
Filière PSI

EPREUVE DE PHYSIQUE I

Durée : 3 heures
Calculatrices autorisées

Remarque importante :

Le sujet, bien que portant sur un dispositif unique, comporte deux problèmes indépendants. Certaines parties de l'énoncé, notées en *italique*, ne sont pas indispensables à la résolution de ces deux problèmes. Elles sont données à titre d'information, pour décrire le cadre de fonctionnement du dispositif étudié. On pourra donc, pour gagner du temps, s'abstenir de leur lecture.

Dans chaque problème, certaines parties peuvent être traitées, indépendamment de ce qui précède, en admettant, si besoin, les résultats donnés par l'énoncé.

**Étude de quelques caractéristiques du tokamak
Tore Supra**

Le tokamak Tore Supra, est un dispositif expérimental, mis en service en 1988 à Cadarache (Alpes de Haute Provence), qui s'inscrit dans un programme de large coopération internationale visant à la maîtrise des plasmas de fusion thermonucléaire par confinement magnétique. Son but est de mettre en œuvre des principes et de valider des techniques qui doivent permettre, à moyen terme (vers 2050) la production d'électricité, à partir de l'énergie de fusion. Ses aimants toroïdaux supraconducteurs lui confèrent sa spécificité : l'étude des décharges plasmas de longue durée (2 minutes et plus)

Sur Tore Supra, on cherche à faire fusionner, deux à deux, des noyaux de Deutérium D^+ (hydrogène lourd comportant 1 proton et 1 neutron). Dans ce but, on chauffe fortement, par différents moyens, un gaz atomique de Deutérium sous très faible pression, le conduisant dans un premier temps à l'état plasma, où les électrons et leurs noyaux sont totalement dissociés. Il est alors nécessaire de maintenir le chauffage du plasma pour augmenter l'énergie cinétique des électrons mais surtout celle des noyaux D^+ , afin de leur permettre de vaincre la répulsion électrostatique qui existe entre deux noyaux de charge positive, et ainsi de fusionner.

A l'heure actuelle, l'énergie obtenue par fusion reste encore très faible par rapport à l'énergie totale injectée pour le chauffage des particules. Cependant, les dernières avancées dans la maîtrise des plasmas de fusion, réalisées sur Tore Supra, comme par exemple la décharge record de 750 MJ d'énergie injectés puis extraits, d'une durée de 4 min 25 s, obtenue en septembre 2002, laissent entrevoir un avenir prometteur.

Dans la suite, nous allons étudier quelques-uns des aspects du dispositif Tore Supra : le confinement du plasma de fusion par champ magnétique (premier problème) et l'un de ses nombreux diagnostics permettant la mesure de la densité électronique au sein du plasma par interférométrie Infra Rouge (deuxième problème).

<u>Données :</u>	vitesse de la lumière dans le vide :	$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
	permittivité du vide :	$\epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
	perméabilité du vide :	$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
	charge élémentaire :	$e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$
	masse d'un électron :	$m_e = 9,1.10^{-31} \text{ kg}$
	masse d'un noyau D^+ :	$m_D = 2 \times 1,67.10^{-27} \text{ kg}$
	conversion d'unités d'énergie :	$1 \text{ eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$
	double produit vectoriel :	$\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = \vec{b}(\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c}(\vec{a} \cdot \vec{b})$

Premier problème : Confinement magnétique du plasma de fusion

La réalisation de réactions de fusion dans un plasma de faible densité nécessite le maintien des particules chargées, très énergétiques, qui le composent hors de contact de tout élément matériel, afin d'éviter leur perte par adsorption, par exemple sur les parois du récipient contenant le plasma. Pour cela, on utilise sur Tore Supra des champs magnétiques qui permettent de maintenir le plasma dans une enveloppe immatérielle, réalisant ainsi son confinement.

Dans tout le problème, on supposera que les particules étudiées sont non relativistes, ce qui permet de leur appliquer les lois de la mécanique classique, et qu'elles n'ont aucune interaction entre elles (modèle dit des « plasmas cinétiques classiques » non collisionnels).

A - Etude d'une particule chargée dans un champ $\vec{B}$ axial permanent et uniforme

On considère une particule chargée, de masse m et de charge q , se déplaçant avec la vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen. Elle est soumise uniquement à un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme et permanent, décrit en coordonnées cartésiennes par :

$$\vec{B} = B \vec{u}_y, \text{ avec } B > 0.$$

- 1) Ecrire la relation fondamentale de la dynamique traduisant l'évolution de la vitesse $\vec{v}$ de la particule chargée. En déduire les trois équations différentielles liant les composantes de $\vec{v}$ et leurs dérivées premières par rapport au temps. On introduira :

$$\text{la pulsation cyclotron : } \omega_c = \frac{|q|B}{m} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{q}{|q|} = \frac{q}{e} \quad \text{donnant le signe de } q.$$

- 2) Déterminer les composantes de la vitesse $\vec{v}$ de la particule chargée, en résolvant le système d'équations différentielles couplées, à découpler par une méthode de votre choix.

On considèrera qu'à l'instant initial, $v_x(0) = v_\perp > 0$, $v_y(0) = v_\parallel$ et $v_z(0) = 0$.

On adoptera, dans la suite du problème, ce type de décomposition pour toute vitesse :

$$\vec{v} = \vec{v}_{\perp} + \vec{v}_{\parallel} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \vec{v}_{\perp} \text{ est la composante de } \vec{v} \text{ dans le plan perpendiculaire à } \vec{B} \\ \vec{v}_{\parallel} \text{ est la composante de } \vec{v} \text{ parallèle à } \vec{B} \end{cases}$$

- 3) a) Déterminer les équations du mouvement de la particule chargée, donnant $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$, en considérant qu'à l'instant initial, $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$ et $z(0) = z_0$.

$$\rho_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c}$$

On introduira le rayon de Larmor :

- b) Montrer que le mouvement de la particule chargée est composé d'un mouvement plan de rotation autour d'un point appelé centre guide G, dont on précisera les coordonnées et d'un mouvement de translation du centre guide, dont on précisera la direction.

- 4) Faire deux schémas, suivant le signe de la charge q , représentant dans l'espace, l'allure de la trajectoire de la particule chargée et le sens de parcours (on prendra $v_{\parallel} > 0$). On n'omettra pas de faire figurer la direction du champ magnétique $\vec{B}$, celle de $\vec{v}_{\perp}(0)$ et la position G_0 du centre guide à l'instant initial.

- 5) Application numérique : Calculer pour un électron et un noyau de Deutérium :

- les vitesses $v_{\perp e}$ et $v_{\perp D}$ dans le mouvement cyclotron,
- les pulsations cyclotrons ω_{ce} et ω_{cD} et les fréquences correspondantes ν_{ce} et ν_{cD}
- les rayons de Larmor ρ_{Le} et ρ_{LD} .

Données : On suppose qu'électrons et noyaux de Deutérium ont même énergie cinétique

$$\text{cyclotronique : } \frac{1}{2} m_e v_{\perp e}^2 = \frac{1}{2} m_D v_{\perp D}^2 = 4 \text{ keV} \quad \text{et on prendra } B = 4,2 \text{ T.}$$

B - Calcul du champ magnétique toroïdal permanent $\vec{B}_T$ créé par le tokamak

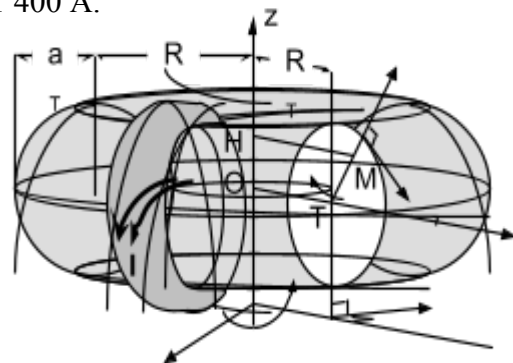
Le tokamak Tore Supra est équipé de $N_b = 18$ bobines supraconductrices, appelées bobines toroïdales, refroidies dans l'Hélium superfluide à 1,8 K, régulièrement réparties autour du tore de façon quasi-jointive. Elles comportent chacune $N_s = 2028$ spires circulaires parcourues par un courant permanent d'intensité $I = 1400 \text{ A}$.

Données :

Grand rayon du tore : $R_T = 2,40 \text{ m}$

Petit rayon du tore : $a_T = 1,20 \text{ m}$

 tore = chambre à vide accueillant le plasma
une des 18 bobines toroïdales supraconductrices



Repérage dans le tore :

(Oz) est l'axe principal du tore

$(O, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ définit le plan équatorial du tore

$\vec{u}_\theta$ définit la direction toroïdale

$(T, \vec{u}_\rho, \vec{u}_\alpha)$ définit un plan méridien du tore

$\vec{u}_\alpha$ définit la direction poloïdale

repérage du point M : $r = OM$ et $\rho = TM$

1) Montrer par une étude des symétries du problème que le champ magnétique toroïdal peut s'exprimer sous la forme : $\vec{B}_T = B_T(r, z) \vec{u}_\theta$.

2) En appliquant le théorème d'Ampère sur un cercle de rayon r et d'axe (Oz), déterminer, en fonction de r , l'expression du champ magnétique $\vec{B}_T$ créé par les bobines toroïdales. On distinguera l'intérieur de l'extérieur du tore. Donner l'allure de la courbe représentant $B_T(r)$ sur l'axe radial $(O, \vec{u}_r)$, dans le plan équatorial du tore.

3) Application numérique : Calculer l'amplitude du champ magnétique créé au centre du plasma, c'est à dire pour $r = R_T$.

C - Confinement magnétique d'un plasma dans le tokamak Tore Supra

Pour piéger des particules chargées soumises à un champ magnétique, il suffit de refermer ses lignes de champ sur elles-mêmes : on obtient ainsi une configuration de champ magnétique toroïdal, comme dans le tokamak Tore Supra. Dans ce dispositif, les particules chargées constituant le plasma sont des noyaux de Deutérium D^+ et des électrons.

Les résultats de la partie A ne sont pas directement transposables pour décrire le comportement des particules chargées du plasma, soumises au champ magnétique $\vec{B}_T$ crée dans Tore Supra, En effet :

- la norme de $\vec{B}_T$ n'est plus uniforme mais dépend de r ,
- les lignes de champ de $\vec{B}_T$ ne sont pas rectilignes mais circulaires.

Cependant, on supposera, en première approximation, qu'une particule chargée effectue toujours un mouvement de révolution autour du son centre guide G et que G se déplace, comme précédemment, suivant les lignes de champ magnétique, maintenant courbées.

1) On considère un électron ou un noyau D^+ , soumis à $\vec{B}_T$, tournant autour de leur centre guide G, lorsque G suit la ligne de champ magnétique $\vec{B}_T$ au centre du plasma, en $r = R_T$. Dans ce cas :

- a) Calculer numériquement la variation relative $\frac{\Delta B_T}{B_T}$ de l'amplitude du champ $B_T(r)$ sur l'étendue de la trajectoire de ces particules.
- b) Comparer numériquement les rayons de courbure des trajectoires de ces particules, dans leur mouvement autour du centre guide G par rapport au rayon R_T de la trajectoire de G.
- c) Commenter ces résultats de façon à justifier les approximations exprimées en introduction de cette partie.

- 2) L'expérience montre que la non-uniformité du champ $\vec{B}_T$ ainsi que la courbure de ses lignes de champ entraînent une légère dérive transverse de la particule chargée. On admet alors, que pour une particule chargée se déplaçant aux alentours du centre du plasma, en $r = R_T$, la vitesse de dérive de son centre guide G prend la forme :

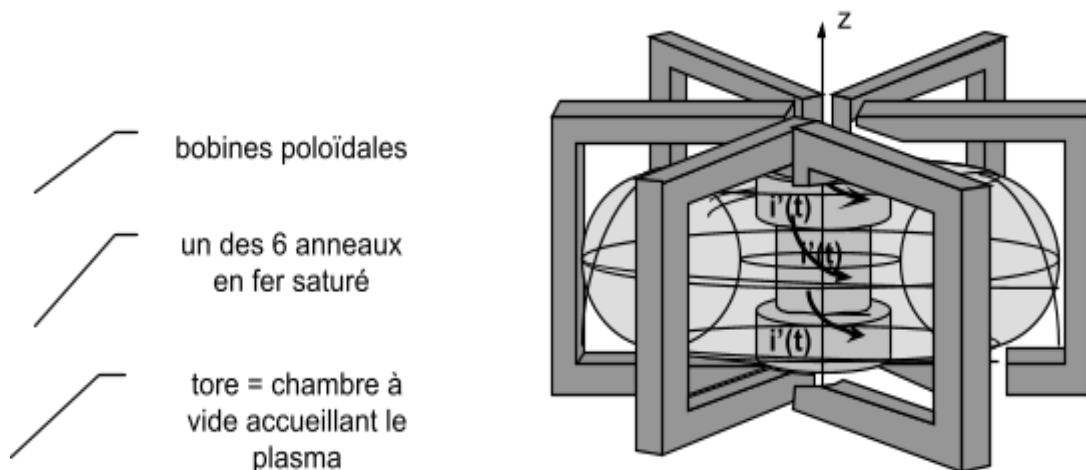
$$\vec{v}_d(G) = \varepsilon \frac{1}{R_T \omega_c} \left(v_{//}^2 + \frac{v_{\perp}^2}{2} \right) \vec{u}_z \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \varepsilon = +1 \text{ pour un noyau } D^+ \\ \varepsilon = -1 \text{ pour un électron} \end{cases}$$

- a) Représenter schématiquement l'évolution de la trajectoire d'un noyau D^+ subissant cette dérive lorsqu'il est soumis au champ magnétique $\vec{B}_T$. Même question pour un électron.

- b) Application numérique : calculer $\|\vec{v}_d(G)\|$ pour un électron et pour un noyau D^+ se déplaçant autour du centre du plasma, en $r = R_T$.
En déduire le temps t_d mis par une particule chargée, partant du centre du plasma pour atteindre la paroi matérielle du tore, en $\rho = a_T$.

Données : On prendra : $\frac{1}{2} m_e v_{\perp e}^2 = \frac{1}{2} m_D v_{\perp D}^2 = 4 \text{ keV}$, $v_{//}^2 = \frac{v_{\perp}^2}{2}$, $B(R_T) = 4,2 \text{ T}$.
Commentaires.

- 3) Pour contrecarrer cette dérive des particules chargées lorsque seul agit $\vec{B}_T$, on utilise un jeu de bobines coaxiales au tore, appelées bobines poloïdales, composées d'un grand nombre de spires parcourues par un courant variable $i'(t)$, de fréquence $\nu = 50 \text{ Hz}$. On associe à ces bobines 6 anneaux rectangulaires en fer saturé, régulièrement répartis autour du tore.



Pour alléger le schéma, les bobines toroïdales n'y sont pas représentées, mais imposent toujours le champ magnétique toroïdal $\vec{B}_T$ aux particules contenues à l'intérieur du tore. Le repérage dans le tore est identique à celui défini sur le schéma de la partie B.

- a) Définir le rôle de chaque élément du dispositif intervenant dans « le transformateur » permettant la création d'un courant dans le plasma.

b) Déterminer, en les justifiant, la direction et le sens :

- du champ magnétique $\vec{B}'$ créée par le courant $i'(t)$ circulant dans les bobines poloïdales
- du champ électrique $\vec{E}'$ induit dans le plasma par les variations de $\vec{B}'$
- du vecteur densité de courant plasma $\vec{j}'_p$ créé par les charges du plasma mises en mouvement par $\vec{E}'$. On assimilera le plasma à un milieu conducteur ohmique.
- du champ magnétique poloïdal $\vec{B}_p$ créé par le courant plasma.

On utilisera pour cela les vecteurs unitaires définis sur le schéma de la partie B.

- c) Montrer alors que les lignes de champ $\vec{B}_T + \vec{B}_P$ s'enroulent de façon hélicoïdale autour de surfaces toriques emboîtées, de rayon ρ constant, dont la valeur peut être prise du centre du plasma, correspondant $\rho = 0$, jusqu'à la paroi matérielle du tore, correspondant à $\rho = a_T$. On pourra s'aider d'un schéma.
- d) En déduire que, dans cette nouvelle structure de champ magnétique, l'effet de dérive est maintenant compensé entre les portions de trajectoire du centre guide G situées de part et d'autre du plan équatorial du tore.

Deuxième problème : Mesure de la densité électronique au sein du plasma par interférométrie Infra Rouge

La mesure de la densité ionique en noyaux D^+ est l'un des paramètres importants à connaître, avec leur énergie cinétique, pour pouvoir estimer la possibilité de réalisation de réactions de fusion. Partant d'un gaz neutre, les densités ioniques en noyaux D^+ et électroniques, supposées uniformes au sein du plasma, sont donc identiques :

$$N_e = N_D = N$$

du moins avant l'apparition quantitative de réactions de fusion. Dans ce problème, on supposera cette égalité vérifiée.

Sur Tore Supra, de nombreux diagnostics utilisent des rayonnements électromagnétiques comme moyen d'investigation, donnant accès à divers paramètres de fonctionnement du dispositif. Ces rayonnements sont soit directement émis par le plasma, soit, comme dans le cas que nous allons traiter, produits par des sources extérieures puis analysés après avoir traversé le plasma.

Avant de s'intéresser au diagnostic lui-même, étudions tout d'abord de façon générale, les conditions de propagation d'une onde électromagnétique à travers un plasma.

D - Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma – Condition de transparence

On considère un plasma totalement ionisé, constitué de noyaux de Deutérium D^+ et d'électrons, supposés non relativistes et sans interaction entre eux (modèle dit des « plasmas cinétiques classiques » non collisionnels).

On soumet ce plasma à une onde électromagnétique plane, progressive, monochromatique, caractérisée par son champ électrique, noté en complexe :

$$\underline{\vec{E}}(z, t) = \underline{\vec{E}}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

On suppose, dans cette partie, que le plasma n'est soumis qu'à cette seule onde électromagnétique, en dehors de toutes autres interactions.

- 1) Montrer que l'effet du champ magnétique de l'onde sur une particule chargée du plasma est négligeable par rapport à l'effet du champ électrique.

- 2) a) Exprimer en régime sinusoïdal établi, les vecteurs vitesses complexes $\vec{V}_e$ et $\vec{V}_D$ des électrons et des noyaux D^+ , en fonction du champ électrique $\vec{E}$.
- b) En déduire l'expression de la densité de courant complexe $\vec{j}_{\text{plasma}}$ due à la présence de l'onde au sein du plasma. Montrer, qu'en première approximation, la contribution des noyaux D^+ y est négligeable.
- c) Exprimer, dans ce cas, la conductivité complexe $\underline{\sigma}$ du plasma. Commenter le résultat concernant la faculté de l'onde électromagnétique à céder de l'énergie au milieu.
- d) Montrer que la densité volumique de charge au sein du plasma, notée ρ_{plasma} , est nulle.
- 3) a) En considérant le plasma comme un milieu linéaire homogène et isotrope, non polarisé et non magnétique, assimilable au vide, exprimer les vecteurs $\vec{D}$ et $\vec{H}$ caractérisant la réponse du plasma à l'excitation générée par l'onde électromagnétique.
- b) En déduire l'expression des 4 équations de Maxwell applicables au sein du plasma, en fonction des champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ qui y règnent et de la densité de courant $\vec{j}_{\text{plasma}}$.
- 4) En utilisant les résultats précédents en formalisme complexe :
- a) Montrer que l'onde qui se propage dans le plasma est transverse électrique.
- b) Montrer aussi qu'elle y garde une structure d'onde plane.
- c) Etablir l'équation de dispersion donnant k^2 en fonction de ω , c et de la pulsation plasma :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

- d) En supposant k réel, exprimer k en fonction de ω , c et ω_p . Tracer le graphe $k(\omega)$.
- 5) a) Pour quelles valeurs de la pulsation ω y a-t-il propagation de l'onde dans le plasma ? Déterminer dans ce cas, la vitesse de phase v_ϕ et la vitesse de groupe v_g de l'onde. Comparer v_ϕ et v_g avec c : vitesse de la lumière dans le vide. Que représentent physiquement les vitesses v_ϕ et v_g ?
- b) Montrer que la condition de propagation de l'onde au sein du plasma peut se traduire sur la densité électronique N par :

$$N < N_C$$

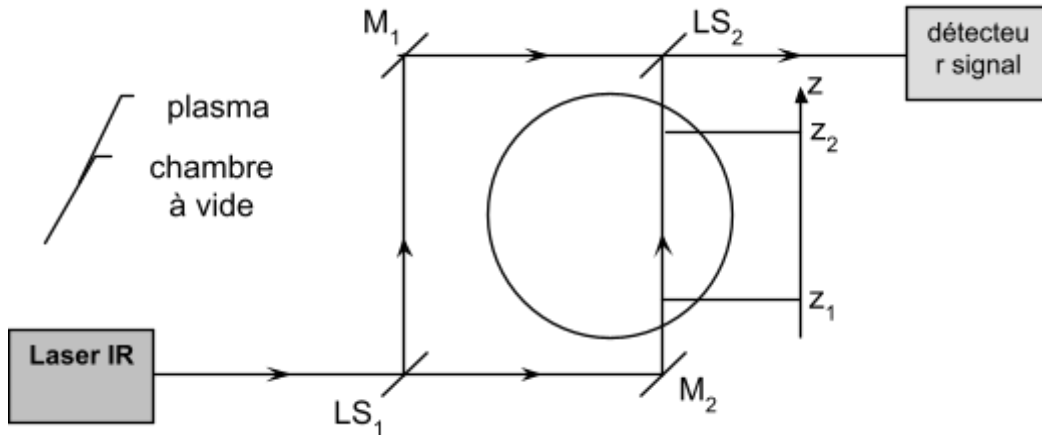
où on exprimera la valeur de la densité électronique critique N_C en fonction de la longueur d'onde λ de l'onde électromagnétique et d'autres paramètres du problème.

- 6) Exprimer l'indice optique $n(\omega)$ du plasma, défini par $v_\phi = \frac{c}{n(\omega)}$, d'abord en fonction des pulsations ω et ω_p , puis en fonction des densités électroniques N et N_C .
- 7) Application numérique : Calculer la valeur de la densité électronique critique N_C correspondant à une radiation monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 195 \mu\text{m}$.

E - Principe de mesure de la densité électronique au sein du plasma par interférométrie

La mesure de la densité électronique au sein du plasma sur Tore Supra, s'effectue à l'aide d'un interféromètre de Mach-Zehnder (schéma de principe ci-dessous).

Le faisceau émis par un laser est séparé par la lame semi-réfléchissante LS_1 . Les deux faisceaux résultants parcourent chacun l'un des bras de l'interféromètre, supposés parfaitement symétriques, en se réfléchissant sur un miroir oblique (M_1 pour le 1^{er} bras et M_2 pour le 2^{ème}). Après leur passage par la lame semi-réfléchissante LS_2 , les deux faisceaux interfèrent sur le détecteur signal. Le trajet de l'un des bras traverse le plasma verticalement, entre les cotes z_1 et z_2 , dans le plan méridien de mesure.



La source de l'onde électromagnétique d'investigation est un laser qui émet une radiation monochromatique, dans l'Infra Rouge lointain, à la longueur d'onde $\lambda = 195 \mu\text{m}$, particulièrement appropriée au domaine de variation de la densité électronique sur Tore Supra.

On suppose que les résultats de la partie D sont encore applicables.

Dans cette partie, on s'intéresse aux amplitudes s_1 et s_2 des signaux lumineux sortant de la lame séparatrice LS_2 après s'être réfléchis respectivement sur les miroirs M_1 et M_2

Posons :

$$\begin{cases} s_1(t) = a_1 \cos(\omega t) \\ s_2(t) = a_2 \cos(\omega t - \phi) \end{cases}$$

Avec cette convention de signe, le déphasage $\phi = \phi(s_1) - \phi(s_2)$ entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$, dû à la présence du plasma, sera positif. On supposera, à priori, a_1 et a_2 différents, sans chercher à calculer leur valeur.

- 1) Exprimer l'intensité lumineuse obtenue sur le détecteur « signal » en fonction de la différence de phase ϕ présente entre les deux signaux et des intensités portées par chaque rayon.
- 2)
 - a) Quelle est l'origine de l'existence d'une différence de phase ϕ entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$?
 - b) On se place en pratique dans le cas où la densité électronique N est très inférieure à N_C . Montrer dans ces conditions, que le déphasage peut se mettre sous la forme :

$$\phi = K \lambda \int_{z_1}^{z_2} N(z) dz$$

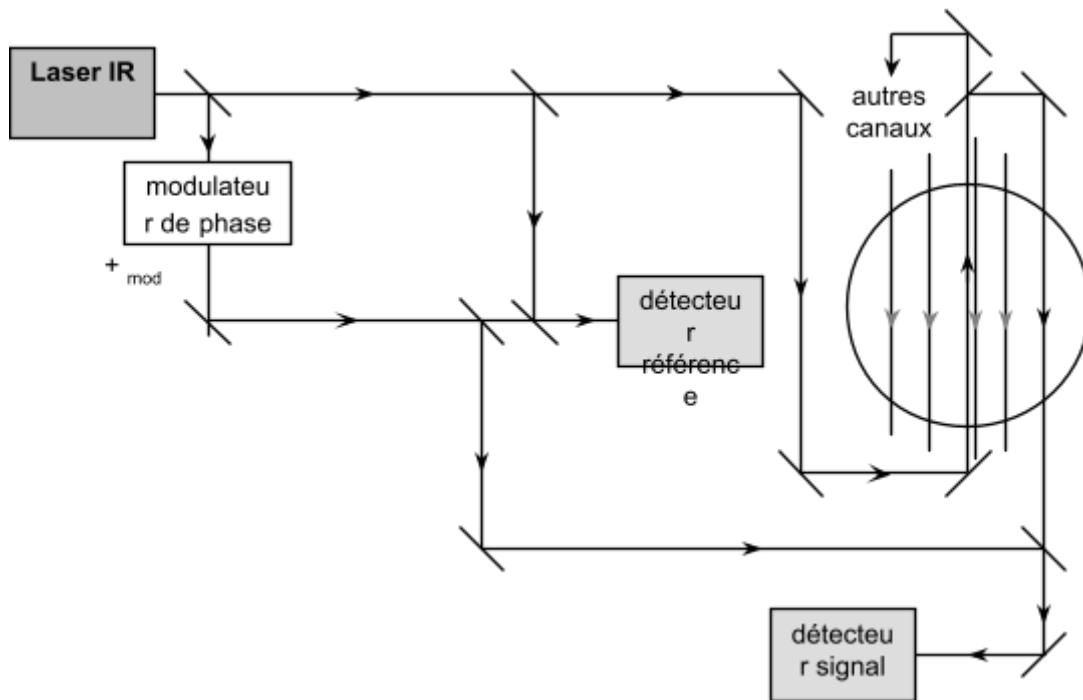
où on exprimera K en fonction des données et on calculera sa valeur numérique en précisant son unité.

$$N_{line} = \int_{z_1}^{z_2} N(z) dz$$

Dans la suite du problème, on posera N_{line} appelée abusivement (car elle n'en a pas les dimensions) « densité électronique linéique intégrée ». C'est en fait ce paramètre qui est mesuré sur le dispositif. L'obtention de la densité électronique volumique N se fait par calculs informatiques en couplant les mesures de N_{line} , faites sur 5 axes verticaux différents, à un modèle de description du plasma où N est supposée ne dépendre que de la coordonnée ρ . Cet aspect ne sera pas traité dans ce problème.

F - Réalisation pratique de la mesure du déphasage ϕ par modulation de phase

Le principe de mesure précédent permet de mesurer ϕ . Cependant, il reste sensible aux fluctuations d'amplitude des signaux lumineux et ne donne pas accès au sens de variation de ϕ . Pour remédier à ces inconvénients, on a choisi de réaliser, sur Tore Supra, le dispositif suivant :



Le rayon lumineux d'investigation effectue deux passages à travers le plasma : le premier en remontant par le centre du plasma, le second en descendant par l'un des 5 canaux de mesure. Comme dans la partie précédente, on notera ϕ le déphasage dû à la présence du plasma même si celui-ci tient compte de deux traversées du plasma par le faisceau.

Un traitement informatique permet de séparer le terme de déphasage correspondant à chacun des deux passages à travers le plasma, conduisant alors à la détermination de N_{line} sur les 5 axes de mesure.

Les deux détecteurs sont équipés de façon à délivrer une tension proportionnelle au terme interférentiel, en $\cos \phi$. On les notera de façon explicite u_R et u_S .

Le détecteur « référence » se situe en bout de chaîne d'un interféromètre à deux bras parfaitement symétriques. Les deux ondes qui lui parviennent sont déphasées de ϕ_R .

Le détecteur « signal » donne quant à lui accès au déphasage ϕ_s . La différence de longueur des deux bras de l'interféromètre de la partie « signal » se traduit par l'apparition d'une différence de phase ψ_0 constante, par rapport à la situation de la partie E.

Le modulateur de phase permet d'ajouter une pulsation constante ω_{mod} , de faible valeur à la pulsation ω de l'onde laser incidente. Dans ce dispositif :

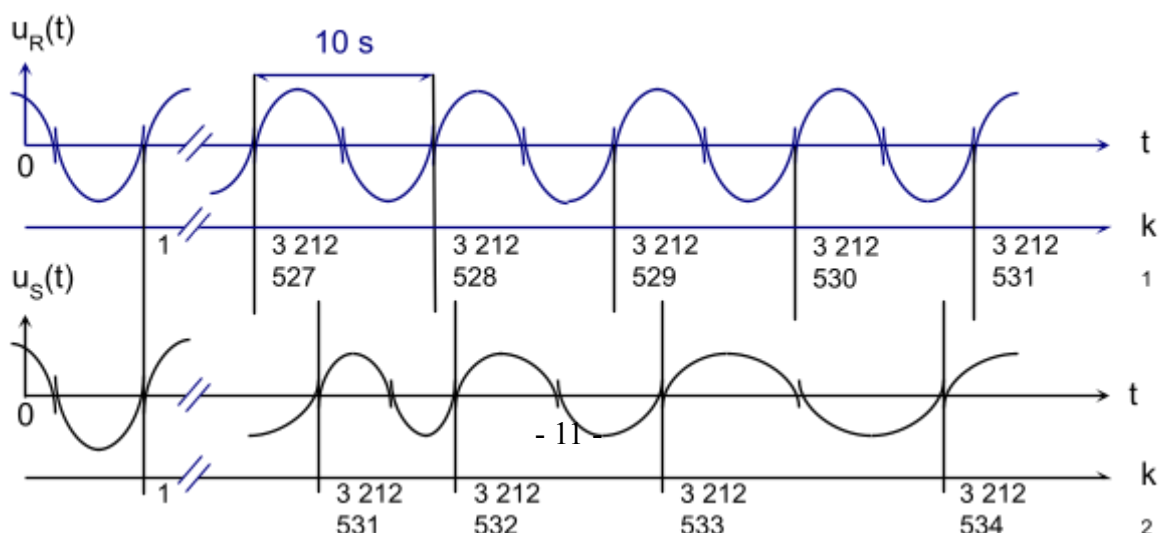
$$\omega_{\text{mod}} = 2\pi \cdot \nu_{\text{mod}} \quad \text{avec} \quad \nu_{\text{mod}} = 100 \text{ kHz}$$

obtenue par réflexion sur un réseau cylindrique tournant (cette considération, sur le mode d'obtention de ω_{mod} , n'est pas nécessaire à la résolution des questions suivantes).

Nous allons voir que l'utilisation de la modulation de phase de l'onde laser permet de faire apparaître ϕ_R et ϕ_s comme des fonctions du temps.

- 1) Déterminer les déphasages $\phi_R(t)$ et $\phi_s(t)$ mesurés sur les deux détecteurs.
- 2)
 - a) Quelle est la nature du filtrage électronique réalisé à la sortie de chaque détecteur pour obtenir une tension proportionnelle au terme interférentiel en $\cos \phi_R(t)$ ou $\cos \phi_s(t)$?
 - b) Par quel dispositif électronique réglable, situé à la sortie du détecteur « signal », peut-on compenser l'existence de ψ_0 ? Dans quelles conditions doit-on en effectuer le réglage ?
- 3) Soient k_1 et k_2 deux entiers naturels.
Soit t_1 un instant pour lequel la tension $u_R(t)$ s'annule, avec dérivée positive pour le k_1 -ième fois depuis le début de l'expérience.
Soit t_2 un instant correspondant à l'annulation de la tension $u_s(t)$, dans les mêmes conditions pour le k_2 -ième fois depuis le début de l'expérience.
 - a) Déterminer l'expression du déphasage ϕ dû à la présence du plasma, en fonction des instants t_1 , t_2 , de k_1 et k_2 et d'autres constantes.
 - b) Montrer que la mesure de ϕ peut se déduire de la mesure d'un intervalle de temps. Préciser la nature des termes qui interviennent dans l'expression de ϕ ?
- 4) Vérifier la levée des inconvénients émis en introduction de cette partie.
- 5) Application : Après avoir compensé le déphasage ψ_0 , on déclenche, à $t = 0$, l'acquisition des tensions $u_R(t)$ et $u_s(t)$. Sur chaque voie, un compteur permet de relever le nombre k_1 et k_2 de passages par zéro avec pente positive des tensions $u_R(t)$ et $u_s(t)$ depuis le début de l'expérience.

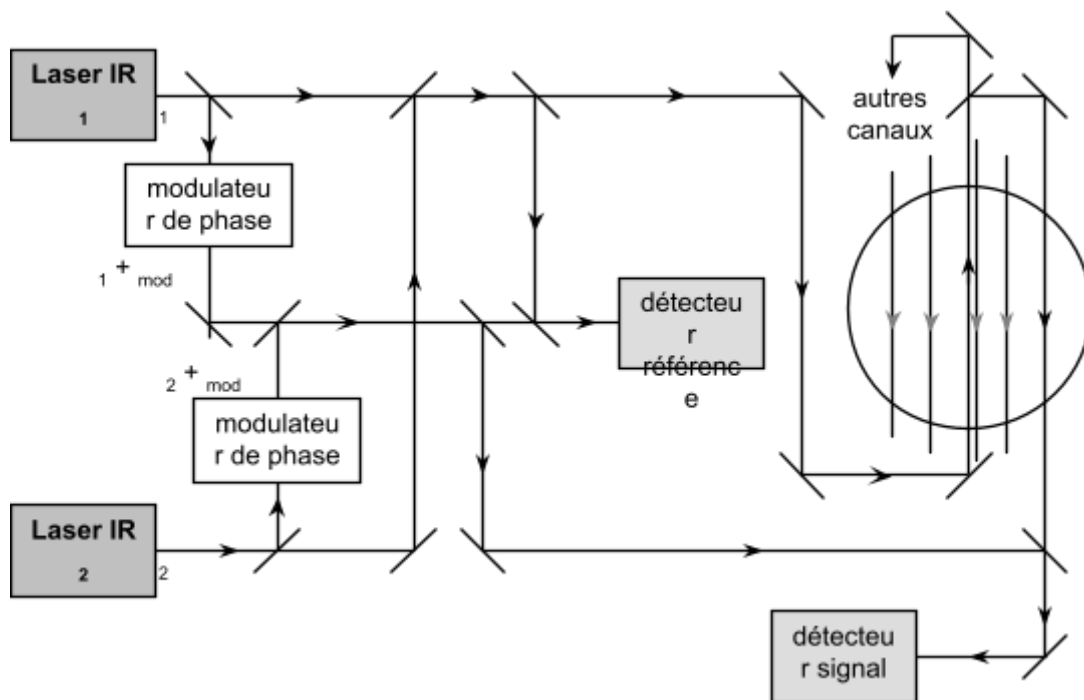
En utilisant les graphes suivants, déterminer les différentes valeurs de ϕ accessibles et celles de N_{line} correspondantes.



G - Dispositif de compensation des vibrations et des déformations de la structure portante

Les miroirs de renvoi des rayons lumineux, au-dessus et en dessous du tore sont fixés sur la structure magnétique des anneaux en fer saturé liés aux bobines poloïdales. On observe, dès la prémagnétisation du dispositif, des déformations et des vibrations de cette structure portante, générant une variation de chemin optique, de l'ordre d'une centaine de micromètres, sur le rayon traversant le plasma, ce qui perturbe fortement la mesure de N_{line} .

Dans le but de compenser ces perturbations, on utilise simultanément deux lasers infrarouges de longueurs d'onde voisines. Le premier, déjà utilisé dans les parties E et F, est un laser type DCN, à gaz comprimé, mélange de N_2 , He et CD_4 (méthane lourd), de longueur d'onde $\lambda_1 = 195 \mu\text{m}$. Le second est un laser de type H_2O , à mélange de vapeur d'eau et d'hydrogène, qui émet une radiation monochromatique, à la longueur d'onde $\lambda_2 = 118 \mu\text{m}$. Ces deux radiations sont analysées séparément dans chaque détecteur. Le dispositif utilisé est schématisé ci-dessous :



On note ϕ_1 (respectivement ϕ_2) la valeur du déphasage dû à la présence du plasma, mesurée à l'aide de la radiation de longueur d'onde λ_1 (respectivement λ_2), par la méthode décrite dans la partie F, en absence de toute perturbation. On appelle δ la différence de chemin optique totale engendrée par une déformation ou une vibration, exercée à un instant donné.

- 1) Déterminer, pour chacune des deux radiations de longueur d'onde λ_1 et λ_2 , les déphasages Φ_1 et Φ_2 tenant compte de la perturbation appliquée.

$$N_{\text{line}} = \frac{\Phi_1 \lambda_1 - \Phi_2 \lambda_2}{K (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}$$

- 2) a) Montrer que :

où K possède la même valeur qu'à la question E.2) b).

- b) Justifier alors que ce dispositif de mesure de N_{line} à deux lasers permet d'éliminer les effets d'une déformation ou des vibrations de la structure portante.