

# A propos de la mesure de la densité d'un plasma thermonucléaire.

## L'interféromètre à réseau tournant

La densité d'un plasma à vocation thermonucléaire est, avec sa température et son temps de confinement, l'un de ses paramètres les plus importants. Le moyen le plus employé pour connaître cette densité, si le plasma est neutre, consiste à mesurer l'indice de propagation dans le plasma d'une onde EM (électro-magnétique). La valeur de cet indice peut s'obtenir, par exemple, en comparant le temps de parcours de cette onde dans ce plasma avec celui d'une autre onde de même nature et de même fréquence parcourant la même distance hors plasma. L'appareil de mesure, comparant deux ondes, fera donc partie des interféromètres.

L'indice de propagation  $n$  dans un plasma est proportionnel à sa densité en électrons  $N_e$  tant que la fréquence  $f$  de l'onde est bien supérieure à une fréquence caractéristique appelée *fréquence plasma* et donnée par la relation :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e q^2}{m \epsilon_0}}$$

avec les symboles habituels :  $q$  : charge de l'électron,  $m$  : sa masse,  $\epsilon_0$  : constante diélectrique du vide.

En explicitant ces constantes :  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C,  $m = 9 \cdot 10^{-31}$  kg,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ,

on obtient pour expression de la fréquence plasma :  $f_p = 8,97 N_e^{1/2}$  (hz,  $e/m^3$ )

Exemple, avec  $N_e = 10^{18} e/m^3$  ( $= 10^{12}$  cgs),  $f_p = 8,97$  Ghz (longueur d'onde  $\lambda = 33,4$  mm).

L'indice de propagation de l'onde EM dans le plasma est donné par :  $n = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}$

Si  $f$  est inférieure à  $f_p$ , l'indice  $n$  est imaginaire ; l'onde pénètre un peu dans le plasma sous forme d'une onde évanescente, mais elle est principalement réfléchiée comme par un miroir. C'est cette propriété qui provoque la réflexion des ondes radio *longues* sur l'ionosphère et permet des communications radio sur Terre bien au-delà de l'horizon ; mais nous n'utiliserons pas ici cette propriété.

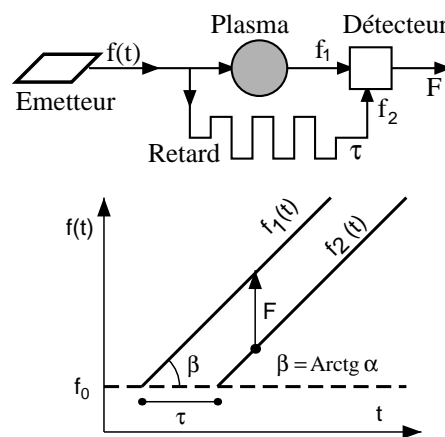
Si  $f > f_p$ , l'indice est réel, mais inférieur à 1, ce qui peut paraître contradictoire avec la théorie de la relativité restreinte puisqu'un indice inférieur à 1 implique une onde se propageant avec une vitesse supérieure à celle de la lumière ; il n'y a cependant pas contradiction puisqu'il ne s'agit pas ici de transport de matière.

Si on veut connaître la densité du plasma par sondage avec une onde EM, on devra utiliser une fréquence supérieure à  $f_p$ . Jusque vers 1967, la densité des plasmas à vocation thermonucléaire ne dépassait guère  $10^{12} e/cm^3$  avec donc une fréquence plasma de 9 Ghz (3 cm pour la longueur d'onde) ; on pouvait utiliser un faisceau micro-onde issu d'un générateur d'hyperfréquences (un carcinotron par ex.).

La méthode généralement employée jusque là consistait à faire interférer deux faisceaux issus d'un même générateur, l'un traversant le plasma et donc portant l'information de densité, le second hors plasma, mais retardé d'une quantité fixe  $\tau$  ; on modulait alors en fréquence le générateur selon une loi linéaire (dite *en dents de scie*). On avait alors  $f(t) = f_0 + \alpha(t-t_0)$ ,  $\alpha$ ,  $f_0$ ,  $t_0 = \text{ctes}$ , de sorte qu'on détectait à tout instant  $t$  un battement à fréquence constante  $F = \alpha\tau$ , portant l'information densité, puisque, quels que soient  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ) et  $\phi$ , l'addition (ou battement) entre 2 ondes, l'une en  $\sin(\omega t + \phi)$ , l'autre en  $\sin[(\omega - \alpha\tau)t + \phi]$ , transposant ainsi à la fréquence  $F = \alpha\tau$  le signal utile et son déphasage  $\phi$ .

En pratique, on visualisait la mesure sur un oscilloscope : balayage vertical (lent) de son faisceau en fonction du temps ; balayage horizontal (rapide) par la dent de scie  $f(t)$ , modulation de la luminosité de l'écran par le signal détecté : on réglait le seuil de luminosité pour ne détecter que le maximum de la sinusoïde ; ce maximum se décalait donc verticalement en fonction de la phase et donc de la densité plasma. Son ondulation était appelée *raie de zèbre*, elle se déplaçait de dent de scie en dent de scie et se ramenait à une ligne horizontale si le plasma était absent ou de densité constante.

Ainsi, avec un faisceau de longueur d'onde 2 mm modulé de 1‰ en 10  $\mu\text{s}$ ,  $\alpha$  est égal à  $1,5 \cdot 10^{-13}$ , et donc, avec un circuit retardateur de 2 mètres, on obtenait un battement à la fréquence de 10 khz, facile à photographier sur l'écran d'un oscilloscope.



Vers 1968, le DRFC (département de recherche sur la fusion contrôlée du CEA) s'orientait vers la filière Tokamak, avec l'espoir d'obtenir des densités pouvant atteindre ou dépasser  $10^{20} e/m^3$ , donc des fréquences plasma de plus de 300 Ghz, i.e. une longueur d'onde de moins de 1 mm. Il n'existait pas de générateur hyperfréquence dans ce domaine, mais on pensait utiliser, pour sonder ces plasmas, le faisceau d'un laser infra-rouge, comme celui du laser HCN (337  $\mu$ , soit 890 Ghz, infra-rouge lointain), laser dont on fabriqua un exemplaire dans le département.

Cependant, la méthode employée jusque là pour transposer le déphasage en basse fréquence ne fonctionnait plus, la fréquence du laser HCN n'étant pas modulable. La mesure des densités paraissait être dans l'impasse.

De nombreux labos cherchaient alors un moyen pour résoudre la question avec ce laser. Dans le département, l'un des chercheurs en fut chargé. Au bout d'un mois (en 1969), il exposait à ses collègues une série de méthodes a priori envisageables, visant toutes à transposer en basse fréquence le signal laser HCN après traversée du plasma.

Sa **première** méthode reposait sur l'emploi d'un second laser HCN légèrement décalé en fréquence du premier ; mais il montrait que ni la stabilité, ni la pureté de ces lasers n'étaient suffisantes pour que leur battement aboutisse à un signal BF exploitable.

La **seconde** proposition consistait à diviser le faisceau d'un unique laser en deux faisceaux dont l'un, réfléchi par un miroir en mouvement rectiligne uniforme subissait un décalage Doppler-Fizeau (DF) adapté à la fréquence de battement souhaitée. La méthode ne soulevait pas de problèmes théoriques, mais, par contre, beaucoup de difficultés pratiques. La vitesse du miroir devait être de l'ordre de 4 mètres par seconde et être uniforme pendant une seconde au moins et ceci, sans vibrations. En outre, son fonctionnement devrait être synchronisé avec le déroulement de l'expérience plasma. La mécanique impliquée serait donc complexe et coûteuse.

La **3e méthode** reposait toujours sur la division du faisceau en 2 branches et décalage en fréquence de l'une d'elles par procédé acousto-optique. Mais ce genre d'interaction, bien que connu, n'était pas suffisamment exploré dans l'infra-rouge lointain et il aurait fallu au préalable lancer le labo dans une recherche fondamentale sur le sujet. Le chef de section, C.E., n'y était pas favorable.

Une **4e méthode** consistait à changer de laser et donc de longueur d'onde. Le laser CO<sub>2</sub>, déjà bien étudié à cette époque, bénéficiait d'un faisceau et d'accessoires de haute qualité : matériaux, fenêtres, modulateurs électro-acoustiques et très bons détecteurs. Sa longueur d'onde (10,6 μ), par contre, n'était pas optimale et procurait un déphasage 32 fois moindre qu'avec le laser HCN. Il faisait remarquer que la sensibilité n'est pas le seul critère dans l'étude des moyens d'une mesure et qu'il fallait faire celle de l'ensemble des paramètres affectant le critère fondamental, à savoir **le rapport signal sur bruit**. Malgré tout, l'équipe HCN – qui ne tenait pas à voir ses travaux rendus inutiles – réussit à convaincre l'auditoire qu'il ne fallait pas changer de longueur d'onde.

La **5e méthode** exposée reposait, comme la seconde, sur l'emploi d'un faisceau HCN dérivé du premier et décalé en fréquence par un procédé encore **jamais proposé**. On va décrire ce procédé, puisque c'est celui qui a finalement été retenu par les autorités après sa recommandation par la majorité de l'assemblée des physiciens. Il reposait cependant sur **un pari**, mais ce pari était jugé acceptable parce que pas trop onéreux.

Ce procédé consistait à utiliser un effet Doppler-Fizeau non pas sur un miroir en translation, mais sur un miroir cylindrique en rotation, bien plus facile à mettre en œuvre. Il fallait cependant rendre non nul le produit  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{V}$ , produit entre le vecteur  $\mathbf{V}$ , vitesse au point de réflexion, et le vecteur  $\mathbf{K} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ , différence entre les vecteurs lumineux incident et réfléchi, donc dissocier le vecteur  $\mathbf{K}$  de la normale au réflecteur. C'est seulement dans ce cas qu'on pouvait espérer obtenir un effet DF non nul. L'orateur envisageait l'emploi d'un miroir circulaire tournant (qu'on appellera **la roue**) éclairé sous incidence oblique. On ne pourrait pas y exploiter la réflexion spéculaire classique, puisque  $\mathbf{K}$  y est alors normal à  $\mathbf{V}$ . Mais on pouvait essayer d'utiliser soit la diffusion, très peu efficace, soit la diffraction par un réseau, de rendement bien plus élevé, mais à sa connaissance, jamais encore tentée.

Pour obtenir le maximum d'intensité dans un faisceau diffracté, il était judicieux de travailler à l'ordre un avec un réseau échelette, donc de tailler des facettes (ou *dents de scie*) sur la couronne d'une roue diffractante. La diffraction à l'ordre un aurait lieu sur la normale à la surface des facettes. Les rayons issus de chaque facette devraient être en phase, i.e avoir entre eux un chemin ne différant que d'un nombre entier de longueurs d'onde. Si la surface des facettes faisait un angle  $\alpha$  avec la surface moyenne de la roue (*angle de moiré*), la distance de facette à facette ou *pas du réseau* serait  $p = m\lambda / (2 \sin\alpha)$ ,  $m$  entier quelconque, qu'on prendrait ici égal à 2.

Le produit  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{V}$  étant non nul, cette diffraction entraînerait un effet DF, de fréquence angulaire égale à  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{V}$ , c'est-à-dire égal à la fréquence (ordinaire)  $F = (2V \sin\alpha) / \lambda$  (avec  $m=2$ ).

La valeur de la longueur d'onde nous était imposée (337 μ). Celle du battement  $F$  également, pour des raisons expérimentales (ce serait la cadence des mesures,  $F = 10^4$  Hz). Celle de l'angle  $\alpha$  devait respecter les possibilités de taille pour les facettes. On prendra  $\alpha$  égal à 30°, mais cette valeur n'était pas critique.

Le diamètre de la roue devait être suffisant pour obtenir un effet collectif dans la diffraction (le faisceau laser doit recouvrir plusieurs facettes) ; en prenant pour rayon  $R$  de la roue la valeur raisonnable de 12 cm, on obtient :

#### Autres paramètres.

**Pas du réseau** :  $p = m\lambda / (2 \sin\alpha) = 2\lambda = 0.674$  mm (avec  $m = 2$  et  $\alpha = 30^\circ$ )

**Vitesse  $V$**  : pour un décalage  $F = 10$  kHz, avec  $F = (2V \sin\alpha) / \lambda$ ,  $V = F\lambda / (2 \sin\alpha) = 3,37$  m/s (soit  $\approx 24$  km/h)

**Nombre d'échelons** :  $n = 2\pi R/p = 4\pi R \sin\alpha / (m\lambda) \approx 1119$ .

**Vitesse de rotation** :  $N' = V / (2\pi R) = (F\lambda) / (4\pi R \sin\alpha) \approx 4,48$  tours/s, valeur facile à atteindre.

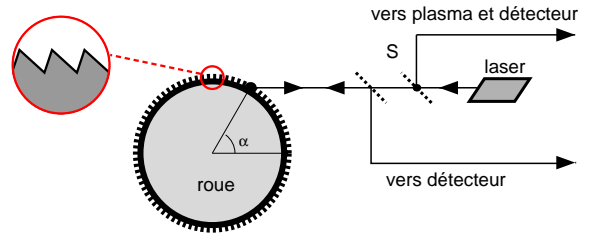
Remarquer la relation très simple :  $\boxed{nN' = F/2}$

On pourra donc fixer le nombre de facettes à un nombre un peu différent de celui calculé ci-dessus si on sait ajuster finement la vitesse de rotation et si on respecte la précédente relation.

La fabrication de la roue ne posa pas de problèmes : elle relevait des techniques de taille des engrenages de précision. Pas de difficultés non plus dans le montage des différents constituants. Cependant, la détection du signal ne pouvait pas être effectuée par des cristaux liquides, leur temps de réponse étant bien trop élevé. C'était pourtant les seuls détecteurs employés jusque là dans ce labo. Il fallut se résoudre à utiliser un cristal photovoltaïque d'InSb, de bande passante suffisante, mais exigeant un refroidissement dans un bain d'hélium liquide et même superfluide, ce qui compliquait beaucoup l'appareillage.

Le détecteur fournira un signal sinusoïdal déphasé. Pour connaître la valeur du déphasage, il faudra comparer ce signal avec celui obtenu avant plasma par le même détecteur et extrapolé pendant une fraction de seconde, ce qu'autorise largement l'inertie de la roue. On pourrait également détecter le passage individuel de chaque dent de la roue (donc à la fréquence  $F$ ) devant le faisceau fin d'un laser He-Ne.

Le déphasage entre les deux signaux sera mesuré par méthode électronique numérique à partir du passage par zéro du signal sinusoïdal fourni par le détecteur. L'évolution du paramètre densité sera alors directement présentée sur l'écran d'un enregistreur multicanal. Le plasma n'étant pas encore disponible, il était simulé par le passage plus ou moins rapide dans le faisceau d'une feuille de matière plastique transparente dans l'infra-rouge lointain, mais d'indice supérieur à l'unité. Tout fonctionnera comme prévu. Il apparaissait cependant très vite, dans le signal mesuré, des fréquences parasites de faible amplitude, interprétées comme dues au manque de stabilité de la température dans l'atelier de fabrication de la roue, laquelle fabrication avait exigé une semaine entière.



### Commentaires

*Les circonstances de cette recherche ont été bien particulières et méritent d'être exposées.*

En effet, le gouvernement français de cette époque (1967) croyait beaucoup en l'intérêt de nos recherches en *fusion contrôlée* et à la production d'énergie électrique par la voie thermonucléaire. Or, dans le monde entier, les expériences plafonnaient à des densités trop faibles. Seule l'URSS affichait des résultats meilleurs avec la voie *Tokamak*. Notre département décidait alors de se lancer dans cette direction. Il y eut, chez nous, deux projets concurrents. C'est le projet TFR (*Tokamak de Fontenay aux Roses*), conçu par PH Rebut, qui sera retenu.

Parallèlement, le gouvernement avait accepté l'organisation à Grenoble des jeux olympiques d'hiver 1968, ce qui impliquait de lourdes dépenses, payées en majeure partie par la population, avec donc la nécessité d'augmenter le nombre de contribuables. En particulier, le gouvernement se proposait de transférer à Grenoble des activités publiques. Or, peu auparavant, le Pr Néel avait créé à Grenoble un centre de recherches nucléaires, dont la direction ne demandait qu'à l'agrandir.

Jusque là, à FAR (Fontenay-aux-Roses), les recherches *sur la fusion* posaient de sérieux problèmes, dont celui de fortes perturbations sur le réseau électrique local, nos expériences exigeant une puissance instantanée très élevée et de courte durée (< 3 secondes), ce qui perturbait gravement les abonnés du voisinage (en particulier les hôpitaux). Nous étions jugés indésirables. Or Grenoble, avec de nombreux barrages hydroélectriques à proximité – dont la prochaine puissante STEP de Grand-Maison – était un emplacement tout indiqué pour nos recherches.

Le gouvernement nous le fit savoir et donna l'ordre du transfert à Grenoble des recherches sur la *fusion contrôlée*. Ce transfert lui convenait d'autant plus que, selon notre contrat de travail, l'Etat devait nous reloger et envisageait donc de nous installer dans l'un des immeubles construits en banlieue pour loger les participants aux Jeux ...

*La boucle était bouclée* ; tout semblait parfaitement bien pensé. Quelques-uns d'entre nous avaient commencé à chercher un logement plus convenable ou même à acheter un terrain pour y construire leur logement familial. Par contre, nos chefs, bien installés depuis longtemps en région parisienne, ne tenaient pas du tout à être mutés et freinaient ce projet des quatre fers.

Hélas, le président de la République démissionnait en 1969. Le nouveau gouvernement n'adoptait pas ses idées en matière de développement scientifique. Nos chefs réussirent à faire annuler en grande partie son projet de transfert. *In fine*, seuls les nouveaux agents, dont le contrat de travail mentionnait expressément le transfert à Grenoble, seraient autorisés à être mutés au sein d'une unité nommée *Service d'ionique générale*. TFR se construirait à Fontenay et, pour ce qui concerne les perturbations sur le réseau électrique francilien, la créativité de PH Rebut, Torossian *et al.* y remédiera en construisant une puissante *machine tournante*, gros alternateur de 100 Mw, capable d'alimenter TFR pendant la durée nécessaire (~1,5 s) sans faire un appel direct au réseau EDF.

Ceci se passait peu après les *événements de 68* et la contestation générale des autorités. Notre département avait été alors profondément remanié avec création d'unités plus spécialisées, dont la section de *Physique des plasmas*, dans laquelle, ne pouvant plus aller à Grenoble, je demandais à entrer. Son chef, CE, m'acceptait, mais me donnait une mission impérative, celle de chercher un moyen de mesurer la densité des plasmas de type Tokamak, densité supérieure à celles étudiées jusqu'alors. La majorité des physiciens – et donc de nos chefs – pensaient que la longueur d'onde du laser HCN ( $337 \mu$ ) était la mieux adaptée à cette mesure et je devais donc venir renforcer la petite équipe dirigée par X., qui avait construit un laser HCN et étudié ses propriétés, mais sans trouver le moyen de l'utiliser pour mesurer la densité du plasma.

J'étudiais donc le problème et, un mois plus tard, exposais à l'assemblée des physiciens du département le résultat de mes spéculations, en 5 points, comme dit ci-dessus. Aucun des chercheurs du labo HCN ne croyait en la méthode retenue, celle du décalage DF (Doppler-Fizeau) par diffraction sur un réseau échelette en rotation. A la sortie de cette séance mémorable, RP, physicien reconnu, auteur d'un livre sur les ondes dans les plasmas, m'avait dit entre deux portes : *Si ça marchait, ton truc, ça se saurait...* Bien sûr, dans tous les labos du monde s'orientant vers les Tokamaks, on cherchait aussi à résoudre ce problème.

Le chef de section, CE, optait pour ma 5e méthode, bien que très risquée car elle ne reposait sur aucun précédent, mais il pensait que l'enjeu était de taille et le coût de l'essai pas trop élevé. Il approuva donc ma proposition de mesure de densité au moyen d'un interféromètre avec décalage en fréquence du faisceau HCN par diffraction sur un réseau échelette tournant. Ni X., ni mes collègues les plus proches ne croyaient à mon projet, mais le chef avait décidé ...

La fabrication du réseau tournant ne posa pas de gros problèmes, car elle relevait des techniques d'usinage des engrenages de précision. Le traitement de l'information non plus ; j'étais déjà très versé dans ce domaine. Il fallut seulement louer un enregistreur numérique multicanal. Seule la détection du faisceau s'avéra difficile. Jusque là, le labo HCN n'étudiait que les propriétés du faisceau et n'utilisait que des détecteurs pyroélectriques. Or ceux-ci avaient une bande passante bien trop faible et il fallut se rabattre sur un autre type de détecteur, un cristal d'InSb refroidi à 2°K sous champ magnétique. En infrarouge lointain, la panoplie des détecteurs était très restreinte.

L'expérience, une fois assemblée, fonctionna très vite. Pour simuler le plasma – non encore disponible –, on faisait passer à la main une feuille de mylar dans le faisceau laser et l'appareil enregistrerait parfaitement la modification du chemin optique selon les caractéristiques prévues.

Le système, tout à fait original, a fait l'objet d'**un brevet**. Avec beaucoup de naïveté et par politesse envers le chef du labo où j'étais affecté, je demandais à inscrire son nom à côté du mien comme inventeur du procédé, bien qu'il ne participât en rien à la conception de cet appareil et peu à sa construction. De même, dans la première publication sur cet interféromètre, figuraient, à ma demande, nos deux noms. C'était dans un congrès sur les aspects techniques de la *fusion contrôlée*, réuni à Munich en été 1970 ou 71, si mes souvenirs sont corrects. C'est probablement X. qui fit cet exposé, car, ayant séjourné aux USA, il parlait l'anglais mieux que moi.

Nos autorités étaient très satisfaites. Le chef du département me proposa une tournée de quelques semaines aux USA pour y exposer ma découverte dans les labos concurrents. Je lui répondais que, s'il voulait me faire plaisir, je préférerais qu'il me signe un ordre de mutation pour Grenoble, ce qu'il accepta, en même temps que la mission de perfectionner là-bas ma méthode.

Hélas, mon collègue X. n'accepta pas le traité et, après ma mutation, il s'arrangea pour conserver à FAR l'exclusivité du développement de cet appareil. Mieux, comme je l'ai appris plus tard par des collègues, dans les conférences internationales, il exposait par la suite le fonctionnement de cet outil comme s'il en était l'auteur et même l'auteur exclusif, sans mentionner mon nom. Sur la recommandation de mon chef de service grenoblois, TC, je lui écrivais pour protester contre cette grave entorse à la déontologie, mais cette protestation n'a eu aucun effet. A Grenoble, j'ai dû alors changer de sujet d'étude. Plus tard, assistant à Grenoble à un congrès de la Société française de Physique et y croisant MT, le chef du département, celui-ci me dit : *Tiens, Blanc, je ne savais pas que vous vous intéressiez à la physique.... Un comble ...!*

Un jeune stagiaire, JP Lesieur, fraîchement arrivé dans notre groupe, prenait pour sujet de sa thèse de 3e cycle *Etude du fonctionnement et des applications d'un laser à acide cyanhydrique*, soutenue en novembre 72. Dans cette thèse (rapport Eur-Cea-Fc 670) [1], il décrivait en particulier mon montage, appelant *roue Doppler* le réseau tournant de ma conception. Pas un mot sur ma découverte, ni sur le pari surmonté, ni même sur une quelconque participation de ma part, comme s'il s'agissait de sa propre invention ou bien d'un outil connu depuis des temps immémoriaux. Comment les membres du jury de cette thèse, dont C.E., mon ancien chef de section, ont-ils pu accréditer ce travail, alors qu'ils en connaissaient parfaitement la genèse, son développement, ses difficultés et ma paternité exclusive ? Comment ne pas rappeler ici le mot de RP : *Si ça marchait, ton truc, ça se saurait ...*

[1]. Disponible sur Internet ([http://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/04/059/4059809.pdf](http://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/04/059/4059809.pdf); )  
On pourra lire également le rapport d'activité du département en 1972, EUR-CEA-FC-678, pp 55-57 et 90-91.  
Ou bien le rapport, quoiqu'un peu tardif, CEA-Conf 2167 d'octobre 1972.

Plus tard, au cours d'une mission à Cadarache, un jeune chercheur du DRFC m'avait dit être content de me rencontrer, car, d'après lui, tous savaient à FAR que j'avais inventé **seul** cet appareil et que X.. m'en avait usurpé la paternité ; il ajoutait que ce même X.. s'était comporté de la même manière plus tard envers l'un de ses stagiaires.

Cet ancien collègue, demeuré à FAR, réussissait à me faire interdire par nos autorités la poursuite de mes travaux sur le sujet et, en particulier, il m'empêchait d'adopter une meilleure longueur d'onde, celle du laser CO<sub>2</sub>, qui présentait pourtant des atouts bien supérieurs à ceux du laser HCN. Je changeais donc de sujet d'étude et me désintéressais de cet interféromètre, ne lisant même plus les *communications* sur le sujet. Cependant, 3 ou 4 ans plus tard, je devenais *réfèrent* (*referee*, en anglais) pour la revue scientifique internationale *Plasma physics* dans la spécialité *Mesures expérimentales* et je remarquais que, dans tous les projets de publications qui m'étaient soumis, rien ne se rapportait ni à ma découverte, ni à un travail similaire.

J'attribuais cette absence apparente d'intérêt pour mon appareil à l'obligation d'utiliser le détecteur InSb à 2°K, d'emploi difficile et coûteux. Je rappelle que, dans mes propositions de 1969, était cité l'emploi du laser CO<sub>2</sub>, dont la qualité de faisceau et celle des accessoires (modulateur acousto-optique, détection avec HgCdTe à 77°K) conduisaient à un rapport signal sur bruit meilleur qu'avec le laser HCN et pour des coûts bien inférieurs.

C'est tout récemment que, retraité disposant de plus de temps libre, je m'adonnais à une recherche par Internet sur les publications à ce sujet. A ma grande surprise, j'en découvrais de nombreuses, alors que je croyais que cet interféromètre à réseau tournant n'avait été qu'un *feu de paille* et ne présentait pas d'intérêt dans le monde de la recherche en *fusion contrôlée*, et que c'était sans doute à cause de son détecteur InSb.

Ci-après, on pourra trouver les références à quelques-unes des nombreuses publications sur l'emploi de cet appareil qui, contrairement à ce que je croyais, était encore universellement utilisé 50 ans après ma découverte.

Mais **aucune** de ces publications ne fait référence à mon travail. Partout était cité X... Mieux : un article italien (signé Martini & Pasqualotto) appelle même, en 2009, *Veron wheel* mon réseau tournant !

A quoi sert donc un brevet d'invention ?

En 2023, mon interféromètre est non seulement toujours d'actualité, mais il semble ne jamais avoir été dépassé et n'a pas encore de concurrent. En effet, en 2017, par exemple, dans la revue *Plasma sciences techniques*, tome 19, p.18, Pen, Gen Li *et al.*, du groupe **ITER**, publient un article dans lequel ils se proposent de remplacer le **traditionnel** interféromètre à réseau rotatif : *Development of an HCN dual laser for the interferometer ... on EAST ... and a slight frequency offset (~1 MHz) were generated in this system to replace the traditional rotating grating with ~10 kHz IF...*

Quand un projet de publication scientifique est soumis à un *réfèrent*, celui-ci se doit d'en chercher les précédents. Or ici aucun ne s'est donné cette peine ... Voilà qui ne renforce pas le crédit accordé aux revues *à comité de lecture*, revues souvent bien plus commerciales que rigoureuses, malgré l'importance qu'elles prennent au niveau des gouvernements, comme dans le cas du GIEC et de ses rapports.

L'appareil était même couvert par un brevet ! Un comble ...

P. Blanc, 2024

### Ci après, quelques références d'articles sur le sujet trouvés en 2024 via Internet.

**1972** (avril). D.Véron, CR Acad Sciences, B, Paris, tome 274, p 1013.

**1973** (31 janvier). Thèse JP Lesieur : étude du fonctionnement du laser à acide cyanhydrique. *Il décrit également l'interféromètre, mais sans citer aucune référence à l'auteur* (Rapport EUR-CEA-FC-670, notice 897, p 48-50) [1].

**1974** (janv). D. Véron. Opt. comm., 10, p.95. High sensitivity HCN laser interferometer for plasma electron density measurements .... *The frequency shift is produced by diffracting the radiation of a cylindrical rotating blazed grating. A phase shift is deduced from the time variation of the zero crossings of the low frequency signal ...*,

**1974**. Kazuo Kawahata, Kiichiro Haba, Shigeki Okajima, J. of optics communications. High sensitivity HCN laser interferometer for plasma electron density measurements (JIPP T-IIU tokamak).

**1976**. D. Véron, J. Cerrtain, JP. Crenn. *The principle of the interferometer built for the Tokamak in operation at Fontenay-aux-Roses (T.F.R.) is as follows : the frequency of the reference beam of the interferometer is slightly Doppler shifted with the aid of a cylindrical grating which rotates at a constant speed.*

**1976** (dec). Veron, Certain, Crenn. Submill waves & their applic... HCN Interferometer for Electron Density measurement of a Tokamak Plasma ; *Doppler shift,.... electronic clock...*

**1976**. K. Button, S. Wolfe. Applied Optics. High Sensitivity Far Infrared Interferometry for Plasma Density Measur.. *High resol. submill. interferometry systems for measure. of electron densities in the range  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  to  $2 \times 10^{15}$  have been developed.*

[1] Thèse JP Lesieur (rapport Eur-Cea-Fc 670)

1977. Veron, Certain, Crenn. J. Opt Soc Amer, 67, 7, p 964. *Multichannel HCN interferometer for electron density profile measurements of tokamak plasmas (42 cit..)*
1979. D. Veron, Submillimeter interferometry of high density plasmas, in *Infrared and Millimeter Waves* (vol 2, livre édité par K. J. Button, (Academic press, New York, 1979), vol. 2, pp. 67-135
1979. The Australian national university, Plasma research laboratory annual report 1979. *The interferometer will follow the FAR system, using a cylindrical rotating grating to produce a continuous 10 kHz Doppler shift of its reference beam .*
1982. TJ Dolan, Fusion research, Pergamon press, chap 10G, p. 260 : *...rotating blazed cylindrical grating to produce a frequency shift  $\Delta\omega = 10 \text{ kHz}$  ...*
- 1984 (May). LB. Whitbourn. Intern. Journ. of Infrared and Millimeter Waves. A 337  $\mu\text{m}$  density interferometer for the LT-4 tokamak. *The design of the system is conventional, using a rotating grating to produce continuous beat notes ...*
1985. I. Pééli, P. Richter, F. Engard. Frequency-shifted local oscillator produced by a rotating radial grating for a heterodyne detector. *A frequency-shifted .... a rotating radial grating in an infrared heterodyne detector operating with a CO2 laser.*
- 1986 (oct). P. Krug, P. Stimson, I. Falconner, B James, J.Phys E, Scient Instr, vol 19, no 11, p. 960, 11th int. conf on IR & millim waves (p. 255A). Far-infrared Michelson interferometer for Tokamak electron density measurements using computer-generated reference fringes
- 1986 Krug, Stimson, Falconer, James. 11th Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Submillimeter laser interferometry on small tokamak *A simple far-infrared interferometer ...394  $\mu$  laser line .. Phase modulation .... by a rotating mirror modulator.*
1989. Kazuo Kawahata, Kiichiro Haba, Shigeki Okajima, J. Fujita, Rev Sci Instr, t 60. Multichannel HCN laser interferometer for electron density measurements of the JIPP T-IIU tokamak. *A six-channel HCN laser interferometer system has been developed for the measurement of the electron density profile in the JIPP T-IIU tokamak. ....using a reference beam, the frequency of which is Doppler shifted by 50 kHz with a rotating grating.... (27 ref, 25 cit..)*
1989. John Howard, Anu-PRL-PP89-8. A novel scanning interferometer for 2 dimensional plasma measurements. *...The scanning rotating grating ... 37 cit.*
- 1990 (mars). U. Lammers, R. A. Marr, J. B. Morris, Intern J. of Infr & millim. waves. A coherent mechanical submillimeter frequency shifter. *Highly correlated transmit and local oscillator signals for use in a narrowband heterodyne system ... One component is Doppler shifted in frequency by a mechanically rotating device ...*
- 1990 (Jan). Kazuo Kawahata, Kiichiro-Haba-Junji-Fujita, Suigeki Okajima. Measurements on the Jipp TIUU Tokamak. *A 6 channels HCN laser interferometer ... on JIPP T tokamak ...reference beam, the frequency of which is Doppler shifted by 50 kHz with a rotating grating*
- 1991 (Feb). T. Maekawa, T.-Minami, M.-Iguchi (RSI, 62, 304). Frequency shift of 1.45 MHz for 337  $\mu\text{m}$  HCN laser beam *... with a super rotating grating by use of a rotating grating fabricated on the top of the rotor of a turbomolecular pump with a high rotating speed of 43200 rpm (super rotating grating) ...*
- 1992 (April). John Howard. Applied Optics, vol 31, no 10, 1419, 1 .Multiorder rotating grating interferometer. *A multichannel interferometer that uses a rotating grating to both disperse and Doppler shift an incident far-infrared laser....*
1993. A. Allmendinger, R. Platz, G. Dodel, RSI, Physics engineering., 64, 1705. *Frequency shifts in the megahertz region, as required under certain conditions in far-infrared diagnostics of magnetically confined fusion plasmas, can be achieved via multiple diffraction by a cylindrical diffraction grating rotating at moderate speed ...*
- 2001 HK Park (Princeton), KC Lee, B. Denng, CW Domier & al (Univ. Calif.). Application of Stark Tuned Laser ... *In general interferometry systems for large plasma devices, the heterodyne far-infrared laser system ( $10 \mu\text{m} < \lambda_o < 1000 \mu\text{m}$ ) has been extremely popular. There are two well known techniques in modulating the frequency; the frequency shift has been introduced by either by a mechanically rotating grating or two laser systems .... In both cases, the maximum achievable frequency modulation is limited by the speed of the rotating grating ( $< 100 \text{ kHz}$ ) ...*
- 2009 (fév) Stefano Martini, Roberto Pasqualotto, Eur joint PhD Program on diagnostics & data acquisition. Interferometry & polarimetry. *Dans une figure, mon réseau tournant est appelé " Veron wheel " !!*
- 2014, B. Chouli (Tore Supra), thèse de doctorat, p. 67. *In Tore Supra, ... a MZ interferometer, with the frequency in one arm shifted 100 kHz by a rotating grating ...*
- 2017 (juin), Gen Li, Xuechao Wei & all. (Iter). Plasma sci. & techn.,19,8. Development of an HCN dual laser for the interfer. on EAST... *a slight frequency offset ( $\sim 1 \text{ MHz}$ ) were generated ... to replace the traditional rotating grating with  $\sim 10 \text{ kHz}$  IF...*
- 2020 (nov). Q.M Xiao, Z.L. Zhang, Q.Y. Nie, P. E, Y.Y. Jia, X.G. Wang and L.Y. Li. Journ. of Instr., vol 15. Design of HCN laser based interferometer on the Space plasma environment facility..... *HCN laser ... the phase modulation is achieved by a rotating grating with a modulation frequency of 10 kHz. The beat signal is detected by AlGaIn/GaN ...*