

Chapitre I

Généralités sur les plasmas

I -Généralités sur les plasmas

I-1 - Qu'est-ce que c'est qu'un plasma?

Le plasma, appelé aussi le quatrième état de la matière, est un gaz (partiellement) ionisé, dans lequel on trouve à côté des molécules de gaz neutres et des fragments de celles-ci, des électrons libres et des cations, un fait qui rend le gaz conducteur. Il s'y ajoute un grand nombre de molécules excitées qui retombent dans leur état initial en émettant un rayonnement électromagnétique. La lueur caractéristique du plasma est due à ce phénomène.

L'énergie nécessaire à la formation d'un plasma peut avoir de différentes sources. On trouve des plasmas dans la nature p.ex. sur le soleil aussi bien que dans des éclairs et des flammes mais aussi dans des phénomènes atmosphériques telles les "aurores boréales". La génération technique des plasmas la plus répandue est celle d'une radiation incidente de champs électriques. D'après la fréquence appliquée, on fait la différence entre le plasma à courant alternatif (50 Hz), à audio- (kHz), à radio-fréquence (MHz) ou le plasma à micro-ondes (GHz) . On se sert de la technique du plasma p.ex. dans les tubes néon; depuis quelques temps, on l'exploite surtout dans le domaine du traitement des surfaces.

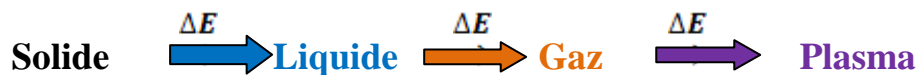
La différenciation des plasmas entre "le plasma froid" (non thermique) et "le plasma chaud" (thermique) est courante.

I-1-1-Formation d'un Plasma :

--- Dans les conditions usuelles, un milieu gazeux ne conduit pas l'électricité. Lorsque ce milieu est soumis à un champ électrique faible, un gaz pur est considéré comme un isolant électrique parfait, car il ne contient aucune particule chargée libre (électrons ou ions positifs). Mais des électrons libres et des ions positifs peuvent apparaître si on soumet le gaz à un champ électrique de forte intensité ou à des températures assez élevées, si on le bombarde de particules ou s'il est soumis à un champ électromagnétique très intense.

Lorsque l'ionisation est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide très conducteur qu'on appelle plasma.

--- Un plasma est un gaz ionisé. Comme tel, il est donc constitué en général d'électrons, d'ions, d'espèces atomiques ou moléculaires neutres et de photons. Un gaz ionisé étant obtenu par apport d'énergie à un gaz, les plasmas sont souvent présentés comme un "4^{ème} état" de la matière, faisant suite aux phases solide, liquide et gazeuse :



I-1-2-Historique sur la découverte de plasma :

C'est en 1923 que les physiciens Langmuir et Tonks [1] ont introduit la première fois le terme plasma pour désigne le gaz ionisé contenu dans un tube de décharge.

La physique des plasmas, science du 20^e siècle est née de l'étude des décharges dans les gaz. Depuis 1920 cette discipline s'est considérablement développée en raison de son intérêt (milieux naturels, applications industrielles), intégrant l'essentiel des connaissances de la physique moderne. Dans la nature, le plasma constitue le quatrième état de la matière et fait suite, dans l'ordre croissant des températures, aux états solides, liquides et gazeux. La phase plasma correspond, à l'équilibre thermodynamique, à l'ionisation totale d'un gaz par collision entre les particules neutres. Cette situation ne peut être atteinte, dans ces conditions, qu'à très haute température (supérieur à 50000 K) afin que l'énergie d'agitation thermique soit du même ordre que le seuil d'ionisation des neutres.

En toute rigueur, l'appellation plasma devrait être réservée aux gaz complètement ionisés et globalement neutres, les particules chargées (ions, électrons) en interaction générant des champs locaux de charge d'espace qui peuvent être à l'origine d'oscillations d'ensembles comparables à celles d'une gélatine. Par extension, on a pris l'habitude d'appeler plasma tous les gaz ionisés. Cela conduit à une grande diversité de situations physiques, puisqu'un grand nombre de plasmas de laboratoire sont hors équilibre thermodynamique, l'ionisation résultant des collisions entre électrons et neutres (les électrons, accélérés par un champ électrique extérieur, ont alors une température élevée par rapport à celle des neutres).

Devant cette difficulté de classification, on caractérise les plasmas à partir de leur degré d'ionisation, leur densité et leur température électronique. Cette première approche permet de constater que la physique des plasmas couvre un domaine de densité électronique allant de 10^6 m^{-3} (espace interstellaire) à 10^{30} m^{-3} (plasmas dans les métaux, étoiles) pour des températures comprises entre 10^2 °K (espace interstellaire) et 10^8 °K (intérieur des étoiles, plasmas de fusion). La physique des plasmas tient donc une place importante dans l'étude des milieux naturels (astrophysique) et des gaz ionisés produits en laboratoire.

Bien que l'on admette actuellement que 99 % de l'Univers est constitué de matière à l'état plasma, cette discipline est encore trop peu enseignée. La raison en est sans doute la complexité de cette matière de synthèse qui fait pratiquement appel à tous les domaines physiques (mécanique statistique, mécanique quantique, théorie des collisions, physique atomique et moléculaire, physique nucléaire, théorie cinétique, équations de transport, thermodynamique, ondes, rayonnement, spectroscopie, électricité, cinétique chimique, équations couplées non linéaires, ...). L'intérêt présenté par cette science a suscité de nombreux travaux théoriques et expérimentaux qui ont permis d'approfondir notre connaissance sur un plan à la fois fondamental et appliqué.

Ces efforts ont eu pour effet l'introduction progressive de ces techniques dans l'industrie où on distingue trois familles de plasmas :

- les plasmas froids, où les ions et les neutres restent à des températures inférieures à 1000 °K , alors que les électrons sont à des températures élevées (applications au traitement de surface, à l'élaboration des matériaux nouveaux, à la dépollution, à la génération d'ozone, à la chimie assistée par plasma, ...), les plasmas thermiques, caractérisés par des températures de fonctionnement supérieures à 3000 °K (utilisations des décharges d'arc pour la soudure, la découpe, la projection de matière, la dépollution, ...),
- les plasmas chauds, correspondant à des températures supérieures à 10^6 °K

(l'objectif étant de produire de l'énergie électrique à partir de la fusion contrôlée).

I-1-3-Génération et maintien des plasmas :

À la différence des gaz neutres, les plasmas, du fait de leur caractère chargé, sont sensibles à l'action des forces électromagnétiques. Un gaz contenant toujours quelques charges libres (ne serait-ce que par l'effet du rayonnement cosmique), l'application d'un champ électrique peut communiquer une énergie suffisante aux particules les plus mobiles, les électrons, qui produisent une paire électron-ion par collisions sur les espèces neutres selon le schéma réactionnel :



Ou n désigne un atome ou une molécule neutre et i un ion. l'électron supplémentaire produit peut à son tour être accéléré par le champ électrique et entrer en collision avec un neutre, de sorte que l'on peut ainsi produire un plasma de densité finie par ce mécanisme d'avalanche électronique . La génération des plasmas par apport d'énergie électromagnétique n'est pas le seul processus de création des plasmas. L'apport direct de chaleur par élévation de la température (plasmas thermiques) ou par absorption de photons énergétiques (photo ionisation) sont 2 autres exemples de processus générateurs de plasmas. L'ordre de grandeurs des énergies d'ionisation des atomes étant de l'ordre de quelques eV (pour les halogènes, sauf l'hydrogène) à la dizaine d'eV (pour les gaz rares), l'ordre de grandeur de l'énergie à apporter pour produire un plasma est de l'ordre de l'eV, soit 11 600 Kelvin. Outre la question de génération des plasmas que nous venons de discuter brièvement, se pose la question essentielle de maintien du plasma. Dans les grandes lignes l'analyse de cet aspect résulte d'une problématique gains/pertes. Les espèces chargées sont créées en volume par ionisation mais perdues par diffusion (induites par les collisions ou la turbulence) vers les parois du réacteur (donc en surface), et éventuellement perdues également en volume si des mécanismes de recombinaisons de charges sont possibles dans le plasma étudié. Le maintien du plasma sur des temps suffisamment longs passe par cet équilibre.

- **A - Plasmas de laboratoire : plasmas froids :**

Les plasmas faiblement ionisés (ou plasmas froids ou décharges électriques) sont créés au sein de réacteurs initialement remplis de gaz neutres et alimentés par une source extérieure d'énergie électromagnétique. Les paramètres extérieurs de contrôle d'une décharge comprennent donc le choix d'un gaz à une pression déterminée, les diverses longueurs qui fixent la géométrie du réacteur choisi, et les grandeurs physiques caractéristiques de la source d'énergie (fréquence caractéristique d'alimentation, tension d'alimentation ou puissance absorbée par le dispositif).

La nature des gaz utilisé dépend de l'application visée ; parmi les plus simples, on peut citer, l'argon ou le xénon, souvent utilisés comme gaz modèles pour les études académiques,

l'oxygène moléculaire, O₂, et le fluorure de bore, BF₃ utilisés respectivement pour la croissance de films d'oxyde de silicium ou de dépôt de bore sur des substrats de silicium.

Les gaz sont utilisés sur une large gamme de pression, typiquement du mTorr à la pression atmosphérique. Les unités courantes sont le Torr et le bar. On rappelle les correspondances :

$$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ Torr}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Torr} = 133,3 \text{ Pa}$$

Plusieurs types de réacteurs, qui correspondent à différentes façons de coupler l'énergie électromagnétique au plasma ont été imaginés. Par exemple, dans les réacteurs dits capacitifs, une différence de potentiel, continue ou variable dans le temps est directement appliquée entre deux électrodes qui donnent naissance à un champ électrique agissant sur les charges dans le plasma. Dans les réacteurs dits inductifs, on fait circuler un courant variable dans une des électrodes qui crée un champ magnétique variable et donc un champ électrique également variable par induction.

Selon le type de réacteur utilisé, les densités électroniques (ou ioniques) observées sont de l'ordre de 10^9 à 10^{12} particules par cm³ (voire davantage pour les micro décharges ou l'une au moins des dimensions du dispositif est micrométrique). Ces densités sont souvent très faibles par rapport à la densité des neutres qui sont les espèces majoritaires. Dans la plupart des plasmas froids, les taux d'ionisation sont très faibles, de 10^{-5} à 10^{-1} . On a donc en général pour le taux d'ionisation α :

$$\frac{n_e}{n_e + n_n} \approx \frac{n_e}{n_n} \ll 1 \quad \textit{plasma faiblement ionisé}$$

Du fait du rapport des masses, les transferts de quantité de mouvement ou d'énergie sont très faibles des électrons vers les neutres, et très efficaces (masses voisines) entre les ions et les neutres. En conséquence, les températures des espèces légères (électrons) et des espèces lourdes (ions, neutres) sont très différentes au sein d'un plasma froid (au moins à basse pression sur des échelles de temps suffisamment courtes) : les plasmas froids ne sont pas des

milieux à l'équilibre thermodynamique, les températures des ions et du gaz sont voisines, et d'un à 2 ordres de grandeurs plus faibles que la température des électrons :

$$T_i \approx T_n \quad \text{et} \quad \frac{T_i}{T_e} \ll 1 \quad \textit{plasma hors-équilibre}$$

- **B - Plasmas naturels : plasmas spatiaux:**

Mis à part ces plasmas créés en laboratoires (plasmas artificiels), il existe des plasmas naturels. Dans le voisinage de la terre, on peut mentionner les éclairs, les aurores boréales ou l'ionosphère. Dans l'espace, les environnements ou les intérieurs stellaires constituent d'autres exemples de plasmas présents dans l'univers. Le soleil, par exemple, génère un plasma très conducteur, le vent solaire, qui progresse à quelques centaines de km/s dans l'espace interplanétaire.

Quand le vent solaire rencontre le champ magnétique terrestre, il subit une déviation et génère une onde de choc. Face au soleil, le champ se trouve comprimé, alors qu'il est étiré sous forme d'une longue queue magnétique du côté opposé. Pour donner une idée de la variété des plasmas naturels et artificiels, quelques-uns d'entre eux sont regroupés dans le plan température électronique-densité électronique. On notera que les températures et densités varient respectivement sur 8 et 25 ordres de grandeurs.

- **C- Plasmas de laboratoire : plasmas chauds :**

Dans d'autres dispositifs, comme ceux à confinement magnétique (Tokamaks), à confinement par lasers (fusion inertielle) ou par compression magnétique (Zpinch), les plasmas sont créés à plus hautes densités et beaucoup plus haute température électronique (on parle de plasmas chauds).

Dans les tokamaks par exemple, le confinement du plasma est obtenu par de forts champs magnétiques dont les lignes de courant s'entourent sur un tore (**Figure 1-1**).

Les particules chargées du plasma suivent ces lignes de champ et restent ainsi confinées un certain temps.



(Figure 1-1) – Configuration Tokamak pour les plasmas de fusion magnétique.

Les lignes bleues représentent les lignes de champ magnétique.

L'objectif recherché dans ce genre de dispositifs est la création d'énergie par fusion thermonucléaire contrôlée d'éléments légers, principalement selon la réaction :



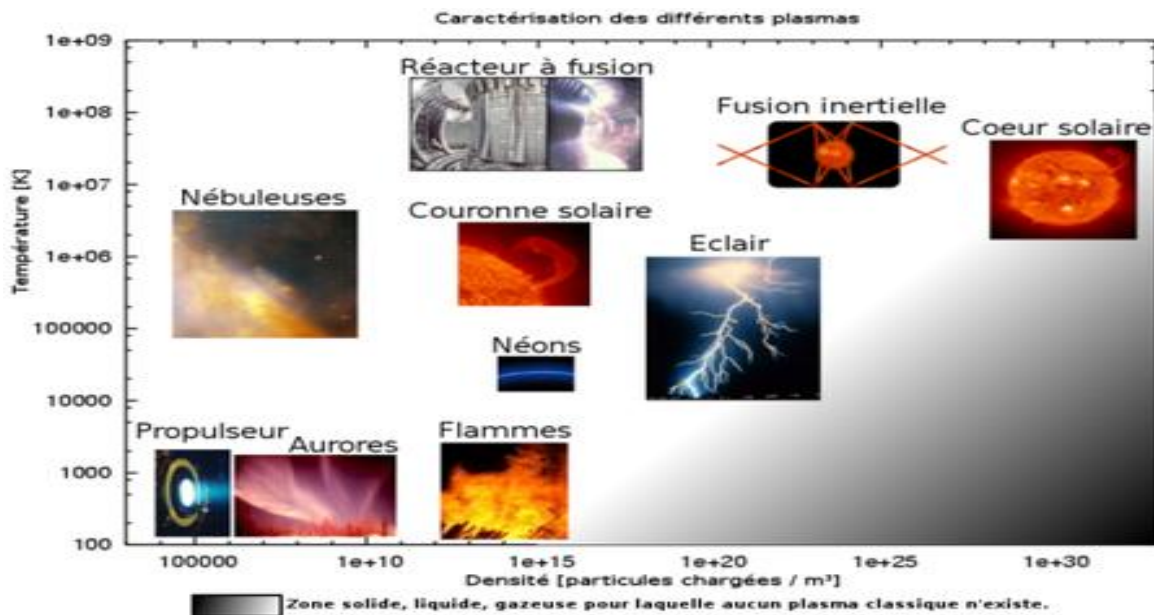
On peut montrer que cette réaction ne peut s'entretenir que pour des températures de l'ordre du keV. A ces températures le plasma est complètement ionisé ($\alpha \approx 1$), les densités observées dans les tokamaks en fonctionnement sont de l'ordre de 10^{12} à 10^{13} particules par cm^3 . Les difficultés associées au développement de tels dispositifs sont à la fois technologiques (génération de champs magnétiques intenses et stables, tenue des matériaux au flux de neutrons ...) et scientifiques (le problème majeur de la stabilité du plasma sur des échelles de temps suffisamment longues passe par la maîtrise des phénomènes de turbulences observées dans ces conditions expérimentales).

-D- Plasmas naturels : plasmas spatiaux

Mis à part ces plasmas créés en laboratoires (plasmas artificiels), il existe des Plasmas naturels. Dans le voisinage de la terre, on peut mentionner les éclairs, les aurores boréales ou l'ionosphère. Dans l'espace, les environnements ou les intérieurs stellaires constituent d'autres exemples de plasmas présents dans l'univers. Le soleil, par exemple, génère un plasma très conducteur, le vent solaire, qui progresse à quelques centaines de km/s dans l'espace interplanétaire.

Quand le vent solaire rencontre le champ magnétique terrestre, il subit une déviation et génère une onde de choc. Face au soleil, le champ se trouve comprimé, alors qu'il est étiré sous forme d'une longue queue magnétique du côté opposé. Pour donner une idée de la variété des plasmas naturels et artificiels, quelques-uns d'entre eux sont regroupés dans le plan température électronique-densité électronique (**Figure 1-2**).

On notera que les températures et densités varient respectivement sur 8 et 25 ordres de grandeurs.



(Figure 1-2) – Diagramme température électronique- densité électronique pour quelques plasmas.

I-1-4- Applications des plasmas :

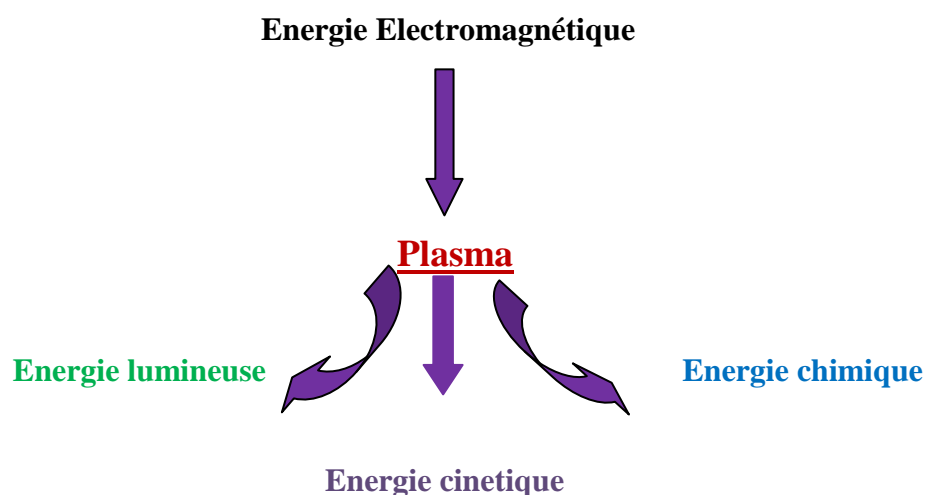
La principale application des plasmas chauds, encore en développement, consiste en la production d'énergie par fusion thermonucléaire contrôlée d'éléments légers.

Compte tenu des températures d'amorçages nécessaires aux réactions de fusion, l'utilisation de réacteurs à parois matérielles n'est pas envisageable, de sorte que le confinement par champs magnétiques (Tokamaks) ou par laser (fusion inertielle) semble une des seules voies possibles de production d'énergie par fusion.

En outre, les éléments impliqués, essentiellement le deutérium et le tritium, sont disponibles en quantité abondante et ne produisent que des déchets faiblement radioactifs et pas de CO₂.

Les autres applications des plasmas peuvent être classifiées schématiquement en considérant le plasma comme un convertisseur de l'énergie électromagnétique reçue en diverses autres formes d'énergie (**Figure 1-3**). Citons en particulier :

- la conversion énergie électromagnétique/énergie lumineuse ou l'on tente d'optimiser un processus d'excitation électronique particulier qui conduira à l'émission de photons (éclairage, écrans à plasmas, lasers X à plasma ...)
- la conversion énergie électromagnétique/énergie cinétique ou le plasma est utilisé en tant que source de particules chargées (sources d'ions, faisceaux d'électrons, propulsion ionique...)
- la conversion énergie électromagnétique/énergie chimique ou l'on exploite le fait qu'un plasma peut être la source d'espèces chimiquement actives (traitement des matériaux, stérilisation, dépollution ...)



(Figure 1-3)

I-1-5- Exemple sur le plasma :

On distingue les plasmas naturels :

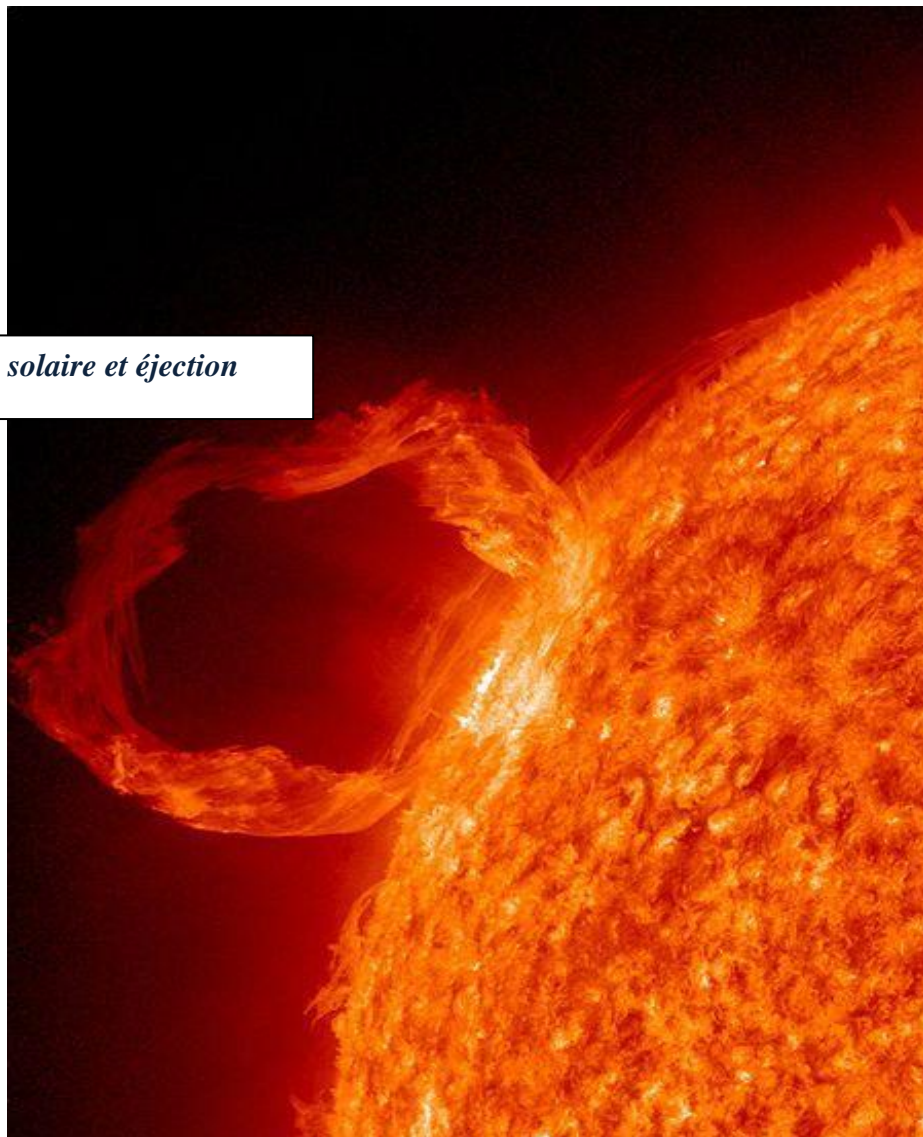
- les étoiles, nébuleuses gazeuses, quasar, pulsar ;
- les aurores boréales ;
- les éclairs ;
- l'ionosphère ;
- le vent solaire;
- La queue des comètes

Et les plasmas industriels :

- dans les téléviseurs ;
- les décharges (comme dans un disjoncteur à haute-tension, ou tube à décharges (lampes, écrans, torche de découpe, production de rayon X)) ;
- les plasmas de traitement pour dépôt, gravure, modification de surface ou dopage par implantation ionique ;
- la propulsion par plasmas ;
- la fusion nucléaire (voir aussi Tokamak, Stellarator et Z-pinch) ;
- et de nombreuses autres applications qui ne sont encore que des expériences de laboratoire ou des prototypes (radar, amélioration de combustion, traitement des déchets, stérilisation etc.).



Une jolie lutte entre le champ magnétique terrestre et le vent solaire.



Eruption solaire et éjection

Notre système solaire produit donc du plasma, qui est généralement éjecté vers l'espace à des vitesses considérables (de l'ordre de 1 à 3 millions de kilomètres par heure). Ce plasma forme alors ce qu'on appelle le vent solaire. On admet généralement que les dimensions d'un système solaire sont délimitées par la distance maximale parcourue par les vents solaires. Ces vents balayent la Terre en permanence. La surface de la Terre est protégée de l'impact des particules du vent solaire par sa ionosphère qui annule le plasma: les aurores boréales sont la manifestations de cette lutte.



Lors d'une éruption solaire, le soleil envoie du plasma, gaz très chaud et très dense, dans l'espace. Normalement le champ magnétique terrestre dévie ce plasma.

I-2-Généralités sur les interféromètres

L'interférométrie est l'étude et l'utilisation du phénomène d'interférence dû aux propriétés ondulatoires de la lumière. Ce phénomène d'interférence est un processus additif dans lequel les amplitudes de deux ou plusieurs ondes lumineuses superposées sont systématiquement atténuées et renforcées; des franges sont alors formées. Pour que deux ondes visibles puissent interférer, il faut qu'elles soient cohérentes, c'est-à-dire qu'elles aient la même fréquence, une relation de phase fixe, et que leurs champs électriques E_1 et E_2 ne soient pas perpendiculaires. En effet:

-- Si elles ne sont pas cohérentes, leur superposition donnera lieu à des franges "instables" sitôt que la durée dépasse celle d'un train d'ondes émis par la source ($\sim 10^{-8}$ s); donc pratiquement inobservables et inutilisables.

-- Si elles n'ont pas quasiment la même fréquence, une variation rapide de la dépendance temporelle de déphasage se produit. Une variation temporelle rapide en résulte, les franges sont alors instables et inobservables.

-- Si les deux ondes sont polarisées perpendiculairement l'une à l'autre, le produit scalaire du terme $\langle E_1 \cdot E_2 \rangle$ est toujours nul; leur superposition ne donnera pas de franges ;

Ces conditions ne sont en général réalisées qu'en sélectionnant dans l'onde provenant d'une source lumineuse deux ondes capables d'interférer. Deux méthodes générales existent :

1- Interférences par division du front d'onde (à l'intérieur du domaine de cohérence spatiale): l'un des dispositifs suivants peut être utilisé: trous d'Young, miroirs de Fresnel, bi prisme de Fresnel, bi lentilles de Billet.

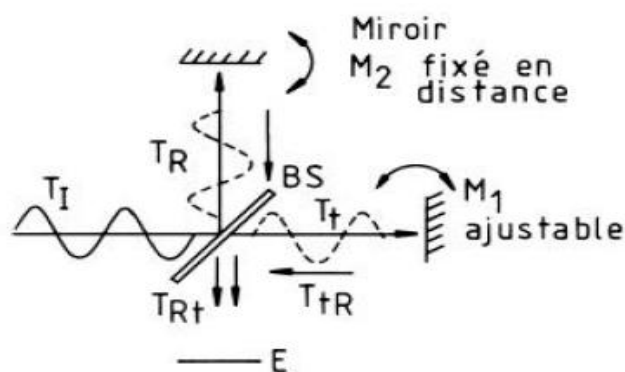
2- Interférences par division d'amplitude (pour une distance inférieure à la longueur de cohérence): les interféromètres utilisent ce principe. Citons les interféromètres de Michelson, Mach-Zehnder, Pulfrich et Jamin. [16]

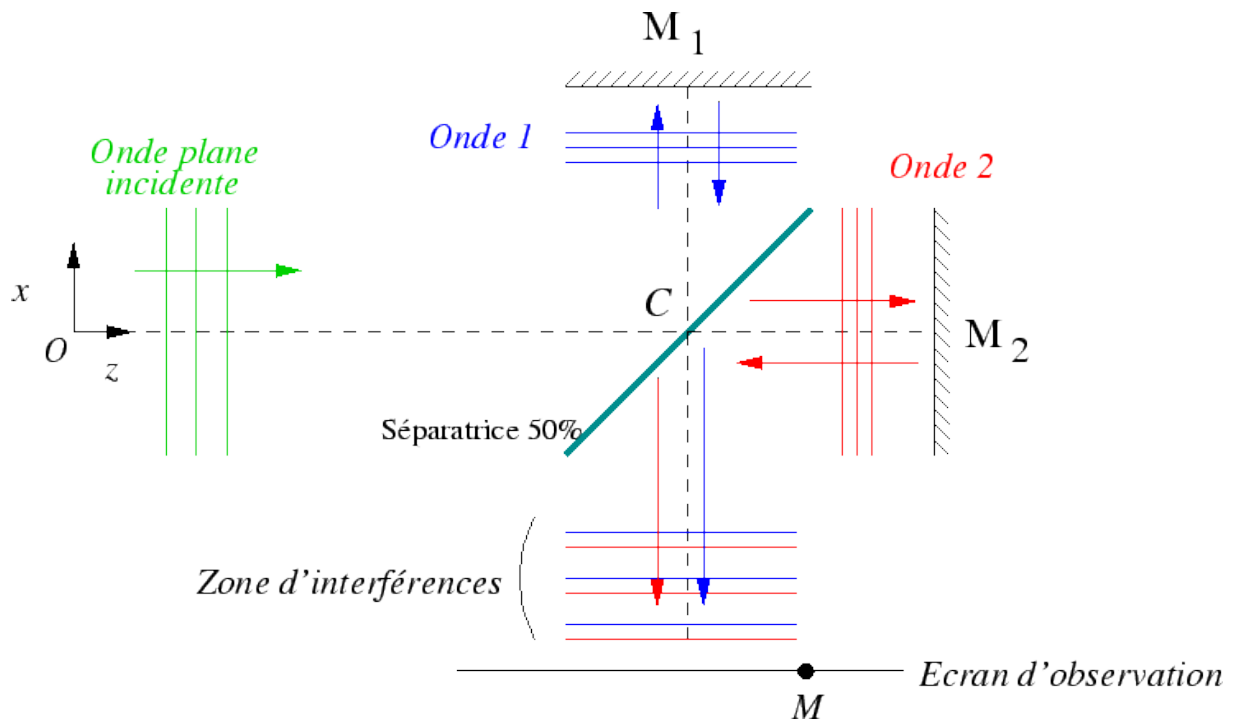
I -2-1- Les interféromètres à deux ondes :

I -2-1-1- Interféromètre de Michelson

L'interféromètre de Michelson est un appareil qui divise un faisceau incident en deux parties et les recombine après un trajet quasiment identique. Ces très légères différences de trajet optique créent un phénomène d'interférences lumineuses. L'appareil est à la base d'un grand nombre d'expériences d'optique ondulatoire. Il constitue également un excellent exercice pour s'initier aux méthodes de réglage sur des instruments de haute précision.[17]

Le principe de fonctionnement de cet interféromètre est déjà décrit d'une façon générale dans le paragraphe 2, la **figure (4)** montre son schéma de principe. Une lame semi réfléchissante B_S (lame en verre à faces parallèles dont l'une est très légèrement argentée) est placée à 45° par rapport au faisceau incident. Deux miroirs plans sont placés à 90° l'un par rapport à l'autre et à 45° par rapport à B_S . Un train d'ondes incident (T_I) est divisé par B_S en une partie transmise T_t et une partie réfléchi T_R , amplitude de $T_R =$ amplitude de $T_t = \frac{1}{2}$ amplitude T_i . T_t et T_R sont ensuite réfléchis sur M_1 et M_2 pour venir se recombinaer après réflexion de T_t (T_{tR}), et transmission de T_R (T_{Rt}) sur B_S . Une image d'interférence, résultant de cette superposition, peut alors être détectée sur un écran E à 90° de T_I pour autant que la différence des chemins optiques de T_t et T_R soit





(Figure I-4) : schéma de principe de l'interféromètre de Michelson [17].

Inférieure à la longueur de cohérence (il ne faut pas que l'une arrive après que l'autre soit passée !). Cette différence de chemin est déterminée par les milieux transparents que T_t et T_R traversent ainsi que par les distances B_S-M_1 et B_S-M_2 . En général, un ajustement fin des positions des miroirs est nécessaire; les flèches (Figure.1-4) indiquent la solution adoptée.

On peut analytiquement et expérimentalement démontrer que:

- 1) Pour un ajustement approprié de l'orientation de M_1 et M_2 , les franges obtenues sur E sont rectilignes, circulaires, elliptiques, paraboliques ou hyperboliques.
- 2) Pour une figure d'interférence donnée, un déplacement parallèle d'un miroir de $\lambda_0/2$ fait passer chaque frange sur la position de sa voisine.

Ainsi, pour mesurer une différence de chemins optiques, il suffit de régler l'interféromètre pour obtenir des franges (parallèles, par exemple), de fixer la position d'une frange comme repère et de compter le nombre N de franges qui y passent lors d'une variation ΔL de chemins optiques de l'un des deux faisceaux T_R ou T_t . On a alors

$$\Delta L = N \frac{\lambda_0}{2} \quad (1.17)$$



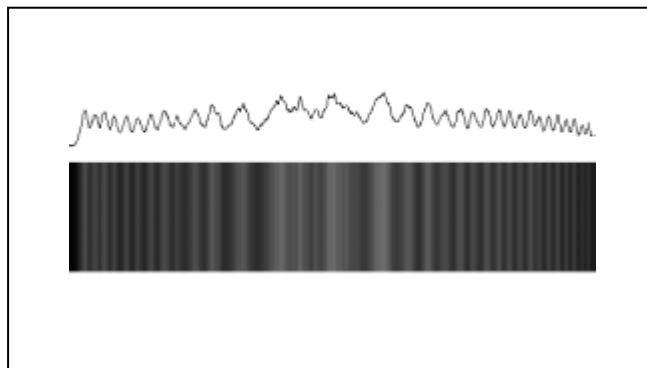
(Figure.1-5) -Vue depuis l'entrée du dispositif (à gauche) et Vue de dessus (à droite)



(Figure-1-6)-Trajets des rayons dans l'interféromètre



(Figure.1-7).[18]



(Figure1-8). [18]

I -2-1-2-Interféromètre en lame d'air

Cette situation est obtenue lorsque les deux miroirs sont parfaitement perpendiculaires et que leur distance à la lame séparatrice est différente. On obtient alors une figure formée d'anneaux concentriques ; plusieurs exemples en sont présentés ci-dessous.

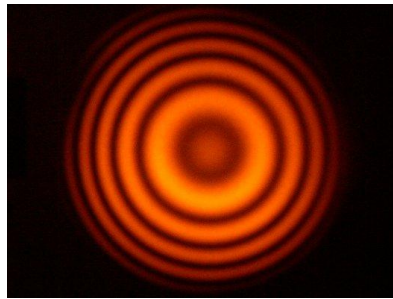
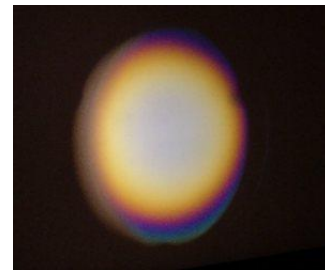


Figure :Anneaux d'interférences obtenus avec un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air, éclairé par une lampe à vapeurs de Sodium, émettant une lumière orangée.[19]



(Figure 1-9)

Lorsque les deux miroirs sont situés presque à même distance de la lame séparatrice S_p (on parle alors de contact optique, on observe de moins en moins d'anneaux pour tendre vers une figure d'interférences constituée d'une intensité uniforme et d'une couleur unie. On parle alors de teintes plates de Newton. Celles-ci sont encore plus perceptibles lorsqu'on utilise une source de lumière blanche. [19]

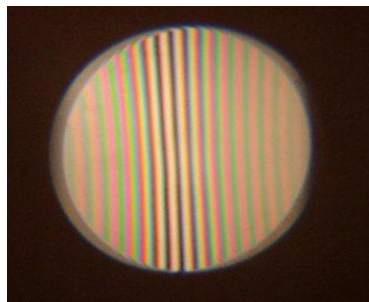
La photo ci-dessus à gauche est prise un peu avant le contact optique, la photo de droite correspond à une position plus proche du contact optique. On peut observer sur ces deux dernières photographies que les anneaux sont un peu ovales; cela provient d'un réglage pas tout à fait optimal de la perpendicularité des miroirs.

I -2-1-3. Interféromètre en coin d'air :

L'interféromètre est réglé en coin d'air lorsque les deux miroirs ne sont plus strictement parallèles, mais restent pratiquement à la même distance de part et d'autre de la lame séparatrice.

On peut alors montrer que la situation s'apparente alors à celle du film d'eau savonneuse vue dans les pages qui précèdent ; comme dans ce cas, on observe des franges d'interférences rectilignes.

Sur la photographie faite ci-dessous, on voit très clairement deux zones circulaires éclairées (les deux miroirs de l'interféromètre en fait) et, dans leur partie commune, des franges d'interférence quasiment rectilignes. Les couleurs de ces franges sont irisées car l'éclairage est réalisé en lumière blanche.



(Figure.1-10): Franges rectilignes, interféromètre en coin d'air , observation en lumière blanche.[19]

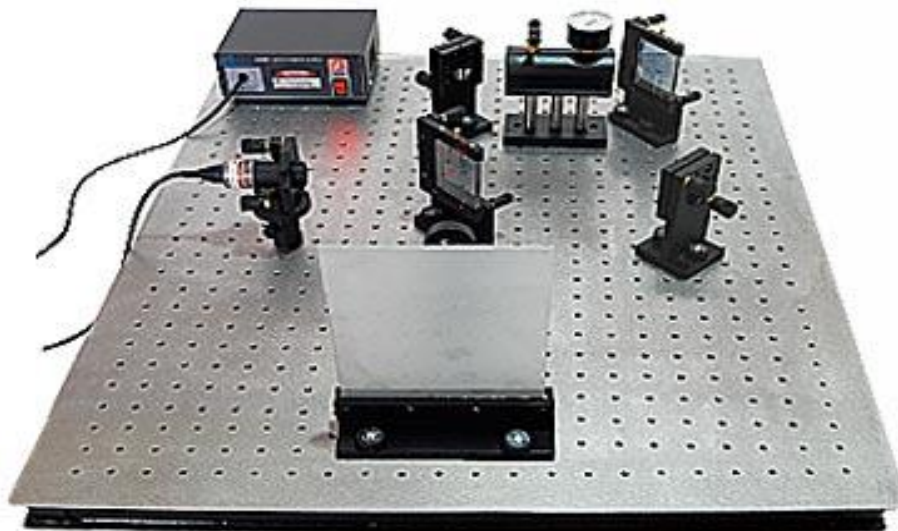
I-2-1-4- Interferometre de Mach - Zehnder

L'interféromètre de Mach-Zehnder est un interféromètre optique créé par Ernst Mach et

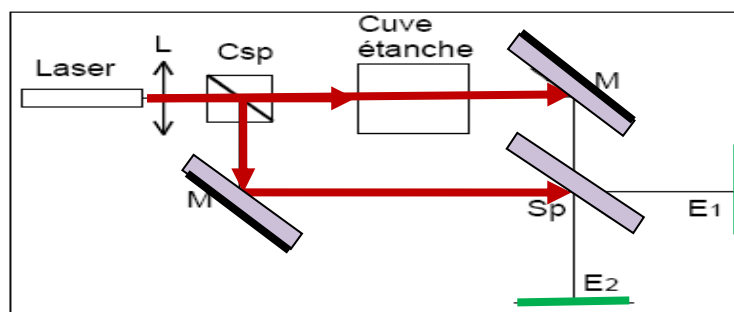
Ludwig Zender [20]. Il est constitué de deux miroirs et de deux lames semi-réfléchissantes

Comme le montre le schéma ci-dessous, un faisceau lumineux est divisé en deux, puis ces deux faisceaux sont alors recombinaés à l'aide d'un miroir semi réfléchissant. Ils vont donc pouvoir interférer entre eux.

La figure d'interférences ainsi obtenue permet de réaliser des mesures très précises sur la source de lumière.



(Figure.1-11).Montage réel de l'interféromètre de Mach-Zehnder[20]



(Figure.1-12).Schéma du montage optique.[21]

I-2-2- interféromètre à ondes multiples :

I-2-2-1- Interféromètre de Fabry- Pérot

L'interféromètre de Fabry -Pérot est un interféromètre à ondes multiples formé d'une lame d'air à faces parallèles. Cette lame d'air est constituée de deux lames de verre dont les faces

internes sont planes et traitées réfléchissantes. Le parallélisme des lames est réglable ainsi que la distance entre les lames (épaisseur de la lame d'air).

L'interféromètre est monté sur des pieds anti-vibratoires.

Construit pour la première fois par Charles Fabry et Alfred Pérot à la fin du XIX^e siècle, il est constitué d'un système microscopique à fort pouvoir de résolution, mais il sert aussi de cavité résonnante pour les lasers.

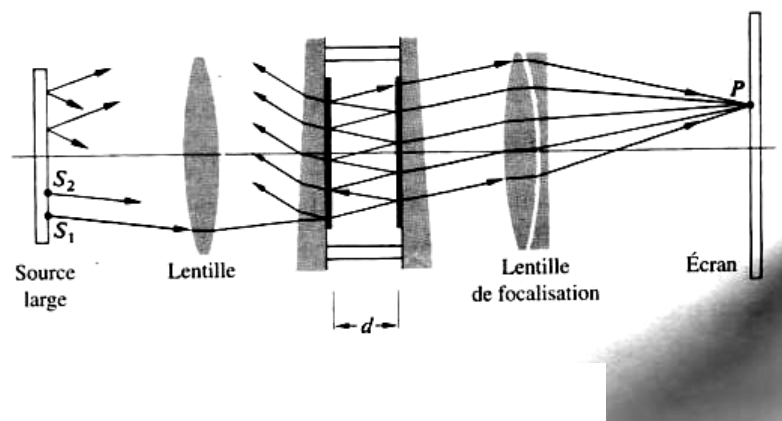
En principe le système repose sur deux surfaces hautement réfléchissantes planes, parallèles, séparées une distance. Il s'agit de la configuration la plus simple. En pratique on utilise deux plans étalons semi- argentés ou aluminés comme surfaces réfléchissantes. L'épaisseur d'air associée varie généralement de quelques millimètres à quelques centimètres lorsque l'appareil est utilisé de manière interférométrique, et souvent jusqu'à des longueurs considérablement plus grandes lorsqu'il est utilisé comme cavité résonnante d'un laser. Si l'on peut faire varier mécaniquement cet intervalle en translatant l'un des miroirs, il se rapporte à un interféromètre. Lorsque les miroirs sont fixes et ajustés en parallélisme au moyen de cales (l'invar ou le quartz sont souvent employés), on parle de l'étalon (bien qu'il soit toujours un interféromètre au sens large du terme). Si les deux surfaces d'une simple lame de quartz sont convenablement polies et argentées, celle-ci servira également d'un étalon, d'une autre part si les faces non argentées des lames sont souvent taillées pour réduire la figure d'interférence provenant des réflexions sur ses faces.

La figure (1.15). montre un étalon par une source étendue, qui pourrait être un arc à mercure ou un faisceau laser He-Ne de quelques centimètres de diamètre. Cela peut s'effectuer en éclairant la pupille de sortie d'un télescope mis au point à l'infini, et en diffusant la lumière par une lame de verre dépoli. On n'a tracé qu'un seul des rayons émis d'un point S_1 de la source à travers l'étalon. Entrant par la lame partiellement argentée, il est de nombreuses fois réfléchi à l'intérieur de l'étalon. Les rayons transmis sont collectés par une lentille et focalisés sur l'écran, où ils interfèrent pour former soit une tache brillante, soit une tache sombre. Considérons ce plan d'incidence particulier, qui contient tous les rayons réfléchis. Un autre rayon émis d'un point différent S_2 , parallèle au rayon original et situé dans ce plan d'incidence, formera une tache au même point P sur l'écran. Comme nous le verrons.

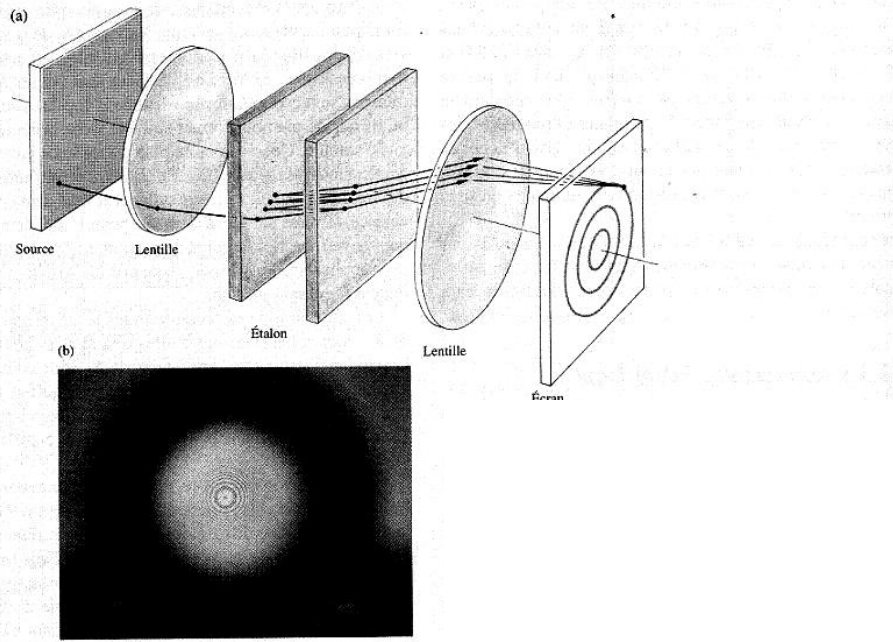
Les ondes multiples produites dans la cavité soit de S_1 soit de S_2 sont cohérentes entre elles quand elles arrivent en P. Cependant, les rayons provenant de S_1 soit complètement incohérents avec ceux venant de S_2 , de sorte qu'il n'y a aucune interférence mutuelle durable. la contribution à l'éclairement I_t (éclairement en transmission déterminé par l'équation $I_t = \frac{I_i (tt')^2}{(1+r^4) - 2r^2 \cos\delta}$) en P est simplement la somme des deux contributions de l'éclairement.

Tous les rayons ayant le même angle engendrèrent une frange circulaire d'éclairement uniforme figure (1.16). Avec une source étendue diffuse, les franges d'interférences seront des cercles concentriques étroits, correspondant à une figure d'interférence à ondes multiples à transmission.

On peut observer visuellement le système de franges en regardant à l'infini. Le travail de la lentille de focalisation, qui n'est plus alors nécessaire, est fait par l'œil. Pour de grandes valeurs de d , les anneaux seront trop resserrés, et un télescope pourrait être nécessaire pour les agrandir. Un monocle bon marché remplira la même fonction et permettra de photographier les franges localisées à l'infini. Il est possible de produire des franges réelles non localisées grâce à une source ponctuelle brillante.



(Figure 1.15) : Etalon Fabry –Perot. [22]



(Figure 1.16) : (a) étalon Fabry-Perot. (b) franges à symétrie axiale vues dans l'étalon.

[22]

Les films métalliques semi- transparents souvent utilisés pour augmenter le facteur de réflexion ($R=r^2$) absorberont une partie A de flux ; cette fraction est dénommée facteur d'absorption. L'expression :

$$tt'+r^2=1 \tag{I.18}$$

Où $T+R=1$ (I.19)

Où Test le facteur de transmission, doit maintenant se réécrire ainsi :

$$T+R+A=1 \tag{I.20}$$

Une autre complication introduite par les films métalliques est le déphasage additionnel $\phi(\theta_i)$, qui peut différer de zéro ou de π . la différence de phase entre les deux ondes successivement transmises est alors de :

$$\delta = \frac{4\pi n_f}{\lambda_0} d \cos\theta_i + 2\phi \tag{I.21}$$

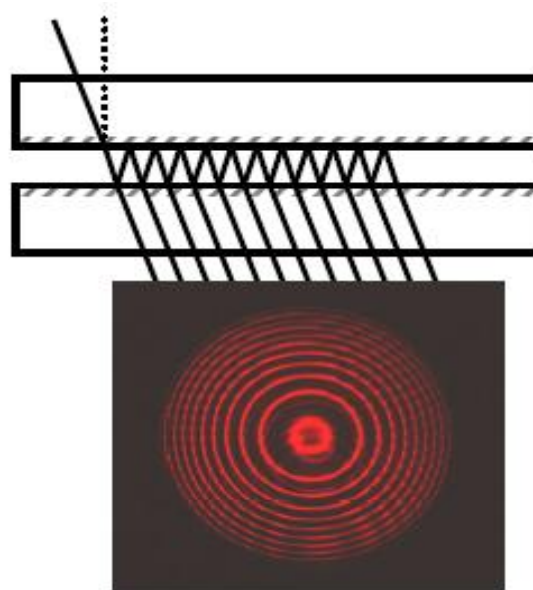
Dans les conditions présentes, θ_i est petit et ϕ peut être considéré comme constant . En

général, d est tellement grand, et λ_0 tellement petit que ϕ peut être négligé. Nous pouvons exprimer le rapport des deux clairement transmit et incident comme :

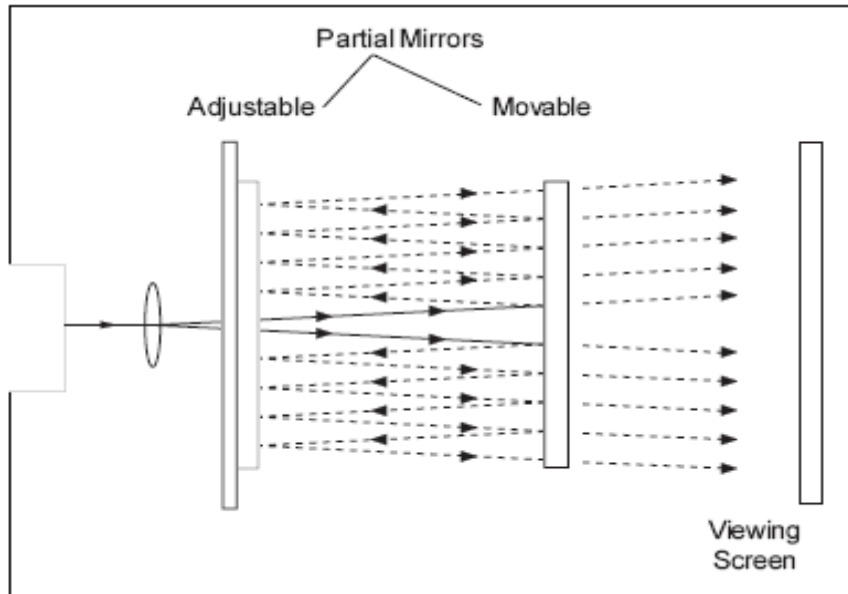
$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R\cos\delta} \tag{I.22}$$

En utilisant l'équation (I.19) et la définition de la fonction d'Airy, nous obtenons :

$$\frac{I_t}{I_i} = \left[1 - \frac{A}{(1 - R)} \right]^2 A(\theta) \tag{I.23}$$



(Figure 1.17) principe de fonctionnement [23]



(Figure1. 18) interferometre de fabry-perot[24]

I- 3 - Les différentes techniques de diagnostics :

Comment savoir ce qui se passe au coeur du plasma, dans une machine sous vide hermétiquement fermée où règne des températures de plusieurs millions de degrés ? C'est le rôle des diagnostics, ces instruments de mesure aussi variés qu'astucieux, et qui nécessitent le savoir-faire de nombreux spécialistes. Les tokamaks en sont truffés, ils sont indispensables.

I-3-1- comment mesurer ce qu'on ne peut toucher ?

Il est évidemment difficile d'introduire un instrument de mesure dans le plasma, milieu plutôt hostile avec ses millions de degrés, n'en déplaise au lord anglais qui, réagissant à une interrogation d'un de ses collègues lors des débats pour la construction du tokamak JET "Mais quel genre de thermomètre est capable de mesurer des millions de degrés ?", répondit "Un très grand, I présume". On a donc recours à des instruments de mesure qui observent le plasma à distance respectueuse, souvent derrière des hublots spécialement conçus. Impossible d'être exhaustif (Tore Supra compte plus d'une quarantaine de diagnostics) mais on peut en citer quelques uns à titre d'exemple en les classant en différentes catégories suivant le principe de mesure :

- utiliser l'émission naturelle du plasma dans toutes les gammes de longueur d'onde, depuis les rayons X jusqu'à l'infrarouge, en passant par le visible.

Les rayons X, mesurés par des caméras équipées de détecteurs spéciaux, sont liés au rayonnement de freinage des électrons très énergétiques, et permettent d'avoir des renseignements sur leur distribution en énergie et donc l'efficacité d'un chauffage par exemple.

Dans l'ultraviolet, des spectromètres mesurent le rayonnement des impuretés lourdes, comme les métaux, ce qui fournit des renseignements sur la pollution du plasma et donne éventuellement l'alarme en cas de surchauffe d'un composant métallique.

Des caméras CCD travaillant dans le visible permettent d'avoir une vue générale de la chambre à vide, avec le halo rose caractéristique de l'interaction plasma/paroi au bord de la décharge.

Toujours dans le visible, des fibres optiques ou des endoscopes installés sur les composants face au plasma donnent des informations locales sur le rayonnement des espèces légères, comme le deutérium, l'hélium ou le carbone. Cela permet de progresser dans la compréhension des interactions plasma/paroi, en particulier au niveau de l'émission d'impuretés par érosion.

Voici par exemple un gros plan sur un neutraliseur du divertor ergodique (le plasma repose sur les longues structures au centre de l'image) [figure\(1-19\)](#), et le même, vu par un endoscope équipé d'un filtre permettant de sélectionner l'émission d'une molécule d'hydrocarbure, formée entre le carbone érodé et le deutérium du plasma lors de certains processus d'érosion. On voit clairement que l'émission est concentrée autour des surfaces avec lesquelles le plasma est en contact.

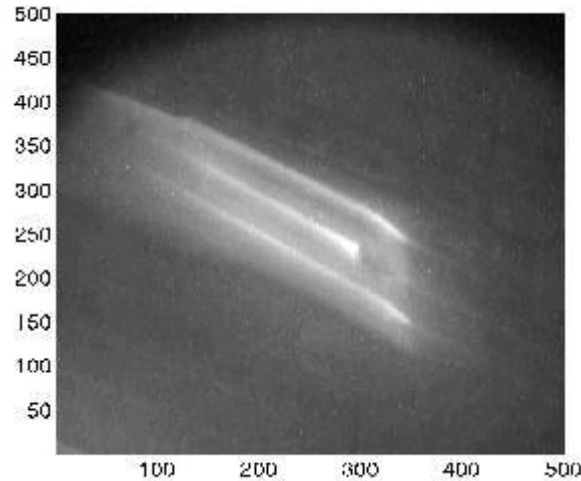


Figure (1-19),

Quant au domaine de l'infrarouge, de nombreuses caméras sont elles utilisées pour mesurer l'élévation en température des composants face au plasma, et constituent un élément vital pour la sécurité de la machine. Si on observe un échauffement anormal, on coupe immédiatement la puissance additionnelle, et on arrête le plasma. **figure(1-20),**

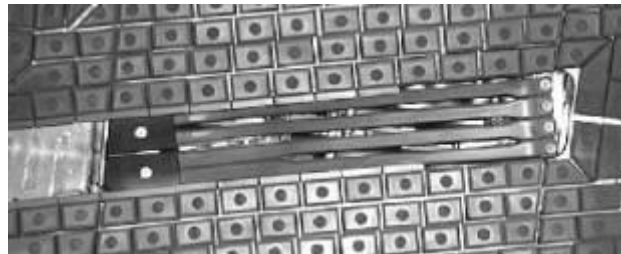


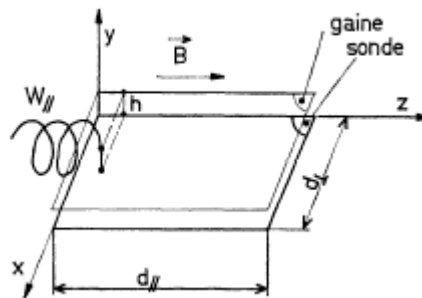
Figure (1-20),

I- 3-2- Les diagnostics locaux :

L'emploi d'une sonde plane, placée parallèlement au champ magnétique, dont les dimensions sont grandes devant le rayon de Larmor électronique, permet de lever certaines difficultés théoriques et expérimentales. Pour cette géométrie, la perturbation du plasma (densité, potentiel) est négligeable. Ce résultat étant obtenu pour des sondes de dimensions suffisantes, le courant collecté est facilement mesurable. Toutefois, cette géométrie ne

permet pas un calcul rigoureux des caractéristiques de sonde et on est amené à faire des hypothèses sur la répartition spatiale de la différence de potentiel sonde -plasma afin de calculer les branches électroniques et ioniques de la caractéristique.

L'étude des caractéristiques de sonde est effectuée dans le domaine des paramètres considérés est tel que les dimensions de la sonde, petites devant les libres parcours moyens et comparables au rayon de Larmor ionique, sont grandes devant le rayon de Larmor électronique lui-même grand devant la longueur de Debye. Dans cette géométrie, le courant ionique, proportionnel à la surface de la sonde, est petit devant le courant électronique lorsque la polarisation de la sonde est positive. Le courant électronique, proportionnel à la dimension de la sonde perpendiculairement au champ magnétique et au rayon de Larmor électronique, est quasiment indépendant de la température des ions et peut être décrit par une courbe universelle.

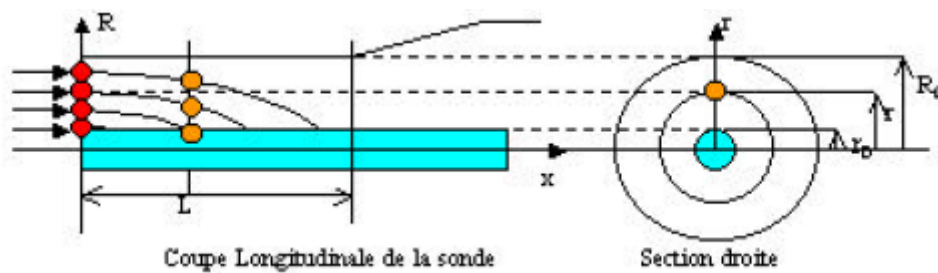


(Figure 1.21) : Schéma de mécanisme de collection électronique par une sonde plane, placé parallèlement au champ magnétique [6].

La sonde de Langmuir (Figure. 1.23) : constitue le plus simple instrument de diagnostic pour des plasmas de laboratoire. Le fonctionnement de la sonde est le suivant : Les charges électriques entraînées par un écoulement gazeux pénètrent dans la sonde dont la structure permet de la considérer comme iso cinétique. Ces charges sont mises en mouvement perpendiculairement à l'écoulement gazeux par un champ électrique confiné dans l'espace inter électrodes. La totalité des charges apportées par l'écoulement est collectée par l'électrode réceptrice. Un montage à forte impédance résistive permet de transformer les variations de charges collectées en courant puis en tension. A partir de l'acquisition de la

tension induite sur cette électrode seront déterminés : Tout d'abord les variations de courant, ensuite le profil temporel des charges entrant dans la sonde (ce qui va nécessiter d'établir un modèle permettant de caractériser la réponse de la sonde).

Pour établir ce modèle, il existe deux types de structures : une est constituée par deux cylindres concentriques, l'élément récepteur des charges en transit étant une fine électrode cylindrique, polarisée de signe opposé à celui des charges à collecter (Figure.1.22). L'autre électrode étant un cylindre concentrique mis à la masse.



(Figure. 1.22) : fonctionnement de la sonde de Langmuir [7]



(Figure. 1.23) : la sonde de Langmuir

I-3-3- les diagnostics à distance

I-3-3-1- La spectroscopie optique[8]

Ou la spectrométrie, est l'étude du spectre d'un phénomène, c'est-à-dire l'étude de la répartition d'une onde ou d'un faisceau de particules en fonction de la fréquence ou de l'énergie. Le suffixe « scopie » fait référence à l'observation visuelle, par exemple l'impression sur un film photographique, la projection sur un écran ou bien l'utilisation d'une lunette d'observation (par exemple lunette montée sur un goniomètre pour la dispersion de la lumière par un prisme). Le suffixe « métrie » fait référence à l'enregistrement d'un signal.

Cette grandeur peut être un rayonnement électromagnétique, mais aussi une onde mécanique comme le son ou les ondes sismiques, ou encore des particules ou des masses. L'instrument de mesure permettant d'obtenir un spectre est un spectromètre.

La spectroscopie est utilisée dans de nombreux domaines : astronomie, biophysique, chimie, physique atomique, physique nucléaire, physique du solide....

Il existe différents types de spectroscopies classées suivant la grandeur physique mesurée ou le processus de la mesure.

"Quand les mystères sont très malins, ils se cachent dans la lumière" disait le poète Giono dans *Ennemonde* [9].

Il est vrai que la lumière contient de nombreuses informations sur les corps qui l'ont émise, les objets qui l'ont reflétée ou les produits qu'elle a traversé. Pour mieux connaître la structure physique ou chimique de ces produits, on analyse comment la lumière est modifiée. Ce principe est appliqué en spectrométrie d'absorption ou de fluorescence.

Lorsque la matière est soumise à un rayonnement, elle absorbe une partie de ce rayonnement. Cette absorption est décrite sous forme d'un spectre qui donne, pour chaque longueur d'onde, le niveau d'absorption.

L'absorption dépend de la structure chimique et physique de l'objet étudié. En fonction du type de rayonnement électromagnétique appliqué, on collecte des informations sur différentes caractéristiques de l'objet : les liaisons moléculaires, les liaisons électroniques, la structure cristalline...

I-3-3-2- la strioscopie

C'est une autre méthode optique de visualisation pour isoler dans une image des détails comme des faibles variations d'indice lors de la compression de l'air ou d'autre fluide.

la **strioscopie** orientée sur l'arrière plan est une méthode optique similaire développée à la fin des années 90 respectivement en Angleterre et en Allemagne, afin de mesurer quantitativement les champs de densité dans les fluides. Cette méthode utilise les propriétés optiques des fluides inhomogènes, qui sont à la base du *Schlieren* classique, classique, combinées aux possibilités offertes par les outils informatiques en terme de traitement d'image. Les propriétés physiques des fluides (température, densité, salinité) influent faiblement sur leur indice optique, si bien qu'un fluide inhomogène peut être considéré comme un objet de phase. La déformation locale d'une image vue à travers un tel milieu est alors proportionnelle au gradient d'indice optique dans le milieu. Si l'image est constituée de points blancs aléatoirement repartis sur un fond noir, les algorithmes de vélocimétrie par images de Particules (PIV) sont alors tout à fait appropriés à une mesure fine de déformation locale.

Le principe repose sur la mesure de l'angle de réflexion des rayons lumineux à travers le fluide inhomogène. Cet angle α est proportionnel au gradient d'indice optique présent dans le milieu et à l'épaisseur de fluide traversée.

I-3-3-3- L'ombroscopie (Shadowgraph)

Elle permet de visualiser le déplacement d'un faisceau lumineux par rapport à la position qu'il aurait s'il s'était propagé en droite ligne. Cette technique est sensible aux changements de la dérivée seconde de la densité du gaz. Le changement de phase absolu n'est visible que par l'interférométrie. Le principe de chacune de ces trois techniques est notamment décrit par A.boutier et al [10]. Cette technique n'est cependant pas valable dans les écoulements turbulents R.Jenrich.1981[11].

L'ombroscopie est intéressante par sa simplicité, on voit facilement, par exemple, la géométrie de la distribution de pression, l'expansion des ondes dans les courants de gaz supersonique, la structure turbulente des jets compressible et les faible flux. Cette technique n'est cependant pas valable pour des mesures quantitatives de la densité car il faut intégrer 2 fois pour obtenir la valeur de la densité à partir de la valeur mesurée. Ce la introduit de trop grosses erreurs. Les systèmes strioscopiques permettent de mesurer la déviation de la lumière générer par les objets de phase transparents. La variation de l'intensité enregistrée sur une photo peut être évaluée quantitativement afin d'obtenir le gradient de la densité du gaz.

Une intégration mène alors à la, distribution de la densité dans le champ de flux observé. La mesure du contraste n'est cependant pas facile à réaliser avec une grande précision, on emploiera une méthode plutôt à des fins qualitatives, elle donne une meilleure résolution que l'ombroscopie. On peut introduire dans ce système car le contraste est alors plus facile à déterminer. Il existe aussi une technique particulière pour les mesures en trois dimensions.

Ces deux techniques, d'ombroscopie et de strioscopie, peuvent être modifiées en superposant des franges sur l'image observée. Les franges sont alors perturbées par l'objet analysé et le déphasage est proportionnel à la déviation de la lumière dans le milieu test.

I – 4 - Applications de l'interférométrie [1]

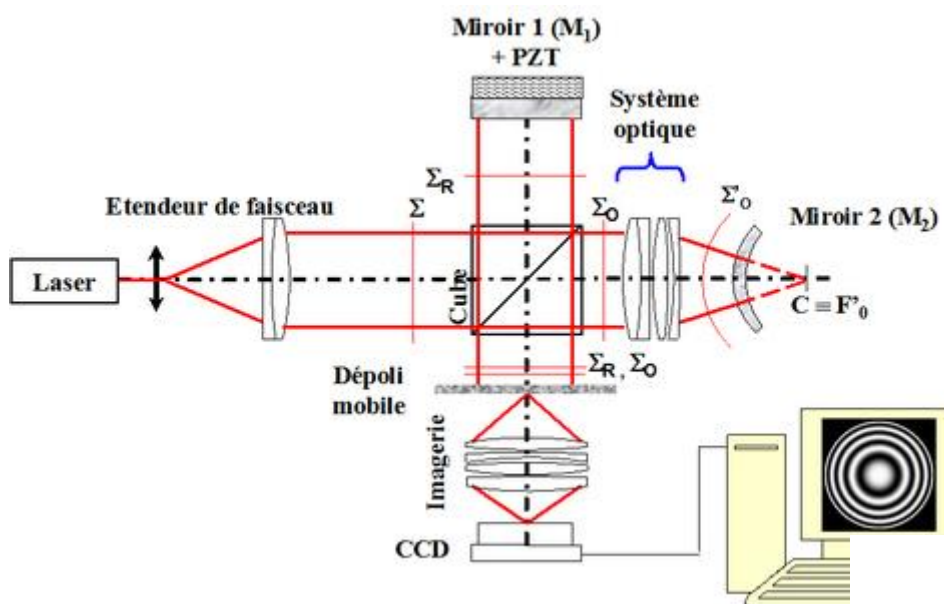
L'interféromètre a eu beaucoup d'applications, dont certaines n'ont eu qu'un intérêt historique ou pédagogique, alors que d'autres sont utilisées de manière intensive. L'avènement du laser et la disponibilité de sources quasi monochromatiques hautement cohérentes ont facilité la conception de nouvelles configurations d'interféromètres.

I – 4 -1 - L'inteferferometre Twyman- Green

C'est essentiellement une variation de celui de Michelson. C'est un instrument de grande importance dans le domaine du contrôle en optique moderne .il comprend une source ponctuelle quasi monochromatique et une lentille L_1 , lesquelles fournissent des ondes planes entrantes, et une lentilles L_2 , focalisée dans l'œil afin que la totalité du champ, (c'est -à- dire n'importe quelle portion de M_1 et M_2) soit visible. Les versions laser du twyman-Green sont parmi les outils de test les plus efficaces en optique. Le dispositif présenté sur la

Figure(1.21) est destiné au contrôle d'une lentille. Le centre de courbure du miroir sphérique M_2 coïncide avec le foyer de la lentille. Si la lentille étudiée n'a pas d'aberration, la surface d'onde réfléchie revenant vers la lame séparatrice sera plane. S'il y a du stigmatisme, de l'aberration sphérique le front d'onde sera déformé et l'on observera ou en prendra une photographie de motif de franges caractéristique de ces distorsions. En remplaçant M_2 par un miroir plan, on peut également tester d'autres éléments (prismes, lames optiques, etc.).

L'opticien, après interprétation des franges, fait des repères sur la surface pour repolir la surface afin d'en corriger les imperfections. Dans le cas des systèmes optiques tels que les télescopes, caméras de reconnaissance aérienne ou autres systèmes de qualité, les interférogrammes sont analysés par ordinateur pour produire automatiquement des lignes de contour ou des vues de perspective tridimensionnelle du front d'onde issu de l'élément testé. On peut utiliser ces procédures tout au long du processus de fabrication pour assurer la plus haute qualité optique. Cette technique permet de contrôler des systèmes optiques complexes avec des aberrations d'une fraction de longueur d'onde.



(Figure 1-21) :schéma d'interféromètre de Twyman-Green [1]



(Figure. 1-22) : Interféromètre de Twyman-Green [2]

I – 4 – 2- l'interferometre en anneau de Sagnac [1]

L'interféromètre de Sagnac est largement utilisé pour mesurer des vitesses de rotation. Les premières expériences qui donnèrent l'impulsion à ces efforts furent celles de Sagnac qui , en 1911, faisant tourner tout l'interféromètre ,les miroirs, la source ,le détecteur ,autour d'un axe perpendiculaire passant en son centre ,les deux faisceaux superposés traversent l'interféromètre , l'un dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre en sens inverse .la rotation réduit effectivement le chemin suivi par un faisceau par rapport à celui qui est comparé au chemin suivi par l'autre. Dans l'interféromètre il en résulte un décalage des franges proportionnel à la vitesse angulaire de rotation ω .

Dans un laser en anneau, c'est une différence de fréquence entre les deux faisceaux qui est proportionnelle à ω .

Considérons le dispositif qui est dépeint sur la Figure (1.23).

Le sommet A (et tous les autres) se déplacent à une vitesse linéaire $V = R.\omega$, où R est la moitié de la diagonale du carré. En utilisant un raisonnement classique, on trouve que le temps de parcours de la lumière le long de AB est de :

$$t_{AB} = \frac{R\sqrt{2}}{c-v/\sqrt{2}} \tag{II.1}$$

On peut exprimer la différence entre le temps du trajet dans le sens des aiguilles d’une montre et dans le sens inverse en terme d’aire $A=2R^2$ du carré formé par les faisceaux de lumière soit,

$$\Delta t = \frac{4A\omega}{c^2} \tag{II.2}$$

Si $\tau=\lambda/c$ est la période de la lumière monochromatique utilisé, alors le déplacement fractionnel des franges, donné par $\Delta N=\Delta t/\tau$ est :

$$\Delta N = \frac{4A\omega}{c\lambda} \tag{II.3}$$

n résultat qui est vérifié expérimentalement. En particulier, Michelson et Dale ont utilisé cette méthode pour déterminer la vitesse angulaire de la terre.

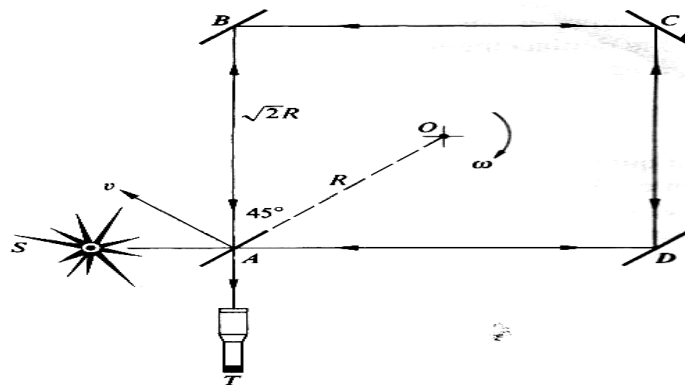


Figure 9.56 Interféromètre de Sagnac pour la gyrométrie. À l’origine, il était de 1 m × 1 m avec $\omega = 120$ tours/min.

(Figure .1.23) : interféromètre de Sagnac pour la gyrométrie. [1]

I – 4 – 3 - Application des franges d'égalé inclinaison ou anneaux d'Haidinger

I -4-3-1- traitement antireflet des surfaces [3]

Ce traitement a pour but d'éviter les pertes de flux lumineux incident par réflexion et ainsi de transmettre, jusqu'au détecteur, le maximum de flux. par exemple, on dépose sur le premier verre des lentilles d'un objectif photographique, d'indice n_s , une couche d'un matériau transparent d'indice N . Afin que l'interférence par réflexion soit totalement destructive (pas de lumière réfléchi), deux conditions doivent être réalisées :

i) N doit être tel que les facteurs de réflexion sur les deux faces, ρ_1 et ρ_2 , soient égaux. En effet, les amplitudes des deux premiers rayons réfléchis valent respectivement, lorsque l'amplitude de l'onde incidente est 1 :

$$\rho_1 \text{ et } \tau_1 \quad \rho_2 \quad \tau_1' \quad \text{avec} \quad \rho_1 = \frac{n_e - N}{n_e + N} \quad \rho_2 = \frac{N - n_s}{N + n_s} \quad \tau_1 = \frac{2}{1 + N} \quad \text{et} \quad \tau_1' = \frac{2N}{1 + N}$$

ρ_1, ρ_2 étant les facteurs de réflexion des deux dioptries et τ_1, τ_1' des facteurs de transmission sur la première face dans les sens incident et réfléchi ; n_e est l'indice du milieu à l'entrée.

Comme $N \sim 1$, les facteurs de transmission τ_1 et τ_1' sont sensiblement égaux à 1. On en déduit la condition :

$$\rho_1 \approx \rho_2 \quad \text{Soit} \quad \frac{n_e - N}{n_e + N} \approx \frac{N - n_s}{N + n_s}$$

On trouve aussi

$$N \approx (n_e n_s)^{1/2}$$

Ainsi, N doit être compris entre n_e et n_s ; si $n_e=1$ (air) et $n_s=1.52$ (crown), $N=1.23$. Comme il existe pas de matériau dont l'indice soit aussi faible, on s'en approche avec des matériaux naturels comme le fluorure de magnésium $Mg F_2$ ($N=1.35$) ou la cryolithe $Al F_3 \cdot 3Na F$ ($N=1.36$), que l'on dépose sur le verre en évaporant sous vide.

ii) la différence de phase ϕ_r qui vaut ici $(2\pi/\lambda_0)2N_e$ pas de terme de phase π supplémentaire) doit être égale à $(2m+1)\pi$, m étant un entier. Par conséquent :

$$\phi_r = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2N_e = (2m+1)\pi \quad (II.4)$$

d' où
$$e = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_0}{2N}$$

L'épaisseur minimale qui convient est donc $\lambda_0/(4N)$. lorsque la lumière incidente est blanche, l'épaisseur e de la couche déposée est uniquement celle relative à la longueur d'onde pour laquelle l'œil a une sensibilité maximale (jaune-vert). Donc $e \approx 0.12 \mu m$. Pour les autres radiations, l'interférence n'est pas totalement destructive. C'est pourquoi la teinte complémentaire, constituée de reflets bleus et violets, est visible par réflexion sur les verres des objectifs photographique. On arrive par cette technique à obtenir des facteurs de réflexion en intensité inférieurs à 1%.

I - 4- 3- 2. traitement des surfaces par augmentation du facteur de réflexion des verres [3]

Lorsqu'on au contraire augmenter le facteur de réflexion des verres, on dépose sur leurs surfaces une couche de sulfure de zinc d'indice $N=2.35$. Comme N est supérieur aux indices des milieux extrêmes air et verre ($n_s = 1.52$), la différence de phase introduite par cette couche présente le terme supplémentaire égal à π ; la condition précédente

$e = \lambda_0/(4N)$ réalise donc l'interférence constructive des deux premières ondes réfléchies.

Lorsque l'amplitude de l'onde incidente est égale à l'unité, les amplitudes réelles de ces ondes sont respectivement :

$$A_1 = -\rho_1 = \frac{N-1}{N+1} = 0.4$$

Et
$$A_2 = \tau_1 \rho_2 \tau_1' = \frac{2}{1+N} \times \frac{2N}{1+N} \times \frac{N-n}{N+n} = 0.189$$

On en déduit le facteur de réflexion en intensité qui est l'intensité de l'onde réfléchie résultant de l'interférence constructive des deux ondes :

$$R = I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 = (A_1 + A_2)^2 = 0.347$$

I – 4-3-3-Mesure des indices [3]

les anneaux d'Haidinger qui peuvent servir à mesurer l'indice n d'un matériau, par exemple un gaz. En effet, en mesurant la variation du rayon du premier anneau brillant, lorsque le milieu passe de l'air au gaz étudié, on en déduit l'indice.

Dans le cas général d'une mince d'indice n , rappelons que :

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2nec \cos r + (\pi) \quad (II.5)$$

Le déphasage π est le déphasage supplémentaire dont il faut tenir compte dans l'observation par réflexion. Les rayons des anneaux brillants sont donnés par les valeurs de l'angle d'incidence i telles que l'ordre d'interférence soit entier.

En déduit le rayon R_q du q ème anneau brillant dans le plan focal image de L :

$$R_q \approx fi_q \approx fnr_q = f \left(\frac{n\lambda_0}{e} \right)^{1/2} (q-1+\varepsilon)^{1/2} \quad (II.6)$$

$$\text{Telle que } r_q = \left(\frac{\lambda_0}{ne} \right)^{1/2} (q-1+\varepsilon)^{1/2}$$

$$\text{Et } 0 \leq \varepsilon < 1$$

I -4-4 - Application des franges d'égal épaisseur ou franges de Fizeau [3]

I -4-4-1- étude des surfaces :

Les franges d'égal épaisseur fournissent un moyen de contrôler, de façon précise, la planéité des surfaces transparentes. Il suffit de réaliser un coin d'air entre la surface à contrôler et une surface étalon. En éclairant l'ensemble avec une source étendue

monochromatique, on obtient une représentation visuelle de l'écart entre les deux surfaces. Le montage de Fizeau schématisé sur la figure (1.24) est très utilisé ; il comporte une lentille au plan focal objet de laquelle est placée la source.

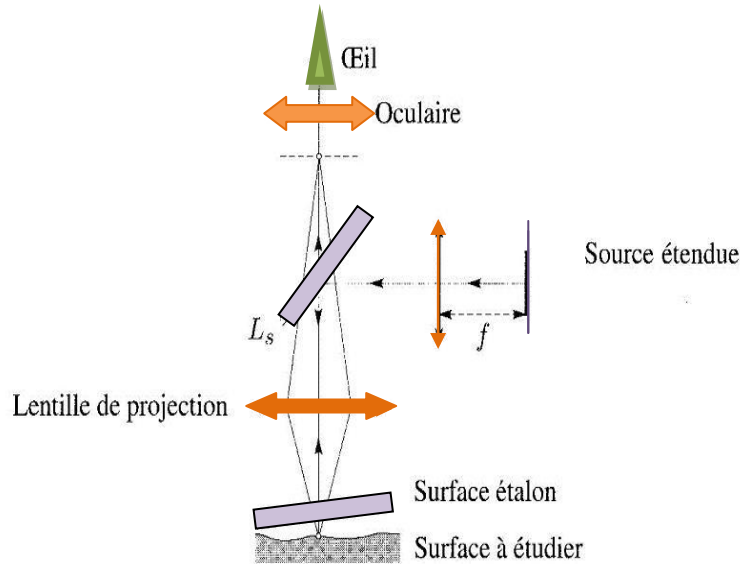


FIG. 25.8.

(Figure.1-24) : montage de Fizeau [3].

I – 4-4-2-mesure des faibles épaisseurs par la méthode du spectre cannelé

qui permet après étalonnage, de mesurer l'épaisseur de la lame. En effet, entre la longueur d'onde λ_1 , relative à une première cannelure sombre de rang 1, et celle relative à la cannelure de rang m, on a la relation suivante :

$$L = 2ne = m_1 \lambda_1 = (m_1 + m - 1)\lambda_m \quad (II.7)$$

D'où :
$$e = \frac{m_1 \lambda_1}{2n} = \left(\frac{m-1}{2n} \right) \frac{\lambda_1 \lambda_m}{\lambda_1 - \lambda_m}$$

Puisque
$$m_1 = \frac{(m-1)\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_m}$$

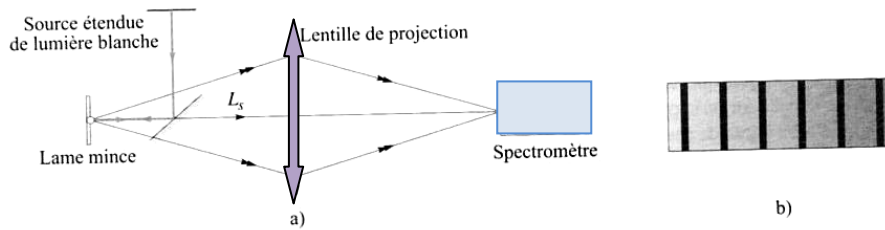
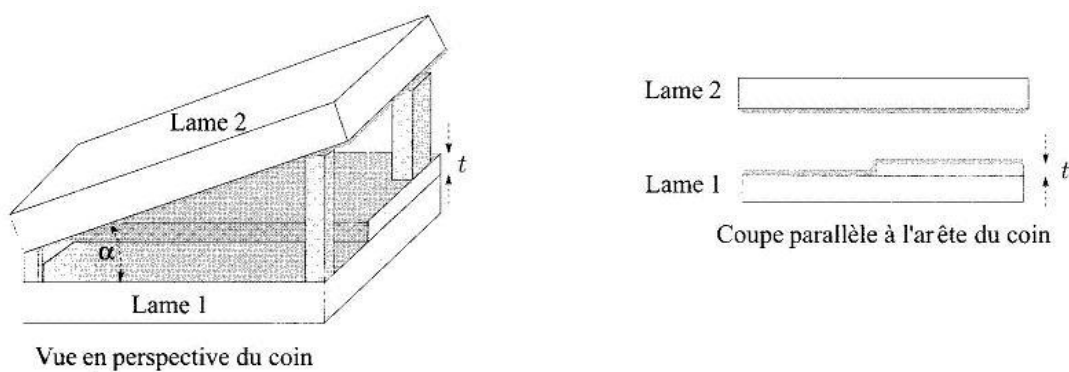


FIG. 25.7.

(Figure 1-25): Spectre de lumière blanche cannelé [3]

I -4-4-3- Mesure des faibles épaisseurs par la méthode de Tolanski.

Lorsqu'on veut mesurer une faible épaisseur t (quelques dizaines de nanomètres) d'un certain matériau déposé sur un support de verre, la méthode précise de Tolanski, consiste à réaliser un coin d'air à l'aide de deux lames de verre. La première qui supporte le matériau déposé sur une partie de la surface, est recouverte d'une couche d'un métal évaporé très réfléchissant, la seconde est étendue partiellement réfléchissante.



(Figure 1-26): la méthode de Tolanski pour la mesure des faibles épaisseurs [3]

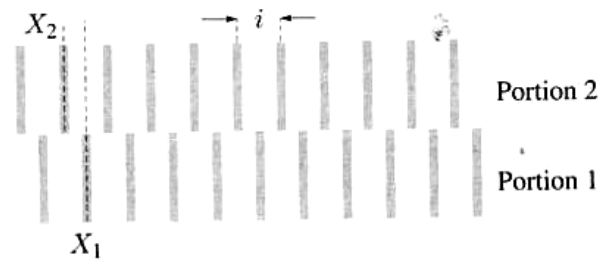
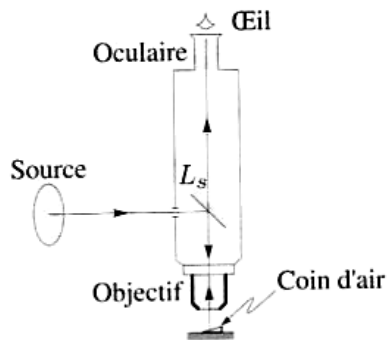
Le coin d'air ainsi constitué est observé par réflexion à l'aide d'un microscope métallographique (figure 1-27). Il est éclairé normalement au moyen d'un miroir semi transparent. On voit aisément deux systèmes de franges rectilignes identiques, parallèles à l'arête commune et décalés du fait de la présence du dépôt (figure).écrivons que la phase est donc l'épaisseur sont inchangées lorsque l'on suit une même frange sur toute la largeur du coin d'air . Il vient, il notant X_1 et X_2 est abscisses des deux portions de franges :

$$X_1\alpha = X_2\alpha + t \quad (11.8)$$

D'où
$$t = (X_1 - X_2)\alpha$$

En introduisant l'interfrange i , on trouve :

$$t = \frac{X_1 - X_2}{i} \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{Car} \quad i = \frac{\lambda_0}{2\alpha}$$



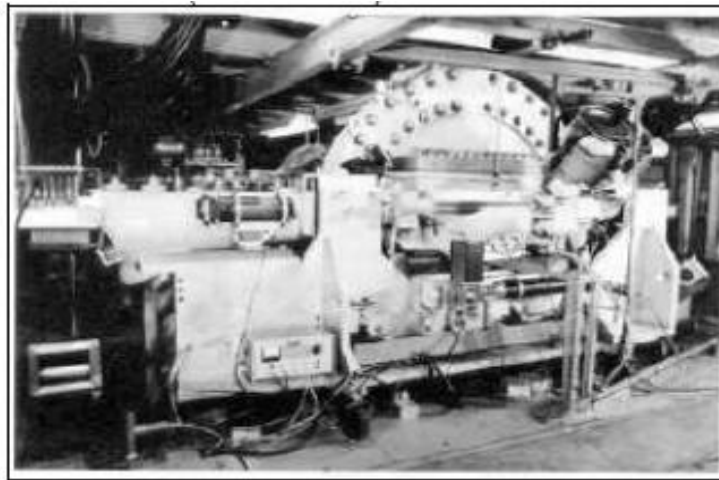
a) microscope métallographique

b) aspect de l'image du coin d'air

(Figure 1-27)

I -4-5- Interféromètre de Mach - Zehnder

La figure(1-28) montre une très belle application , le dispositif de compression magnétique connu sous le nom de Scylla IV , utilisé pour étudier des réactions thermonucléaires contrôlées au laboratoire scientifique de Los Almos. Dans ce cas, l'interféromètre de Mach – Zehnder apparaît sous la forme d'un parallélogramme. Les deux photographies, qui sont des intèrferogrammes laser à rubis, montre la figure d'interférence obtenue en l'absence de plasma dans le tube et les contours de la densité du plasma pendant une réaction.



(Figure.1-28) : Scylla IV, un des premiers montages pour étudier des plasmas [1]

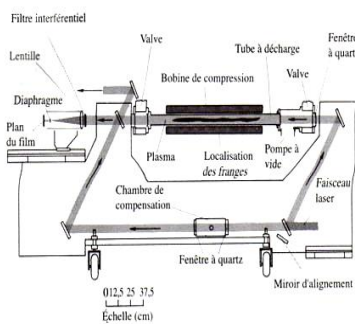
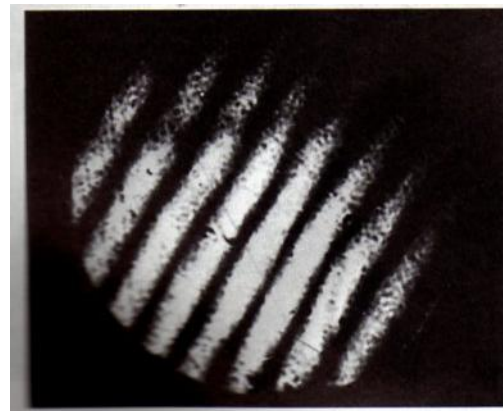


Figure 9.28 Schéma de Scylla IV.



Interférogramme avec plasma. (Photo Los Alamos National Laboratory.)



a) Interférogramme avec plasma

b) Interférogramme sans plasma [1]

(Figure 1-29)

I-5- Les décharges électriques

I-5-1- Les décharges luminescentes (décharges “glow”)

Les décharges luminescentes sont le plus souvent générées à basse pression (inférieure à 10 torrs) entre deux électrodes planes avec des tensions d'alimentation d'une centaine de volts tandis que l'intensité varie de 10^{-4} à 10^{-1} ampère. Ces décharges peuvent aussi être obtenues à pression atmosphérique avec d'autres géométries de réacteur [24]. Les tensions d'alimentation sont alors beaucoup plus importantes (plusieurs kV).

Le régime de décharge luminescente, notamment utilisé dans les tubes d'éclairage (tubes néon, tubes fluorescent), est aussi employé pour le traitement de polluants comme les COV (ChloroFluoroCarbones[24], méthane[25]), ou les NO_x[26]. Ces décharges sont caractérisées par un plasma homogène. A basse pression, la technique permet l'utilisation de faibles champs électriques (de l'ordre de 10 V.cm^{-1}) mais ne doit pas occulter le problème de la limitation du débit massique de gaz à traiter.

I-5-2- Les décharges couronnes :

Les décharges couronnes sont des décharges électriques pré-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques. Parmi les configurations très variées de systèmes d'électrodes utilisés, les plus courantes sont les systèmes pointe/plan, multipointe / plan, couteau / cylindre, fil-plan, fil / cylindre ou cylindre / cylindre. La distance interélectrodes est habituellement inférieure au centimètre.



Pointe/Plan Multipointe/Plan Couteau/Cylindre Fil/Cylindre Cylindre/Cylindre

**(Figure 1-30) : Systèmes d'électrodes couramment utilisés
pour la production de décharges couronne**

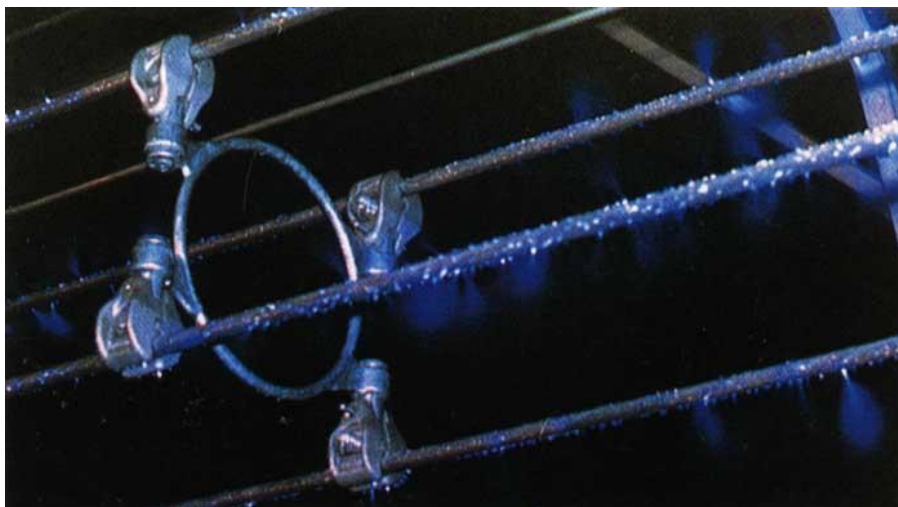
Du fait de cette dissymétrie, le champ entre les deux électrodes est hétérogène. Les décharges couronnes peuvent s'appliquer à des milieux gazeux variés à des pressions allant de

quelques centaines de pascals à quelques atmosphères. En revanche, à ces mêmes pressions, les plasmas de gaz rares exempts d'impuretés évolueront pratiquement instantanément en arc. En outre, les décharges couronnes ont pour avantage d'être faciles à produire dans de bonnes conditions de stabilité et de reproductibilité. Suivant les applications envisagées, la haute tension, qui est généralement appliquée à l'électrode active, peut être pulsée, alternative ou continue de polarité positive ou négative. L'utilisation d'une alimentation pulsée permet de générer de forts courants pendant des temps très courts (typiquement 500 A pendant 100 ns) et donc d'obtenir, sans passage à l'arc, des électrons de haute énergie, adaptés au traitement de certains polluants. Les tensions de travail habituellement utilisées varient de quelques kilovolts à une trentaine de kilovolts environ tandis que les puissances dépassent rarement quelques kilowatts.

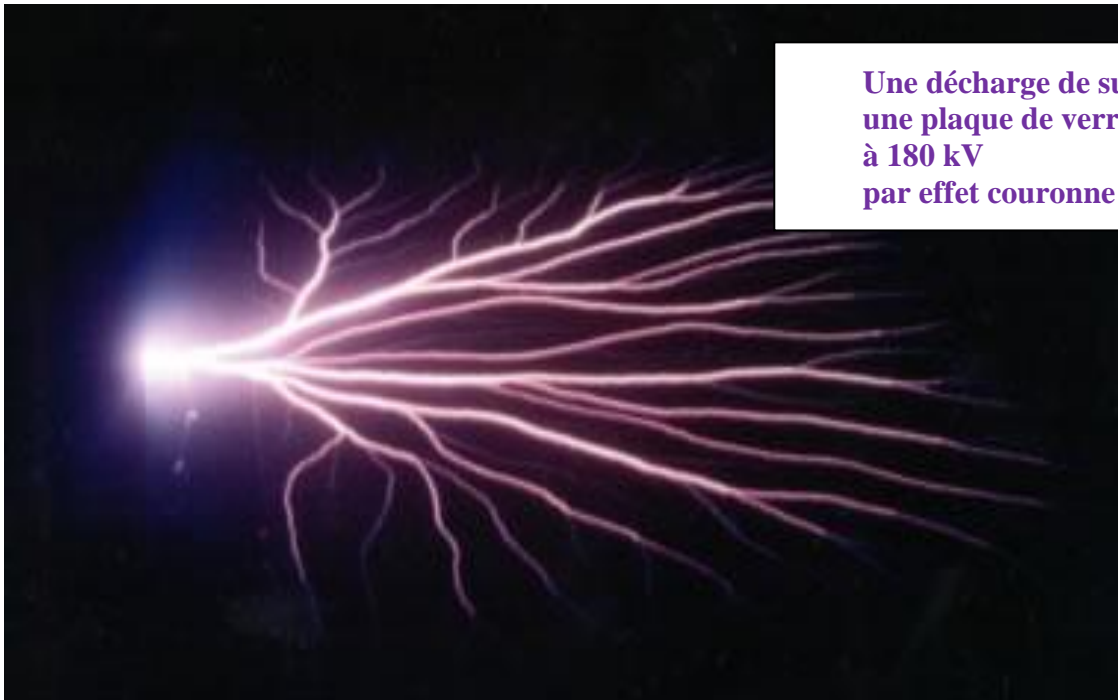
De nombreuses applications des décharges couronnes ont vu le jour pour le traitement des effluents gazeux[27,28,29], notamment dans le cas des COV (méthane[30,31], acétaldéhyde[32,33],CFC[34]), du CO₂[35], des NO_x[36] ou du SO₂[37]. Les géométries de réacteur permettant d'obtenir simultanément plusieurs décharges (système multi-impulsionnel) semblent les plus adaptées puisqu'elles autorisent des débits de gaz à traiter plus importants.

I -5-3-Exemple sur les décharges couronne :

- La présence de petites saillies à la surface des conducteurs, comme par exemple les gouttes d'eau, les flocons de neige ou encore des insectes, produisent de fortes augmentations du champ électrique.



- **L'effet de couronne varie donc nettement en fonction des conditions extérieures et atmosphériques.**



Une décharge de surface sur
une plaque de verre chargée
à 180 kV
par effet couronne dans l'air

1.5.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur les l'interférométrie , ses applications et quelques décharges électriques dans les gaz. Dans le prochain chapitre nous décrivons notre montage expérimental.

REFERENCES

Références

[1] :Eugene Hecht,optique 4 eme édition , Adepfi University.2005

[2]: Born M., Wolf E.; Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1975.

[3] :José- Philippe Pérez. Optique . fondements et applications. 6eme edition .Dunod,
paris,2000.

[5]http://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_des_plasmas.

[6] :MESURE DE LA DENSITÉ D'UN PLASMA .PAR SONDE DE LANGMUIR EN PRÉSENCE DE CHAMP MAGNÉTIQUE .J. RIPAULT-MISGUICH .Association

Euratom-CEA. (Reçu le 8 juillet 1971, révisé le 27 avril 1972)

[7] : Réponse dynamique d'une sonde de Langmuir ; Caractérisation de la répartition des charges électriques dans un capteur ionique de débit d'air. Par Marie-France Dandine (1), Ludovic Savouré (2) et Roger Barriol (3). 16ème Congrès Français de Mécanique.

[8] : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectroscopie>

[10] :Marode E.G « la formation de l'arc entre une pointe positive et un plan »

These pour doctorat ès- sciences physiques.Orsay(Paris-Sud)1972N° d'ordre :1020

[11] :Goldman M .and Goldman A .chap.4, coronadischargein 'Gaseous Electronics »edited by Hirsh M.N.and Oskam H.J.Acad.Press1978

[12] :R. ROSCH et al Diagnostics d'imagerie X par microscopes X à miroirs développés dans le cadre du programme LIL J. Phys. IV France 108, p. 207 – 210, (2003)

[13] : J.P LE BRETON et al LIL and LMJ target diagnostics status Inertial Fusion Sciences and Applications 2001, Elsevier, Paris p 856-862 (2002).

[14] :Ph. TROUSSEL Quelques diagnostics X pour les expériences d'interaction laser-matière. Annales de Physique. Vol 27. N°3 EDP Sciences (2002)

[15] :LEYBOLD DIDACTIC GMBH ,Leyboldstrasse 1 , D-50354 Hürth .

[16] :François M., Krauzman N., Mathieu J.P., May M., Expériences d'optique physique, Gordon and Breach 1969 (bibliothèque IPH cote Pc 37)

[17] :interferometrie pdf.

[18] :INTERFEROMETRIE : de l'interféromètre de Michelson à l'autocorrélateur optique.P.Segonds

[19] :L'interféromètre de Michelson.Lycée Claude Fauriel .Décembre 2002.

[20] :interferometre.pdf

[21] :INTERFÉROMÈTRE DE MACH-ZEHNDER. GOP1. MACH-ZENDER.

[22] : Eugene Hecht . livre Optique. 4eme édition . Adelphi University.

[23] :SUD-EST OPTIQUE DE PRECISION .132 chemin de Berne – BP28 – 83510 Lorgues.

[24] : Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Models

OS-9255A PRECISION INTERFEROMETER.