

L'électronique au service de l'enseignement de l'optique

par **Alain LE RILLE**

Math spé MP

Lycée Camille Pissarro - 95300 Pontoise

alain.lerille@prepas.org

RÉSUMÉ

Des montages électriques simples et des programmes Maple sont présentés, afin d'illustrer le cours d'optique en classes préparatoires. Grâce à du matériel classique d'électrocinétique de laboratoire, ou d'un ordinateur, ils permettent de mieux expliquer deux concepts délicats en optique : la polarisation d'une onde électromagnétique plane progressive monochromatique et l'interférence de deux ondes monochromatiques synchrones.

1. POLARISATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

1.1. Intérêt

On trouve dans les livres de cours (voir en particulier [1] p. 212-218, [2] p. 39 et [3] p. 156-158) l'étude de la polarisation d'une onde électromagnétique plane, progressive, monochromatique. Dans un plan de phase (perpendiculairement à la direction de propagation Oz), le champ électrique peut être décomposé suivant :

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cdot \cos(\omega_e \cdot t) \\ E_y = E_{0y} \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varphi) \end{cases}$$

L'état de polarisation de l'onde dépend du déphasage φ , comme résumé sur la figure 1 (cf. page ci-après). Ceci est habituellement étayé par le calcul, mais nous proposons ici d'en faire l'illustration grâce à une visualisation directe sur un écran d'oscilloscope ou d'ordinateur.

1.2. Principe

Nous nous intéresserons aux grandeurs :

$$\begin{cases} V_x = V_{0x} \cdot \cos(\omega_e \cdot t) \\ V_y = V_{0y} \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varphi) \end{cases}$$

Pour plus de commodité, on peut choisir $V_{0y} = V_{0x} = V_0$ (dans le montage électrique, les

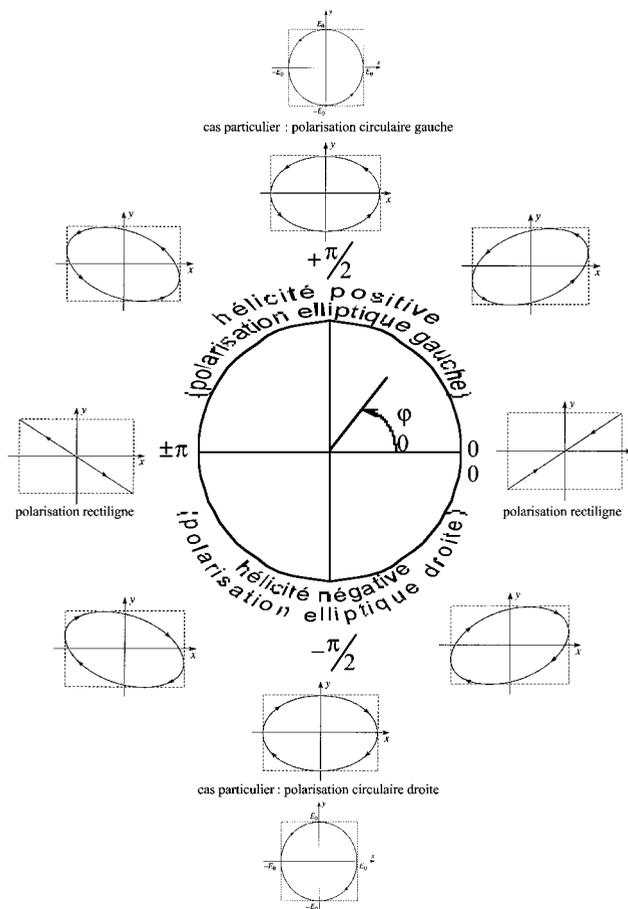


Figure 1

gains en X et Y de l'oscilloscope permettent artificiellement de changer indépendamment les amplitudes des signaux).

Bien entendu, le domaine de fréquence utilisé pour la manipulation électrocinétique (ARQS) est totalement différent de celui de l'optique ($\omega_e \approx 10^3 \text{ Hz} \ll \omega_o \approx 10^{15} \text{ Hz}$), et il convient de le faire remarquer aux élèves.

1.3. Réalisation analogique

Si l'on veut réaliser un montage électrocinétique, il nous faut disposer de deux tensions sinusoïdales, synchrones mais déphasées. On peut pour cela utiliser deux générateurs basses fréquences, l'un déclenchant l'autre. Mais un tel déclenchement externe

n'étant pas toujours prévu, nous proposons la réalisation d'un déphaseur analogique (cf. [5] p. 107) dont le schéma est donné figure 2. Ce montage est facilement réalisable grâce à un amplificateur opérationnel, quelques résistances et capacités, et une boîte de résistance variable (ou de capacité variable). Les deux tensions sont alors déphasées de $\psi = -2 \cdot \text{Arctan}(R \cdot C \cdot \omega_c)$, ainsi ψ varie dans le domaine $]-\pi, 0]$.

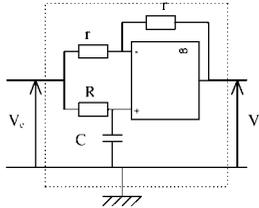


Figure 2

Si on s'intéresse au cas $\varphi > 0$, V_x est alors délivré par un générateur basse fréquence et envoyé en entrée du déphaseur, tandis que V_y est obtenu en sortie du déphaseur. Dans le cas où $\varphi < 0$, on échange le rôle de V_x et V_y .

On suit expérimentalement la valeur de φ grâce à un phasemètre [6]. Il en existe dans le commerce mais on peut aussi en réaliser au laboratoire (cf. [5-8]), ou encore utiliser un oscilloscope numérique.

On peut choisir une fréquence assez basse : 4 Hz est un bon compromis qui permet à la fois de visualiser la forme elliptique et son sens de parcours.

Pour cette fréquence, le déphaseur fonctionne bien avec $R = 500 \text{ k}\Omega$ et $C \in [100 \text{ pF}; 1 \mu\text{F}]$. On utilise par exemple une boîte de capacités à cinq décades.

1.4. Réalisation informatique

Le programme suivant, écrit en Maple, permet la même visualisation de l'état de polarisation (y compris l'hélicité, grâce à l'animation permise par l'instruction « animate ») :

```
> restart;
> with(plots):
>
> vx:=t->v0x*cos(t);
> vy:=t->v0y*cos(t-phi);
>
> v0x:=1;
> v0y:=1.4;
> phi:=-2*Pi/3;
> image:= plot( [vx(t),vy(t),t=0..2*Pi], scaling=CONSTRAINED, color=red, thickness=1);
> bouge:= animate( [vx(t),vy(t), t=0..2*Pi], t=0..2*Pi, color=black, frames=25, thickness=5);
> display(image,bouge);
```

Ce programme permet d'observer en particulier (cf. la figure 3 ci-après) sur fond

d'ellipse rouge (la polarisation) le déplacement d'un carré noir (donc l'hélicité).

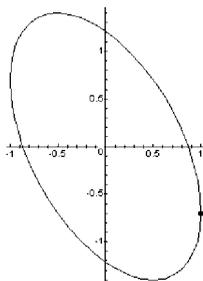


Figure 3

2. INTERFÉRENCES DE DEUX ONDES MONOCHROMATIQUES SYNCHRONES

2.1. Intérêt

Un autre problème pédagogique se pose lorsque l'on introduit le concept d'interférence. Pour débiter cette étude, on a l'habitude de s'intéresser à deux ondes parfaitement synchrones déphasées de φ (c'est-à-dire issues d'une même source primaire et de longueur de cohérence infinie). Pour plus de détails, on se référera aux ouvrages [1] (p. 240-241) et [4] (p. 81-83), mais rappelons les principaux points de la démonstration.

Le phénomène physique des interférences repose sur deux points cruciaux : le premier est que les amplitudes des ondes s'ajoutent. Deuxièmement, les détecteurs optiques (œil, plaque photographique, ...) sont lents et quadratiques : ils sont sensibles à la valeur moyenne (le temps d'intégration est long devant la période de l'onde) du carré de l'amplitude (c'est l'intensité lumineuse).

La démonstration théorique aboutit à la formule $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2}$, qui (si $I_1 = I_2 = I_0$), se simplifie en $I = 2.I_0(1 + \cos \varphi)$.

2.2. Réalisation analogique

Nous pouvons illustrer, pas à pas, le raisonnement qui nous conduira à la formule classique de l'interférence de deux sources parfaitement synchrones, déphasées de φ .

Représentation des amplitudes des ondes

$$\text{Deux tensions : } \begin{cases} V_1 = V_0 \cdot \cos(\omega_e t) \\ V_2 = V_0 \cdot \cos(\omega_e t - \varphi) \end{cases}$$

vont représenter les amplitudes de ces deux sources parfaitement synchrones, déphasées de φ . On utilisera pour obtenir ces deux tensions un générateur basse fréquence et le

montage déphaseur déjà décrit (cf. figure 2).

Là encore, le domaine de fréquence utilisé pour la manipulation électrocinétique est très différent de celui de l'optique ($\omega_e \approx 10^3 \text{ Hz} \ll \omega_o \approx 10^{15} \text{ Hz}$), et il convient de le faire remarquer aux élèves.

À titre d'information, le tableau 1 donne les déphasages obtenus, pour différentes valeurs de la résistance R (avec $\frac{\omega_e}{2\pi} = 500 \text{ Hz}$, $C = 22 \text{ nF}$).

R	φ
0 Ω (fil)	0°
1,5 $\text{k}\Omega$	90°
5,0 $\text{M}\Omega$	180°

Tableau 1

On visualise V_x et V_y sur un oscilloscope, en mode « CHOP », et on suit expérimentalement la valeur de φ grâce à un phasemètre.

Les amplitudes s'ajoutent

Le montage prévoit un additionneur analogique. On réalise facilement un tel additionneur ([5], p. 16) : le schéma de ce montage est présenté figure 4.

L'intensité est la moyenne quadratique de l'amplitude

Le montage est prolongé par un multiplicateur qui délivre une tension proportionnelle au carré de la tension d'entrée. Il existe des composants (AD534, cf. [5] p. 309) vendus pour réaliser une telle fonction, mais on peut les trouver déjà montés par exemple dans les boîtiers didactiques de modulation d'amplitude.

Un voltmètre continu (utilisé en mode « DC »), branché à la sortie du multiplicateur (le schéma du montage est présenté figure 5) affiche la valeur moyenne de la tension. On lit par conséquent sur le voltmètre (en volt !) une grandeur proportionnelle à l'intensité.

Mesures préalable des intensités I_1 et I_2

Avant toute manipulation, il convient de mesurer - grâce à notre montage électro-

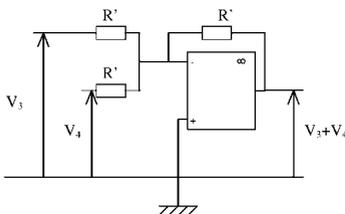


Figure 4

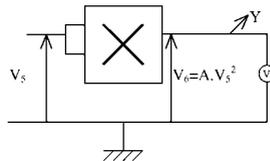


Figure 5

nique - préalablement les intensités I_1 et I_2 . Pour mesurer I_1 (respectivement I_2), on réalisera le branchement de la première source sur une des entrées de l'additionneur : $v_3 = v_1$ (respectivement $v_3 = v_2$), tandis que la seconde sera reliée à la masse ($v_4 = 0$).

Grâce à un réglage judicieux du niveau de sortie du générateur basse fréquence, on peut obtenir un affichage égal à 1 V. Ceci nous évitera en particulier tout risque de saturation de l'amplificateur opérationnel et du multiplicateur.

Mesure de l'intensité résultante I

On réalisera ensuite le branchement des sources sur les entrées de l'additionneur ($v_3 = v_1$ et $v_4 = v_2$).

Effet du déphasage φ sur les interférences

On peut alors montrer très quantitativement grâce au voltmètre les effets du déphasage φ sur l'intensité résultante : l'interférence est constructive (on mesure 4 V) quand les deux sources sont en phase (pour $\varphi = 0$), destructive (≈ 0 V) quand elles sont en opposition de phase (pour $\varphi = 180^\circ$), et il n'y a pas d'interférence (2 V) lorsqu'elles sont en quadrature de phase (pour $\varphi = 90^\circ$).

2.3. Réalisation informatique

Le programme suivant, écrit en Maple, permet le calcul de l'intensité résultant de l'interférence :

```
> restart;
> with(plots):
> Digits:=2:
>
> s[1]:=A[1]*cos(2*Pi*t/T);
> s[2]:=A[2]*cos(2*Pi*t/T+phi);
> T:=1e-15: # période de l'onde lumineuse
> Tm:=1e-3: # période d'intégration du détecteur
>
> intensité:=s->evalf(Int(s^2,t=0..Tm,3)/Tm):
>
> A[1]:=1: intensité(s[1]); # intensité de l'onde n°1
> A[2]:=1: intensité(s[2]); # intensité de l'onde n°2
> phi:=2*Pi/5: # déphasage entre les deux ondes
> onde1:=plot(s[1],t=0..2*T,color=red,thickness=1): onde2:=plot(s[2],t=0..2*T,color=red,thickness=1):
onde:=plot(s[1]+s[2],t=0..2*T,color=black,thickness=3):
tout:=display (onde1,onde2,onde);
> intensité(s[1]+s[2]); # intensité résultant des interférences
```

On voit (cf. figure 6) aussi le tracé des amplitudes des deux ondes (en traits fins), et de l'onde résultante (en trait épais).

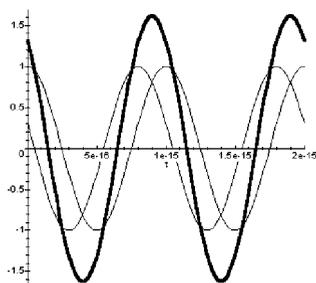


Figure 6

CONCLUSION

Ainsi, Maple permet de tracer rapidement des courbes que l'on dessine assez lentement (et avec plus ou moins de bonheur !) au tableau. C'est est pour le physicien un des principaux intérêts de ce langage.

Nous avons vu aussi de simples montages électrocinétiques qui permettaient de la même façon d'illustrer le cours d'optique.

Plus qu'une analogie, c'est, du point de vue théorique, formellement le même phénomène d'onde électromagnétique sinusoïdale qui intervient pour la lumière et à l'oscilloscope. Seul le domaine de fréquence varie, sur plus de dix ordres de grandeur...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PÉREZ J.-P. *Optique - géométrique, ondulatoire et polarisation*. 3^e édition - Masson.
- [2] MOUCHET A. *Apprendre les ondes - Cours et exercices corrigés*. CAPES de physique chimie, Dunod.
- [3] FAROUX J.-P. et RENAULT J. *Électromagnétisme 2*. Collection J'intègre, Dunod.
- [4] GIÉ H., SARMANT J.-P., OLIVIER S. et MORE C. *Physique Spé - MP*, MP et PT*, PT*. Éditions Tec & Doc.
- [5] AUBERT D. *Dictionnaire de physique expérimentale - Tome III : l'électronique*. Éditions Pierron.
- [6] VELAY B. Vous avez dit : « phasemètre » ? *Bull. Un. Phys.*, mars 1992, vol. 86, n° 742, p. 409-415.
- [7] JULIARD Ph. Réalisation d'un phasemètre. *Bull. Un. Phys.*, mars 1992, vol. 86, n° 742, p. 417-423.
- [8] LAVERTU G. Phasemètre pour travaux pratiques. *Bull. Un. Phys.*, mars 1992, vol. 86, n° 742, p. 425-433.