

*N.B. : Le candidat attachera la plus grande importance à la **clarté**, à la **précision** et à la **concision** de la **rédaction**. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.*

**RAPPEL DES CONSIGNES**

- Utiliser uniquement un **stylo noir ou bleu foncé non effaçable** pour la rédaction de votre composition ; **d'autres couleurs, excepté le vert**, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les **schémas** et la **mise en évidence des résultats**.
- **Ne pas utiliser de correcteur**.
- **Numéroter les copies** : "i/nombre total".
- **Respecter les notations** de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la **numérotation de la question posée**.
- **Écrire le mot FIN à la fin de votre composition**.

**Ex 1 : Bienvenue dans les Landes : sa forêt, ses traditions, ses plages**



**Photo 1** - Vue aérienne de la "Côte d'Argent", visible sur le site officiel du Comité Départemental du Tourisme des Landes : [www.tourismelandes.com](http://www.tourismelandes.com)

**Données :**

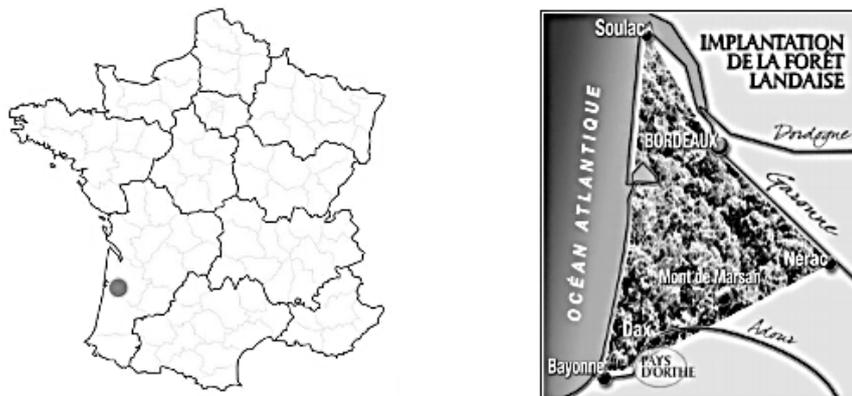
Élément chimique	H	C	O	Na	P	S	Ti	I
Masse molaire (g·mol <sup>-1</sup> )	1	12	16	23	31	32	48	127

Constante molaire des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;

Température en kelvins :  $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$  .

## Partie I - Les besoins en eau du pin maritime (ou pin des Landes)

La forêt des Landes de Gascogne est un massif forestier du Sud-Ouest de la France situé en Nouvelle-Aquitaine (**figure 1**). Bordée à l'Ouest par l'océan Atlantique (la Côte d'Argent), elle forme un vaste triangle d'une superficie de plus d'un million d'hectares, qui s'étend sur trois départements (la Gironde, les Landes et le Lot-et-Garonne).



**Figure 1** - Position géographique des Landes de Gascogne et de sa forêt  
([www.centrecultureldupaysdorthe.com](http://www.centrecultureldupaysdorthe.com))

Cette forêt a été plantée au XIX<sup>e</sup> siècle sous l'impulsion de Napoléon III, dans le but de lutter contre l'avancée des dunes menaçant les villages, d'assécher les marais nombreux dans le territoire et de développer une ressource de matières premières (bois d'œuvre, poteaux télégraphiques, pâte à papier, solvants pour l'industrie chimique...). De nos jours, elle constitue aussi un atout considérable pour le tourisme vert. Hélas, plus de 32 000 hectares de ce précieux massif forestier ont été détruits au cours des gigantesques incendies de l'été 2022.

### Mouvements d'eau dans un végétal, potentiel hydrique et analogie électrocinétique

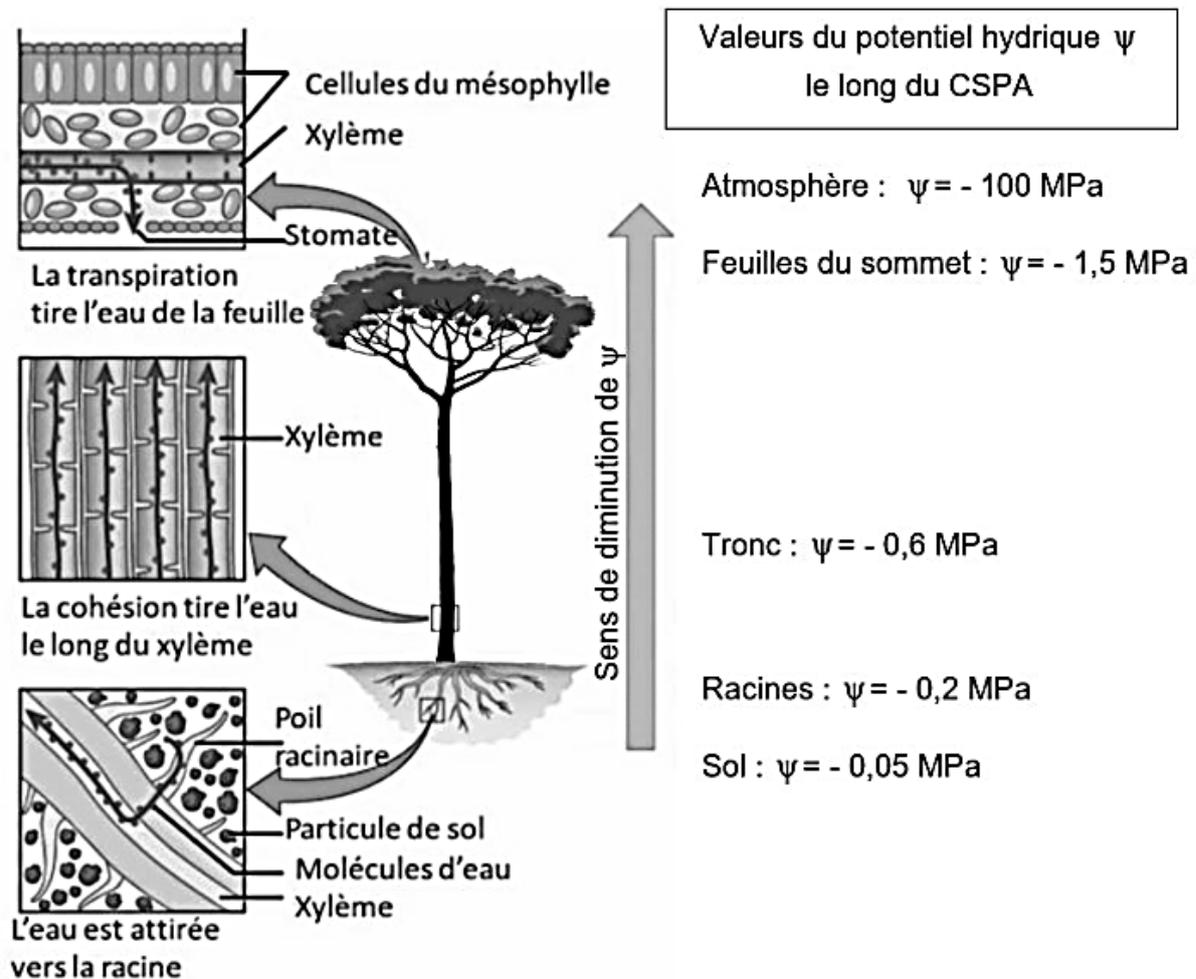
Les végétaux terrestres prélèvent dans le sol l'eau et leurs nutriments qui sont des sels minéraux. Le liquide obtenu constitue la sève brute circulant dans la plante. Pour décrire cette circulation d'eau, les botanistes utilisent le potentiel hydrique, noté  $\psi$ . C'est une grandeur homogène à une pression, qui caractérise les états de liaison de l'eau dans les différents milieux et tissus cellulaires constituant le **Continuum Sol-Plante-Atmosphère (CSPA)**. Ce dernier comprend (**figure 2**) :

- le sol,
- le xylème des racines, du tronc et des branches (ensemble des tissus cellulaires organisés en canaux de circulation de la sève brute),
- les stomates des feuilles (cellules de l'épiderme des feuilles régulant l'évapotranspiration),
- l'air de l'atmosphère au contact des feuilles.

Pour de l'eau liquide pure sous  $P^0 = 1$  bar (état de référence), le potentiel hydrique  $\psi$  est nul par convention. Il est négatif dans le CSPA (**figure 2**) car l'eau y est en interaction avec les tissus cellulaires. L'évapotranspiration au niveau des feuilles, provoquée par le rayonnement solaire, crée un appel d'eau vers l'atmosphère. Des gradients de potentiel hydrique apparaissent alors le long du CSPA, accompagnés de flux d'eau dans le sens des potentiels hydriques décroissants. Ces

flux sont régis par la loi de Darcy :  $\vec{j}_M = -\frac{K}{\rho_e g} \overrightarrow{\text{grad}} \psi$  où  $\vec{j}_M$  désigne le vecteur densité volumique

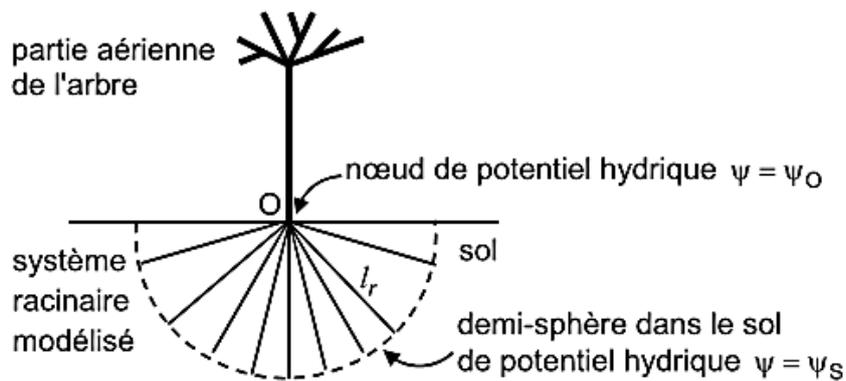
de courant de masse en eau,  $K$  la perméabilité hydraulique du milieu,  $\rho_e$  la masse volumique de l'eau et  $g$  l'accélération de la pesanteur. Cette circulation de masse d'eau dans le CSPA présente donc des analogies avec la circulation de charges électriques dans un milieu conducteur ohmique.



**Figure 2 - Potentiel hydrique le long du CSPA**  
 ([www.encyclopedie-environnement.org/vivant/quete-de-eau-par-les-plant](http://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/quete-de-eau-par-les-plant))

- Q1. a)** Rappeler la loi d'Ohm locale dans un milieu ohmique (on l'écrira à l'aide du potentiel électrique  $V$ ). À quelles grandeurs électriques sont analogues respectivement  $\psi$  et  $\vec{j}_M$  ? Définir et exprimer, en fonction des données, la conductivité hydraulique  $\gamma$ , analogue de la conductivité électrique.
- b)** Dans ce modèle, la masse d'eau traversant une surface ( $S$ ) par unité de temps, ou débit massique à travers ( $S$ ), est  $D = \iint_{(S)} \vec{j}_M \cdot \vec{dS}$ . De quelle grandeur électrique le débit massique  $D$  est-il l'analogue ?
- Q2. a)** Définir la résistance hydraulique  $R_H$  d'un tube de courant d'eau de débit massique  $D$ , d'extrémités A et B, soumis à une différence de potentiel hydrique  $\psi_A - \psi_B > 0$ .
- b)** Dans quelle unité faisant intervenir uniquement le mètre et la seconde, s'exprime la résistance hydraulique ?

Le système racinaire du pin est modélisé comme un faisceau de  $N$  racines cylindriques rectilignes de conductivité hydraulique  $\gamma_r$ , de section  $s_r$  et de longueur  $l_r$ , interconnectées au point O à la base du tronc (**figure 3**) et soumises à la même différence de potentiel hydrique  $\psi_S - \psi_O > 0$ , avec  $\psi_S$  le potentiel hydrique au niveau des extrémités des racines au contact avec le sol.



**Figure 3** - Schéma d'un pin et de son système racinaire

- Q3.** Par circulation du champ  $-\overline{\text{grad}}\psi$  le long d'une racine, établir l'expression de la résistance hydraulique  $R_r$  d'une racine en fonction de  $\gamma_r$ ,  $s_r$  et de  $l_r$ . En déduire la résistance hydraulique  $R_N$  du système racinaire.
- Q4.** Avec  $R_N$  la résistance hydraulique du système racinaire,  $R_t$  celle du tronc,  $R_f$  celle du système foliaire et  $R_a$  celle à l'interface entre le système foliaire et l'atmosphère, donner en justifiant, le schéma électrique équivalent au système racines-tronc-feuilles-atmosphère.

La résistance hydraulique moyenne d'un pin adulte (des extrémités des racines au contact avec le sol jusqu'aux aiguilles à son sommet) est  $R_p = 1,0 \cdot 10^9$  S.I.

- Q5.** À partir de  $R_p$  et des valeurs du potentiel hydrique de la **figure 2**, donner la valeur numérique de  $R_a$ .
- Q6.** En déduire la masse évapo-transpirée par un pin adulte pendant un jour d'été (avec les valeurs numériques de la **figure 2** et une durée d'exposition solaire journalière de 12 h).
- Q7.** On peut lire sur un document du C.N.P.F. (Centre National de la Protection Forestière) "*qu'un hectare de pins maritimes adultes aspire 15 à 25 tonnes d'eau par jour, cette eau étant évapo-transpirée par la partie aérienne de l'arbre*".  
Sachant qu'il y a typiquement 300 pins adultes par hectare, les valeurs du C.N.P.F. sont-elles en accord avec le résultat trouvé en **Q6** ? On rappelle que 1 hectare =  $10^4$  m<sup>2</sup>.

## Partie II - Gemmage en forêt landaise et distillation de la résine de pin

Le gemmage est un procédé ancestral qui consiste à produire une entaille dans l'écorce du pin pour en retirer la résine. Le procédé, généralisé à toute la forêt landaise jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, va devenir une activité industrielle phare de la région jusque dans les années 1950. Après une période de déclin, puis sa disparition dans les années 1990, des projets de relance sont aujourd'hui en cours.

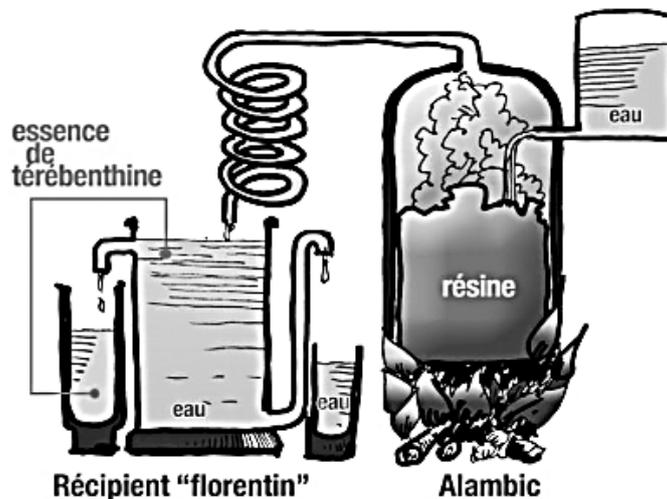
À l'aide du hapchot (petite hache), le résinier effectue les piques qui forment la "carre" le long de laquelle la résine va s'écouler jusqu'à un pot en terre cuite coincé entre une lamelle de zinc et un clou en contrebas (**photos 2a et 2b**).

La résine (ou gomme) ainsi récoltée est ensuite distillée pour obtenir de l'huile essentielle de térébenthine et des composés organiques lourds, nommés brai ou colophane selon leur consistance. Le principal constituant de l'essence de térébenthine est le pinène, molécule odorante de formule brute  $C_{10}H_{16}$ , très utilisée comme solvant organique. Le brai est utilisé comme colle végétale et la colophane comme liant dans certaines peintures. Elle est aussi bien connue des musiciens pour favoriser le crissement de l'archet sur les instruments à cordes frottées.



**Photo 2a - Résinier ouvrant la " carre "**      **Photo 2b - Pot de recueil de la résine**  
<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geographie-region-aquitaine-gemmage>

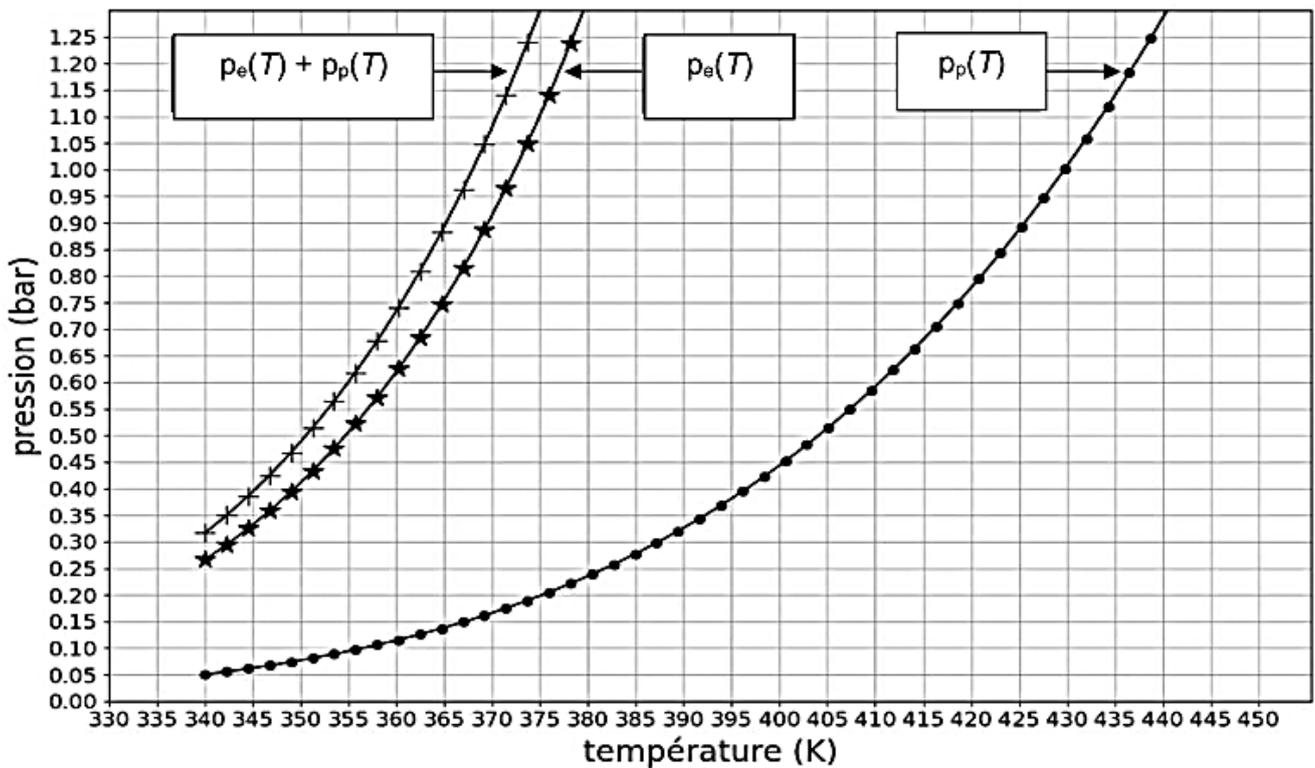
Pour récupérer la térébenthine, on procède par entraînement à la vapeur (ou hydrodistillation) (**figure 4**) : de l'eau pure est ajoutée à la gomme dans un alambic. Le tout est porté à ébullition. Les vapeurs d'eau obtenues entraînent avec elles des vapeurs de pinène, ce qui donne un mélange gazeux de composition déterminée. Ce mélange passe alors dans le serpentin où il se refroidit et se condense. Le condensat est récupéré dans un récipient, appelé " florentin ". L'eau et le pinène liquides étant non miscibles, l'essence de térébenthine surnage au dessus de l'eau, ce qui permet sa récupération. Le résidu de distillation au fond de l'alambic donne le brai et la colophane.



**Figure 4 - Schéma d'une hydrodistillation**  
<https://www.centrecultureldupaysdorthe.com>

- Q8.** Dessiner l'allure du diagramme des phases ( $p$ ,  $T$ ) de l'eau pure. Nommer et mentionner deux points particuliers sur ce diagramme et indiquer les domaines solide, liquide et gazeux.
- Q9.** La pression de vapeur saturante du pinène pur à 20 °C est  $p_p(293) = 430$  Pa.  
 En considérant le modèle de gaz parfait pour les espèces gazeuses, établir s'il est dangereux de travailler dans un local à 20 °C dans lequel de l'essence de térébenthine se trouverait à l'équilibre de vaporisation, sachant que la teneur limite à ne pas dépasser est de 5 g de pinène par mètre cube d'air.

On donne en **figure 5** les courbes représentatives des pressions de vapeur saturante  $p_e(T)$  et  $p_p(T)$  des équilibres de vaporisation de l'eau pure et du pinène pur en fonction de la température. La troisième courbe correspond à la somme  $p_e(T) + p_p(T)$ . On fera les lectures adéquates sur ces courbes pour répondre aux questions **Q10** à **Q13**.



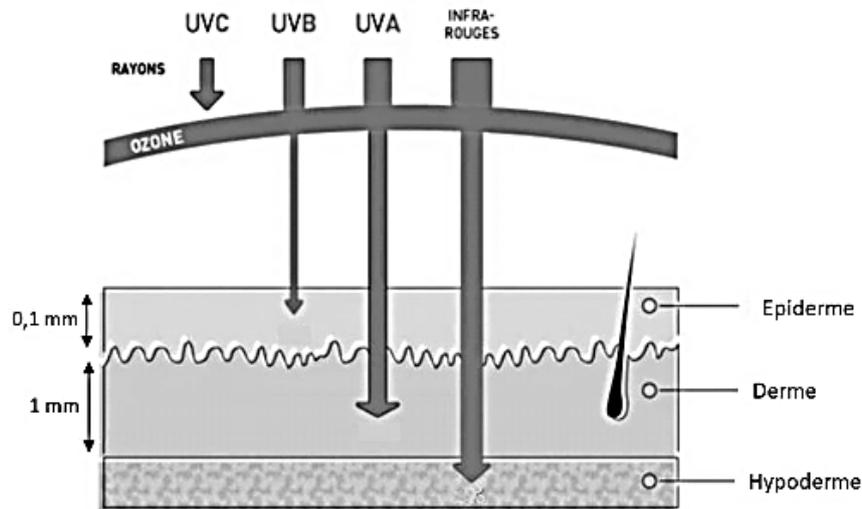
**Figure 5** - Courbes des pressions de vapeur saturante en fonction de la température

- Q10.** À quelle température faudrait-il chauffer du pinène liquide pur pour le porter à ébullition sous la pression  $P^\circ = 1$  bar ?
- Q11.** Toujours sous  $P^\circ = 1$  bar, donner la valeur de la température d'ébullition du mélange d'hydrodistillation dans l'alambic, sachant que les pressions partielles de l'eau et du pinène dans la phase vapeur sont égales à leurs pressions de vapeur saturante pure.
- Q12.** Quelles sont, dans ce cas, les valeurs des pressions partielles en eau et en pinène ?
- Q13.** Déduire la masse d'eau nécessaire pour produire 1 kg de pinène.

## Partie V - Bronzage sur les plages de la Côte d'Argent et protection solaire

### V.1 - La pénétration des rayonnements dans la peau

On dispose en **figure 9** d'une illustration de la pénétration différenciée des rayonnements ultraviolets (UVA, UVB et UVC) et infrarouges dans les trois couches constitutives de la peau. Des informations sur ces rayonnements sont données dans le **document 1**.



**Figure 9** - Illustration de la pénétration du rayonnement solaire dans la peau (<https://www.newpharma.fr/cnt/art/186/rayons-uv-uva-uvb-et-uvc-la-difference.html>)

#### \*Les UVA (320 à 400 nm)

Ils représentent environ 95 % des radiations UV qui atteignent la surface de notre planète. Ils pénètrent le derme en activant la mélanine présente dans notre peau, ce qui la fait bronzer. Mais dans la durée, ils provoquent aussi une altération moléculaire du derme du fait des radicaux libres qu'ils produisent, ce qui les rend responsables du photo-vieillessement et de cancers de la peau.

#### \*Les UVB (290 à 320 nm)

Ils représentent 5 % des rayons UV qui atteignent la surface de la Terre. Ils pénètrent seulement l'épiderme mais sont plus dommageables que les UVA. Ils sont responsables des coups de soleil.

#### \*Les UVC (100 à 280 nm)

Les UVC sont intégralement absorbés par la couche d'ozone et n'atteignent pas la surface de la Terre, où ils rendraient la vie impossible.

#### \*Les infrarouges (800 à 2 000 nm)

Leurs grandes longueurs d'onde leur permettent d'atteindre les couches les plus profondes de la peau, mais ils sont beaucoup moins nocifs que les ultraviolets.

#### Document 1 - Informations sur les rayonnements UV et infrarouges

Afin d'étudier la pénétration cutanée des rayonnements UV, on propose un modèle sommaire dans lequel les propriétés de conduction électrique des différentes couches de la peau sont décrites par un milieu conducteur ohmique unique, de conductivité électrique  $\gamma$  uniforme, réelle et indépendante de la longueur d'onde, de permittivité diélectrique  $\epsilon_0$  et de perméabilité magnétique  $\mu_0$ , égales à celles du vide. Un point  $M$  de l'espace est repéré par ses coordonnées cartésiennes

$(x, y, z)$  dans le repère cartésien  $(O; \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ , avec  $O$  un point à l'interface air/conducteur,  $\vec{u}_z$  le vecteur unitaire normal au plan de l'interface et dirigé de l'air vers le conducteur, ce dernier occupant le demi-espace  $z > 0$ .

On note  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ ,  $\vec{E}(M, t)$  et  $\vec{B}(M, t)$  les champs électrique et magnétique de l'onde électromagnétique présente dans le conducteur.

**Q32.** Écrire les équations de Maxwell dans le conducteur dans l'hypothèse d'un milieu localement neutre et à courant de déplacement négligeable devant le courant de conduction.

**Q33.** Établir l'équation aux dérivées partielles vérifiée par le champ  $\vec{E}$ . On rappelle que  $\overline{\text{rot}(\text{rot}\vec{E})} = \overline{\text{grad}(\text{div}\vec{E})} - \Delta\vec{E}$ , où  $\Delta$  est l'opérateur laplacien vectoriel.

Soit  $\vec{E}(M, t) = E_0 \vec{u}_x e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \overline{OM})}$  la représentation complexe du champ électrique en un point  $M$  de la peau. Dans cette expression,  $i^2 = -1$ ,  $E_0$  et  $\omega$  sont des constantes réelles strictement positives et  $\vec{k} = k \vec{u}_z$  est le vecteur d'onde complexe, avec  $k$  une constante complexe.

**Q34. a)** Préciser la direction de propagation et la polarisation de l'onde.

**b)** Exprimer  $k^2$  en fonction de  $\mu_0$ ,  $c$ ,  $\gamma$  et de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ .

En déduire, en justifiant, l'expression de  $k$  qui convient.

**c)** Faire apparaître une longueur caractéristique  $\delta$  d'évolution de l'amplitude de  $\vec{E}$ . Quel nom donne-t-on à  $\delta$  ?

**Q35.** Expliquer si ce modèle semble conforme à la pénétration différenciée des rayonnements illustrée en **figure 9**.

---

## **Ex 2 : Interférences et étude d'un plasma**

### **Données**

Deutérium  $D$  masse molaire atomique  $M_D \approx 3.10^{-27} \text{ kg.mol}^{-1}$ .

Charge élémentaire  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Masse d'un électron  $m = 9.10^{-31} \text{ kg}$ .

Célérité des ondes électromagnétiques dans le vide  $C = 3.10^8 \text{ m/s}$

Perméabilité du vide :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

# Partie I. Mesures interférométriques

## A – Trou d’Young

Un Laser envoie, sur un trou circulaire de faible diamètre  $d$  percé dans un plan  $\pi_0$ , un faisceau de lumière parallèle monochromatique, de longueur d’onde dans le vide  $\lambda_0$  (cf Fig 0). On observe la figure 1 sur l’écran  $\pi_E$  placé à la distance  $D$  de  $\pi_0$  ( $\pi_E$  et  $\pi_0$  sont parallèles).

Le faisceau incident se propage dans l’air (indice absolu  $N_a$ ) dans la direction  $x'x$  perpendiculaire aux plans.

On associe au plan  $\pi_E$  un repère ( $y'y, z'z$ ).

La figure 2 donne, en fonction de  $z$ , l’intensité lumineuse  $I$  observée sur  $\pi_E$ .

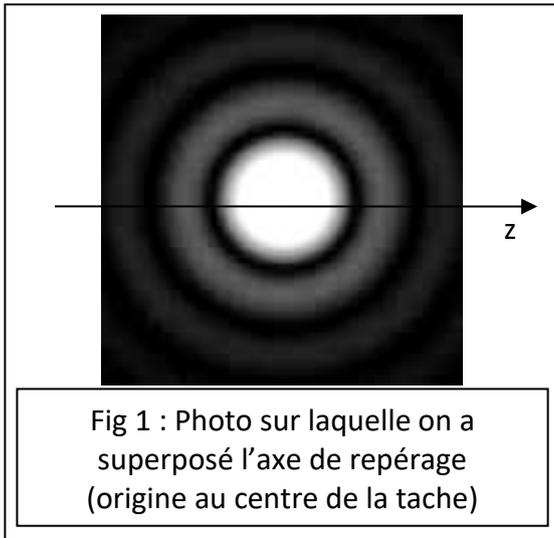
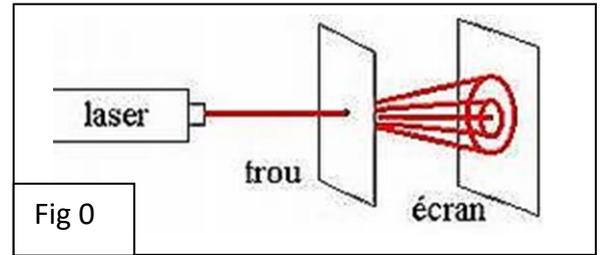
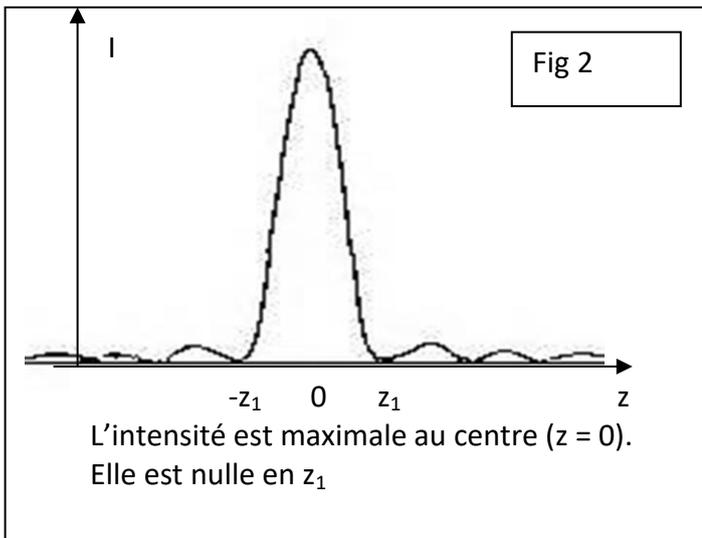


Fig 1 : Photo sur laquelle on a superposé l’axe de repérage (origine au centre de la tache)



L’intensité est maximale au centre ( $z = 0$ ). Elle est nulle en  $z_1$

**Q1.**

a- Quel est le phénomène physique mis en jeu ?

Le rayon  $R$  de la tache centrale, supposé égal à  $z_1$ , est donné par une des relations suivantes :

$$\kappa \frac{\lambda_0 D}{N_a d} \quad \text{ou} \quad \kappa \frac{\lambda_0 D}{N_a d^2} \quad \text{ou} \quad \kappa \frac{\lambda_0 d}{N_a D}$$

$\kappa$  est une constante sans dimension dépendant de la géométrie et dont la valeur approchée est  $\kappa = 1,2$  pour un trou circulaire.

b- Ecrire la bonne réponse en justifiant les raisons de votre choix.

**Q2.** On peut considérer que le trou d’Young se comporte comme une source lumineuse, notée  $S$ , quasi ponctuelle, émettant de la lumière dans un cône d’ouverture  $\theta$  correspondant à la tache centrale de la figure 1.

- a- Evaluer  $\theta$  littéralement.
- b- Tracer, en fonction de  $z$ , le profil de l’intensité lumineuse sur  $\pi_E$  en supposant que la zone éclairée l’est uniformément.
- c- Comparer ce profil et la figure 2. Conclure en 5 lignes maximum sur la validité de ce modèle.

Dans toute la suite, les trous d’Young seront assimilés à une telle source ponctuelle.

## B – Dispositif interférentiel à deux trous d’Young

Le dispositif est le même qu’en A, mais le faisceau arrive sur deux trous d’Young percés dans le plan  $\pi_0$  (Fig 3). Ces trous d’Young, éclairés par un faisceau incident parallèle se propageant dans la direction Ox, se comportent comme deux sources lumineuses  $S_1, S_2$  ponctuelles, distantes de  $b$  (fig 3a), monochromatiques, émettant des ondes cohérentes entre elles ; ces deux sources émettent une même lumière de longueur d’onde dans le vide  $\lambda_0$ . Elles sont symétriques par rapport à l’axe Ox.

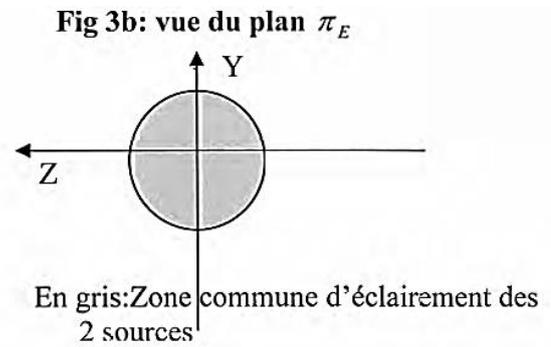
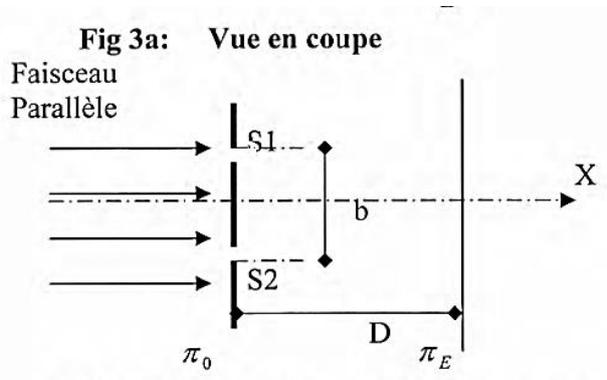
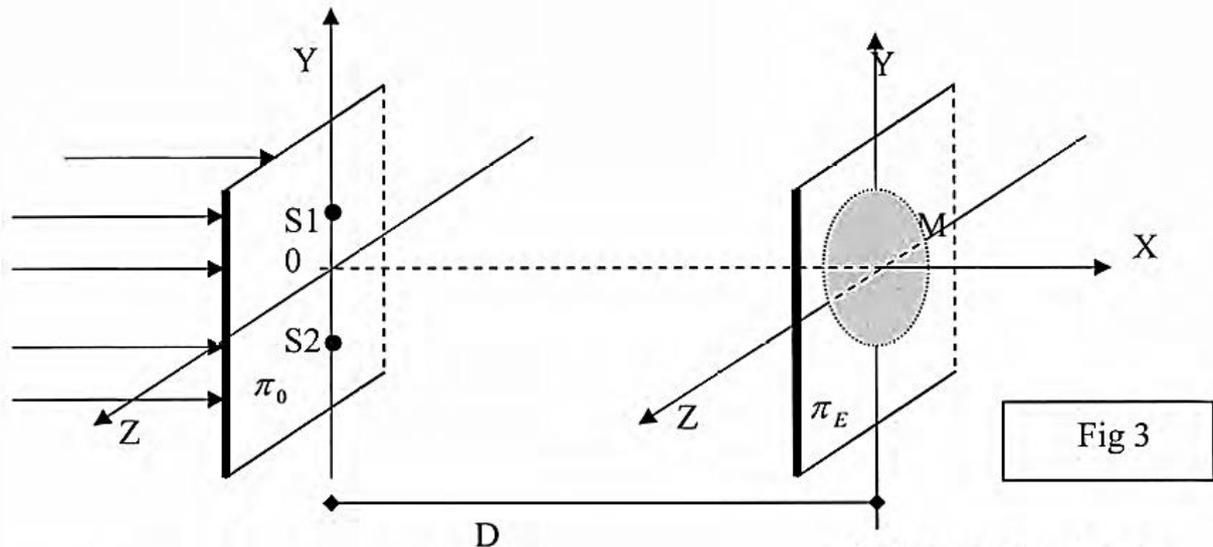
Ces ondes se propagent dans l’air d’indice optique absolu  $N_a$ .

On utilise le repère  $\{Oxyz\}$ , l’origine O étant au milieu de  $S_1S_2$  (Fig 3).

On observe des interférences dans la zone commune d’éclairement du plan  $\pi_E$ .

Cette zone est sensiblement un disque de rayon  $R = 1$  cm (Fig 3 et 3b).

On s’intéresse aux phénomènes en un point M ( $x = D, y, z$ ) du plan  $\pi_E$ .



**Q3.** Préciser ce que signifie « ondes cohérentes entre elles ».

**Q4.** On note  $d_1 = S_1M$  et  $d_2 = S_2M$  les distances séparant les sources du point M (de coordonnées  $D, y, z$ ).

a- Evaluer  $d_2, d_1$  en fonction de  $y, z, D$  et  $b$ .

b- En déduire la différence de marche  $\delta_{2/1}$  lorsque  $y, z$  et  $b$  sont très petits devant  $D$ .

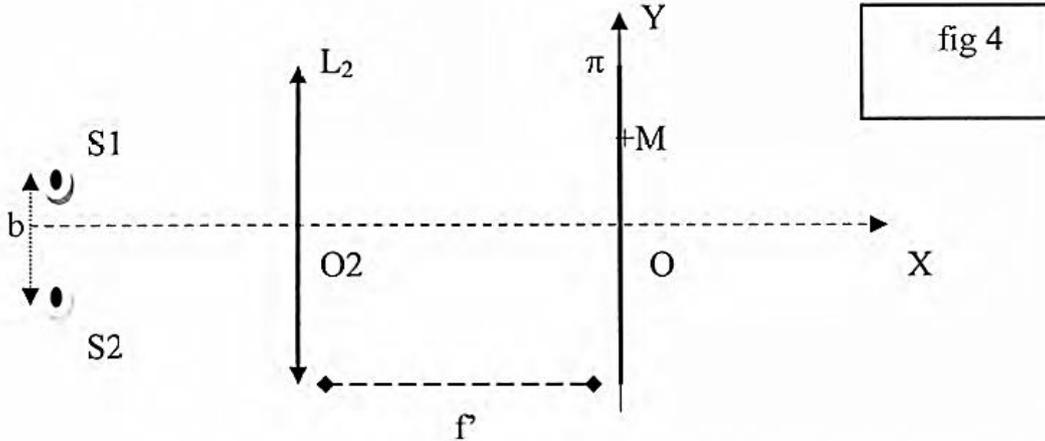
**Q5.** Montrer que l’intensité lumineuse au point M est de la forme  $I = A.(1+\cos(B))$  et expliciter B en fonction de  $\delta_{2/1}$  et  $\lambda_0$ .

**Q6.** Reproduire et compléter la figure 3b en dessinant l’allure géométrique des franges d’intensité maximale.

**Q7.** Evaluer le nombre de franges d’intensité maximale observables avec  $\lambda_0 = 500$  nm,  $b = 2$  mm,  $N_a \cong 1$  et  $D = 2$  m.

### C – Montage expérimental

On reprend le montage de la partie B mais on observe, à présent, les phénomènes sur un écran  $\pi$  situé dans le plan focal image d'une lentille convergente ( $L_2$ ). Cette lentille, fonctionnant dans les conditions de Gauss, sera considérée comme parfaitement stigmatique pour ses points conjugués. Les trous d'Young sont symétriques par rapport à l'axe optique  $Ox$  de la lentille  $L_2$ .



On regarde ce qui se passe en un point  $M$  d'ordonnée  $y$  du plan  $\pi$ . On suppose que  $S_1$  et  $S_2$  sont en phase.

**Q8.** Démontrer que la différence de chemin optique  $\delta_{2/1}$  entre l'onde arrivant en  $M$  issue de  $S_2$  et celle issue de  $S_1$  est :  $\delta_{2/1} = N_a \frac{by}{f}$ . **On justifiera de manière précise, à l'aide de schémas, les raisonnements utilisés.**

### D – Mesure d'indice de réfraction

Le dispositif de mesure comprend une source de lumière monochromatique  $S$ , ponctuelle, de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$ , placée au foyer objet d'une lentille convergente  $L_1$  (Fig 5).

Entre les deux lentilles  $L_1$  et  $L_2$  (considérées comme minces, identiques, de distance focale  $f'$ ), on dispose deux cuves  $C1$  et  $C2$  identiques de longueur  $L$ .

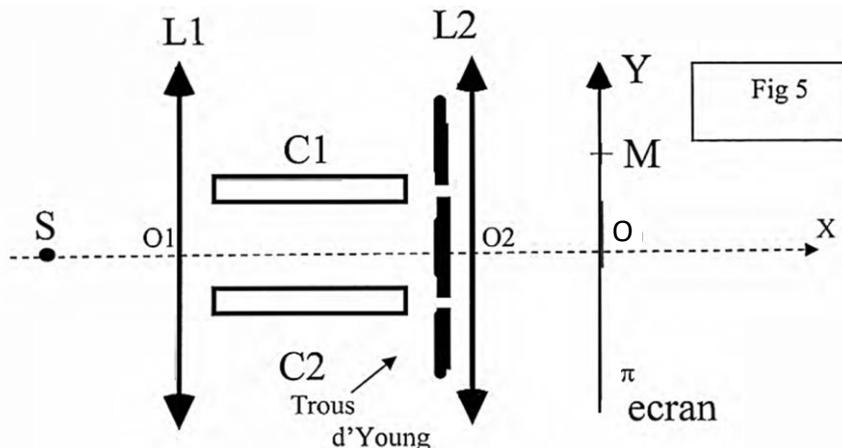
Deux fentes d'Young séparées de la distance  $b$  sont placées avant  $L_2$  symétriquement par rapport à l'axe  $SO$ .

On observe sur un écran  $\pi$  dans le plan focal image de  $L_2$ .

Les points  $S$  et  $O$  sont sur l'axe optique commun de  $L_1$  et  $L_2$ .

La cuve  $C2$  contient de l'air d'indice optique absolu  $N_a$ ; la cuve  $C1$  contient un gaz d'indice optique absolu  $N_1$ .

**Q9.** Déterminer la différence de chemin optique  $\delta_{2/1}$  entre une onde issue de  $S$  arrivant en  $M$  en étant passée par  $C2$  et celle qui est passée par  $C1$ . On donnera le résultat en fonction de  $N_a$ ,  $N_1$ ,  $b$ ,  $f'$ ,  $L$  et l'ordonnée  $y$  de  $M$  sur  $\pi$ .



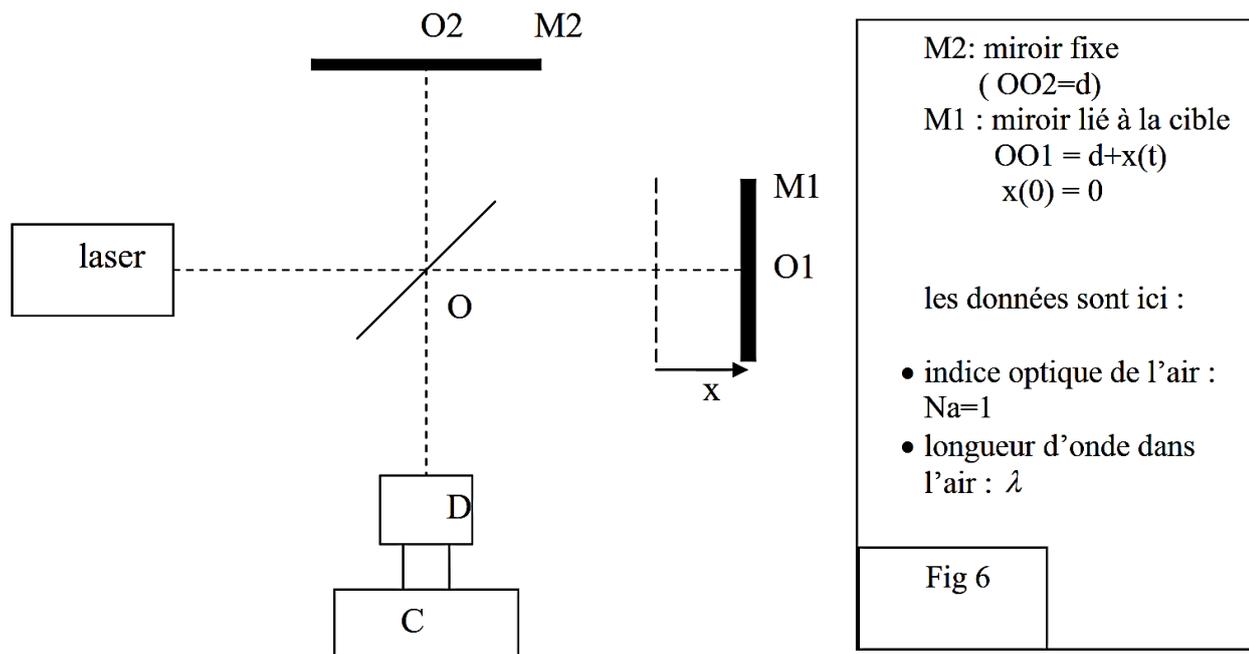
**Q10.** Tous les résultats trouvés en **Q5** sont valides avec cette expression de  $\delta_{2/1}$  ; déterminer l'interfrange  $i'$ .

**Q11.** Un capteur placé en O ( $y = 0$ ) est couplé à un compteur qui s'incrémente de 1 unité à chaque détection d'une frange brillante. On part d'un état initial où les cuves C1 et C2 sont remplies d'air.

- Quel est l'ordre d'interférence  $p_0$  initial en O ?
- On remplace progressivement l'air de la cuve C1 par du gaz d'indice  $N_1$  ( $N_1 > N_a$ ). Lorsque C1 est uniquement rempli de ce gaz, le détecteur s'est incrémenté de  $k$  unités. Préciser le nouvel ordre en  $Y = 0$  et le sens dans lequel le système de franges a défilé (**on attend ici une réponse argumentée**).
- Déterminer l'expression littérale de  $N_1$  en fonction de  $N_a$ ,  $k$ ,  $L$  et  $\lambda_0$ .
- Avec  $L = 1,00$  m ;  $k = 100$  ;  $N_a = 1,0002926$  ;  $\lambda_0 = 500$  nm, on obtient  $N_1 = 1,0003426$ . Pour chaque grandeur, on admet une erreur absolue de 1 sur le dernier chiffre indiqué. Combien de chiffres significatifs doit on conserver dans le résultat de  $N_1$  (**réponse argumentée requise**).

### E – Suivi de déplacement

On utilise un dispositif de Michelson à deux miroirs parfaitement orthogonaux, éclairés par un fin pinceau lumineux monochromatique émis par un Laser. On se ramène au modèle dans lequel la séparatrice, inclinée à 45°, est idéale (elle est semi réfléchissante, infiniment mince et n'introduit aucun déphasage) (Fig 6).



**Q12.**

- Déterminer l'intensité lumineuse  $I$  arrivant sur le détecteur D ; montrer qu'elle se compose d'un terme constant et d'un terme variable lié au déplacement  $x(t)$ .
- Le détecteur D élimine la composante constante du signal et donne une tension  $U_d$  proportionnelle à la composante variable de l'intensité  $I$ .

Montrer que  $U_d = U_0 \cdot \cos(\Phi)$  et expliciter  $\Phi$  en fonction de  $x$  et des données.

- Le détecteur D est couplé à un compteur C incrémenteur de franges (cf **Q11**).

Le compteur est à 0 lorsque  $x=0$ .

- On envisage un déplacement de la cible toujours dans le même sens sur une longueur  $L = 200 \lambda$  ; quelle sera l'indication du compteur ?

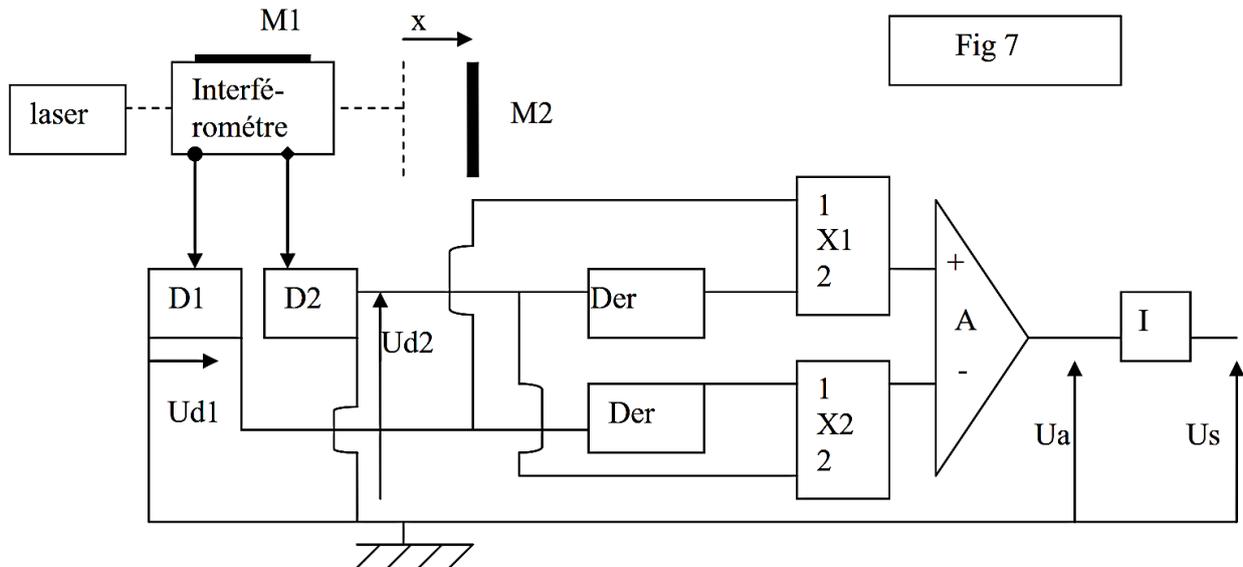
- ii. On envisage à présent un déplacement de  $L_1=100\lambda$  dans un sens et  $L_2=100\lambda$  en sens inverse. Donner l'abscisse finale de la cible et l'indication du compteur dans ce cas.
- iii. A quelle grandeur accède-t-on finalement par ce dispositif interférentiel ?

**d- lame à retard**

On interpose sur le bras OO2, une lame d'indice N et d'épaisseur e, dans le but que le détecteur D délivre la tension  $U_d = U_o \cdot \sin(\Phi)$ ,  $\Phi$  ayant la même expression que celle trouvée en **Q12.b**. Donner l'expression littérale des épaisseurs possibles de la lame pour qu'il en soit ainsi.

**e- Mesure d'abscisse.**

Le dispositif interférométrique de suivi de déplacement est modifié de manière à générer, à l'aide de 2 détecteurs, les tensions  $U_{d1} = U_o \cos(\Phi)$  et  $U_{d2} = U_o \sin(\Phi)$  ( fig 7 ).



Dans la figure 8, les expressions donnent les relations entre les tensions de sortie ( s ) et d'entrée , par rapport à la masse. Les  $K_p$  sont des constantes

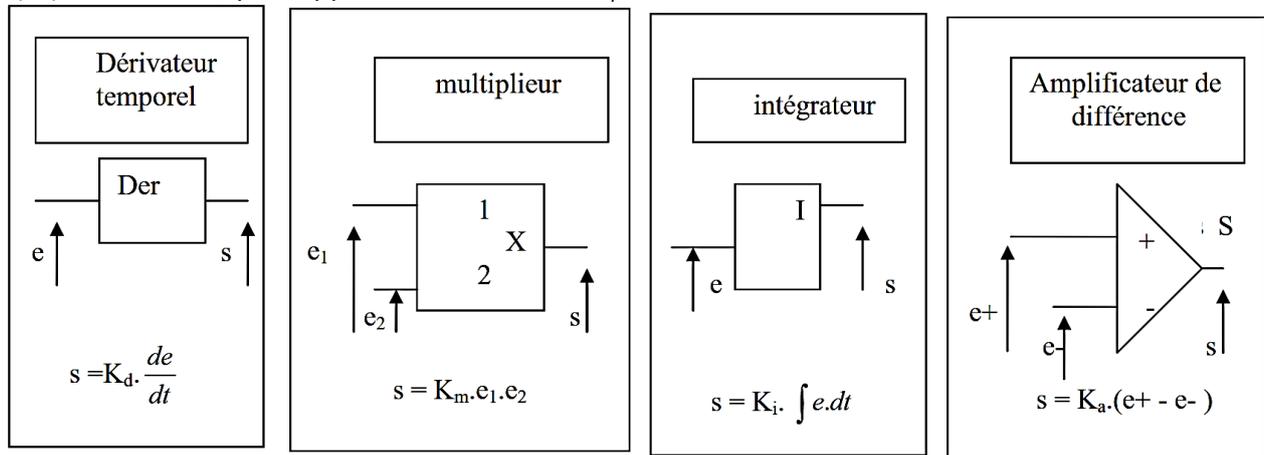


Figure 8

- i. On cherche les tensions  $U_{x1}$  et  $U_{x2}$  à la sortie des multiplieurs ; remplir le tableau suivant :

	Tension sur l'entrée 1	Tension sur l'entrée 2	Tension de sortie
X1			
X2			

- ii. Donner l'expression de  $U_a$ .
- iii. Donner l'expression de  $U_s$ .
- iv. Quel est l'intérêt de ce montage ?

## Partie II. Mesures au sein d'un plasma

Nous étudions ici les conditions de propagation d'une onde électromagnétique à travers un plasma formé de noyaux de deutérium ( $D^+$ ) et d'électrons ( $e^-$ ).

On considère le plasma électriquement neutre et au repos macroscopique (les vitesses moyennes des particules sont nulles).

On travaille dans le repère cartésien  $\{\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z\}$ .

On soumet ce plasma à l'action d'une onde électromagnétique plane progressive monochromatique, caractérisée par le champ électrique :  $\vec{E}(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x$

**On négligera toutes les interactions autres que celles dues à l'onde.**

On donne :

**Les densités volumique particulières** supposées constantes et uniformes:

$n_e$  pour les électrons ;  $n_D$  pour le deutérium.

**Les masses** :  $m_e$  pour l'électron et  $m_D$  pour le noyau de deutérium.

**La charge élémentaire** :  $e$ .

**Célérité** des ondes électromagnétiques dans le vide  $C = 3.10^8$  m/s

**Perméabilité** du vide :  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  H.m<sup>-1</sup>

**Les vitesses instantanées** :  $\vec{v}_e$  et  $\vec{v}_D$  acquises respectivement par l'électron et le noyau de deutérium sous l'action de l'onde (on supposera ces vitesses petites devant la célérité  $C$  des ondes électromagnétiques dans le vide ).

**Q13.** Comment justifier que  $n_e = n_D = n$  ?

**Q14.** Donner l'expression de la densité volumique locale de courant électrique  $\vec{j}$  en fonction de  $n$ ,  $e$  et des vitesses  $\vec{v}_e$  et  $\vec{v}_D$ .

**Q15.** A partir de l'équation de Maxwell-Faraday, donner l'expression du champ magnétique  $\vec{B}(z, t)$ .

**Q16.**

a- Etablir les équations différentielles liant les vitesses  $\vec{v}_e$  et  $\vec{v}_D$  et le champ  $\vec{E}(z, t)$ .

Vous préciserez ce qui permet de négliger la force due au champ magnétique devant celle due au champ électrique.

b- En déduire les équations horaires de ces vitesses en régime sinusoïdal forcé.

**Q17.**

a- Etablir l'expression du vecteur  $\vec{j}(z, t)$  .

b- Montrer, qu'en première approximation, la contribution des noyaux  $D^+$  est négligeable et simplifier en conséquence l'expression de  $\vec{j}(z, t)$ .

**Q18.** Déterminer la puissance électrique volumique locale et sa moyenne temporelle. Conclure sur le transfert d'énergie entre l'onde et le plasma.

**Q19.** A partir de l'équation de Maxwell-Ampère, établir la relation de dispersion donnant  $k^2$  en fonction de  $\omega$  et des données.

**Q20.** Donner une inégalité sur  $\omega$  pour que la propagation ait lieu, on introduira une pulsation caractéristique  $\omega_c$  à expliciter en fonction des données.

**Q21.** Tracer le graphe donnant  $k$  en fonction de  $\omega$ , vous donnerez l'équation de l'asymptote haute fréquence et vous tracerez cette asymptote sur le même graphe.

**Q22.**

- a- Donner l'expression de la célérité  $v_\phi$  de l'onde dans le plasma en fonction de  $\omega$ ,  $\omega_c$  et de la célérité  $C$  dans le vide.
- b- Comment qualifie-t-on un milieu dans lequel la célérité de l'onde dépend de  $\omega$  ?

**Q23.**

- a- Exprimer l'indice optique du plasma  $N_p = \frac{C}{v_\phi}$  et préciser le domaine de valeur numériques possibles pour  $N_p$ .
- b- Représenter graphiquement  $N_p$  en fonction de  $\omega$  (on déterminera la dérivée  $\frac{dN_p}{d\omega}$  et sa valeur lorsque  $\omega \rightarrow \omega_c$ ).

**Q24.** Mesure de  $n$  par interférométrie.

On cherche à mesurer la densité électronique  $n$  du plasma supposé homogène.

En utilisant les résultats de la partie I, décrire, en 5 lignes au plus, comment procéder pour mesurer  $n$ .

**Q25.** Mesure par réflectométrie.

- a- Dans le domaine de pulsation où l'onde ne se propage pas, préciser la nature de l'onde dans le plasma.

L'énergie de l'onde incidente se retrouve donc dans l'onde réfléchie.

On dispose d'un émetteur d'onde de pulsation  $\omega$  réglable.

- b- A partir de la relation liant  $\omega_c$  et  $n$  établie en **Q20**, décrire, en 5 lignes au plus, comment on pourrait procéder pour mesurer, par réflectométrie, la densité  $n$  d'un plasma homogène.

**-- FIN DE L'ENONCE --**