ensemble de N charges (2)	67
Distribution continue de charges	68
Densité volumique d'énergie	69
Électrostatique: récapitulatif	70
Équations du champ électrique (1)	71
Équations du champ électrique (2)	72
Conducteurs en électrostatique	73
Qu'est-ce qu'un conducteur?	74
Le champ et les charges à l'intérieur	75
Le champ et les charges dans une cavité	76
Le champ à la surface du conducteur (1)	77
Le champ à la surface du conducteur (2)	78



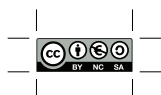
Rigidité diélectrique	79
Rigidité diélectrique: quelques valeurs typiques	80
Courants électriques	81
Des charges en mouvement	82
Calculer la densité de courant	83
Conservation de la charge: forme intégrale	84
Conservation de la charge: forme locale	85
Électronique: loi des nœuds	86
Vitesses des électrons dans les conducteurs (1)	87
Vitesses des électrons dans les conducteurs (2)	88
Vitesses des électrons dans les conducteurs (3)	89
Courants dans les conducteurs	90
Conductivité: quelques valeurs typiques	91
Électronique: loi d'Ohm	92
Électronique: puissance consommée	93
Magnétostatique	94
Magnétisme	95
Loi de Biot-Savart	96
Champ magnétique d'une charge en mouvement	97
Sources du champ magnétique	98
Force magnétique (Laplace et Lorentz)	99
Force magnétique sur un courant	100
Force entre deux courants	101
Loi d'Ampère (forme intégrale)	102
Théorème du rotationnel	103
Loi d'Ampère (forme locale)	104
Magnétostatique: récapitulatif	105
Équations du champ magnétique	106
Analyse vectorielle 5: le nabla $\vec{\nabla}$	107
L'opérateur nabla	108
Opérations avec le nabla (1)	109
Opérations avec le nabla (2)	110
Quelques formules avec le nabla	111
Le(s) Laplacien(s): nabla au carré	112
Gauss, Stokes, etc.: un autre point de vue (1)	113
Gauss, Stokes, etc.: un autre point de vue (2)	114
Électrostatique – Magnétostatique:une comparaison	115
Deux champs bien différents (?)	116
Phénomènes d'Induction(enfin, un peu de mouvement!)	117
« Force » électromotrice (1)	118
« Force » électromotrice (2)	119
fem due au mouvement	120
fem due au mouvement: des exemples!	121
Induction électromagnétique	122
Loi de Faraday (forme intégrale)	123
Loi de Faraday (forme locale)	124
La règle du flux magnétique	125





Le champ électrique induit	126
Inductance: mutuelle	127
Inductance: self	128
Énergie magnétique (1)	129
Énergie magnétique (2)	130
[Bizarre] Champ \vec{E} non conservatif	131
Induction: récapitulatif	132
Les 4 équations, forme intégrale	133
Les 4 équations, forme locale	134
Équations de Maxwell	135
Un problème avec la loi d'Ampère?	136
Le terme qui manque: courant de déplacement	137
James Clerk Maxwell (1831–1879)	138
Les trois régimes en électromagnétisme	139
Les équations de Maxwell	140
Ondes	141
Qu'est-ce qu'une onde?	142
[Rappel] L'argument d'une fonction	143
Propagation d'une impulsion 	144
L'équation d'onde (1)	145
L'équation d'onde (2)	146
Ondes électromagnétiques	147
La prévision théorique de Maxwell (1)	148
La prévision théorique de Maxwell (2)	149
La lumière est une onde électromagnétique!	150
Le spectre électromagnétique	151
Ondes électromagnétiques planes, progressives, monochromatiques (OPPM)	152
Onde monochromatique vers $+z$	153
Propagation d'une sinusoïde 	154
Onde électromagnétique PPM selon $+\hat{e}_z$	155
Onde électromagnétique PPM selon \hat{k}	156
Notation complexe: définition	157
Notation complexe: avantages (1)	158
Notation complexe: avantages (2)	159
Notation complexe: avantages (3)	160
Notation complexe: application	161
Équations de Maxwell: régime harmonique	162
Équations de Maxwell dans le cas d'une OPPM	163
Propriétés d'une OPPM dans le vide 	164
Polarisation linéaire d'une OPPM	165
Polarisation circulaire d'une OPPM 	166
OPPM dans les conducteurs	167
Conducteurs et loi d'Ohm (bis)	168
Les équations de Maxwell dans un conducteur	169
L'équation d'onde dans un conducteur	170
OPPM dans un bon conducteur 	171




Conditions aux limites vide-conducteur	172
Interface vide-conducteur	173
Conditions aux limites	174
Puissance électromagnétique: vecteur de Poynting	175
[Rappel] Énergie électro/magnétostatique	176
Énergie électromagnétique	177
Travail du champ électromagnétique	178
Énergie \vec{E}/M et puissance fournie (1)	179
Énergie \vec{E}/M et puissance fournie (2)	180
Énergie \vec{E}/M et puissance fournie (3)	181
Puissance \vec{E}/M transportée: vecteur de Poynting	182
[Produit de deux fonctions harmoniques]	183
Énergie et puissance d'ondes \vec{E}/M harmoniques	184
OPPM énergie électrique = magnétique	185
Impédance caractéristique du vide	186
Champ électrique dans la matière	187
Diélectriques (isolants)	188
Effet de la polarisation de la matière	189
Polarisation: charges induits	190
Loi de Gauss dans les diélectriques	191
Milieux LHI	192
Permittivité relative: quelques valeurs typiques	193
Champ magnétique dans la matière	194
Phénomènes magnétiques: dus aux courants	195
Magnétisation: courants induits	196
Loi d'Ampère dans les diélectriques	197
Milieux LHI	198
Susceptibilité magnétique: quelques valeurs	199
Ferromagnétisme	200
Équations de Maxwell dans la matière	201
Courant de polarisation	202
Équations de la divergence	203
Équations du rotationnel	204
Équations de Maxwell dans la matière (1)	205
Équations de Maxwell dans la matière (2)	206
Équations de Maxwell dans la matière (3)	207
Énergie et puissance dans la matière	208
OPPM dans les milieux lhi	209
OPPM dans un milieu lhi	210
Types de pertes dans la matière	211
Permittivité effective	212
Nombre d'onde complexe	213
Coefficients α et β	214
Milieu lhi sans pertes	215
Milieu lhi avec pertes	216
Réflexion / transmission entre deux milieux lhi	217
Conditions aux limites entre deux milieux lhi	218



Incidence normale sur une interface	219
Incidence normale: conditions aux limites	220
Incidence normale: coefficients amplitude	221
Incidence normale: coefficients puissance	222
Incidence oblique sur une interface: définitions	223
Incidence oblique \perp : champs	224
Incidence oblique \perp : Snel – Descartes	225
Incidence oblique \perp : conditions aux limites	226
Incidence oblique \perp : coefficients amplitude 	227
Incidence oblique \perp : coefficients puissance	228
Incidence oblique \parallel : champs	229
Incidence oblique \parallel : conditions aux limites	230
Incidence oblique \parallel : coefficients amplitude 	231
Incidence oblique \parallel : coefficients puissance	232



Ce document contient les transparents du cours mais il n'est en aucun cas complet (auto-suffisant); une grande quantité d'information (commentaires, explications, diagrammes, démonstrations etc.) est donnée pendant les séances, oralement ou à l'aide du tableau.

 Le logo du logiciel R à droite d'un titre contient un lien vers le script illustrant les résultats présentés dans le transparent. L'étude du graphique (mais pas celle du script !) fait partie intégrante du cours. Tous les scripts sont accessibles dans la partie « Documents / Compléments multimédia » du site :

<http://www.polytech.unice.fr/~aliferis/fr/teaching/courses/cip2/electromagnetisme/>

Toutes les ressources externes, disponibles en lien hypertexte à partir de ce document, sont aussi répertoriées dans la partie « Ressources Externes » du site :

<http://www.polytech.unice.fr/~aliferis/fr/teaching/courses/cip2/electromagnetisme/>

Les extraits vidéo proviennent du cours du Professeur Walter Lewin, MIT : *Walter Lewin, 8.02 Electricity and Magnetism, Spring 2002. (Massachusetts Institute of Technology : MIT OpenCourseWare),*

<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/CourseHome/>
(Accessed September 9, 2009). *License : Creative Commons BY-NC-SA.*



Document préparé avec L^AT_EX et powerdot, sous licence **Creative Commons** BY-NC-SA :
Paternité – Pas d'Utilisation Commerciale – Partage des Conditions Initiales à l'Identique 2.0 France.



Introduction

2

Plan du cours

- ▼ Introduction
- ▼ Analyse vectorielle
- ▼ Électrostatique
- ▼ Magnétostatique
- ▼ Phénomènes d'induction
- ▼ Équations de Maxwell
- ▼ Ondes électromagnétiques
26 séances cours + 26 séances TD ($39h \times 2$)
- ▼ *Optique ondulatoire*
6 séances cours + 6 séances TD ($9h \times 2$)

3

Règles du jeu / conseils

- ▼ Travail individuel
 - ▶ Contrôles : 3 (IA) + 1 (PV)
 - ▶ Coefficients croissants
14%, 18%, 22%, 26%
 - ▶ Contrôle continu : quiz, tableau, etc.
20% (harmonisation des notes entre groupes TD)
- ▼ Les transparents
- ▼ Classeurs, prise de notes
- ▼ J@lon : <http://jalon.unice.fr>
- ▼ ...

4



Un tout petit peu d'histoire. . .

- ▼ L'ambre (ἤλεκτρον) et l'aimant (μαγνήτης) :
3000 ans d'histoire !
- ▼ Premières traces écrites :
Thalès (624–547 av. J.C.)
Platon (427–341 av. J.C.)
- ▼ Deux phénomènes distincts. . .
- ▼ . . . unifiés à la fin du XIX^e siècle (1864)
par James Clerk Maxwell (1837–1879)
- ▼ (et après ?)

5

Qu'est-ce qu'on fait ici ?

- ▼ Pourquoi étudier l'électromagnétisme ?
- ▼ La technologie (toutes ces applications. . .)
C'est tout ?
- ▼ Les quatre forces (interactions) de la Nature :
 1. Gravitationnelle
 2. Électromagnétique
 3. Nucléaire forte
 4. Nucléaire faible
- ▼ Dans quels contextes ? Dans quel ordre ?

6



Forces gravitationnelle et électrique

▼ Deux électrons

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

▼ Force gravitationnelle

$$F_g = G \frac{m_e m_e}{r^2} \quad (G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2})$$

▼ Force électrique

$$F_e = k_c \frac{q_e q_e}{r^2} \quad (k_c = 8.99 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2})$$

▼ $F_e/F_g = 0.23 \times 10^{42}$

▼

$$\frac{\text{Univers}}{\text{proton}} = \frac{1 \times 10^{26} \text{ m}}{1.6 \times 10^{-15} \text{ m}} = 0.6 \times 10^{41}$$

7

L'É/M est partout !

Les forces et les phénomènes électromagnétiques se trouvent partout autour de nous !

(mais pourquoi on ne sent rien ?)

8



Champs électromagnétiques

- ▼ Pourquoi utiliser les champs \vec{E} et \vec{B} pour décrire ces phénomènes ?
- ▼ Force électrique entre deux charges : loi de Coulomb

$$\vec{F} = k_c \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{u}_{1 \rightarrow 2}$$

Valable *uniquement* si les charges sont immobiles !

Sinon ? la formule devient très compliquée. . .

- ▼ Force électromagnétique (force de Lorentz) :

$$\boxed{\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})} \quad (1)$$

Exercée sur une charge q de vitesse \vec{v} se déplaçant dans un champ \vec{E} et \vec{B} .

Valable *toujours*.

9

Comment ça marche ?

1. Les charges « sources » (immobiles ou pas) créent des champs.
2. Les champs agissent sur d'autres charges (force de Lorentz).
Il suffit de (bien) décrire les champs (\vec{E} et \vec{B}) créés par les sources.

Charge : valeur multiple de q_e . . .

10



Champ électrostatique

- ▼ « Statique » : les charges ne se déplacent pas
- ▼ Loi de Coulomb (1785)
- ▼ Force exercée par la charge 1 sur la charge 2 :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}}_{k_c} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{u}_{1 \rightarrow 2}$$

- ▼ Champ électrique généré par la charge 1 :

$$\vec{E}_1 \triangleq \frac{\vec{F}_{1 \rightarrow 2}}{q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{u}_{1 \rightarrow 2}$$

- ▼ Donc, à partir du champ électrique :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = q_2 \vec{E}_1$$

11



Analyse vectorielle : champ, flux

12

La notion de champ

- ▼ *Champ scalaire* : l'association à chaque point de l'espace d'un scalaire (un seul nombre) : p.ex. température, altitude, ...
- ▼ *Champ vectoriel* : l'association à chaque point de l'espace d'un vecteur (longueur et orientation) : p.ex. vent, vitesse, ...
- ▼ Il faut d'abord pouvoir se repérer et s'orienter dans l'espace !
- ▼ Systèmes de coordonnées (1, 2 ou 3 dimensions ?)
- ▼ Vecteurs

13



Système de coordonnées cartésiennes

Variable	valeurs	longueur élémentaire
x	$] -\infty, \infty[$	dx
y	$] -\infty, \infty[$	dy
z	$] -\infty, \infty[$	dz

▼ Surface élémentaire dS

x constant : $dy dz$

y constant : $dz dx$

z constant : $dx dy$

▼ Volume élémentaire $dV = dx dy dz$

▼ Vecteur de position : $\vec{r} = x\hat{e}_x + y\hat{e}_y + z\hat{e}_z$

▼ Un système d'exception ! les trois variables ont les mêmes dimensions (longueur) et sont équivalentes.

▼ (et l'oreille interne?)

14

Système de coordonnées cylindriques

Variable	valeurs	longueur élémentaire
ρ	$[0, \infty[$	$d\rho$
ϕ	$[0, 2\pi]$	$\rho d\phi$
z	$] -\infty, \infty[$	dz

▼ Surface élémentaire dS

ρ constant : $\rho d\phi dz$

ϕ constant : $d\rho dz$

z constant : $\rho d\rho d\phi$

▼ Volume élémentaire $dV = \rho d\rho d\phi dz$

▼ Vecteur de position : $\vec{r} = \rho\hat{e}_\rho + z\hat{e}_z$

15



Système de coordonnées sphériques

Variable	valeurs	longueur élémentaire
r	$[0, \infty[$	dr
θ	$[0, \pi]$	$r d\theta$
ϕ	$[0, 2\pi]$	$r \sin \theta d\phi$

- ▼ Surface élémentaire dS
 r constant : $r^2 \sin \theta d\phi d\theta$
 θ constant : $r \sin \theta dr d\phi$
 ϕ constant : $r dr d\theta$
- ▼ Volume élémentaire $dV = r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi$
- ▼ Vecteur de position : $\vec{r} = r\hat{e}_r$

16

Vecteurs

- ▼ Objet mathématique ayant une longueur (norme), une direction et un sens (orientation).
- ▼ Notation :
le vecteur : \vec{A}
sa norme : $\|\vec{A}\|$ ou A (un nombre)
- ▼ Un vecteur est défini par ses trois *composantes* :

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}$$

Les A_1, A_2, A_3 dépendent du système de coordonnées choisi, mais le vecteur non !

- ▼ Astuce : le vecteur $\hat{u}_A = \frac{1}{\|\vec{A}\|} \vec{A}$ a la même orientation que \vec{A} mais $\|\hat{u}_A\| = 1$!
Vecteur « unitaire »

17



Le produit scalaire : une projection

- ▼ Le produit scalaire de \vec{A} et \vec{B} , deux vecteurs formant un angle θ :

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = \|\vec{A}\| \|\vec{B}\| \cos \theta \quad (2)$$

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = AB \cos \theta \quad (\text{notation plus simple})$$

(Ne pas oublier le point \cdot entre les vecteurs !)

- ▼ $A \cos \theta$: la projection de \vec{A} sur la direction de \vec{B} !
- ▼ Si \hat{u} un vecteur unitaire (orientation) :

$$\vec{A} \cdot \hat{u} = \text{projection de } \vec{A} \text{ sur la direction de } \hat{u}$$

- ▼ Dans tous les systèmes de coordonnées :

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3 \quad (3)$$

18

Vecteurs unitaires

- ▼ Des vecteurs « à part »
- ▼ Notation : lettre minuscule + chapeau \hat{u} , \hat{n} , \hat{e} , ...
- ▼ Information sur l'orientation :
 - Systèmes de coordonnées : \hat{e}_x , \hat{e}_ρ , \hat{e}_θ , ...
montrent le sens d'augmentation de la variable concernée
 - Surfaces : \hat{n}
montrent le sens de la normale par rapport à la surface (donc la définissent + entrée/sortie)
- ▼ « Utilité » :
 - « Extraire » la composante d'un vecteur \vec{A} sur la direction du vecteur unitaire \hat{u} : $\vec{A} \cdot \hat{u}$
(C'est quoi les composantes d'un vecteur ?)

19



[Extra] Le vecteur de position \vec{r}

- ▼ Pour chaque point M , le vecteur \vec{r} indique :
la **distance** par rapport à l'origine (OM)
l'**orientation** (de O vers M).
- ▼ Coordonnées cartésiennes, $M(x, y, z)$:

$$\vec{r} = x\hat{e}_x + y\hat{e}_y + z\hat{e}_z$$

- ▼ Coordonnées cylindriques, $M(\rho, \phi, z)$:

$$\vec{r} = \rho\hat{e}_\rho + z\hat{e}_z$$

(où est passé ϕ ?)

- ▼ Coordonnées sphériques, $M(r, \theta, \phi)$:

$$\vec{r} = r\hat{e}_r$$

(où sont passés θ et ϕ ?)

20

Système de coordonnées cartésiennes (bis)

Variable	valeurs	longueur élémentaire
x	$] -\infty, \infty[$	dx
y	$] -\infty, \infty[$	dy
z	$] -\infty, \infty[$	dz

- ▼ Surface élémentaire dS
 x constant : $dy dz$
 y constant : $dz dx$
 z constant : $dx dy$
- ▼ Volume élémentaire $dV = dx dy dz$
- ▼ Un système d'exception ! les trois variables ont les mêmes dimensions (longueur) et sont équivalentes.
- ▼ En plus, les trois vecteurs unitaires $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$, restent les mêmes à chaque point de l'espace !

21



Champ scalaire

- ▼ *Champ scalaire* : l'association à chaque point de l'espace d'un scalaire (un seul nombre) : p.ex. température, altitude, ...
- ▼ Un champ scalaire est une fonction de 3 variables
p.ex. en coordonnées cartésiennes : $\Phi(x, y, z)$

22

Champ vectoriel

- ▼ *Champ vectoriel* : l'association à chaque point de l'espace d'un vecteur (module et direction) :
p.ex. vent, vitesse, ...
- ▼ Un champ vectoriel est un ensemble de 3 fonctions (les composantes) chacune de 3 variables (les coordonnées) :

$$\vec{A}(x, y, z) = \begin{pmatrix} A_x(x, y, z) \\ A_y(x, y, z) \\ A_z(x, y, z) \end{pmatrix}$$

- ▼ *Ne pas confondre composantes et coordonnées !*

23



Flux d'un champ vectoriel (intro)

(Qu'est-ce qui traverse une surface ?)

- ▼ Champ vectoriel \vec{h} : $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$
- ▼ Surface élémentaire (ouverte) dS
 - ▶ Vecteur normal à la surface \hat{n}
 - ▶ Vecteur $d\vec{S} = \hat{n} dS$
 - ▶ Que représente $\vec{h} \cdot d\vec{S}$?
- ▼ Surface ouverte S
 - ▶ Que représente $\int_S \vec{h} \cdot d\vec{S}$?
- ▼ Surface fermée S
 - ▶ Que représente $\oint_S \vec{h} \cdot d\vec{S}$?

24

Flux d'un champ vectoriel

- ▼ Champ vectoriel \vec{A}
- ▼ Surface (ouverte) S
Flux du champ \vec{A} à travers S :

$$\int_S \vec{A} \cdot d\vec{S} \quad \text{ou} \quad \int_S \vec{A} \cdot \hat{n} dS \quad (4)$$

- ▼ Surface (fermée) S (\hat{n} sortant)
Flux du champ \vec{A} à travers S :

$$\oint_S \vec{A} \cdot d\vec{S} \quad \text{ou} \quad \oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} dS \quad (5)$$

Le flux à travers une surface **fermée** donne des informations sur les « sources » du champ à l'intérieur de la surface

25



Loi de Gauss (électrostatique)

- ▼ **Électrostatique** : les charges sont immobiles
- ▼ **Loi de Gauss** : « Le flux du champ électrique à travers une surface *fermée* est proportionnel à la charge totale incluse à *l'intérieur* de cette surface »

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (6)$$

- ▼ La constante ϵ_0 (permittivité du vide) est égale à $8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F m}^{-1}$ (rappel sur les dimensions : $\text{F} = \text{C V}^{-1}$).
- ▼ \hat{n} est perpendiculaire à chaque point de la surface S et sa direction est vers *l'extérieur* de celle-ci.
- ▼ Le champ électrique en V m^{-1}

26



Analyse vectorielle 2 : divergence

27

Couper un volume en morceaux...

- ▼ Volume \mathcal{V} entouré par S (donc fermée)
- ▼ Partager \mathcal{V} en $\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2$, entourés par S_1, S_2

$$\oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS = \oint_{S_1} \vec{A} \cdot \hat{n}_1 \, dS + \oint_{S_2} \vec{A} \cdot \hat{n}_2 \, dS$$

- ▼ Continuer...

$$\oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS = \sum_i \left(\oint_{S_i} \vec{A} \cdot \hat{n}_i \, dS \right) \quad (7)$$

- ▼ ...jusqu'où ?
- ▼ Surface fermée S_i élémentaire

28



Divergence

- ▼ Quel est le flux à travers une surface élémentaire fermée ?

- ▼ Divergence = flux surface élémentaire / volume

- ▼

$$\operatorname{div} \vec{A} \triangleq \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_S \vec{A} \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

- ▼ $\operatorname{div} \vec{A}$: un champ *scalaire* ! ($> 0, < 0, = 0$)
- ▼ À chaque point de l'espace, $\operatorname{div} \vec{A} \propto$ flux à travers surface fermée autour de ce point
- ▼ flux \propto sources
- ▼ *La divergence du champ \vec{A} est proportionnelle à la densité volumique des sources qui le génèrent.*

29

Loi de Gauss (électrostatique) : forme locale

- ▼ Surface élémentaire autour d'un volume élémentaire ΔV incluant une charge ΔQ :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{\Delta Q}{\epsilon_0}$$

- ▼ Densité volumique de charge $\rho = dQ/dV$
- ▼ Charge $\Delta Q = \int_{\Delta V} \rho dV = \rho \Delta V$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\rho \Delta V}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (9)$$

- ▼ (et alors ?)

30



Calcul de la divergence

- ▼ Système de coordonnées cartésiennes
- ▼ Surface élémentaire autour de (x, y, z) :
cube centré à (x, y, z) , de dimensions $\Delta x, \Delta y, \Delta z$
- ▼ Calculer le flux à travers sa surface

$$\operatorname{div} \vec{A} = \lim_{\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow 0} \frac{\text{flux}}{\text{volume}}$$

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (10)$$

- ▼ Systèmes de coordonnées cylindriques et sphériques...

31

Théorème de la divergence (1)

- ▼ Surface fermée S autour d'un volume \mathcal{V}
- ▼ Découper \mathcal{V} en plusieurs petits morceaux \mathcal{V}_i
- ▼ S_i la surface (fermée) autour de \mathcal{V}_i

$$\text{flux à travers } S = \sum_i \text{flux à travers } S_i$$

$$\oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS = \sum_i \left(\oint_{S_i} \vec{A} \cdot \hat{n}_i \, dS \right)$$

- ▼ À la limite où la surface S_i devient infiniment petite (englobe $\Delta \mathcal{V} \rightarrow 0$) :

$$\lim_{\Delta \mathcal{V} \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta \mathcal{V}} \oint_{S_i} \vec{A} \cdot \hat{n}_i \, dS = \operatorname{div} \vec{A}$$

32



Théorème de la divergence (2)

$$\text{divergence} = \frac{\text{flux}}{\text{volume}}$$

$$\oint_{S_i} \vec{A} \cdot \hat{n}_i \, dS = \text{div } \vec{A} \, dV$$

▼ Donc :

$$\oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS = \int_V \text{div } \vec{A} \, dV \quad (11)$$

▼ Théorème

- de la divergence
- de Gauss
- de Ostrogradsky

33

Loi de Gauss : intégrale vers locale

▼ Loi de Gauss, forme intégrale (6), tr.26 :

$$\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

▼ La charge à l'intérieur de S : $Q_{\text{int}} = \int_V \rho(\vec{r}) \, dV$

▼ Le flux à travers S : $\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = \int_V \text{div } \vec{E} \, dV$

▼

$$\int_V \text{div } \vec{E} \, dV = \int_V \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0} \, dV$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

34



Superposition

35

Le principe de superposition : $\vec{1} + \vec{1} = \vec{2}$

- ▼ L'effet de la somme = la somme des effets
- ▼ Charge ponctuelle q_i à \vec{r}_i ,
crée un champ \vec{E}_i à \vec{r} :

$$\vec{E}_i(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{\|\vec{r} - \vec{r}_i\|^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{\|\vec{r} - \vec{r}_i\|}$$

- ▼ Ensemble de charges crée $\vec{E}(\vec{r}) = \sum_i \vec{E}_i(\vec{r})$
- ▼ Distribution continue de charges,
densité volumique ρ (C m⁻³), crée :

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\mathcal{V}} \frac{1}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \underbrace{\rho(\vec{r}') d\mathcal{V}'}_{dq}$$

- ▼ *Condition : pas d'interaction entre les charges !*

36

Exemple de superposition : deux plans infinis

- ▼ Deux plans parallèles
- ▼ Distance entre les plans : d
- ▼ Un plan infini de densité surfacique $+\rho_s$
- ▼ Un plan infini de densité surfacique $-\rho_s$
- ▼ Calculer le champ \vec{E} partout dans l'espace
- ▼ (un seul plan : TD 1, 1.3 ; WL, L3, 37m58s-41m00s)

$$\vec{1} + \vec{1} = \vec{2}$$

37



Visualisation de champs vectoriels

38

Deux approches

1. Dessiner des vecteurs
 - ▼ À chaque point \vec{r} dessiner le vecteur $\vec{E}(\vec{r})$
 - ▼ L'origine du vecteur à \vec{r}
 - ▼ Diagramme "quiver" (carquois)
2. Dessiner des « lignes de champ »
 - ▼ Lignes continues
 - ▼ Tangentes au champ \vec{E} (orientation)
 - ▼ Lignes/surface $\propto \|\vec{E}\|$ (module)
 - ▼ Ne se croisent jamais
 - ▼ *Pas de superposition !*
 - ▼ (moins maniables que le champ. ...)

39

Un autre regard sur le flux (et la divergence)

$$\frac{\text{nombre de lignes}}{\text{surface perpendiculaire}} \propto E$$

▼

$$\boxed{\text{flux à travers } S} = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

$$\boxed{\propto} \int_S \text{nombre de lignes traversant } dS \\ = \boxed{\text{nombre de lignes traversant } S}$$

- ▼ lignes traversant = lignes sortant – lignes entrant
- ▼ Flux positif : sorties > entrées
- ▼ Flux nul : équilibre entrées/sorties
- ▼ Flux négatif : sorties < entrées
- ▼ Divergence : flux « local »

40



Lignes de champ en électrostatique

- ▼ Loi de Gauss :
 $\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$ ou $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
- ▼ Nombre de lignes traversant une surface fermée
 $\propto Q$ (à l'intérieur)
- ▼ Trois règles d'or :
 1. Les lignes commencent (\nearrow) sur les charges positives...
 2. ... et se terminent (\searrow) sur les charges négatives
 3. Le nombre de lignes ($\nearrow - \searrow$) **autour** d'une charge Q , est proportionnel à Q
- ▼ Exemples de lignes de champ :
Applet "**Electric field lines**"
et expériences de Walter Lewin (**MIT**) :
Graines de gazon (**WL, L2, 42m25-43m40**)
Jeu de ballon ! (**WL, L2, 45m55-49m24**)

41



Travail dans un champ électrostatique : potentiel

42

Le travail de A vers B (1)

- ▼ Une charge (fixe) ponctuelle Q à l'origine
(le reste n'est que superposition !)
- ▼ On déplace une charge « test » q
dans le champ \vec{E} de Q
- ▼ Quel est le travail *dépensé* de A à B ?
(« dépensé » : par celui qui déplace la charge)
- ▼ Travail = force \times déplacement :

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{l} = \vec{F} \cdot \hat{t} dl \quad (J = N m)$$

- ▼ \hat{t} : vecteur unitaire, tangent à $d\vec{l}$
- ▼

$$W_{A \rightarrow B} = \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

43



Le travail de A vers B (2)

- ▼ Force **exercée** sur la charge q pendant le déplacement :
(« exercée » : par celui qui déplace la charge)

$$\vec{F} = -\vec{F}_{\text{el}} = -(q\vec{E})$$

- ▼ Travail **dépensé** de A à B :

$$W_{A \rightarrow B} = -q \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (12)$$

$\Gamma : \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B$ le chemin de A vers B (**lequel ?**)

44

De quoi dépend $W_{A \rightarrow B}$?

- ▼ ... après réflexion,
 $W_{A \rightarrow B}$ ne dépend que de \vec{r}_A et \vec{r}_B
- ▼ (parce que $\vec{E} \parallel \hat{e}_r$)
- ▼ Il n'y a que les points de départ et d'arrivée qui interviennent !
- ▼ Le chemin Γ de A à B ne compte pas !
- ▼ Conséquence :
le travail le long d'une courbe **fermée** est nul,
donc :

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} dl = 0 \quad (13)$$

- ▼ « La **circulation** du champ électrique
le long d'une courbe fermée, est nulle »
- ▼ Les forces électrostatiques sont conservatrices

45



Du travail au potentiel

- ▼ $W_{A \rightarrow B} = f(\vec{r}_A, \vec{r}_B) = ?$
- ▼ Remarque : $W_{P \rightarrow A} + W_{A \rightarrow P} = 0$
- ▼

$$\begin{aligned} \boxed{W_{A \rightarrow B}} &= W_{A \rightarrow P \rightarrow B} \text{ (le chemin ne compte pas)} \\ &= W_{A \rightarrow P} + W_{P \rightarrow B} \\ &= \boxed{-W_{P \rightarrow A} + W_{P \rightarrow B}} \end{aligned}$$

- ▼ Travail *dépendu* de A à B par charge déplacée : $W_{A \rightarrow B}/q$
- ▼

$$\frac{W_{A \rightarrow B}}{q} = \frac{W_{P \rightarrow B}}{q} - \frac{W_{P \rightarrow A}}{q} \quad (14)$$

46

Potentiel : le travail par charge

- ▼ On *choisit* un point de référence P et on *définit le potentiel* à chaque point A de l'espace :

$$V(\vec{r}_A) \triangleq \frac{W_{P \rightarrow A}}{q} \quad (\text{J C}^{-1} = \text{V}) \quad (15)$$

- ▼ Le potentiel $V(\vec{r})$ est un champ scalaire
- ▼ Le potentiel du point de référence :

$$V(\vec{r}_P) = \frac{W_{P \rightarrow P}}{q} = 0$$

- ▼ Le travail dépendu de A à B :

$$W_{A \rightarrow B} \stackrel{(14),(15)}{=} q[V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A)] \quad (16)$$

47



Travail : charge \times ddp

- ▼ $V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A)$: différence de potentiel (ddp)

$$W_{A \rightarrow B} = q[V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A)] = \text{charge} \times \text{ddp} \quad (17)$$

- ▼ Si $W_{A \rightarrow B} > 0$ on fournit de l'énergie à la charge déplacée
 - ▶ $q > 0$ et $V(\vec{r}_B) > V(\vec{r}_A)$
 - ▶ $q < 0$ et $V(\vec{r}_B) < V(\vec{r}_A)$
- ▼ Si $W_{A \rightarrow B} < 0$ on récupère de l'énergie (déplacement « *spontané* » $A \rightarrow B$)
 - ▶ $q > 0$ et $V(\vec{r}_B) < V(\vec{r}_A)$
 - ▶ $q < 0$ et $V(\vec{r}_B) > V(\vec{r}_A)$

48

Potentiel créé par une charge ponctuelle

- ▼ Charge Q à l'origine
- ▼ $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r$
- ▼ Potentiel = travail / charge ; référence P à l'infini

$$\begin{aligned} V(\vec{r}_A) &= \frac{W_{\infty \rightarrow A}}{q} = - \int_{\Gamma: \vec{r}_{\infty} \rightarrow \vec{r}_A} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl \\ &= - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Gamma: \vec{r}_{\infty} \rightarrow \vec{r}_A} \frac{1}{r^2} \hat{e}_r \cdot (-\hat{e}_r \, dr) \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{\infty} \frac{1}{r^2} \, dr \quad \text{attention aux bornes!} \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_A}^{\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_A} \end{aligned} \quad (18)$$

- ▼ Ensemble de charges ou distribution de charges :
superposition

49



Du champ électrostatique au potentiel

- ▼ Travail dépensé de A vers B par charge déplacée :

$$\begin{aligned}\frac{W_{A \rightarrow B}}{q} &= V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) \\ &= - \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ \text{alors que } V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) &= \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} dV\end{aligned}$$

$$\boxed{dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l}} \quad (19)$$

- ▼ À un point de l'espace, examiner les cas :
 $dV > 0$ (max ?); $dV < 0$ (min ?); $dV = 0$
 ▼ Exemple : un condensateur (plaques parallèles);
 Van de Graaf et tube fluorescent (WL, L4, 43m00-49m01);
 Applet "Charges and Fields"

50

Du potentiel au champ électrostatique

- ▼ $dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l}$
 ▼ En coordonnées cartésiennes, $V(\vec{r}) = V(x, y, z)$:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

et

$$d\vec{l} = dx\hat{e}_x + dy\hat{e}_y + dz\hat{e}_z$$

donc

$$-\vec{E} = \frac{\partial V}{\partial x}\hat{e}_x + \frac{\partial V}{\partial y}\hat{e}_y + \frac{\partial V}{\partial z}\hat{e}_z \triangleq \overrightarrow{\text{grad}} V$$

$$\boxed{\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V} \quad (\text{V m}^{-1}) \quad (20)$$

- ▼ Remarque : $dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = \overrightarrow{\text{grad}} V \cdot d\vec{l}$

51



Analyse vectorielle 3 : gradient

52

Le gradient d'un champ scalaire

▼ $dV = \overrightarrow{\text{grad}} V \cdot d\vec{l} = \overrightarrow{\text{grad}} V \cdot \hat{t} dl$

$$\overrightarrow{\text{grad}} V \cdot \hat{t} = \frac{dV}{dl} \text{ dérivée selon } \hat{t}$$

▼ Le gradient d'un champ scalaire V :

1. Est un champ **vectoriel**
2. Perpendiculaire aux **équipotentielles**
($V = \text{cste}$, $dV = 0$)
3. Montre la direction de la plus **forte**
augmentation de V ($dV \text{ max}$)
4. Module : $\left. \frac{dV}{dl} \right|_{\text{max}}$ (max quand $\hat{t} \parallel \overrightarrow{\text{grad}} V$)

$$V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) = \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \underbrace{\overrightarrow{\text{grad}} V \cdot \hat{t}}_{dV/dl} dl$$

$$\text{rappel : } f(b) - f(a) = \int_a^b f'(x) dx = \int_a^b \frac{df}{dx} dx$$

53

Le gradient dans les trois systèmes de coordonnées

▼ $dV = \overrightarrow{\text{grad}} V \cdot d\vec{l}$

▼ Exprimer dV et $d\vec{l} \dots$

▼ Coordonnées cartésiennes

$$\overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial x} \hat{e}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{e}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{e}_z \quad (21)$$

▼ Coordonnées cylindriques

$$\overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial \rho} \hat{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \phi} \hat{e}_\phi + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{e}_z \quad (22)$$

▼ Coordonnées sphériques

$$\overrightarrow{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \hat{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \hat{e}_\phi \quad (23)$$

54



Du champ au potentiel : un raccourci

- ▼ $V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) = - \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl$
- ▼ Deux conditions pour prendre un raccourci :
 1. Le champ \vec{E} n'a qu'une seule composante...
 2. ... correspondant à une variable de longueur
- ▼ Exemple : coord. cylindriques et $\vec{E} = E_\rho \hat{e}_\rho$
 - Commencer par $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$
 - Équ. (22) : $\partial V / \partial \phi = 0$ et $\partial V / \partial z = 0$
 - Donc V est fonction uniquement de ρ !
 - $E_\rho(\rho) = -\frac{dV(\rho)}{d\rho} = -V'(\rho)$
$$V(\rho) = - \int E_\rho(\rho) \, d\rho + C \quad (24)$$
 - C : constante à déterminer en imposant une valeur de V
(p.ex. $V_{\text{réf}} = 0$)

55



Analyse vectorielle 4 : circulation, rotationnel

56

Couper une surface en morceaux...

▼ **Circulation** du champ \vec{A} le long de Γ :

$$\int_{\Gamma} \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad \text{ou} \quad \int_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} dl \quad (25)$$

Circulation : un nombre (> 0 , < 0 , $= 0$)

égal à la **valeur moyenne de A_{tan} \times longueur de Γ**

- ▼ À partir de maintenant : courbe Γ fermée
- ▼ Surface S (ouverte) entourée par Γ (fermée)
- ▼ Partager S en S_1, S_2 , entourées par Γ_1, Γ_2

$$\oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} dl = \oint_{\Gamma_1} \vec{A} \cdot \hat{t}_1 dl + \oint_{\Gamma_2} \vec{A} \cdot \hat{t}_2 dl$$

▼ Continuer...

$$\oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} dl = \sum_i \left(\oint_{\Gamma_i} \vec{A} \cdot \hat{t}_i dl \right) \quad (26)$$

- ▼ ... jusqu'où ?
- ▼ Courbe fermée Γ_i et surface S_i : élémentaires

57



Rotationnel

- ▼ Quelle est la circulation le long d'une courbe élémentaire fermée ?
- ▼ Rotationnel $\triangleq \frac{\text{circulation courbe élémentaire fermée}}{\text{aire surface plane entourée}}$
- ▼ Faire intervenir le vecteur \hat{n} de la surface
- ▼ Sens de circulation $\hat{t} \leftrightarrow$ sens de la normale \hat{n}
(Périph' externe \leftrightarrow tour Eiffel)

$$\hat{n} \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \triangleq \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta S} \oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} dl \quad (27)$$

- ▼ $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$: un champ **vectoriel** ! (norme + sens)
- ▼ À chaque point de l'espace, $\hat{n} \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$ (composante du $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$ selon \hat{n}) \propto circulation autour de ce point sur le bord d'une surface élémentaire $\perp \hat{n}$
- ▼ Si le champ « tourne » ($\|\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}\| \neq 0$), il fait des tourbillons autour du vecteur du rotationnel (règle de la main droite).
- ▼ La surface dont $\hat{n} \parallel \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$ contient un tourbillon du champ.
- ▼ **Visualisation** : un moulin immergé dans le champ.

58

Rotationnel du champ électrostatique

- ▼ Courbe élémentaire autour d'une surface plane ΔS
- ▼ Circulation du champ électrostatique (13) :

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} dl = 0$$

- ▼ Circulation par surface plane :

$$\hat{n} \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta S} 0 = 0$$

- ▼ Pour toutes les surfaces ΔS , \hat{n} !
- ▼ Rotationnel du champ électrostatique :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (28)$$

- ▼ (et alors ?)

59



Calcul du rotationnel

▼ Système de coordonnées cartésiennes

$$\hat{n} \cdot \vec{\text{rot}} \vec{A} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\text{circulation courbe élémentaire fermée}}{\text{aire surface plane entourée}}$$

▼ Trois courbes élémentaires autour de (x, y, z) :

1. $\hat{n} = \hat{e}_z$: surface plane, centrée à (x, y, z) ,
de dimensions $\Delta x, \Delta y$ ($\Delta S = \Delta x \Delta y$)

▼ Calculer la circulation le long de cette courbe

$$\hat{e}_z \cdot \vec{\text{rot}} \vec{A} = \vec{\text{rot}} \vec{A}|_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}$$

▼ Les deux autres courbes ($\hat{n} = \hat{e}_x$ et $\hat{n} = \hat{e}_y$) :

$$\vec{\text{rot}} \vec{A}|_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \quad , \quad \vec{\text{rot}} \vec{A}|_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}$$

60

Le rotationnel en coordonnées cartésiennes

$$\vec{\text{rot}} \vec{A} = \begin{vmatrix} \hat{e}_x & \hat{e}_y & \hat{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \quad (29)$$

développer selon la première ligne !

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

61



Le rotationnel en coordonnées cylindriques

$$\begin{aligned}\vec{\text{rot}} \vec{A} &= \frac{1}{\rho} \begin{vmatrix} \hat{e}_\rho & \rho \hat{e}_\phi & \hat{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial \rho} & \frac{\partial}{\partial \phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_\rho & \rho A_\phi & A_z \end{vmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \\ \frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \\ \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial \rho} - \frac{\partial A_\rho}{\partial \phi} \right] \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (30)$$

62

Le rotationnel en coordonnées sphériques

$$\begin{aligned}\vec{\text{rot}} \vec{A} &= \frac{1}{r^2 \sin \theta} \begin{vmatrix} \hat{e}_r & r \hat{e}_\theta & r \sin \theta \hat{e}_\phi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \phi} \\ A_r & r A_\theta & r \sin \theta A_\phi \end{vmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial(\sin \theta A_\phi)}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right] \\ \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \phi} - \frac{\partial(r A_\phi)}{\partial r} \right] \\ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(r A_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (31)$$

63



Énergie électrostatique

64

Charge ponctuelle

- ▼ Travail dépensé $P \rightarrow A$ = Énergie potentielle

$$W_{P \rightarrow A} = q[V(\vec{r}_A) - V(\vec{r}_P)] = qV(\vec{r}_A) = \mathcal{U}_e$$

- ▼ L'énergie potentielle électrostatique d'une charge q :

$$\mathcal{U}_e = qV(\vec{r}) \quad (32)$$

- ▼ $V(\vec{r})$: potentiel créé par toutes les *autres* charges

65

Ensemble de N charges (1)

- ▼ \mathcal{U}_e : Le travail dépensé pour déplacer *toutes* les charges de $P \rightarrow A$
- ▼ Charges déplacées l'une après l'autre, q_i à \vec{r}_i
- ▼ $V_j(\vec{r}_i)$: potentiel créé au point \vec{r}_i par la charge q_j

Déplacée	Présente(s)	Travail dépensé
q_1	—	0
q_2	q_1	$q_2 V_1(\vec{r}_2)$
q_3	q_1, q_2	$q_3 V_1(\vec{r}_3) + q_3 V_2(\vec{r}_3)$
...
q_N	q_1, \dots, q_{N-1}	$q_N [V_1(\vec{r}_N) + \dots + V_{N-1}(\vec{r}_N)]$
Total :		$\mathcal{U}_e = \sum_{i=2}^N \sum_{j<i} q_i V_j(\vec{r}_i)$

- ▼ Peut-on trouver une formule plus simple ?

66



Ensemble de N charges (2)

- ▼ $\mathcal{U}_e = \sum_{i=2}^N \sum_{j<i} q_i V_j(\vec{r}_i)$
- ▼ Remarque : $q_i V_j(\vec{r}_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{i,j}} = q_j V_i(\vec{r}_j)$ (normal !)
- ▼ On ajoute l'autre moitié des termes et on divise par deux !

$$\begin{aligned}\mathcal{U}_e &= \frac{1}{2} \sum_{i=2}^N \sum_{j<i} q_i V_j(\vec{r}_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j>i} q_i V_j(\vec{r}_i) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} q_i V_j(\vec{r}_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[q_i \left(\sum_{j \neq i} V_j(\vec{r}_i) \right) \right]\end{aligned}$$

$$\boxed{\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i V(\vec{r}_i)} \quad (33)$$

- ▼ $V(\vec{r}_i)$: potentiel créé au point \vec{r}_i par toutes les *autres* charges (sauf la q_i)

67

Distribution continue de charges

1. Volumique : $dq = \rho(\vec{r}) dV$

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_V \rho(\vec{r}) V(\vec{r}) dV \quad (34)$$

2. Surfactive : $dq = \rho_s(\vec{r}) dS$

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_S \rho_s(\vec{r}) V(\vec{r}) dS \quad (35)$$

3. Linéique : $dq = \rho_l(\vec{r}) dl$

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_\Gamma \rho_l(\vec{r}) V(\vec{r}) dl \quad (36)$$

- ▼ $V(\vec{r})$: le potentiel au point \vec{r} créé par la distribution
- ▼ Intégrer *sur les charges*

68



Densité volumique d'énergie

- ▼ Peut-on exprimer l'énergie en termes de champ \vec{E} plutôt que de potentiel V et de charges ρ ?

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_V \rho(\vec{r}) V(\vec{r}) dV$$

$$\rho = \epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E}$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V$$

- ▼ Sans démonstration : la (34) devient

$$\boxed{\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_{\mathcal{V}} \epsilon_0 E^2(\vec{r}) d\mathcal{V}} \quad (37)$$

- ▼ $\epsilon_0 E^2/2$: densité volumique d'énergie (J m^{-3})
▼ Intégrer *partout dans l'espace* !

69



Électrostatique : récapitulatif

70

Équations du champ électrique (1)

- ▼ Forme intégrale : flux et circulation
- Forme locale : divergence et rotationnel

$$\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = 0$$

$$\text{rot } \vec{E} = \vec{0}$$

- ▼ Potentiel

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

$$V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) = - \int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl$$

$$\text{Si } \vec{E} = E_x \hat{e}_x : V(x) = - \int E_x(x) \, dx + C$$

71



Équations du champ électrique (2)

▼ Énergie potentielle électrostatique

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i V(\vec{r}_i)$$

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_{\mathcal{V}} \rho(\vec{r}) V(\vec{r}) d\mathcal{V}$$

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_{\mathcal{V}} \epsilon_0 E^2(\vec{r}) d\mathcal{V}$$

72



Conducteurs en électrostatique

73

Qu'est-ce qu'un conducteur ?

- ▼ Conducteur (contraire : isolant ou « diélectrique »)
- ▼ Contient des porteurs de charge en libre circulation
- ▼ « Porteurs de charge » :
électrons libres dans le métal
- ▼ Les charges (électrons) sont *libres* à se déplacer
- ▼ Les charges (+ ou –) se repoussent le plus loin possible : on retrouve des *charges uniquement sur la surface* d'un conducteur...

74



Le champ et les charges à l'intérieur

- ▼ « À l'intérieur » : *dans* le métal
- ▼ À l'*équilibre électrostatique*, les charges ne se déplacent plus (par définition)...
- ▼ ...alors qu'il y a des électrons libres à l'intérieur !
- ▼ Pas de déplacement parce que pas de force !

$$\vec{E} = \vec{0} \quad \text{à l'intérieur d'un conducteur}$$

- ▼ Loi de Gauss à l'intérieur du conducteur :
forme intégrale : $\vec{E} = \vec{0} \Rightarrow Q_{\text{int}} = 0$
forme locale : $\vec{E} = \vec{0} \Rightarrow \text{div } \vec{E} = 0 \Rightarrow \rho = 0$
- ▼ L'intérieur du conducteur est *neutre* !

75

Le champ et les charges dans une cavité

- ▼ « Cavité » : la partie interne d'un conducteur creux
- ▼ Cavité vide (neutre)
- ▼ Calculer la circulation de \vec{E} : chemin Γ dans la cavité et dans le conducteur

$$\vec{E} = \vec{0} \quad \text{dans une cavité sans charge}$$

- ▼ Loi de Gauss à l'intérieur du conducteur :
forme intégrale : $Q_{\text{cav}} + Q_{\text{surf. int}} = 0$
- ▼ Pas de charges sur la surface interne si cavité vide !
(WL, L5, 28m26–31m27)
- ▼ Mêmes résultats en présence d'un champ \vec{E}_{ext}
(WL, L5, 43m13–45m41)
- ▼ Principe de *blindage* (cage de Faraday)
(WL, L5, 45m43–49m58)

76



Le champ à la surface du conducteur (1)

- ▼ À l'équilibre, les charges ne se déplacent plus...
- ▼ ... pas de composante \vec{E} *tangentielle*
- ▼ Le champ \vec{E} est nul à l'intérieur
- ▼ Des charges uniquement sur la surface :
densité surfacique ρ_s (C m^{-2})
- ▼ Loi de Gauss : un cylindre autour de la surface

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \hat{n}} \quad (38)$$

- ▼ Le champ \vec{E} est
 1. *perpendiculaire* à la surface du conducteur
 2. proportionnel à la densité surfacique des charges
- ▼ Un conducteur (+ ses cavités sans charge)
forme une région *équipotentielle*

77

Le champ à la surface du conducteur (2)

- ▼ Deux sphères métalliques, rayons R_1, R_2
- ▼ Très éloignées ; connectées par un fil conducteur
- ▼ Charges Q_1, Q_2
- ▼ Densité de charge surfacique $\rho_{si} = Q_i / 4\pi R_i^2$
- ▼ Potentiel : $V(R_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_i}{R_i}$
- ▼ « Connectées » : $V(R_1) = V(R_2)$
- ▼ $\Rightarrow \frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2}$
- ▼ Si $R_1 > R_2$, $\rho_{s1} < \rho_{s2}$ donc $E_1 < E_2$

Le champ électrique est plus fort aux endroits où le rayon de courbure est petit (p.ex. pointes)

- ▼ Démonstration : une casserole chargée
(WL, L6, 6m30–9m00)

78



Rigidité diélectrique

- ▼ Quand les isolants deviennent conducteurs. . .
- ▼ R.D. : valeur maximale du champ électrique dans un isolant avant qu'il ne devienne conducteur
- ▼ Mécanisme : quand $E > E_{\max}$,
électrons libres accélérés par le champ ; avalanche d'électrons libres ; le milieu s'ionise et devient conducteur ; formation d'arc électrique ; son et lumière à la recombinaison électrons/ions
- ▼ Dans l'air $E_{\max} = 3 \text{ MV/m}$
- ▼ Si $E > E_{\max}$, décharge électrostatique
(WL, L6, 40m27–42m10)
- ▼ Effet corona : décharge électrostatique sans formation d'arc ; « fuite » de charges par les pointes ;
champ électrique élevé, mais ne dépasse pas E_{\max}
(WL, L6, 42m12–46m00)

79

Rigidité diélectrique : quelques valeurs typiques

Matériau	R.D. (MV m^{-1})
Air (sec, à 25 °C)	3
Quartz	8
Titanate de strontium	8
Néoprène	12
Nylon	14
Pyrex	14
Huile silicone	15
Papier	16
Bakelite	24
Polystyrène	24
Teflon	60

Remarque : $\text{MV m}^{-1} = \text{kV mm}^{-1}$

80



Courants électriques

81

Des charges en mouvement

- ▼ Courant électrique $I = \text{Charges} / \text{Temps}$
- ▼ Quelques précisions...
- ▼ « Courant » : à travers une *surface*
- ▼ « Charges » : traversant la surface de façon *perpendiculaire*
- ▼ Inclure la surface à la définition !
- ▼ *Densité* de courant \vec{J}
 - ▶ Vecteur (champ vectoriel)
 - ▶ Direction : celle des charges *positives*
 - ▶ Module : charges traversant une surface \perp par unité de temps et de surface
 - ▶ Unités : $\text{C s}^{-1} \text{m}^{-2} = \text{A m}^{-2}$

82

Calculer la densité de courant

- ▼ Des porteurs de charges libres à se déplacer
- ▼ Densité volumique des porteurs : $n \text{ (m}^{-3}\text{)}$
- ▼ Charge des porteurs : $q \text{ (C)}$
- ▼ Vitesse des porteurs : $\vec{v} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$
- ▼ Un cylindre de longueur l et de section A ;
section $\perp \vec{v}$
- ▼ Charge totale dans le cylindre : $Q = n l A q$
traversant la section A en un temps $t = l/v$
- ▼ Densité de courant :

$$\vec{J} = n q \vec{v} \quad (\text{A m}^{-2}) \quad (39)$$

- ▼ Si plusieurs types de porteurs :

$$\vec{J} = \sum_i n_i q_i \vec{v}_i$$

83



Conservation de la charge : forme intégrale

- ▼ Courant à travers une surface élémentaire :

$$dI = \vec{J} \cdot d\vec{S} = \vec{J} \cdot \hat{n} dS \quad (> 0 \text{ ou } < 0)$$

- ▼ Courant à travers une surface ouverte :

$$I = \frac{dQ_{\text{surf}}}{dt} = \int_S dI = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS \quad (40)$$

- ▼ Courant à travers une surface *fermée* :

$$\oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = -\frac{dQ_{\text{int}}}{dt} \quad (41)$$

- ▼ La charge totale dans l'Univers est constante :

$$\frac{d}{dt} (Q_{\text{surf fermée}} + Q_{\text{int}}) = 0$$

84

Conservation de la charge : forme locale

- ▼ À partir de (41) on remplace :

$$\oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = \int_V \text{div } \vec{J} dV \quad (\text{th. de la divergence})$$

$$Q_{\text{int}} = \int_V \rho(\vec{r}) dV$$

- ▼ Conservation de la charge :

$$\text{div } \vec{J}(\vec{r}) = -\frac{\partial \rho(\vec{r})}{\partial t} \quad (42)$$

- ▼ Les « sources » du champ vectoriel \vec{J}
sont les variations temporelles de ρ !

85



Électronique : loi des nœuds

- ▼ En Électronique (« basses fréquences »),
pas d'accumulation de charges dans un circuit :

$$\frac{\partial \rho(\vec{r})}{\partial t} = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{div } \vec{J} = 0$$

- ▼ Donc sur une surface S autour d'une jonction :

$$\oint_S \vec{J} \cdot \hat{n} \, dS = \int_V \text{div } \vec{J} \, dV = 0$$

- ▼ Loi des nœuds (loi de Kirchhoff) :

$$\sum_i I_i = 0 \quad , \quad I \text{ sortant} > 0$$

- ▼ Courant I **constant** le long d'un fil !
(\neq d'une ligne de transmission...)

86

Vitesses des électrons dans les conducteurs (1)

- ▼ Électrons libres, en absence de champ électrique :
mouvement **aléatoire**
- ▼ Données cuivre, température $T = 300 \text{ K}$
- ▼ Vitesse de Fermi : $v_F \approx 10^6 \text{ m s}^{-1}$
- ▼ Temps entre les collisions $\tau \approx 10^{-14} \text{ s}$
- ▼ Distance entre les collisions : $d = v_F \tau \approx 10^{-8} \text{ m}$
- ▼ Densité des électrons libres : $n \approx 10^{29} \text{ m}^{-3}$
- ▼ Densité de courant :

$$J = nqv_F \approx 10^{29} 1.6 \times 10^{-19} 10^6 \text{ A m}^{-2}$$

- ▼ ???
- ▼ Vitesse **moyenne** nulle, $\vec{J} = \vec{0}$!

87



Vitesses des électrons dans les conducteurs (2)

- ▼ Conducteur de longueur l , de section A
- ▼ Appliquer une ddp $U = V_{(+)} - V_{(-)}$
- ▼ Champ dans le conducteur $\neq \vec{0}$!

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V = -\frac{U}{l} \hat{e}_{(-) \rightarrow (+)} = \frac{U}{l} \hat{e}_{(+ \rightarrow (-))}$$

- ▼ Force $\vec{F}_e = q_e \vec{E}$ sur les électrons libres
- ▼ Collisions : force de « friction » $\vec{F}_f = -f \vec{v}$
- ▼ Forces et vitesse sur le même axe : pas de vecteurs

$$m_e \frac{dv}{dt} = q_e E - f v$$

$$\frac{m_e}{f} \frac{dv}{dt} + v = \frac{q_e}{f} E \quad (43)$$

88

Vitesses des électrons dans les conducteurs (3)

- ▼ Solution de (43) :

$$v = C \exp\left(-\frac{f}{m_e} t\right) + \frac{q_e}{f} E$$

- ▼ Conditions initiales : $v(t=0) = 0$
donc $C = -q_e E / f$
- ▼ Unités de f/m_e : s^{-1} , on peut l'appeler $1/\tau$

$$v(t) = \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \frac{q_e \tau}{m_e} E \quad (44)$$

- ▼ Vitesse de dérive des électrons libres :

$$\boxed{v_d = \frac{q_e \tau}{m_e} E} \quad t \gg \tau \approx 10^{-14} \text{ s} \quad (45)$$

- ▼ Mobilité : $\mu_e = q_e \tau / m_e$

89



Courants dans les conducteurs

- ▼ Vitesse de dérive \rightarrow densité de courant :

$$\vec{J} = nq_e \vec{v}_d = \frac{nq_e^2 \tau}{m_e} \vec{E}$$

- ▼ Loi d'Ohm (1827)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (46)$$

- ▼ Conductivité ($\Omega^{-1} \text{ m}^{-1} = \text{S m}^{-1}$)

$$\sigma = \frac{nq_e^2 \tau}{m_e} = nq_e \mu_e \quad (47)$$

- ▼ Résistivité $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ($\Omega \text{ m}$)

90

Conductivité : quelques valeurs typiques

Matériau	σ (S m^{-1})
Quartz	$\approx 10^{-17}$
Polystyrène	$\approx 10^{-16}$
Caoutchouc	$\approx 10^{-15}$
Porcelaine	$\approx 10^{-14}$
Verre	$\approx 10^{-12}$
Eau distillée	$\approx 10^{-4}$
Sol sec	$\approx 10^{-3}$
Eau	$\approx 10^{-2}$
Graisse animale	$\approx 4 \times 10^{-2}$
Corps humain	≈ 0.2

Eau salée : quels porteurs ?

(WL, L9, 41m05–43m08)

Matériau	σ (S m^{-1})
Eau salée	≈ 4
Silicone	10^3
Graphite	$\approx 10^5$
Acier	2×10^6
Plomb	5×10^6
Tungsten	1.8×10^7
Aluminium	3.5×10^7
Or	4.1×10^7
Cuivre	5.7×10^7
Argent	6.1×10^7

91



Électronique : loi d'Ohm

- ▼ $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ou $\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J}$
- ▼ Densité de courant : $J = I/A$
- ▼ Champ électrique : $E = U/l$

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \longrightarrow U = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{A} I \triangleq RI$$

- ▼ Attention aux « conventions » :
 1. $U = V_{(+)} - V_{(-)}$ (ddp ou « tension »)
 2. Sens de I : de (+) vers (-) (comme \vec{E} et \vec{J})
- ▼ Attention, R n'est pas toujours constante !
- ▼ $\sigma \propto \tau$ (temps entre collisions)
- ▼ $I \uparrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow \tau \downarrow \Rightarrow \sigma \downarrow \Rightarrow \rho \uparrow \Rightarrow R \uparrow$
- ▼ Exemple : tungsten (WL, L9, 22m25–23m02)

92

Électronique : puissance consommée

- ▼ « Appliquer une ddp $U = V_{(+)} - V_{(-)}$ sur un conducteur »
- ▼ On crée un champ \vec{E} et un courant \vec{J}
- ▼ Des charges positives se déplacent spontanément : $(+) \rightarrow (-)$
- ▼ $W_{(+)\rightarrow(-)} = q (V_{(-)} - V_{(+)}) = -qU$
- ▼ $W_{(+)\rightarrow(-)} < 0$: travail restitué par la charge...
- ▼ ...donc fourni par le champ ; consommation
- ▼ Le champ dépense $dW = U dq$ pour chaque charge dq
- ▼ Débit de charges déplacées : $dq/dt = I$
- ▼ Puissance consommée :

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{U dq}{dt} = UI$$

(48)

- ▼ U et I selon les « conventions » (tr.92)
- ▼ Si $P = UI < 0$: générateur !
(WL, L10, 47m20–50m03)

93



Magnétostatique

94

Magnétisme

- ▼ Aimants, boussoles, ...
- ▼ Quel rapport avec l'électricité ?
- ▼ Aucun, avant 1820 !
- ▼ Hans Christian Ørsted (1777–1851)
études médicales, thèse en philosophie (1799)
Professeur à l'Univ. de Copenhague (1806)
- ▼ Avril 1820 : cycle de conférences
- ▼ « Pourquoi l'aiguille d'une boussole bouge pendant les orages ? »
- ▼ Étude de l'interaction entre un courant électrique et une boussole
- ▼ *LA Découverte : un courant électrique provoque un effet magnétique!!!*
- ▼ La naissance de l'électromagnétisme
(WL, L11, 8m00–9m30)

95

Loi de Biot-Savart

- ▼ ... les nouvelles arrivent à Paris (11/9/1820)
- ▼ Biot (1774–1862) et Savart (1791–1841) : formulation quantitative (30/10/1820)
- ▼ Champ magnétique créé par un courant :
(loi de Biot-Savart)

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \wedge \hat{r}}{r^2} \quad (49)$$

- ▼ $d\vec{l}$: longueur élémentaire de courant
- ▼ \vec{r} : de l'élément de courant au point d'observation
- ▼ $\hat{r} = \vec{r}/r$
- ▼ $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$: perméabilité du vide
(valeur *exacte*)

96



Champ magnétique d'une charge en mouvement

- ▼ Loi de Biot-Savart : $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \wedge \hat{r}}{r^2}$
- ▼ Conducteur (fil) de section S
- ▼ $I d\vec{l} = \vec{J} S dl$ (astuce!)
- ▼ $\vec{J} = nq\vec{v}$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{S dl \vec{J} \wedge \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{S dln q\vec{v} \wedge \hat{r}}{r^2}$$

- ▼ $S dln$: nombre de charges dans l'élément de courant
- ▼ Champ magnétique créé par une seule charge :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \hat{r}}{r^2} \quad (50)$$

- ▼ **Attention** : pas de courant stationnaire avec une seule charge ! formule approximative. . .

97

Sources du champ magnétique

- ▼ \vec{B} : créé par des charges en mouvement (courants)
- ▼ Impossible d'isoler des « charges magnétiques »
(on a toujours deux pôles dans un aimant !)
- ▼ « Il n'existe pas de monopôles magnétiques » (?)
- ▼ Loi de Gauss pour le champ magnétique :

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = 0 \quad \text{forme intégrale} \quad (51)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad \text{forme locale} \quad (52)$$

98



Force magnétique (Laplace et Lorentz)

- ▼ Une charge en mouvement dans un champ magnétique subit une force :

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad \text{force de Laplace} \quad (53)$$

- ▼ Unités de \vec{B} : $\text{NsC}^{-1}\text{m}^{-1} = \text{T}$: Tesla
- ▼ Unité non SI : Gauss, $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
- ▼ Champ magnétique terrestre : $\approx 0.5 \text{ G}$
- ▼ $\vec{F}_m \perp \vec{v}$: pas de travail !
- ▼ En présence d'un champ \vec{E} et d'un champ \vec{B} :

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B} \\ &= q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{force de Lorentz} \end{aligned} \quad (54)$$

99

Force magnétique sur un courant

- ▼ Courant I dans un conducteur de section S
- ▼ Dans un champ \vec{B} , sur chaque porteur de charge : $\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$
- ▼ Force sur l'élément $d\vec{l}$:

$$d\vec{F}_m = n d\vec{l} S \vec{F}_m = n d\vec{l} S q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

- ▼ $\vec{J} = nq\vec{v}$
- ▼ $\vec{J}S d\vec{l} = \vec{I} d\vec{l} = I d\vec{l}$
- ▼ Force magnétique sur un élément de courant I :

$$d\vec{F}_m = I d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (55)$$

100



Force entre deux courants

- ▼ Deux conducteurs parallèles (infinis...)
- ▼ Courant I_1 génère champ \vec{B}_1 (TD 5.1)

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi\rho}$$

- ▼ Élement de courant I_2 subit force $d\vec{F}_m$:

$$d\vec{F}_m = I_2 d\vec{l} \wedge \vec{B}_1, \quad d\vec{l} \perp \vec{B}_1$$

$$\frac{\text{force magnétique}}{\text{longueur}} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi\rho}$$

- ▼ (Conducteurs infinis → force totale infinie!)
 - ▼ Deux courants parallèles s'attirent
 - ▼ Deux courants opposés se repoussent
- Ampère, 18/9/1820 (WL, L11, 15m00–17m15)

101

Loi d'Ampère (forme intégrale)

- ▼ Ørsted : « le "champ magnétique" décrit des cercles »
- ▼ Lignes de champ magnétique (TD 5.1 et 5.2) :
entourent les courants
- ▼ Ampère : mise en équation
- ▼ La circulation du champ \vec{B} , calculée sur une courbe Γ , est proportionnelle au courant traversant la surface S associée à la courbe Γ :

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot \hat{t} dl = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS \quad (56)$$

- ▼ Courbe Γ : pas nécessairement un cercle!
- ▼ Surface S : ouverte, Γ est son bord
- ▼ \hat{t} et \hat{n} : Périph'externe ↔ Tour Eiffel (tr.#58)
- ▼ $\int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS$: le courant I enlacé par la courbe Γ

102



Théorème du rotationnel

- ▼ (... après le rappel des tr.#57 et #58...)
- ▼ Surface S (ouverte) entourée par Γ (fermée)
- ▼ Partager S en S_1, S_2, \dots , entourées par $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$

$$\begin{aligned}\oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} \, dl &= \sum_i \left(\oint_{\Gamma_i} \vec{A} \cdot \hat{t}_i \, dl \right) \\ &= \sum_i \left(\hat{n}_i \cdot \vec{\text{rot}} \vec{A} \, \Delta S_i \right) \\ &= \int_S \vec{\text{rot}} \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS\end{aligned}$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} \, dl = \int_S \vec{\text{rot}} \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS \quad (57)$$

- ▼ Théorème de Stokes

103

Loi d'Ampère (forme locale)

- ▼ Point de départ : loi d'Ampère forme intégrale, éq.(56) :

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot \hat{t} \, dl = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} \, dS$$

- ▼ Appliquer théorème de Stokes :

$$\int_S \vec{\text{rot}} \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} \, dS$$

pour toute surface ouverte S

- ▼ Loi d'Ampère (forme locale) :

$$\vec{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (58)$$

- ▼ Le champ \vec{B} « tourne » autour de \vec{J}

104



Magnétostatique : récapitulatif

105

Équations du champ magnétique

▼ Flux et circulation (formes intégrale et locale)

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\oint_\Gamma \vec{B} \cdot \hat{t} \, dl = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} \, dS$$

$$\vec{\operatorname{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

106



Analyse vectorielle 5 : le nabla $\vec{\nabla}$

107

L'opérateur nabla

- ▼ « Opérateur » : doit agir sur quelque chose !
(il ne doit jamais rester seul)
- ▼ Champs (scalaires ou vectoriels) : fonctions de plusieurs variables
- ▼ Coordonnées cartésiennes : les trois dimensions sont équivalentes
- ▼ Définir un « vecteur » spécial :

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (59)$$

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \hat{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \hat{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \hat{e}_z$$

- ▼ L'opérateur nabla est un vecteur **gourmand** !
il agit sur des **champs** (scalaires ou vectoriels)

108



Opérations avec le nabla (1)

▼ On peut traiter $\vec{\nabla}$ comme un vecteur ordinaire

1. Vecteur fois scalaire : $\Phi(x, y, z)$ champ scalaire

$$\vec{\nabla} \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \hat{e}_x + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \hat{e}_y + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \hat{e}_z \stackrel{(21)}{=} \overrightarrow{\text{grad}} \Phi \quad (60)$$

2. Vecteur · vecteur : $\vec{A}(x, y, z)$ champ vectoriel

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \stackrel{(10)}{=} \text{div } \vec{A} \quad (61)$$

3. Vecteur \wedge vecteur : $\vec{A}(x, y, z)$ champ vectoriel

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{A} = \begin{vmatrix} \hat{e}_x & \hat{e}_y & \hat{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} \stackrel{(29)}{=} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (62)$$

109

Opérations avec le nabla (2)

▼ Vecteur $\vec{\nabla}$: les résultats sont valables dans **tous** les systèmes de coordonnées !

▼ Mais $\vec{\nabla}$ a une forme simple que dans le cartésien

$$\text{p.ex., } \vec{\nabla} \neq \frac{\partial}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{e}_\theta + \frac{\partial}{\partial \phi} \hat{e}_\phi \quad !!!$$

Opération	De	À
$\overrightarrow{\text{grad}} \Phi$	scalaire Φ	vecteur $\vec{\nabla} \Phi$
$\text{div } \vec{A}$	vecteur \vec{A}	scalaire $\vec{\nabla} \cdot \vec{A}$
$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}$	vecteur \vec{A}	vecteur $\vec{\nabla} \wedge \vec{A}$
$\Delta \Phi$	scalaire Φ	scalaire $\nabla^2 \Phi$
$\vec{\nabla}^2 \vec{A}$	vecteur \vec{A}	vecteur $\vec{\nabla}^2 \vec{A}$

110



Quelques formules avec le nabla

▼ Plutôt simples :

$$\operatorname{div} \overrightarrow{\operatorname{grad}} \Phi = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \Phi) \triangleq \nabla^2 \Phi \quad (63)$$

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \overrightarrow{\operatorname{grad}} \Phi = \vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \Phi) = \vec{0} \quad (64)$$

$$\operatorname{div} \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = 0 \quad (65)$$

▼ Et une plus compliquée...

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{A} = \overrightarrow{\operatorname{grad}} \operatorname{div} \vec{A} - \vec{\Delta} \vec{A} \quad (66)$$

ou

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \vec{\nabla}^2 \vec{A} \quad (67)$$

utiliser $\vec{A} \wedge (\vec{B} \wedge \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B})$

111

Le(s) Laplacien(s) : nabla au carré

▼ L'opérateur $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}$ prend deux formes :

1. Opérateur sur un scalaire : laplacien *scalaire*

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &\triangleq \nabla^2 \Phi \triangleq (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \Phi \\ &\stackrel{\text{cart}}{=} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (68)$$

formules plus compliquées dans les autres systèmes !

2. Opérateur sur un vecteur : laplacien *vectorel*

$$\begin{aligned} \vec{\Delta} \vec{A} &\triangleq \vec{\nabla}^2 \vec{A} \triangleq (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \vec{A} \\ &\stackrel{\text{cart}}{=} (\nabla^2 A_x) \hat{e}_x + (\nabla^2 A_y) \hat{e}_y + (\nabla^2 A_z) \hat{e}_z \end{aligned} \quad (69)$$

Attention : décomposition en composantes $\nabla^2 A_i$ *uniquement* en cartésiennes !

112



Gauss, Stokes, etc. : un autre point de vue (1)

- ▼ Théorème de Gauss (11) :

$$\int_{\mathcal{V}} \operatorname{div} \vec{A} \, d\mathcal{V} = \oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS \quad (3D \rightarrow 2D)$$

- ▼ Théorème de Stokes (57)

$$\int_S \operatorname{rot} \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS = \oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} \, dl \quad (2D \rightarrow 1D)$$

- ▼ Formule du gradient (tr.#53)

$$\int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \overrightarrow{\operatorname{grad}} V \cdot \hat{t} \, dl = V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) \quad (1D \rightarrow 0D)$$

- ▼ Formule de la primitive

$$\int_a^b f(x) \, dx = F(b) - F(a) \quad (1D \rightarrow 0D \text{ sur une ligne droite})$$

113

Gauss, Stokes, etc. : un autre point de vue (2)

- ▼ Théorème de Gauss (11) :

$$\int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \, d\mathcal{V} = \oint_S \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS \quad (3D \rightarrow 2D)$$

- ▼ Théorème de Stokes (57)

$$\int_S \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \cdot \hat{n} \, dS = \oint_{\Gamma} \vec{A} \cdot \hat{t} \, dl \quad (2D \rightarrow 1D)$$

- ▼ Formule du gradient (tr.#53)

$$\int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{\nabla} V \cdot \hat{t} \, dl = V(\vec{r}_B) - V(\vec{r}_A) \quad (1D \rightarrow 0D)$$

- ▼ Formule de la primitive

$$\int_a^b f(x) \, dx = F(b) - F(a) \quad (1D \rightarrow 0D \text{ sur une ligne droite})$$

114



Électrostatique – Magnétostatique : une comparaison

115

Deux champs bien différents (?)

▼ 2+2 équations (formes locales)

Électrostatique

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{0}$$

(sources sans tourbillons)

Potentiel scalaire V

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} V = \vec{0}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V$$

Magnétostatique

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

(tourbillons sans sources)

Potentiel vectoriel \vec{A}

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} = 0$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$$

116



Phénomènes d'Induction (enfin, un peu de mouvement !)

117

« Force » électromotrice (1)

- ▼ Dans un circuit (Électronique) :
force par charge, \vec{f} , crée le courant

$$\vec{f} = \vec{f}_s + \vec{E} \quad (70)$$

- ▼ \vec{f}_s : force par charge *dans* la source
- ▼ \vec{E} : champ électrostatique (partout)
- ▼ « Force » électromotrice (définition générale) :

$$\text{fem} \triangleq \oint_{\Gamma} \vec{f} \cdot \hat{t} \, dl \quad (V) \quad (71)$$

- ▼ Champ électrostatique : circulation nulle

$$\text{fem} = \oint_{\Gamma} \vec{f}_s \cdot \hat{t} \, dl \quad (V) \quad (72)$$

- ▼ Équ. (72) : cas spécial d'un circuit avec source

118



« Force » électromotrice (2)

- ▼ Loi d'Ohm : $\vec{J} = \sigma \vec{f}$
- ▼ À l'intérieur de la source idéale : pas de résistance
 $\sigma = \infty \Rightarrow \vec{f} = \vec{J}/\sigma = 0 \Rightarrow \vec{f}_s = -\vec{E}$
- ▼ ddp aux bornes de la source :

$$\begin{aligned} V_+ - V_- &= - \int_{\Gamma: (-) \rightarrow (+)} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl \\ &= - \int_{\Gamma: (-) \rightarrow (+)} (-\vec{f}_s) \cdot \hat{t} \, dl \\ &= \oint_{\Gamma} \vec{f}_s \cdot \hat{t} \, dl \stackrel{(72)}{=} \text{fem} \end{aligned}$$

- ▼ fem = ddp aux bornes de la source !
- ▼ Polarité : le vecteur \hat{t} va du (-) au (+) de la source
- ▼ fem = IR

119

fem due au mouvement

- ▼ Un circuit se déplace dans un champ magnétique
- ▼ ...
- ▼ fem : *uniquement* pendant les phases d'entrée/sortie
- ▼ fem due au mouvement :

$$\text{fem} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (73)$$

où Φ_B est le flux magnétique à travers le circuit :

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS$$

- ▼ Changement de flux : source de tension !
- ▼ fem génère I qui *s'oppose* au changement de Φ_B !

120



fem due au mouvement : des exemples !

\vec{B} : constant et uniforme dans une région

- ▼ Circuit en déplacement $|\text{fem}| = Blv$ (TD 8.1)
- ▼ Circuit en rotation (TD 8.2)
(WL, L17, 17m10–18m20)
(gén. humain : WL, L17, 25m13–27m25)
(ampoule : WL, L17, 41m52–44m40)
- ▼ Conducteur sur rails $|\text{fem}| = Blv$ (TD 8.3)
- ▼ Courants de Foucault (frein magnétique)
(WL, L17, 40m18–41m52)
- ▼ Circuit en chute « libre » dans un champ magnétique
(WL, L17, 47m18–48m40)

121

Induction électromagnétique

- ▼ Expériences de Faraday (1831)
- ▼ « Puisque \vec{J} crée \vec{B} ...
est-ce que \vec{B} crée \vec{J} ? »
- ▼ Conclusion : ce n'est pas \vec{B} qui crée \vec{J} ...
mais les *changements* de \vec{B} !
- ▼ Aimant et boucle (WL, L16, 10m30–12m30)
- ▼ Il n'y a pas de source dans la boucle ! $\vec{f}_s = \vec{0}$
- ▼ $\vec{f} = \vec{f}_s + \vec{E} = \vec{E}$
- ▼ fem due au champ électrique *induit* (71)

$$\text{fem} = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl \neq 0 \quad (\text{comparer avec (13)!}) \quad (74)$$

- ▼ La *variation* de \vec{B} crée un champ \vec{E} !!!
- ▼ « Champ électrique *induit* »

122



Loi de Faraday (forme intégrale)



$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \hat{n} \, dS \quad (75)$$

- ▼ Courbe (fermée) Γ : le bord de la surface (ouverte) S
- ▼ Signe $-$: loi de Lenz :
Le champ électrique induit génère des courants qui, à leur tour, génèrent un champ secondaire \vec{B}' s'opposant à la variation du flux du champ magnétique initial.
- ▼ (La Nature n'aime pas le changement)
- ▼ Rappel (TD 5) : champ \vec{B} créé par une boucle de courant
- ▼ Solénoïde et boucle (WL, L16, 30m00–32m30)

123

Loi de Faraday (forme locale)

- ▼ Point de départ : loi de Faraday (75) :

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \hat{n} \, dS$$

- ▼ Appliquer le théorème de Stokes :

$$\int_S \vec{\text{rot}} \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot \hat{n} \, dS$$

pour toute surface S

- ▼ Loi de Faraday (forme locale) :

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (76)$$

124



La règle du flux magnétique

- ▼ On combine la fem due au mouvement (73)...
- ▼ et la fem due aux variations de $\vec{B}(t)$ (75)
- ▼ (deux phénomènes bien *différents*!!!)
- ▼

$$\text{fem} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (77)$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS \quad (78)$$

- ▼ En dehors de l'électrostatique, le champ \vec{E} n'est plus conservatif! (circulation $\neq 0$)
- ▼ L'intégrale

$$\int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl$$

dépend du chemin choisi!

- ▼ (on reviendra sur ce sujet contre-intuitif, tr.#131)

125

Le champ électrique induit

- ▼ Que nous dit la loi de Faraday?
- ▼ Les variations de \vec{B} créent un champ \vec{E} induit
- ▼ Dans une région neutre ($\rho = 0$),

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

- ▼ Analogie avec le champ \vec{B} en magnétostatique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

- ▼ *Les lignes du champ \vec{E} induit sont des boucles!*

	\vec{B}	\vec{E} induit
▼ équivalences :	$\mu_0 \vec{J}$	$-d\vec{B}/dt$
	$\mu_0 I_{\text{enlacé}}$	$-d\Phi_B/dt$

126



Inductance : mutuelle

- ▼ Deux circuits séparés (p.ex. solénoïde et boucle)
- ▼ Courant $I_1 \Rightarrow \vec{B}_1 \Rightarrow \Phi_2$

$$\Phi_2 = \int_{S_2} \vec{B}_1 \cdot \hat{n}_2 dS_2 \quad \text{et} \quad \vec{B}_1 = \oint_{\Gamma_1} \frac{\mu_0 I_1 d\vec{l}_1 \wedge \hat{r}}{4\pi r^2} \propto I_1$$

- ▼ Le flux à travers le 2 est proportionnel au courant de 1 :

$$\Phi_2 = M_{21} I_1 \quad (79)$$

- ▼ $M_{21} = M_{12} = M$ inductance mutuelle entre les circuits
- ▼ M : paramètre purement *géométrique*
- ▼ Variations de I_1 génèrent un courant $I_2 = \text{fem}_2 / R_2$:

$$\text{fem}_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt} \quad (80)$$

127

Inductance : self

- ▼ Même phénomène avec un seul circuit !
- ▼ Courant $I \Rightarrow \vec{B} \Rightarrow \Phi_B$

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS \quad \text{et} \quad \vec{B} = \oint_{\Gamma} d\vec{B} = \oint_{\Gamma} \frac{\mu_0 I d\vec{l} \wedge \hat{r}}{4\pi r^2} \propto I$$

- ▼ Flux magnétique à travers un circuit \propto courant

$$\Phi_B = LI \quad (81)$$

- ▼ L : self-inductance ; unités Henry : $H = \text{Wb A}^{-1} = \text{V s A}^{-1}$
- ▼ $L = \Phi_B / I$: paramètre purement *géométrique*
- ▼ Variations de I génèrent une f.e.m. ... :

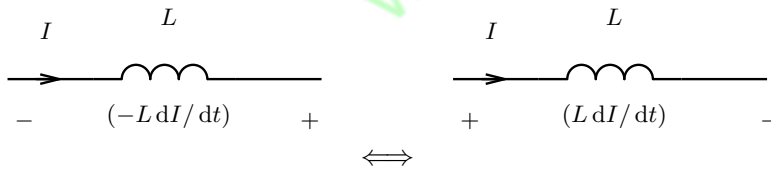
$$\text{fem} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (82)$$

- ▼ ...s'opposant aux variations !

128



Énergie magnétique (1)



- ▼ Puissance « consommée » : emmagasinée dans la self

$$P = \left(L \frac{dI}{dt} \right) I \quad (83)$$

- ▼ $P > 0$ quand $I \uparrow$
- ▼ $I(t=0) = 0$ et $I(t=t_0) = I_0$
- ▼ Énergie magnétique stockée dans la self :

$$\mathcal{U}_m = \int_0^{t_0} P dt = \dots = \frac{1}{2} L I_0^2 \quad (84)$$

129

Énergie magnétique (2)

- ▼ Sans démonstration : la (84) devient

$$\mathcal{U}_m = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{\mu_0} B^2(\vec{r}) dV \quad (85)$$

- ▼ $B^2/(2\mu_0)$: densité volumique d'énergie ($J m^{-3}$)
- ▼ Intégrer *partout dans l'espace* !
- ▼ À comparer avec (37) :

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_V \epsilon_0 E^2(\vec{r}) dV$$

130



[Bizarre] Champ \vec{E} non conservatif

- ▼ Circuit simple : pile ($\mathcal{E} = 1 \text{ V}$), $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 900 \Omega$

Calculer courant et tensions

- ▼ Remplacer pile par $d\Phi_B/dt$

Calculer courant et tensions : $V_{R_1} \neq V_{R_2}$!!!

L'intégrale

$$-\int_{\Gamma: \vec{r}_A \rightarrow \vec{r}_B} \vec{E} \cdot \hat{t} dl \stackrel{?}{=} V_B - V_A$$

dépend du chemin choisi WL, L16, 48m25–51m27

(vidéo avec la théorie WL, L16, 34m51–51m27 ; texte détaillé)

- ▼ Champ électrique non conservatif :

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} dl \neq 0$$

ddp sur un chemin fermé $\neq 0$ (CONTRE-INTUITIF)

M. C. Escher, "Ascending and descending", 1960

131



Induction : récapitulatif

132

Les 4 équations, forme intégrale

▼ Flux et circulation

$$\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} \, dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS = 0$$

$$\oint_\Gamma \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS$$

$$\oint_\Gamma \vec{B} \cdot \hat{t} \, dl = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} \, dS$$

133



Les 4 équations, forme locale

▼ Divergence et rotationnel

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

134



Équations de Maxwell

135

Un problème avec la loi d'Ampère ?

1. « Tester » les équations du rotationnel :

▼ $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0$ OK

▼ $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = 0 ???$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \xrightarrow{(42)} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

2. Appliquer la loi d'Ampère dans un cas $\frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0$:
fil + condensateur

La loi d'Ampère n'est pas valide en dehors de la magnétostatique

136



Le terme qui manque : courant de déplacement

- ▼ Loi d'Ampère (forme locale) :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

- ▼ Loi d'Ampère-Maxwell (forme locale) :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \vec{J}_d \right) = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \right) \quad (86)$$

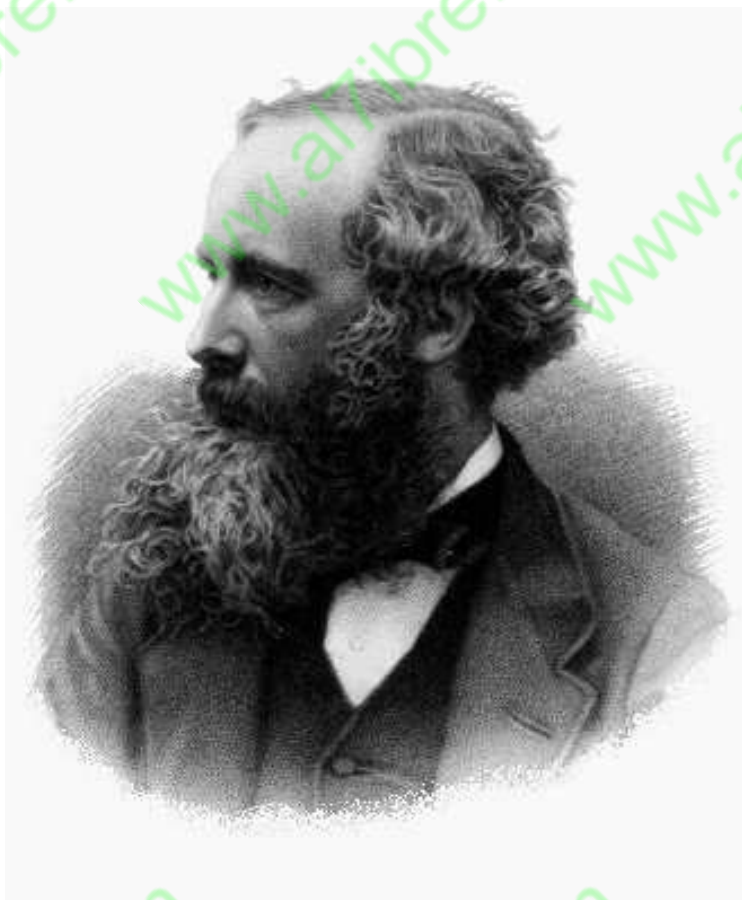
- ▼ Loi d'Ampère-Maxwell (forme intégrale) :

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot \hat{t} \, dl = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} \, dS + \mu_0 \int_S \underbrace{\epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}}_{\vec{J}_d} \cdot \hat{n} \, dS \quad (87)$$

- ▼ \vec{J}_d : courant « de déplacement »
▼ *Les variations de \vec{E} créent un champ \vec{B} induit !*

137

James Clerk Maxwell (1831–1879)



138



Les trois régimes en électromagnétisme

- ▼ Électrostatique (aucun déplacement de charges, $d\rho/dt = 0$)
Magnétostatique (courants invariables dans le temps ; pas d'accumulation de charges,
 $d\rho/dt = 0 \xrightarrow{(42)} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$)

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{0}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \vec{J}\end{aligned}$$

- ▼ Quasistatique : des variations lentes dans le temps

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -\frac{d\vec{B}}{dt}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \underbrace{\dots}_{\approx 0}\end{aligned}$$

- ▼ Régime « complet » : les équations de Maxwell

139

Les équations de Maxwell

- ▼ Maxwell, 1864

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (88)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (89)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (90)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (91)$$

- ▼ 4 équations = 2 scalaires + 2 vectorielles = 2 + 6 = 8
- ▼ Équations : sources vers champs
- ▼ Force de Lorentz : effet des champs, $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$
- ▼ Conservation de la charge : $\vec{\nabla} \cdot (91) \xrightarrow{(88)} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -d\rho/dt$
- ▼ Le champ électromagnétique s'auto-alimente !

140



Ondes

141

Qu'est-ce qu'une onde ?

- ▼ Vagues (océan, fleuve, ...)
- ▼ Ondes acoustiques
- ▼ Vibrations d'une corde
- ▼ Ondes sismiques
- ▼ Signaux électriques
(lignes de transmission, neurones)
- ▼ ...
- ▼ Vagues mexicaines (la ola) : **concert**, **match de foot**.

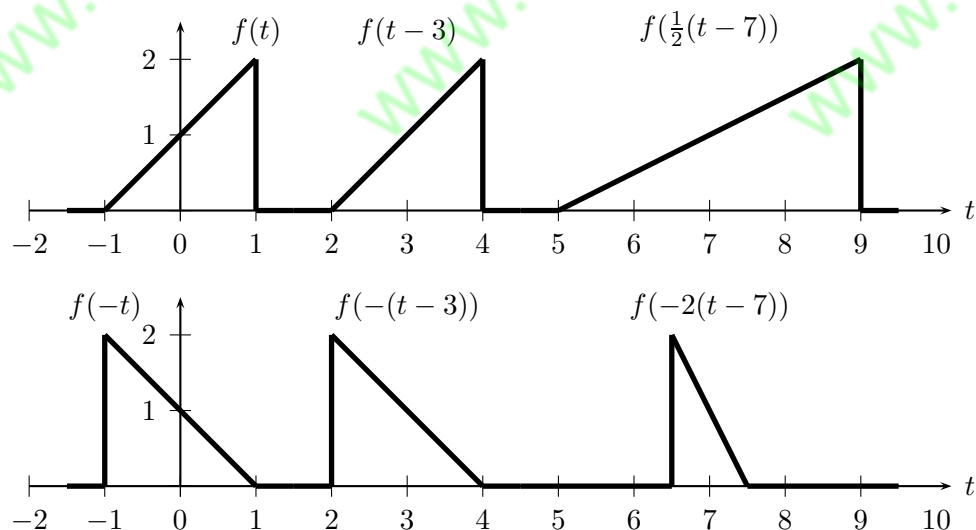
Onde : une **perturbation** qui se **propage** dans un **milieu**, sans transporter de matière.

"Wave on a string"

142

[Rappel] L'argument d'une fonction

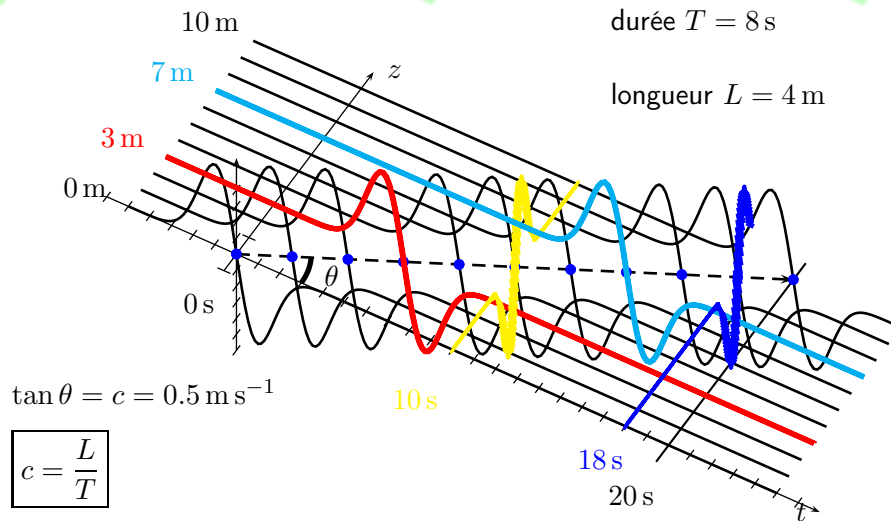
- ▼ $f(t)$: fonction initiale
- ▼ Comment décaler / retourner / changer d'échelle ?



143



Propagation d'une impulsion



À $z = z_0$, $f(t - z_0/c)$: $f(\cdot)$ retardée de z_0/c

À $t = t_0$, $f(-\frac{1}{c}(z - ct_0))$: $f(\cdot)$ retournée, dilatée par c , décalée à ct_0

144

L'équation d'onde (1)

- ▼ $f(t - \frac{z}{c})$: onde se propageant vers $+z$
- ▼ $f(t + \frac{z}{c})$: onde se propageant vers $-z$
- ▼ $f(t \pm \frac{z}{c}) = f(\frac{ct \pm z}{c}) = g(z \pm ct)$: autre vue
- ▼ $f(x, t)$: fonction à deux variables, espace et temps
- ▼ Dérivées temporelles et spatiales... premières

$$\frac{\partial f}{\partial t} = f' \left(t \pm \frac{z}{c} \right)' = f'$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = f' \left(t \pm \frac{z}{c} \right)' = \pm \frac{1}{c} f'$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \pm \frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t}$$

- ▼ et secondes

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = f''$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \left(\pm \frac{1}{c} \right)^2 f''$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

(92)

- ▼ (92) : équation d'onde (une dimension)

145



L'équation d'onde (2)

▼ Équation d'onde (trois dimensions)

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \nabla^2 f = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (93)$$

- ▼ Équations à dérivées partielles (spatiales et temporelle) :
la solution dépend des conditions initiales $f(\vec{r}, t = 0)$ et des conditions aux limites $f(\vec{r} = \vec{r}_i, t)$
- ▼ f : propriété du milieu de propagation
 - ▶ hauteur de la surface de l'eau
 - ▶ pression acoustique
 - ▶ déplacement transversal d'une corde
 - ▶ ...
- ▼ vitesse de propagation c : dépend des paramètres du milieu

146



Ondes électromagnétiques

147

La prévision théorique de Maxwell (1)

- ▼ Les équations de Maxwell dans le vide, sans charges ni sources :

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 & \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

- ▼ Équations différentielles couplées
- ▼ Dérivée seconde pour découpler : agir avec $\vec{\nabla}$
(agir, mais comment ? quelles opérations ?)

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\vec{\nabla}^2 \vec{E}\end{aligned}$$

148



La prévision théorique de Maxwell (2)

- ▼ Équation vectorielle

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (94)$$

se décompose (*uniquement en coordonnées cartésiennes*) :

$$\nabla^2 E_{x,y,z} = \underbrace{\epsilon_0 \mu_0}_{1/c^2} \frac{\partial^2 E_{x,y,z}}{\partial t^2} \quad (95)$$

- ▼ Des *ondes électromagnétiques* existent !
- ▼ Vitesse de propagation :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{10^{-9}}{36\pi} 4\pi 10^{-7}}} \text{ m s}^{-1} \approx 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (96)$$

149

La lumière est une onde électromagnétique !

- ▼ $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$
- ▼ À partir de ϵ_0 et μ_0 on obtient la vitesse de la lumière
- ▼ Une pure coïncidence ?

« La vitesse des ondes électromagnétiques est presque celle de la lumière... ce qui donne une bonne raison de conclure que la lumière est en quelque sorte elle-même (en incluant le rayonnement de chaleur, et les autres radiations du même type) une perturbation électromagnétique qui se propage selon les lois de l'électromagnétisme. »

J.C. Maxwell, 1864

- ▼ Confirmation expérimentale en 1888 par H. Hertz (1857–1894)
- ▼ « Monsieur, à quoi ça sert ? » — « À rien. »

150



Le spectre électromagnétique

Type	Longueur d'onde λ (m)	Fréquence f (Hz)
Radio	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^9$
Micro-ondes	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$
Infrarouge	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$
Visible	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$
Ultraviolet	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$
Rayons X	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$
Rayons Γ	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$

151



Ondes électromagnétiques planes, progressives, monochromatiques (OPPM)

152

Onde monochromatique vers $+z$

- ▼ Rappel **TD 10.1** + visualisation en 3D
- ▼ Perturbation initiale harmonique (à $z = 0$) :

$$f(z = 0, t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = \cos(\omega t)$$

- ▼ Onde se propageant selon $+\hat{e}_z : t \rightarrow t - \frac{z}{c}$

$$f(z, t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}z\right) = \cos(\omega t - kz)$$

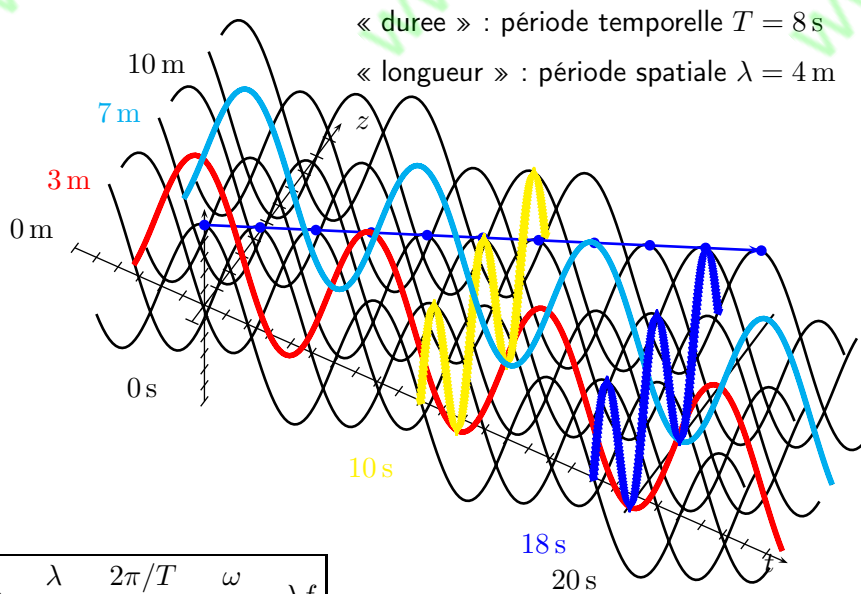
- ▼ $\lambda = cT$: longueur d'onde, la période spatiale (en m)
- ▼ $k = 2\pi/\lambda$: nombre d'onde (en rad m^{-1})
- ▼ $\vec{k} = k\hat{k} = k(+\hat{e}_z)$: vecteur d'onde
- ▼ $\phi(z, t) = \omega t - kz$: la phase de l'onde
- ▼ $v_\phi = \omega/k = c$: la vitesse de phase



153



Propagation d'une sinusoïde



154

Onde électromagnétique PPM selon $+\hat{e}_z$

▼ Onde Plane Progressive Monochromatique (OPPM)

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \underbrace{\vec{E}_0}_{\text{cste}} \cos(\omega t - kz) = \vec{\mathcal{E}}(z, t) \quad (97)$$

- ▼ « Monochromatique » : $\cos(\omega t - kz_0)$
À chaque point de l'espace (\vec{r} fixe), le champ $\vec{\mathcal{E}}$ oscille dans le temps.
Les oscillations sont déphasées en fonction de l'endroit.
- ▼ « Progressive » : temps/espace **couplés**
 $f(t - z/c)$, onde selon $+\hat{e}_z$
- ▼ « Plane » : le champ $\vec{\mathcal{E}}$ est constant sur tout le plan $z = z_0$
- ▼ « Front d'onde » : lieu de points de même phase à t fixe
- ▼ Onde plane = fronts d'onde plans
- ▼ (D'autres formes d'onde existent : cylindriques, sphériques, ...)

155



Onde électromagnétique PPM selon \hat{k}

- ▼ Onde PPM se propageant selon \hat{e}_z :

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz)$$

- ▼ La phase de l'onde dépend uniquement de z
- ▼ z : la projection de \vec{r} sur la direction de propagation \hat{e}_z

$$z = \vec{r} \cdot \hat{e}_z = \vec{r} \cdot \hat{k}$$

- ▼ Cas général, onde PPM se propageant selon \hat{k} :

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - k \underbrace{\hat{k} \cdot \vec{r}}_{z \text{ si } \hat{k}=\hat{e}_z}) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (98)$$

- ▼ Fronts d'onde : des plans perpendiculaires à \hat{k}
- ▼ OPPM : remplit *tout l'espace* (modèle mathématique!)
- ▼ Déphasage entre deux points \vec{r}_1, \vec{r}_2 :

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \vec{k} \cdot (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) = \vec{k} \cdot \vec{r}_{1 \rightarrow 2} \quad (99)$$

156

Notation complexe : définition

- ▼ Formule d'Euler :

$$e^{j\phi} = \cos(\phi) + j \sin(\phi) \rightarrow \cos(\phi) = \text{Re} \{ e^{j\phi} \}$$

- ▼ Application à une OPPM :

$$\begin{aligned} \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta) \\ &= \text{Re} \left\{ \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ \vec{E}_0 e^{j\delta} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\} \\ &\triangleq \text{Re} \left\{ \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} \end{aligned} \quad (100)$$

- ▼ $\vec{E}(\vec{r}, \omega)$: représentation (ou amplitude) *complexe* de $\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t)$

temps $\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) \longleftrightarrow \vec{E}(\vec{r}, \omega)$ fréquence
--

157



Notation complexe : avantages (1)

- ▼ $\vec{E}(\vec{r}, \omega)$: plus simple à manipuler ! (addition)

$$\begin{aligned}\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) &= \vec{\mathcal{E}}_1(\vec{r}, t) + \vec{\mathcal{E}}_2(\vec{r}, t) \\ &= \vec{E}_1 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta_1) + \vec{E}_2 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta_2) \\ &= \dots ??? \dots \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \vec{E}_1(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} + \operatorname{Re} \left\{ \vec{E}_2(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \left(\vec{E}_1(\vec{r}, \omega) + \vec{E}_2(\vec{r}, \omega) \right) e^{j\omega t} \right\} \\ \vec{E}(\vec{r}, \omega) &= \vec{E}_1(\vec{r}, \omega) + \vec{E}_2(\vec{r}, \omega)\end{aligned}\tag{101}$$

- ▼ On additionne les représentations complexes, comme des vecteurs
- ▼ On ne multiplie *jamaïs* des représentations complexes !
(une seule exception, quand on sait ce qu'on fait. . . ; équ. (136), tr.#183)

158

Notation complexe : avantages (2)

- ▼ $\vec{E}(\vec{r}, \omega)$: plus simple à manipuler ! ($\partial/\partial t$)

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{Re} \left\{ \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \vec{E}(\vec{r}, \omega) \frac{\partial}{\partial t} e^{j\omega t} \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ j\omega \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} \\ \frac{\partial}{\partial t} \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) &\longleftrightarrow j\omega \vec{E}(\vec{r}, \omega)\end{aligned}\tag{102}$$

159



Notation complexe : avantages (3)

- ▼ $\vec{E}(\vec{r}, \omega)$: plus simple à manipuler ! ($\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \vec{E}(\vec{r}, t) &\stackrel{\text{OPPM}}{=} \frac{\partial}{\partial x} \text{Re} \left\{ \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\} = \text{Re} \left\{ \underbrace{\vec{E}_0}_{\text{cste}} \frac{\partial}{\partial x} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ -j k_x \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\} = \text{Re} \left\{ -j k_x \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} \\ \frac{\partial}{\partial x} \vec{E}(\vec{r}, t) &\longleftrightarrow -j k_x \vec{E}(\vec{r}, \omega) \\ \vec{\nabla} &= \frac{\partial}{\partial x} \hat{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \hat{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \hat{e}_z \longleftrightarrow \\ &\longleftrightarrow -j k_x \hat{e}_x - j k_y \hat{e}_y - j k_z \hat{e}_z = -j \vec{k} \end{aligned} \quad (103)$$

160

Notation complexe : application

- ▼ Notation complexe :

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \text{Re} \left\{ \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\} \\ \text{Si OPPM : } \vec{E}(\vec{r}, \omega) &= \vec{E}_0 e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} \end{aligned} \quad (104)$$

- ▼ Passer du domaine « temporel » au domaine « fréquentiel »
▼ Remplacer dans les équations de Maxwell :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) \longrightarrow \vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad (105)$$

$$\partial/\partial t \longrightarrow +j\omega \quad (106)$$

$$\text{Si OPPM : } \vec{\nabla} \longrightarrow -j\vec{k} \quad (107)$$

161



Équations de Maxwell : régime harmonique

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left\{ \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\}$$

▼ Dans le vide, sans charges ni courants :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{E}} = 0 \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (108)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{B}} = 0 \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (109)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (110)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{B}} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = j\omega \epsilon_0 \mu_0 \vec{E} \quad (111)$$

▼ L'équation d'ondes (94) devient l'équation de Helmholtz :

$$\boxed{\vec{\nabla}^2 \vec{E} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \vec{E} = 0} \quad (112)$$

162

Équations de Maxwell dans le cas d'une OPPM

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta) = \text{Re} \left\{ \vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\} = \text{Re} \left\{ \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} \right\}$$

▼ Dans le vide, sans charges ni courants :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{E}} = 0 \quad \longrightarrow \quad -j\vec{k} \cdot \vec{E} = 0 \quad (113)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{B}} = 0 \quad \longrightarrow \quad -j\vec{k} \cdot \vec{B} = 0 \quad (114)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad -j\vec{k} \wedge \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (115)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{B}} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad -j\vec{k} \wedge \vec{B} = j\omega \epsilon_0 \mu_0 \vec{E} \quad (116)$$

1. (113) : $\vec{E} \perp \vec{k}$, le champ électrique est transversal
2. (114) : $\vec{B} \perp \vec{k}$, le champ magnétique est transversal
3. (115) ; $\vec{B} = \frac{1}{\omega} \vec{k} \wedge \vec{E}$; (116) : $\vec{E} = c^2 \frac{1}{\omega} \vec{B} \wedge \vec{k}$ (rappel $k = \omega/c$)
4. (115) ou (116) : $\vec{E} \perp \vec{B}$

163



Propriétés d'une OPPM dans le vide



▼ Une OPPM est une onde TEM :

- Le champ électrique est transversal (TE) : perpendiculaire à \vec{k}
- Le champ magnétique est transversal (TM) : perpendiculaire à \vec{k}

▼ Les vecteurs \vec{E} , \vec{B} , \vec{k} forment un trièdre direct :

$$\vec{E} \wedge \vec{B} \parallel \vec{k} \quad (117)$$

▼ Les champs électrique et magnétique sont en phase

▼ L'équation d'ondes en régime harmonique (112) impose :

$$(-j\vec{k})^2 + \omega^2\mu_0\epsilon_0 = 0 \longrightarrow k^2 = \omega^2\mu_0\epsilon_0 \quad (118)$$

▼ Le rapport $\|\vec{E}\|/\|\vec{B}\|$ est constant :

$$\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega} \xrightarrow{\vec{E} \perp \vec{k}} \|\vec{B}\| = \frac{1}{c} \|\vec{E}\| \quad (119)$$

164

Polarisation linéaire d'une OPPM

▼ « Polarisation » : l'orientation du vecteur du champ électrique

$$\vec{\mathcal{E}} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \hat{u}$$

▼ Cas d'une OPPM $\hat{k} = \hat{e}_z$: $\vec{E} \perp \vec{k}$

▼ Polarisation linéaire : l'orientation ne change pas dans le temps

- Polarisation verticale (V) : $\vec{E} = E_0 e^{-jkz} \hat{e}_x$
- Polarisation horizontale (H) : $\vec{E} = E_0 e^{-jkz} \hat{e}_y$
- Cas général : angle θ entre \vec{E} et \hat{e}_x

$$\vec{\mathcal{E}} = E_0 \cos(\omega t - kz) (\cos \theta \hat{e}_x + \sin \theta \hat{e}_y) \quad (120)$$

$$\vec{E} = E_0 e^{-jkz} (\cos \theta \hat{e}_x + \sin \theta \hat{e}_y)$$

165



Polarisation circulaire d'une OPPM



- ▼ Deux composantes \tilde{E}_x et \tilde{E}_y
- ▼ Même amplitude, déphasage 90°

$$\begin{aligned}\vec{\tilde{E}} &= E_0 e^{-j k z} (\hat{e}_x + j \hat{e}_y) \\ \vec{\mathcal{E}} &= E_0 \cos(\omega t - k z) \hat{e}_x - E_0 \sin(\omega t - k z) \hat{e}_y\end{aligned}\quad (121)$$

- ▼ À t fixe, regarder *dans le sens de propagation*
- ▼ Rotation dans le sens horaire : polarisation droite (RCP)
- ▼ Rotation dans le sens anti-horaire : polarisation gauche (LCP) :

$$\begin{aligned}\vec{\tilde{E}} &= E_0 e^{-j k z} (j \hat{e}_x + \hat{e}_y) \\ \vec{\mathcal{E}} &= -E_0 \sin(\omega t - k z) \hat{e}_x + E_0 \cos(\omega t - k z) \hat{e}_y\end{aligned}\quad (122)$$

- ▼ Attention : à z fixe, le vecteur $\vec{\mathcal{E}}$ tourne dans l'autre sens !

166



OPPM dans les conducteurs

167

Conducteurs et loi d'Ohm (bis)

- ▼ Loi d'Ohm (46) :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

- ▼ Conducteur électrique « parfait » (PEC) : $\sigma = \infty$:

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma} \xrightarrow{\text{PEC}} 0$$

- ▼ Champ \vec{E} nul à l'intérieur d'un conducteur *parfait*
- ▼ (Électrostatique : $\vec{E} = 0$ indépendamment de σ)
- ▼ Rappel TD 4.4 :

$$\rho(t) = \rho(t=0)e^{-t/t_r}, \quad t_r = \epsilon_0/\sigma$$

Régime harmonique : dans un conducteur $\rho = 0$ si $T \gg t_r \rightarrow f \ll \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

- ▼ « Bon conducteur » : $\sigma \gg \epsilon_0\omega$

168



Les équations de Maxwell dans un conducteur



$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 & \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -j\omega\vec{B} & \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0\vec{J} + j\omega\mu_0\epsilon_0\vec{E} \\ & & &= \mu_0(\sigma + j\omega\epsilon_0)\vec{E}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -j\omega\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = (-j\mu_0\omega\sigma + \mu_0\epsilon_0\omega^2)\vec{E} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2\vec{E} = -\vec{\nabla}^2\vec{E}\end{aligned}$$

▼ Équation d'onde (vectorielle) :

$$\vec{\nabla}^2\vec{E} = (j\mu_0\omega\sigma - \mu_0\epsilon_0\omega^2)\vec{E} \quad (123)$$

169

L'équation d'onde dans un conducteur

▼ Équation d'onde (scalaire, en cartésiennes) :

$$\nabla^2\tilde{E} = (j\mu_0\omega\sigma - \mu_0\epsilon_0\omega^2)\tilde{E} \quad (124)$$

▼ Essayer une solution type OPPM (104) :

$$\tilde{E} = E_0 e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

$$-k^2 = -\mu_0\epsilon_0\omega^2 + j\mu_0\omega\sigma \longrightarrow k^2 = \omega^2\epsilon_0\mu_0 \left(1 - j\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega}\right)$$

▼ Nombre d'onde complexe \tilde{k} !

▼ Approximation bon conducteur :

$$\sigma \gg \epsilon_0\omega \rightarrow \tilde{k}^2 = -j\mu_0\omega\sigma \rightarrow \boxed{\tilde{k} = \frac{1-j}{\sqrt{2}}\sqrt{\mu_0\omega\sigma}} \quad (125)$$

170



OPPM dans un bon conducteur



- ▼ Direction de propagation $\hat{k} = \hat{e}_z$:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_0 e^{-j\vec{k}z} \\ &= \underbrace{\vec{E}_0 e^{-\sqrt{\frac{\mu_0\omega\sigma}{2}}z}}_{\text{atténuation}} \underbrace{e^{-j\sqrt{\frac{\mu_0\omega\sigma}{2}}z}}_{\text{propagation}}\end{aligned}\quad (126)$$

- ▼ Épaisseur de peau :

$$\delta \triangleq \sqrt{\frac{2}{\mu_0\omega\sigma}} \quad (127)$$

- ▼ OPPM dans un bon conducteur :

$$\boxed{\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-z/\delta} e^{-jz/\delta}} \quad (128)$$

- ▼ Longueur d'onde : $\lambda = 2\pi\delta$

- ▼ Vitesse de phase : $v_\phi = \frac{\omega}{1/\delta} = \sqrt{2\omega/\mu_0\sigma}$ (dépend de ω !)

171



Conditions aux limites vide-conducteur

172

Interface vide-conducteur

- ▼ Les équations de Maxwell dans un conducteur :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + j\omega\mu_0\epsilon_0 \vec{E} \\ &= \mu_0(\sigma + j\omega\epsilon_0) \vec{E} \\ &= j\omega\mu_0\epsilon_0 \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) \vec{E} \\ &= j\omega\mu_0\epsilon_0 \underbrace{\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)}_{\epsilon} \vec{E}\end{aligned}$$

- ▼ Que se passe-t-il *à l'interface* entre deux milieux ?
- ▼ Les champs peuvent être continus ou pas !
- ▼ Appliquer chaque équation sous forme intégrale :
choisir volumes/surfaces/courbes *élémentaires* de part et d'autre de l'interface

173



Conditions aux limites

- ▼ Milieu 1 : vide ; milieu 2 : conducteur
- ▼ \hat{n} : \perp à l'interface ; du métal (2) vers le vide (1)

$$\begin{aligned}\hat{n} \cdot (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) &= \tilde{\rho}_s / \epsilon_0 & \hat{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) &= 0 \\ \hat{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) &= \vec{0} & \hat{n} \wedge (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) &= \mu_0 \vec{J}_s\end{aligned}$$

- ▼ ρ_s : densité de charges surfacique (C m^{-2})
- ▼ \vec{J}_s : densité de courant surfacique (A m^{-1})
 $\neq 0$ seulement si $\sigma = \infty$
- ▼ $\hat{n} \cdot \vec{E}$: composante *normale* à l'interface
- ▼ $\hat{n} \wedge \vec{E}$: composante *tangentielle* à l'interface

$$\begin{aligned}\tilde{E}_{\text{nor}1} - \tilde{E}_{\text{nor}2} &= \tilde{\rho}_s / \epsilon_0 & \tilde{B}_{\text{nor}1} - \tilde{B}_{\text{nor}2} &= 0 \\ \tilde{E}_{\text{tan}1} - \tilde{E}_{\text{tan}2} &= 0 & \tilde{B}_{\text{tan}1} - \tilde{B}_{\text{tan}2} &= \mu_0 \tilde{J}_s\end{aligned}$$

- ▼ Composantes tangentielles du champ électrique continues
- ▼ Composantes normales du champ magnétique continues

174



Puissance électromagnétique : vecteur de Poynting

175

[Rappel] Énergie électro/magnétostatique

- ▼ Énergie électrostatique \mathcal{U}_e (37) :

$$\mathcal{U}_e = \frac{1}{2} \int_V \epsilon_0 E^2(\vec{r}) dV$$

- ▼ Énergie magnétostatique \mathcal{U}_m (85) :

$$\mathcal{U}_m = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{\mu_0} B^2(\vec{r}) dV$$

- ▼ Électromagnétisme : les champs dépendent du temps

$$\vec{E}(\vec{r}) \rightarrow \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t)$$

$$E^2(\vec{r}) \rightarrow \mathcal{E}^2(\vec{r}, t)$$

$$\vec{B}(\vec{r}) \rightarrow \vec{\mathcal{B}}(\vec{r}, t)$$

$$B^2(\vec{r}) \rightarrow \mathcal{B}^2(\vec{r}, t)$$

176



Énergie électromagnétique

- ▼ L'énergie « stockée » dans un volume V :

$$\mathcal{U}_{\text{em}}(t) = \frac{1}{2} \int_V \left(\epsilon_0 \mathcal{E}^2(\vec{r}, t) + \frac{1}{\mu_0} \mathcal{B}^2(\vec{r}, t) \right) dV \quad (129)$$

- ▼ Comment évolue l'énergie électromagnétique dans le temps ?
▼ Que se passe-t-il dans un volume \mathcal{V} ?
1. Énergie \mathcal{U}_{em} *emmagasinée* dans les champs $\vec{\mathcal{E}}, \vec{\mathcal{B}}$
 2. *Travail* du champ sur les charges du volume (« milieu »)
à travers la force de Lorentz : puissance \mathcal{P} fournie au milieu
 3. *Échange* d'énergie avec le monde extérieur
à travers la surface S qui englobe \mathcal{V} :
puissance \mathcal{P}_t sortant du volume
- ▼ Conservation de l'énergie :

$$\frac{d\mathcal{U}_{\text{em}}}{dt} + \mathcal{P} + \mathcal{P}_t = 0$$

177

Travail du champ électromagnétique

- ▼ Le champ électromagnétique $\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t), \vec{\mathcal{B}}(\vec{r}, t)$ agit sur les charges du volume :

$$\vec{F} = q(\vec{\mathcal{E}} + \vec{v} \wedge \vec{\mathcal{B}})$$

- ▼ Travail élémentaire dans un volume dV :

$$\begin{aligned} dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} = \vec{F} \cdot \vec{v} dt = q(\vec{\mathcal{E}} + \vec{v} \wedge \vec{\mathcal{B}}) \cdot \vec{v} dt \\ &= q\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{v} dt = \rho dV \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{v} dt = \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} dV dt \end{aligned}$$

- ▼ Puissance fournie par le champ É/M aux charges du volume \mathcal{V} :

$$\mathcal{P} = \int_V \frac{dW}{dt} = \int_V \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} dV \quad (130)$$

178



Énergie É/M et puissance fournie (1)

- ▼ Écrire $\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}}$ en fonction uniquement de $\vec{\mathcal{E}}$ et $\vec{\mathcal{B}}$
- ▼ Utiliser Maxwell-Ampère pour éliminer $\vec{\mathcal{J}}$:

$$\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} = \frac{1}{\mu_0} \vec{\mathcal{E}} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{B}}) - \epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t}$$

- ▼ Propriété analyse vectorielle :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{B}}) = \vec{\mathcal{B}} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{E}}) - \vec{\mathcal{E}} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{B}})$$

- ▼ Loi de Faraday :

$$\vec{\mathcal{B}} \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{\mathcal{E}}) = -\vec{\mathcal{B}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t}$$

- ▼ Regrouper les trois équations :

$$\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} = \dots \text{ (transparent suivant)}$$

179

Énergie É/M et puissance fournie (2)

- ▼ Densité volumique de puissance fournie :

$$\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} = -\epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t} - \frac{1}{\mu_0} \vec{\mathcal{B}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t} - \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \cdot (\vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{B}})$$

- ▼ Densité volumique d'énergie électrique :

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 \mathcal{E}^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{E}} \implies \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \mathcal{E}^2 \right) = \epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t}$$

- ▼ Densité volumique d'énergie magnétique :

$$\frac{1}{2\mu_0} \mathcal{B}^2 = \frac{1}{2\mu_0} \vec{\mathcal{B}} \cdot \vec{\mathcal{B}} \implies \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2\mu_0} \mathcal{B}^2 \right) = \frac{1}{\mu_0} \vec{\mathcal{B}} \cdot \frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t}$$

180



Énergie É/M et puissance fournie (3)

- ▼ Ce qui se passe dans un volume élémentaire :

$$\underbrace{\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}}}_{\text{puissance/m}^3} + \frac{\partial}{\partial t} \underbrace{\left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{E}} + \frac{1}{2\mu_0} \vec{\mathcal{B}} \cdot \vec{\mathcal{B}} \right)}_{\text{énergie/m}^3} + \frac{1}{\mu_0} \underbrace{\vec{\nabla} \cdot (\vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{B}})}_{\text{flux de ?/m}^3} = 0 \quad (131)$$

- ▼ Intégrer sur le volume \mathcal{V} (+ théorème de la divergence) :

$$\int_{\mathcal{V}} \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} d\mathcal{V} + \frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{E}} + \frac{1}{\mu_0} \vec{\mathcal{B}} \cdot \vec{\mathcal{B}} \right) d\mathcal{V} + \oint_S \frac{1}{\mu_0} (\vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{B}}) \cdot \hat{n} dS = 0 \quad (132)$$

- ▼ Conservation de l'énergie :

$$\mathcal{P} + \frac{d\mathcal{U}_{\text{em}}}{dt} + (\text{puissance qui sort de } \mathcal{V}) = 0 \quad (133)$$

181

Puissance É/M transportée : vecteur de Poynting

- ▼ Puissance qui sort du volume \mathcal{V} :

$$\mathcal{P}_t = \oint_S \frac{1}{\mu_0} (\vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{B}}) \cdot \hat{n} dS$$

- ▼ Densité surfacique de puissance transportée :

$$\vec{\mathcal{S}} \triangleq \frac{1}{\mu_0} \vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{B}} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (134)$$

- ▼ $\vec{\mathcal{S}}$: *vecteur de Poynting*, montre la direction de la puissance
▼ Puissance transportée par une onde à travers une surface S :

$$\mathcal{P}_t = \int_S \vec{\mathcal{S}} \cdot \hat{n} dS \quad (135)$$

182



[Produit de deux fonctions harmoniques]

- ▼ Exemple : les champs d'une onde É/M harmonique

$$\vec{\mathcal{E}}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz + \phi) = \text{Re} \left\{ \vec{E}_0 e^{j\phi} e^{j(\omega t - kz)} \right\} = \text{Re} \left\{ \vec{E}(z) e^{j\omega t} \right\}$$

$$\vec{\mathcal{B}}(z, t) = \vec{B}_0 \cos(\omega t - kz + \theta) = \text{Re} \left\{ \vec{B}_0 e^{j\theta} e^{j(\omega t - kz)} \right\} = \text{Re} \left\{ \vec{B}(z) e^{j\omega t} \right\}$$

- ▼ Produit des modules : $\mathcal{EB} \neq \tilde{E}\tilde{B}$!

$$\begin{aligned} \mathcal{EB} &= E_0 B_0 \cos(\omega t - kz + \phi) \cos(\omega t - kz + \theta) \\ &= \frac{1}{2} E_0 B_0 [\cos(\phi - \theta) + \cos(2\omega t - 2kz + \phi + \theta)] \\ \langle \mathcal{EB} \rangle &= \frac{1}{2} E_0 B_0 \cos(\phi - \theta) = \dots = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ E_0 e^{j\phi} B_0 e^{-j\theta} \right\} \end{aligned}$$

$$\boxed{\langle \mathcal{EB} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \tilde{E} \tilde{B}^* \right\}} \quad (136)$$

- ▼ Le **seul cas** où on peut multiplier des amplitudes complexes ! (cf. tr.#158)

183

Énergie et puissance d'ondes É/M harmoniques

- ▼ Énergie **moyenne** É/M emmagasinée dans les champs :

$$\langle \mathcal{U}_{\text{em}} \rangle = \frac{1}{4} \int_V \left(\epsilon_0 \text{Re} \left\{ \vec{E} \cdot \vec{E}^* \right\} + \frac{1}{\mu_0} \text{Re} \left\{ \vec{B} \cdot \vec{B}^* \right\} \right) dV \quad (137)$$

- ▼ Puissance **moyenne** É/M fournie au milieu :

$$\langle \mathcal{P} \rangle = \frac{1}{2} \int_V \text{Re} \left\{ \vec{E} \cdot \vec{J}^* \right\} dV \quad (138)$$

- ▼ Puissance **moyenne** É/M transportée par l'onde :

$$\langle \mathcal{P}_t \rangle = \int_S \langle \vec{\mathcal{S}} \rangle \cdot \hat{n} dS \quad (139)$$

$$\boxed{\langle \vec{\mathcal{S}} \rangle = \frac{1}{2\mu_0} \text{Re} \left\{ \vec{E} \wedge \vec{B}^* \right\}} \quad (140)$$

- ▼ **Intensité** : $I = \|\langle \vec{\mathcal{S}} \rangle\|$ (W m⁻²)

184



OPPM énergie électrique = magnétique

- ▼ Une OPPM d'amplitude E_0 se propageant selon $\hat{k} = \hat{e}_z$ dans le vide :

$$\begin{aligned}\vec{\mathcal{E}} &= E_0 \cos(\omega t - kz) \hat{e}_x & \vec{E} &= E_0 e^{-j kz} \hat{e}_x \\ \vec{\mathcal{B}} &= \frac{k}{\omega} E_0 \cos(\omega t - kz) \hat{e}_y & \vec{B} &= \frac{k}{\omega} E_0 e^{-j kz} \hat{e}_y\end{aligned}$$

- ▼ Densités volumiques d'énergie (TD 13.1a) :

instantanée	moyenne	
élec. : $\frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t - 2kz)]$	$\frac{1}{4} \epsilon_0 E_0^2$	(141)

mag. : $\frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} \frac{k^2}{\omega^2} E_0^2 \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t - 2kz)]$	$\frac{1}{4} \frac{1}{\mu_0} \frac{k^2}{\omega^2} E_0^2$	(142)
---	--	-------

- ▼ OPPM dans le vide : énergie électrique = énergie magnétique
▼ Égalité en énergies instantanées (et moyennes)

185

Impédance caractéristique du vide

- ▼ Densité de puissance transportée par une OPPM (TD 13.1e) :

$$\begin{aligned}\vec{\mathcal{S}} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{k}{\omega} E_0^2 \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t - 2kz)] \hat{e}_z \\ \langle \vec{\mathcal{S}} \rangle &= \frac{1}{2\mu_0} \frac{k}{\omega} E_0^2 \hat{e}_z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0^2 \hat{e}_z\end{aligned}$$

- ▼ On peut réécrire le dernier résultat :

$$\| \langle \vec{\mathcal{S}} \rangle \| = \frac{(E_0/\sqrt{2})^2}{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}} = \frac{(E_0/\sqrt{2})^2}{Z_0} \quad (143)$$

- ▼ Rappel : en électronique, $\langle P \rangle = V_{\text{eff}}^2/R$

- ▼ Impédance caractéristique du vide :

$$Z_0 \triangleq \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = (120\pi)\Omega \approx 377\Omega \quad (144)$$

186



Champ électrique dans la matière

187

Diélectriques (isolants)

- ▼ Les charges ne sont pas libres à se déplacer
- ▼ Tous les électrons sont liés aux atomes/molécules
- ▼ \neq conducteurs
- ▼ Intrinsèquement neutres
- ▼ Quel est l'effet d'un champ \vec{E} extérieur ?
(retour pour l'instant à l'électrostatique)

1. Création de dipôles $(-q/+q)$ induits

$$\vec{p} \triangleq qd\hat{u}_{- \rightarrow +} \quad \text{moment dipolaire}$$

2. Effet proportionnel à la cause

$$\vec{p} = \alpha \vec{E} \quad \alpha : \text{polarisabilité atomique}$$

3. Alignement des dipôles permanents

Rappel : graines de gazon
(WL, L2, 42m25-43m40)

188

Effet de la polarisation de la matière

- ▼ « Polarisation » : se réfère aux dipôles
- ▼ (Rien à voir avec linéaire/circulaire etc.)
- ▼ On n'examine pas les *causes* pour l'instant
(polarisation induite ou permanente)
- ▼ Matière : grand nombre de dipôles dans un volume
- ▼ Vecteur de polarisation \vec{P} :
densité volumique de moment dipolaire électrique :

$$\vec{P} \triangleq \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{p}_i \quad (\text{C m m}^{-3} = \text{C m}^{-2}) \quad (145)$$

189



Polarisation : charges induits

- ▼ Matière neutre polarisée :
apparition de charges « liées » !

- ▼ Dans un volume V :

1. À la surface :

$$\rho_s \text{ liées} = \vec{P} \cdot \hat{n} \quad (\text{C m}^{-2}) \quad (146)$$

2. À l'intérieur :

$$\rho_{\text{liées}} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P} \quad (\text{C m}^{-3}) \quad (147)$$

3. Matière neutre :

$$\oint_S \rho_s \text{ liées} dS + \int_V \rho_{\text{liées}} dV = 0$$

- ▼ $\rho_{\text{liées}}, \rho_s \text{ liées}$ génèrent champ électrique dû à \vec{P}

190

Loi de Gauss dans les diélectriques

- ▼ Deux types de charges :

1. « Libres » : on peut les choisir/placer etc.
2. « Liées » : on n'a aucun contrôle sur elles

- ▼ Loi de Gauss (électrostatique) :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_{\text{liées}} + \rho_{\text{libres}}) \\ &= \frac{1}{\epsilon_0} (-\vec{\nabla} \cdot \vec{P} + \rho_{\text{libres}}) \end{aligned}$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho_{\text{libres}}$$

$$\boxed{\vec{D} \triangleq \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}} \quad (\text{C m}^{-2}) \quad (148)$$

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{\text{libres}}} \quad (149)$$

- ▼ \vec{D} : déplacement (ou induction) électrique, en C m^{-2}

191



Milieux LHI

▼ Linéaire :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (150)$$

χ_e : susceptibilité électrique

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} \quad (151)$$

$$\triangleq \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

ϵ_r : permittivité relative ϵ/ϵ_0 (ou constante diélectrique)

▼ Homogène : ϵ_r ne dépend pas de \vec{r}

▼ Isotrope : ϵ_r est un scalaire

▼ Milieux lhi :

$$(149) : \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{\text{libres}} \xrightarrow{\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho_{\text{libres}} / \epsilon_0 \epsilon_r$$

remplacer $\rho \longrightarrow \rho_{\text{libres}}$ et $\epsilon_0 \longrightarrow \epsilon_0 \epsilon_r$ dans la loi de Gauss

192

Permittivité relative : quelques valeurs typiques

Matériau	ϵ_r
Vide	1
Hydrogène	1.00025
Air (sec)	1.00054
Diamand	5.2
Sel	5.9
Silicone	11.8
Eau	80.1
Glacé (-30°C)	99

193



Champ magnétique dans la matière

194

Phénomènes magnétiques : dus aux courants

- ▼ Aimants, boussoles, Pôle Nord, etc. :
des courants dans la matière
- ▼ Une boucle de courant I :

$$\vec{m} \triangleq IA\hat{n}$$

- ▼ \vec{m} : moment dipolaire magnétique
- ▼ A : aire de la boucle
- ▼ Dans la matière, \vec{m} créés par les électrons
- ▼ Orientation aléatoire : résultat nul
- ▼ Quel est l'effet d'un champ \vec{B} extérieur ?
 1. Diamagnétisme : \vec{m} s'orientent *contre* \vec{B}
 2. Paramagnétisme : \vec{m} s'orientent *selon* \vec{B}
 3. Ferromagnétisme : \vec{m} s'orientent *selon* \vec{B} à grandes échelles

195

Magnétisation : courants induits

- ▼ Équivalent de la polarisation \vec{P}
- ▼ Vecteur de magnétisation \vec{M} :
densité volumique de moment dipolaire magnétique :

$$\vec{M} \triangleq \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{m}_i \quad (\text{A m}^2 \text{ m}^{-3} = \text{A m}^{-1}) \quad (152)$$

- ▼ Dans un volume \mathcal{V} :

1. À la surface :

$$\vec{J}_s \text{ liés} = \vec{M} \wedge \hat{n} \quad (\text{A m}^{-1}) \quad (153)$$

2. À l'intérieur :

$$\vec{J}_{\text{liés}} = \vec{\nabla} \wedge \vec{M} \quad (\text{A m}^{-2}) \quad (154)$$

196



Loi d'Ampère dans les diélectriques

▼ Deux types de courants :

1. « Libres » : on peut les choisir/placer etc.
2. « Liés » : on n'a aucun contrôle sur eux

▼ Loi d'Ampère (magnétostatique) :

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0(\vec{J}_{\text{liés}} + \vec{J}_{\text{libres}}) \\ &= \mu_0(\vec{\nabla} \wedge \vec{M} + \vec{J}_{\text{libres}})\end{aligned}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \right) = \vec{J}_{\text{libres}}$$

$$\boxed{\vec{H} \triangleq \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}} \quad (\text{A m}^{-1}) \quad (155)$$

$$\boxed{\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{\text{libres}}} \quad (156)$$

▼ \vec{H} : « champ H » (excitation magnétique) en A m^{-1}

197

Milieux LHI

▼ Linéaire :

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (157)$$

χ_m : susceptibilité magnétique

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} \\ &\triangleq \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}\end{aligned} \quad (158)$$

μ_r : perméabilité relative μ/μ_0

▼ Homogène : μ_r ne dépend pas de \vec{r}

▼ Isotrope : μ_r est un scalaire

▼ Milieux lhi :

$$(156) : \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{\text{libres}} \xrightarrow{\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}} \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{J}_{\text{libres}}$$

remplacer $\vec{J} \rightarrow \vec{J}_{\text{libres}}$ et $\mu_0 \rightarrow \mu_0 \mu_r$ dans la loi d'Ampère

198



Susceptibilité magnétique : quelques valeurs

Matériau dia-	χ_m	Matériau para-	χ_m
Or	-3.4×10^{-5}	Oxygène	1.9×10^{-6}
Argent	-2.4×10^{-5}	Sodium	8.5×10^{-6}
Cuivre	-9.7×10^{-6}	Aluminium	2.1×10^{-5}
Eau	-9.0×10^{-6}	Tungsten	7.8×10^{-5}
CO ₂	-1.2×10^{-8}	Platine	2.8×10^{-4}
Hydrogène	-2.2×10^{-9}	Oxygène liquide	3.9×10^{-3}

- ▼ $\mu_r = 1 + \chi_m \approx 1$
- ▼ Oxygène liquide démo (WL, L21, 43m00-46m22)

199

Ferromagnétisme

- ▼ μ_r entre 10^2 et 10^6 !
- ▼ Orientation de \vec{m} par *domaines* ($\approx 10^{20}$ atomes)
- ▼ Orientation permanente : magnétisation
- ▼ Dans un champ magnétique \vec{B} non uniforme : force d'attraction vers \vec{B} fort (WL, L21, 20m10-23m00)
- ▼ Écouter les domaines magnétiques s'orienter : effet Barkhausen (1919) (WL, L21, 25m50-30m30)
- ▼ Phénomène d'hystérésis \vec{B}/\vec{H}
- ▼ Température de Curie (WL, L21, 37m00-40m10)

Matériau	$T_c(^{\circ}\text{C})$
Nickel (Ni)	354
Fer (Fe)	770
Cobalt (Co)	1115

- ▼ Équivalent : matériaux ferroélectriques, hystérésis \vec{P}/\vec{E}

200



Équations de Maxwell dans la matière

201

Courant de polarisation

- ▼ Retour aux phénomènes *variables dans le temps*
- ▼ Régime harmonique ($\partial/\partial t \rightarrow j\omega$, $\vec{\mathcal{E}} \rightarrow \vec{E}$ etc.)
- ▼ Polarisation/magnétisation dans la matière
- ▼ Apparition de charges/courants « liés » :

$$\text{polarisation (147)} : \tilde{\rho}_{\text{liés}} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$$

$$\text{magnétisation (154)} : \vec{J}_{\text{liés}} = \vec{\nabla} \wedge \vec{M}$$

- ▼ Variation de $\tilde{\rho}_{\text{liés}}$: courant de polarisation
(Rappel (42)) : $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -j\omega\tilde{\rho}$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{\text{pol}} = -j\omega\tilde{\rho}_{\text{liés}} \stackrel{(147)}{=} -j\omega(-\vec{\nabla} \cdot \vec{P}) = \vec{\nabla} \cdot j\omega\vec{P}$$

$$\vec{J}_{\text{pol}} = j\omega\vec{P} \quad (159)$$

- ▼ Un nouveau terme de courant à ajouter dans l'équation de Maxwell-Ampère !

202

Équations de la divergence

- ▼ Champ électrique (loi de Gauss)

$$(88) : \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\tilde{\rho}}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0}(\tilde{\rho}_{\text{liés}} + \tilde{\rho}_{\text{libres}}) = \frac{1}{\epsilon_0}(-\vec{\nabla} \cdot \vec{P} + \tilde{\rho}_{\text{libres}})$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \tilde{\rho}_{\text{libres}}} \quad (160)$$

- ▼ Champ magnétique

$$(89) : \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0} \quad (161)$$

203



Équations du rotationnel

▼ Champ électrique (loi de Faraday)

$$(90) : \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (162)$$

▼ Champ magnétique (loi de Maxwell-Ampère)

$$\begin{aligned} (91) : \vec{\nabla} \wedge \vec{B} &= \mu_0(\vec{J}_{\text{liés}} + \vec{J}_{\text{libres}} + \vec{J}_{\text{pol}} + j\omega\epsilon_0\vec{E}) \\ &\stackrel{(159)}{=} \mu_0(\vec{\nabla} \wedge \vec{M} + \vec{J}_{\text{libres}} + j\omega\vec{P} + j\omega\epsilon_0\vec{E}) \\ &= \mu_0(\vec{\nabla} \wedge \vec{M} + \vec{J}_{\text{libres}} + j\omega\vec{D}) \end{aligned}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \right) = \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{\text{libres}} + j\omega\vec{D} \quad (163)$$

204

Équations de Maxwell dans la matière (1)

▼ Forme « inutilisable »

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \tilde{\rho}/\epsilon_0 \quad (164a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (164b)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (164c)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + j\omega\epsilon_0\vec{E}) \quad (164d)$$

▼ Charges et courants : « libres » et « liés »

$$\tilde{\rho} = \tilde{\rho}_{\text{liés}} + \tilde{\rho}_{\text{libres}}$$

$$\vec{J} = \vec{J}_{\text{liés}} + \vec{J}_{\text{libres}} + \vec{J}_{\text{pol}}$$

▼ Équations valables quel que soit le milieu

▼ Inconvénient : calculer les charges/courants que l'on ne contrôle pas

205



Équations de Maxwell dans la matière (2)

- ▼ Forme « généralisée »

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \tilde{\rho}_{\text{libres}} \quad (165a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (165b)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (165c)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{\text{libres}} + j\omega\vec{D} \quad (165d)$$

- ▼ Charges et courants : uniquement « libres » (on ne l'écrit plus!)
- ▼ Relations constitutives

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

- ▼ Équations valables quel que soit le milieu
- ▼ Difficulté : calculer les champs \vec{P} et \vec{M}

206

Équations de Maxwell dans la matière (3)

- ▼ Forme spéciale : milieux linéaires, homogènes, isotropes (lhi)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \tilde{\rho}_{\text{libres}}/\epsilon \quad (166a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (166b)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (166c)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_{\text{libres}} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (166d)$$

- ▼ Charges et courants : uniquement « libres » (on ne l'écrit plus!)
- ▼ Relations constitutives : utilisées dans (165) \rightarrow (166)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \stackrel{\text{lhi}}{=} \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \stackrel{\text{lhi}}{=} \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

- ▼ Équations valables uniquement pour les milieux lhi (y compris le vide!)
- ▼ Ressemblent aux équations (164) mais avec ϵ, μ et charges/courants libres

207



Énergie et puissance dans la matière

- ▼ On peut reprendre les calculs qui ont conduit à (131) mais à partir des équations de Maxwell généralisées (165)

$$\text{pertes : } \frac{d\mathcal{P}}{d\mathcal{V}} = \vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{\mathcal{J}} \quad (\text{W/m}^3)$$

$$\text{énergie é/m : } \frac{d\mathcal{U}_{\text{em}}}{d\mathcal{V}} = \frac{1}{2} \vec{\mathcal{D}} \cdot \vec{\mathcal{E}} + \frac{1}{2} \vec{\mathcal{B}} \cdot \vec{\mathcal{H}} \quad (\text{J m}^{-3}) \quad (167)$$

$$\text{Poynting : } \vec{\mathcal{S}} = \vec{\mathcal{E}} \wedge \vec{\mathcal{H}} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (168)$$

- ▼ Dans le cas spécial du vide, on retrouve (129) et (134)

208



OPPM dans les milieux lhi

209

OPPM dans un milieu lhi

- ▼ On peut reprendre tous les résultats obtenus dans le vide
- ▼ Remplacer $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon$ et $\mu_0 \rightarrow \mu$
- ▼ Faire apparaître uniquement les charges et les courants « libres »
- ▼ Dans un milieu lhi sans sources ni courants :
 - ▶ Une OPPM est une onde TEM
 - ▶ Les vecteurs \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} forment un trièdre direct
 - ▶ Le nombre d'onde est donné par :

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} = k_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (169)$$

- ▶ Le rapport $\|\vec{E}\|/\|\vec{H}\|$ est constant :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega} \xrightarrow{\vec{E} \perp \vec{k}} \|\vec{H}\| = \frac{k}{\omega \mu} \|\vec{E}\| = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \|\vec{E}\|$$

$$Z \triangleq \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\|\vec{E}\|}{\|\vec{H}\|} \quad \text{impédance caractéristique } (\Omega) \quad (170)$$

- ▶ Les champs \vec{E} et \vec{H} sont en phase si ϵ , μ réels

210



Types de pertes dans la matière

1. Pertes de conductivité (ohmiques)

$$(46) : \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{loi d'Ohm}$$

σ : conductivité en $S m^{-1}$

2. Pertes diélectriques : (150) $\rightarrow \vec{P} = \epsilon_0 \tilde{\chi}_e \vec{E}$

$$\tilde{\epsilon} = 1 + \tilde{\chi}_e \triangleq \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon'_r - j\epsilon''_r) = \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r$$

3. Pertes magnétiques : (157) $\rightarrow \vec{M} = \tilde{\chi}_m \vec{H}$

$$\tilde{\mu} = 1 + \tilde{\chi}_m \triangleq \mu' - j\mu'' = \mu_0(\mu'_r - j\mu''_r) = \mu_0 \tilde{\mu}_r$$

(on considère toujours ici $\mu_r \approx 1$)

211

Permittivité effective

▼ Pertes ohmiques et diélectriques dans Maxwell-Ampère :

$$(166) : \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \underbrace{\sigma \vec{E}}_{\vec{J}} + j\omega \tilde{\epsilon} \vec{E} = j\omega \epsilon_0 \left(\tilde{\epsilon}_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E}$$

▼ Définir une permittivité *effective*

$$\tilde{\epsilon}_{\text{reff}} \triangleq \tilde{\epsilon}_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon'_r - j \left(\epsilon''_r + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) = \epsilon'_{\text{reff}} - j \epsilon''_{\text{reff}} \quad (171)$$

▼ L'équation de Maxwell-Ampère (166)

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = j\omega \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_{\text{reff}} \vec{E}$$

▼ On peut reprendre tous les résultats précédents (lhi sans pertes) et remplacer $\epsilon_r \rightarrow \tilde{\epsilon}_{\text{reff}}$

212



Nombre d'onde complexe

- ▼ Le nombre d'onde

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \longrightarrow \tilde{k} = \omega \sqrt{\mu \tilde{\epsilon}_{\text{eff}}}$$

- ▼ Nombre d'onde complexe !

$$\tilde{k} \triangleq \beta - j\alpha$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\tilde{k}z} = \vec{E}_0 e^{-j(\beta - j\alpha)z} = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$$

$$\vec{\mathcal{E}} = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z)$$

- ▼ β : « constante de phase » (rad m^{-1})
- ▼ α : « coefficient d'atténuation » (Np m^{-1})
- ▼ $\delta = 1/\alpha$: « profondeur de peau »

213

Coefficients α et β

- ▼ Milieu lhi sans pertes magnétiques, avec permittivité complexe

$$\tilde{k} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\mu_r \tilde{\epsilon}_{\text{eff}}} = k_0 \sqrt{\mu_r (\epsilon'_{\text{eff}} - j \epsilon''_{\text{eff}})} = k_0 \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon'_{\text{eff}}}{2}} \sqrt{1 - j \frac{\epsilon''_{\text{eff}}}{\epsilon'_{\text{eff}}}}$$

- ▼ Tangente de pertes $\triangleq \epsilon''_{\text{eff}}/\epsilon'_{\text{eff}}$
- ▼ Coefficient d'atténuation / constante de phase :

$$\alpha = k_0 \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon'_{\text{eff}}}{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''_{\text{eff}}}{\epsilon'_{\text{eff}}} \right)^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (172)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon'_{\text{eff}}}{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''_{\text{eff}}}{\epsilon'_{\text{eff}}} \right)^2} + 1 \right)^{1/2} \quad (173)$$

214



Milieu lhi sans pertes

- ▼ Milieu sans pertes : $\epsilon'' = 0$

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon'}$$

- ▼ La vitesse de phase :

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon'_r}} = \frac{c}{n} \leq c \quad (174)$$

- ▼ Indice de réfraction :

$$n \triangleq \sqrt{\mu_r \epsilon'_r} \quad (175)$$

- ▼ La longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon'_r}} = \frac{\lambda_0}{n} \leq \lambda_0$$

215

Milieu lhi avec pertes

- ▼ Milieu avec pertes : $\epsilon'' \neq 0$

$$\alpha \neq 0$$

$$\beta \neq \omega \sqrt{\mu \epsilon'}$$

- ▼ La vitesse de phase (réelle) :

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\operatorname{Re}\{\tilde{k}\}} = \frac{\omega}{\operatorname{Re}\{\omega \sqrt{\mu \tilde{\epsilon}}\}} = \frac{c}{\operatorname{Re}\{\sqrt{\mu_r \tilde{\epsilon}_r}\}} = \frac{c}{\operatorname{Re}\{\tilde{n}\}} \leq c \quad (176)$$

- ▼ Indice de réfraction (complexe) :

$$\tilde{n} \triangleq \sqrt{\mu_r \tilde{\epsilon}_r} \quad (177)$$

- ▼ La longueur d'onde (réelle) :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\operatorname{Re}\{\tilde{k}\}} = \frac{\lambda_0}{\operatorname{Re}\{\sqrt{\mu_r \tilde{\epsilon}_r}\}} = \frac{\lambda_0}{\operatorname{Re}\{\tilde{n}\}} \leq \lambda_0$$

216



Refléxion / transmission entre deux milieux lhi

217

Conditions aux limites entre deux milieux lhi

- ▼ Les équations de Maxwell dans la matière (165)

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \tilde{\rho} & \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= -j\omega\vec{B} & \vec{\nabla} \wedge \vec{H} &= \vec{J} + j\omega\vec{D}\end{aligned}$$

- ▼ Interface entre deux milieux lhi, \hat{n} de 2 vers 1
- ▼ Même procédure que celle du tr.#174

$$\hat{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \tilde{\rho}_s \quad \epsilon_1 \tilde{E}_{\text{nor}1} - \epsilon_2 \tilde{E}_{\text{nor}2} = \tilde{\rho}_s \quad (178a)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad \mu_1 \tilde{H}_{\text{nor}1} - \mu_2 \tilde{H}_{\text{nor}2} = 0 \quad (178b)$$

$$\hat{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = \vec{0} \quad \tilde{E}_{\text{tan}1} - \tilde{E}_{\text{tan}2} = 0 \quad (178c)$$

$$\hat{n} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad \tilde{H}_{\text{tan}1} - \tilde{H}_{\text{tan}2} = \tilde{J}_s \quad (178d)$$

- ▼ \vec{E}_{tan} continu ; \vec{H}_{nor} continu (si milieux non magnétiques)
- ▼ \vec{J}_s : courant surfacique (A m^{-1}), uniquement sur un conducteur parfait

218

Incidence normale sur une interface

- ▼ Interface entre deux milieux lhi à $z = 0$
- ▼ Incidence normale : $\hat{k}_i = \hat{e}_z$ (TD 14.1)
- ▼ Ondes incidente, réfléchie et transmise :

$$\begin{aligned}\vec{E}_i &= E_{i0} e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \hat{e}_x = E_{i0} e^{-jk_i z} \hat{e}_x \\ \vec{E}_r &= \tilde{E}_{r0} e^{-j\vec{k}_r \cdot \vec{r}} \hat{e}_x = \tilde{E}_{r0} e^{+jk_i z} \hat{e}_x \\ \vec{E}_t &= \tilde{E}_{t0} e^{-j\vec{k}_t \cdot \vec{r}} \hat{e}_x = \tilde{E}_{t0} e^{-jk_t z} \hat{e}_x\end{aligned}$$

- ▼ Champs magnétiques $\vec{H} = (\hat{k} \wedge \vec{E})/\tilde{Z}$:

$$\begin{aligned}\vec{H}_i &= +\frac{1}{\tilde{Z}_1} E_{i0} e^{-jk_i z} \hat{e}_y \\ \vec{H}_r &= -\frac{1}{\tilde{Z}_1} \tilde{E}_{r0} e^{+jk_i z} \hat{e}_y \\ \vec{H}_t &= +\frac{1}{\tilde{Z}_2} \tilde{E}_{t0} e^{-jk_t z} \hat{e}_y\end{aligned}$$

219



Incidence normale : conditions aux limites

- ▼ Appliquer les conditions aux limites (178) à $z = 0$
- ▼ (178a) : pas de composantes normales de \vec{E}
- ▼ (178b) : pas de composantes normales de \vec{B}
- ▼ (178c) : composantes tangentielles de \vec{E} (selon \hat{e}_x)

$$E_{i0} + \tilde{E}_{r0} = \tilde{E}_{t0}$$

- ▼ (178d) : composantes tangentielles de \vec{H} (selon \hat{e}_y)

$$\frac{E_{i0}}{\tilde{Z}_1} - \frac{\tilde{E}_{r0}}{\tilde{Z}_1} = \frac{\tilde{E}_{t0}}{\tilde{Z}_2}$$

220

Incidence normale : coefficients amplitude

- ▼ Coefficients de réflexion/transmission en amplitude :

$$\tilde{r} \triangleq \frac{\tilde{E}_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\tilde{Z}_2 - \tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_1} \quad (179)$$

$$\tilde{t} \triangleq \frac{\tilde{E}_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\tilde{Z}_2}{\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_1} \quad (180)$$

- ▼ Quelques propriétés

1. $1 + \tilde{r} = \tilde{t}$
2. r, t réels si milieux sans pertes : pas de déphasage
 - ▶ $r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} < 0$ si $Z_2 < Z_1$
 - ▶ Milieux non magnétiques : $Z_2 < Z_1 \implies \epsilon_1 > \epsilon_2$
 - ▶ $\epsilon_1 > \epsilon_2 \implies v_1 < v_2$ (milieu « lent » vers « rapide »)
3. Si milieu 2 conducteur parfait : $\tilde{Z}_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon' - j\frac{\sigma}{\omega}}} \rightarrow 0$, $r = -1$, $t = 0$

221



Incidence normale : coefficients puissance

▼ Puissance transportée :

$$I_i = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\tilde{Z}_1} \right\} E_{i0}^2$$

$$I_r = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\tilde{Z}_1} \right\} |\tilde{E}_{r0}|^2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\tilde{Z}_1} \right\} |\tilde{r}|^2 E_{i0}^2$$

$$I_t = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\tilde{Z}_2} \right\} |\tilde{E}_{t0}|^2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\tilde{Z}_2} \right\} |\tilde{t}|^2 E_{i0}^2$$

▼ Coefficients de réflexion/transmission en intensité :

$$R \triangleq \frac{I_r}{I_i} = |\tilde{r}|^2 \quad (181)$$

$$T \triangleq \frac{I_t}{I_i} = \frac{\operatorname{Re} \left\{ 1/\tilde{Z}_2 \right\}}{\operatorname{Re} \left\{ 1/\tilde{Z}_1 \right\}} |\tilde{t}|^2 = 1 - R \quad (182)$$

222

Incidence oblique sur une interface : définitions

- ▼ Interface entre deux milieux lhi à $z = 0$
- ▼ « Plan d'incidence » : défini par \hat{n} et \hat{k}_i
- ▼ « Angle d'incidence » θ_i : entre \hat{n} et \hat{k}_i ($0 \leq \theta_i \leq 90^\circ$)
- ▼ « Angle de réflexion » θ_r : entre \hat{n} et \hat{k}_r ($0 \leq \theta_r \leq 90^\circ$)
- ▼ « Angle de réfraction » θ_t : entre \hat{n} et \hat{k}_t ($0 \leq \theta_t \leq 90^\circ$)
- ▼ Incidence *oblique* :

$$\vec{k}_i = k_i \sin \theta_i \hat{e}_x + k_i \cos \theta_i \hat{e}_z$$

$$\vec{k}_r = k_i \sin \theta_r \hat{e}_x - k_i \cos \theta_r \hat{e}_z \quad (k_r = k_i)$$

$$\vec{k}_t = k_t \sin \theta_t \hat{e}_x + k_t \cos \theta_t \hat{e}_z$$

- ▼ Polarisation *perpendiculaire* (\perp , s, TE) : $\vec{E} \perp$ plan d'incidence (TD 14.2)
- ▼ Polarisation *parallèle* (\parallel , p, TM) : $\vec{E} \parallel$ plan d'incidence (TD 14.3)
- ▼ Cas général : perpendiculaire + parallèle
- ▼ Milieux non magnétiques ($\mu_{1,2} = \mu_0$) sans pertes ($\epsilon_{1,2}$ réels)
- ▼ $k = k_0 \sqrt{\epsilon_r} = nk_0$
- ▼ $Z = Z_0 / \sqrt{\epsilon_r} = Z_0 / n$

223



Incidence oblique \perp : champs

- ▼ Polarisation *perpendiculaire* (\perp , s, TE) : $\vec{E} \perp$ plan d'incidence (TD 14.2)
- ▼ Champs électriques :

$$\vec{E}_i = E_{i0} e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}} \hat{e}_y \quad \vec{E}_r = E_{r0} e^{-j \vec{k}_r \cdot \vec{r}} \hat{e}_y \quad \vec{E}_t = E_{t0} e^{-j \vec{k}_t \cdot \vec{r}} \hat{e}_y$$

- ▼ Champs magnétiques $\vec{H} = (\hat{k} \wedge \vec{E})/Z$:

$$\vec{H}_i = \frac{1}{Z_1} E_{i0} e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}} (-\cos \theta_i \hat{e}_x + \sin \theta_i \hat{e}_z)$$

$$\vec{H}_r = \frac{1}{Z_1} E_{r0} e^{-j \vec{k}_r \cdot \vec{r}} (+\cos \theta_r \hat{e}_x + \sin \theta_r \hat{e}_z)$$

$$\vec{H}_t = \frac{1}{Z_2} E_{t0} e^{-j \vec{k}_t \cdot \vec{r}} (-\cos \theta_t \hat{e}_x + \sin \theta_t \hat{e}_z)$$

224

Incidence oblique \perp : Snel – Descartes

- ▼ Appliquer les conditions aux limites (178) à $z = 0$
- ▼ (178c) : composantes tangentielles de \vec{E} (selon \hat{e}_y)

$$E_{i0} e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}} + E_{r0} e^{-j \vec{k}_r \cdot \vec{r}} = E_{t0} e^{-j \vec{k}_t \cdot \vec{r}} \quad \forall \vec{r} = (x, y, 0)$$

- ▼ Égalité possible à condition que :

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \quad \forall \vec{r} = (x, y, 0)$$

« Continuité de la phase sur l'interface »

- ▼ Conséquences :

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} \Rightarrow \sin \theta_i = \sin \theta_r \Rightarrow \boxed{\theta_i = \theta_r} \quad (183)$$

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \Rightarrow \boxed{n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t} \quad (184)$$

Loi de (Willebrord) Snel – Descartes

- ▼ Simplifier la notation : $\theta_1 \triangleq \theta_i = \theta_r$ et $\theta_2 \triangleq \theta_t$

225



Incidence oblique \perp : conditions aux limites

- ▼ Appliquer les conditions aux limites (178) à $z = 0$
- ▼ (178a) : pas de composantes normales de \vec{E}
- ▼ (178b) : composantes normales de \vec{B} (selon \hat{e}_z)

$$\mu_0 \frac{1}{Z_1} E_{i0} \sin \theta_1 + \mu_0 \frac{1}{Z_1} E_{r0} \sin \theta_1 = -\mu_0 \frac{1}{Z_2} E_{t0} \sin \theta_2$$

- ▼ (178c) : composantes tangentielles de \vec{E} (selon \hat{e}_y)

$$E_{i0} + E_{r0} = E_{t0}$$

$$(178b) + Z = Z_0/n + \text{Snell-Descartes} = (178c)$$

- ▼ (178d) : composantes tangentielles de \vec{H} (selon \hat{e}_x)

$$-\frac{1}{Z_1} E_{i0} \cos \theta_1 + \frac{1}{Z_1} E_{r0} \cos \theta_1 = \frac{1}{Z_2} E_{t0} \cos \theta_2$$

- ▼ Mêmes relations en incidence normale (cf. tr. #220) si on définit $Z_{\perp} \triangleq Z / \cos \theta$

226

Incidence oblique \perp : coefficients amplitude



- ▼ Coefficients de réflexion/transmission en amplitude :

$$r_{\perp} \triangleq \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{Z_{2\perp} - Z_{1\perp}}{Z_{2\perp} + Z_{1\perp}} \quad (185)$$

$$t_{\perp} \triangleq \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2Z_{2\perp}}{Z_{2\perp} + Z_{1\perp}} \quad (186)$$

$$Z_{1\perp} \triangleq \frac{Z_1}{\cos \theta_1}$$

$$Z_{2\perp} \triangleq \frac{Z_2}{\cos \theta_2}$$

- ▼ r_{\perp}, t_{\perp} dépendent de θ_1
- ▼ $r_{\perp} \neq 0$ (TD 14.2g)
- ▼ Si milieu 2 conducteur parfait : $Z_2 = 0$, $r_{\perp} = -1$, $t_{\perp} = 0$
- ▼ $Z_{\perp} = |E_{\tan}|/|H_{\tan}|$ (comp. tangentielles à l'interface, ici $|E_y|/|H_x|$)

227



Incidence oblique \perp : coefficients puissance

- ▼ Puissance transportée de façon *normale à l'interface* :

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{2} \frac{1}{Z_1} E_{i0}^2 \cos \theta_1 \\ I_r &= \frac{1}{2} \frac{1}{Z_1} E_{r0}^2 \cos \theta_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_1} r_{\perp}^2 E_{i0}^2 \cos \theta_1 \\ I_t &= \frac{1}{2} \frac{1}{Z_2} E_{t0}^2 \cos \theta_2 = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_2} t_{\perp}^2 E_{i0}^2 \cos \theta_2 \end{aligned}$$

- ▼ Coefficients de réflexion/transmission en intensité :

$$R_{\perp} \triangleq \frac{I_r}{I_i} = r_{\perp}^2 \quad (187)$$

$$T_{\perp} \triangleq \frac{I_t}{I_i} = \frac{1/Z_2 \cos \theta_2}{1/Z_1 \cos \theta_1} t_{\perp}^2 = 1 - R_{\perp} \quad (188)$$

228

Incidence oblique \parallel : champs

- ▼ Polarisation *parallelèle* (\parallel , s, TM) : $\vec{E} \parallel$ plan d'incidence (TD 14.3)
▼ Champs magnétiques :

$$\vec{H}_i = \frac{1}{Z_1} E_{i0} e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}} \hat{e}_y \quad \vec{H}_r = \frac{1}{Z_1} E_{r0} e^{-j \vec{k}_r \cdot \vec{r}} \hat{e}_y \quad \vec{H}_t = \frac{1}{Z_2} E_{t0} e^{-j \vec{k}_t \cdot \vec{r}} \hat{e}_y$$

- ▼ Champs électriques $\vec{E} = (\vec{H} \wedge \hat{k})Z$:

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= E_{i0} e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}} (+ \cos \theta_i \hat{e}_x - \sin \theta_i \hat{e}_z) \\ \vec{E}_r &= E_{r0} e^{-j \vec{k}_r \cdot \vec{r}} (- \cos \theta_r \hat{e}_x - \sin \theta_r \hat{e}_z) \\ \vec{E}_t &= E_{t0} e^{-j \vec{k}_t \cdot \vec{r}} (+ \cos \theta_t \hat{e}_x - \sin \theta_t \hat{e}_z) \end{aligned}$$

- ▼ Même procédure que celle du cas \perp (cf. tr.#225) :

1. Continuité de phase sur l'interface : $\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r}$
2. Snel – Descartes : $\theta_i = \theta_r$ et $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$
3. $\theta_1 \triangleq \theta_i = \theta_r$ et $\theta_2 \triangleq \theta_t$

229



Incidence oblique \parallel : conditions aux limites

- ▼ Appliquer les conditions aux limites (178) à $z = 0$
- ▼ (178a) : composantes normales de \vec{D} (selon \hat{e}_z)

$$-\epsilon_1 E_{i0} \sin \theta_1 - \epsilon_1 E_{r0} \sin \theta_1 = -\epsilon_2 E_{t0} \sin \theta_2$$

- ▼ (178b) : pas de composantes normales de \vec{B}
- ▼ (178c) : composantes tangentielles de \vec{E} (selon \hat{e}_x)

$$E_{i0} \cos \theta_1 - E_{r0} \cos \theta_1 = E_{t0} \cos \theta_2$$

- ▼ (178d) : composantes tangentielles de \vec{H} (selon \hat{e}_y)

$$\frac{E_{i0}}{Z_1} + \frac{E_{r0}}{Z_1} = \frac{E_{t0}}{Z_2}$$

$$(178a) + Z = Z_0/n + \text{Snell-Descartes} = (178d)$$

- ▼ On définit $Z_{\parallel} \triangleq Z \cos \theta$

230

Incidence oblique \parallel : coefficients amplitude



- ▼ Coefficients de réflexion/transmission en amplitude :

$$r_{\parallel} \triangleq -\frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{Z_{2\parallel} - Z_{1\parallel}}{Z_{2\parallel} + Z_{1\parallel}} \quad (189)$$

$$t_{\parallel} \triangleq \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2Z_{2\parallel}}{Z_{2\parallel} + Z_{1\parallel}} \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \quad (190)$$

$$Z_{1\parallel} \triangleq Z_1 \cos \theta_1$$

$$Z_{2\parallel} \triangleq Z_2 \cos \theta_2$$

- ▼ $r_{\parallel} \triangleq -E_{r0}/E_{i0}$ parce que si $\theta_1 \approx 0$, \vec{E}_i et \vec{E}_r sont opposés
- ▼ r_{\parallel} , t_{\parallel} dépendent de θ_1
- ▼ $r_{\parallel} = 0$ si $\theta_1 = \theta_B$: angle de Brewster, $\tan \theta_B = Z_1/Z_2$ (TD 14.3d)
- ▼ Si milieu 2 conducteur parfait : $Z_2 = 0$, $r_{\parallel} = -1$, $t_{\parallel} = 0$
- ▼ $Z_{\parallel} = |E_{\tan}|/|H_{\tan}|$ (comp. tangentielles à l'interface, ici $|E_x|/|H_y|$)

231



Incidence oblique \parallel : coefficients puissance

▼ Puissance transportée de façon *normale à l'interface* :

$$I_i = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_1} E_{i0}^2 \cos \theta_1$$

$$I_r = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_1} E_{r0}^2 \cos \theta_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_1} r_{\parallel}^2 E_{i0}^2 \cos \theta_1$$

$$I_t = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_2} E_{t0}^2 \cos \theta_2 = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_2} t_{\parallel}^2 E_{i0}^2 \cos \theta_2$$

▼ Coefficients de réflexion/transmission en intensité :

$$R_{\parallel} \triangleq \frac{I_r}{I_i} = r_{\parallel}^2 \quad (191)$$

$$T_{\parallel} \triangleq \frac{I_t}{I_i} = \frac{1/Z_2 \cos \theta_2}{1/Z_1 \cos \theta_1} t_{\parallel}^2 = 1 - R_{\parallel} \quad (192)$$

232

