

Vous trouverez ici le résumé de ce qui a été présenté pour cette leçon ainsi qu'une liste de manip pouvant être réalisées au cours de celle-ci.

Table des matières

1	Objectifs pédagogiques de la LP	1
2	Objectifs et messages forts de la LP (disciplinaire)	1
3	Introduction générale de la leçon	2
4	Proposition de plan	2
4.1	Ondes réfléchies et ondes transmises	2
4.2	Ondes évanescentes	2
4.3	Applications	3
5	Ouvertures possibles, prolongements et conclusion de la leçon	4
6	Subtilités de la leçon et points disciplinaires essentiels	4
7	Exercices de base et applications intéressantes pour la leçon	4
8	Bibliographie pour construire la leçon	4
9	Expériences illustratives, simulations numériques et exploitation pédagogique	4
10	Critique des choix pédagogiques de la leçon	5

1 Objectifs pédagogiques de la LP

• Cette section doit vous permettre d'identifier les concepts phares de la LP à transmettre, déclinés sous la forme de compétences et utilisant des verbes d'action (éventuellement).

- ▷ Comprendre que derrière le phénomène de réflexion totale il y a une onde évanescente.
- ▷ Savoir caractériser une onde évanescente (propriétés).
- ▷ Avoir une idée des applications, en microscopie de champ proche par exemple.

2 Objectifs et messages forts de la LP (disciplinaire)

• Présenter brièvement et de manière structurée les objectifs disciplinaires de la LP. Insister sur les articulations logiques entre concepts (aspect didactique) et faire ressortir les différents messages de la LP, ainsi que leur cohérence. Cette partie est complémentaire de la précédente. L'ensemble doit vous permettre d'avoir un discours percutant, clair et circonstancié pour l'oral.

- ▷ La notion de réflexion totale découle des équations de Maxwell, et donc que les lois de Snell-Descartes ne sont que des propriétés des ondes électromagnétiques.
- ▷ Un vecteur d'onde peut être complexe, comme pour le cas des plasmas.
- ▷ Par analyse énergétique de l'onde on montre qu'il n'y a pas de propagation de l'énergie pour une onde évanescente dans une direction donnée.

[†]arnaud.le_diffon@ens-paris-saclay.fr

3 Introduction générale de la leçon

• A construire à partir des deux sections précédentes. Rédiger une introduction qui donne envie à l'auditoire et rassemblant les messages forts pédagogiques et disciplinaires de la LP. Dès le début de votre exposé, vous devez transmettre l'idée que vous serez une bonne professeure et un bon professeur. Ces quelques minutes sont essentielles car le jury se fait une bonne idée de la prestation dès les premières minutes de l'exposé. Il est toujours plus favorable d'avoir le jury de son côté dès le début :-).

La leçon que je vais vous présenter sur la réflexion totale, les ondes évanescentes et leurs applications va vous permettre de faire le lien entre ce que vous connaissez de l'électromagnétisme et l'optique géométrique et de découvrir les applications qui ont pu être réalisées grâce à la compréhension de la lumière en tant qu'onde électromagnétique. De simples expériences vous permettront d'apprivoiser la notion d'onde évanescence, présente derrière toute réflexion totale et de constater la finesse des détails qu'une telle onde peut révéler.

4 Proposition de plan

• La structure du plan en trois parties n'est pas figée : c'est un exemple. Cette partie peut vous permettre de tester plusieurs plans également : un plan brouillon avant le passage de la LP dans l'année, celui présenté dans l'année, le plan définitif que vous aurez construit pendant les révisions ou avant. Il est important de réfléchir aux transitions entre parties : elles structurent votre discours et votre progression et renforcent la cohérence et l'enchaînement de vos développements (aspect didactique).

4.1 Ondes réfléchies et ondes transmises

Dans cette première partie on s'intéresse à retrouver les équations de l'optique géométrique à partir des équations de Maxwell et on donne

► Des équations de Maxwell aux lois de Snell-Descartes

On prend une interface plane vide (air)-diélectrique et on exprime les champs de manière générale dans les deux domaines :
$$\begin{cases} \vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{i(\omega_i t - k_{xi}x - k_{yi}y)} \\ \vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{i(\omega_r t - k_{xr}x - k_{yr}y)} \\ \vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(\omega_t t - k_{xt}x - k_{yt}y)} \end{cases}$$
 Les relations de passage permettent d'écrire :

$\omega = \omega_r = \omega_t$ et : $k_{yi} = k_{yr} = k_{yt}$ et on suppose qu'ils ont vus en L1 : $k^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c^2}$. On en déduit alors les lois de Descartes (constructions géométriques avec les composantes des différents k peuvent être utiles).

$$\theta_i = \theta_r \text{ et } n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

► Angle critique d'entrée dans une fibre optique

Ce calcul rapide permet de réintroduire la notion d'angle critique, et application numérique.

Transition didactique : La réflexion totale semble 'magique' avec l'optique géométrique. Les rayons lumineux semblent 'rebondir' sur les interfaces à l'intérieur de la fibre. Les équations de Maxwell ne peuvent-elles pas apporter des précisions à propos de ce qui se passe au niveau du point de rebroussement, dans le détail ? Expérience de transition : les prismes de paraffine : Il y a quelque chose de l'onde derrière l'interface où il y a réflexion totale (sans le deuxième prisme, on ne détecte rien, et en rapprochant le deuxième prisme du premier, on détecte de plus en plus de signal).

4.2 Ondes évanescentes

► Retour aux équations de Maxwell

On peut trouver à partir des relations précédentes : $k_{xt}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} (1 - n^2 \sin^2(\theta_i))$ Et avec la condition d'angle critique : $\theta_i > \theta_c \Leftrightarrow n_1 \sin \theta_c > n_2$ soit : $k_{xt} = \pm i k_i$ avec k_i introduit par l'occasion. L'onde transmise s'écrit donc sous la forme : $\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{-k_i x} e^{i(\omega t - k_{yi}y)}$ Différentes remarques peuvent être faites ici :

▷ L'onde se propage suivant $+\vec{e}_y$

▷ Pas de terme de propagation et atténuation en exponentielle décroissante dans la direction $+\vec{e}_x$.

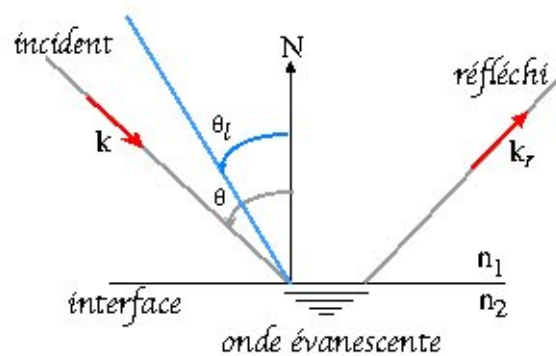


Fig. 1 – Réflexion totale faisant apparaître une onde évanescente et le décalage du rayon réfléchi appelé effet de Goos-Hänchen

► Mesure expérimentale

Mise en évidence (qualitative mais facilement quantifiable) d'ondes évanescentes à l'aide d'émetteurs et de récepteurs micro-ondes et des prismes de paraffine. On peut retrouver la décroissance exponentielle de l'onde évanescente. cf Electromagnétisme II de Feynman dont ce cours s'inspire beaucoup).

► Bilan énergétique

Calcul du vecteur de Poynting :
$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{E_{0t}^2 e^{-2k_i x}}{2\omega\mu_0} k_{yi} \vec{e}_y$$

▷ Cette onde propage de l'énergie dans la direction $+\vec{e}_y$.

▷ Elle est donc évanescente seulement par rapport à la direction $\vec{e}_x$.

On peut donc définir maintenant la notion d'onde évanescente : Les ondes évanescentes apparaissent de façon générale comme des solutions possibles des équations de Maxwell en présence d'interfaces, planes ou non. Elles font partie d'un type très général de solutions dites de champ proche, dont on trouve maintes applications dans les technologies qui leur sont liées : les microscopies de champ proche.

Transition didactique : On va donc maintenant s'intéresser aux différentes applications qui permettent ces ondes.

4.3 Applications

► effet Goos-Hänchen

Voir figure.

► Microscopie en champ proche

En venant sonder la matière à des distances de l'ordre de la longueur d'onde, avec une sonde de diamètre inférieur à celle-ci, on peut imager un objet avec une résolution inférieure à la longueur d'onde, car on s'affranchit du phénomène de diffraction qui est limitant pour la microscopie optique classique.

5 Ouvertures possibles, prolongements et conclusion de la leçon

- Cette partie doit vous permettre de structurer la fin de votre LP et la conclusion. Il faut présenter les couplages de votre leçon avec d'autres sujets, les approfondissements, les applications éventuelles, ...
- ▷ Ce qui a pu être vu : Le lien électromagnétisme-optique géométrique, la caractérisation de l'onde évanescente, solution des équations de Maxwell et une application : la microscopie en champ proche.
- ▷ Ouverture possible sur l'effet tunnel (mais vu seulement en L3, -> abordé en L2 en quantique en PC).

6 Subtilités de la leçon et points disciplinaires essentiels

- Faire figurer ici les incontournables points disciplinaires à maîtriser. Typiquement, ce sont les notions qui ne doivent pas souffrir de carence de compréhension sous peine de sanction lourde par le jury. Également, les différentes subtilités nécessitant un certain recul et/ou du temps d'appropriation doivent apparaître ici. Il est vivement conseillé de consigner dans cette partie les questions des correcteurs, ainsi que les réponses à ces questions. Cela vous permettra d'évaluer la quantité de choses qui vous restent à consolider et le temps à y consacrer avant la fin de la préparation (c'est-à-dire avant les oraux de l'agreg).
- ▷ être au point sur ce qu'est une onde évanescente, une onde stationnaire, progressive etc...
- ▷ Utiliser les conditions de passage, en les adaptant au matériau étudié (ici un diélectrique, donc les courants surfaciques sont nuls mais la densité de charge surfacique est non nulle)
- ▷ Une onde évanescente ne transporte pas d'énergie mais n'est pas pour autant une onde "fantôme" ou "virtuelle", on peut en effet faire repropager le signal à partir de cette l'amplitude de l'onde évanescente. (expérience avec les prismes de paraffine)

7 Exercices de base et applications intéressantes pour la leçon

- Faire figurer la bibliographie pour chaque exemple et chaque application. Le but de cette partie est de vous faire réfléchir à des développements pour la leçon, certains élémentaires et d'autres plus originaux. Cette partie sert également à planifier la révision des calculs de base et ceux plus complexes à maîtriser, notamment pour les écrits. Pour les oraux, cela vous permettra également d'orienter votre choix final vers les développements que vous préférez et que vous maîtrisez, à partir d'une liste assez fournie mais avec un premier tri.
- ▷ Calcul de l'angle critique d'entrée d'une fibre optique, application directe des lois de Snell-Descartes retrouvées auparavant.
- ▷ Autres calculs : cf Électromagnétisme II de Richard Feynman.
- ▷ Avancé : Effet Goos-Hänchen

8 Bibliographie pour construire la leçon

- Tout est dans le titre : répertorier ici la biblio vitale pour construire la LP, et éventuellement celle pour aller plus loin. Cela vous facilitera le travail pour vous y retrouver entre les écrits et les oraux.
- ▷ Voir Électromagnétisme II de Feynman dont sont extraites les parties I et II de ce cours.
- ▷
- ▷

9 Expériences illustratives, simulations numériques et exploitation pédagogique

- Lister ici les expériences illustratives que vous pourriez utiliser dans votre leçon, ainsi que les simulations numériques que vous souhaitez exploiter. Il peut être intéressant également de qualifier l'utilisation pédagogique de l'expérience (exp pour introduire un problème, pour illustrer, pour confirmer,...) et de consigner l'analyse des résultats et l'interprétation. Même chose pour les simulations numériques : n'hésitez pas à expliquer l'intérêt de la simulation dans le cadre de votre leçon. N'oubliez pas de faire des références dans vos plans pour faciliter l'inclusion des expériences et simulations dans vos leçons.
- ▷ Expérience de la fibre optique qui permet de (ré) introduire la notion de réflexion totale, potentiellement hors sujet selon comment la problématique est amenée.

- ▷ Expérience de visualisation de l'empreinte digitale des doigts tenant un verre rempli d'eau => permet de "visualiser" l'ordre de grandeur de l'onde évanescente optique.
- ▷ Expérience avec les prismes de paraffine : permet de retrouver la décroissance exponentielle de l'amplitude de l'onde évanescente.

10 Critique des choix pédagogiques de la leçon

- *Tribune libre où vous réalisez une justification des choix pédagogiques opérés dans la LP, ainsi que les choix d'expériences et simulations numériques utilisées. Ce genre d'exercice sera très formateur pour vous donner de l'aisance à l'oral et montrer au jury une réflexion personnelle et distanciée dans la construction de votre leçon. Cette justification vous sera demandée lors de la phase d'entretien avec le jury, après votre exposé de 40 minutes.*
- ▷ Choix du niveau L2 car s'inscrit bien après les différents chapitres traitant de l'électromagnétisme.
- ▷ Le choix de retrouver les lois de Descartes depuis les équations de Maxwell est discutable eu égard le titre de la leçon... Centrer la leçon d'avantage sur les ondes évanescentes pourrait-être bénéfique.

- BONNE PRÉPARATION -