



## Interférométrie micro-onde

**G. Henrion**


Institut Jean Lamour – UMR CNRS – Université de Lorraine  
NANCY (France)



## Menu


- 1 Introduction
- 2 Un peu de théorie
- 3 Interférométrie expérimentale
- 4 Quelques exemples de mesure de densité électronique
- 5 Réflectométrie
- 6 Conclusions
- 7 Quelques références






# 1


## Introduction



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014


3

Introduction
Théorie
Interférométrie exp.
Exemples
Reflectométrie
Conclusion

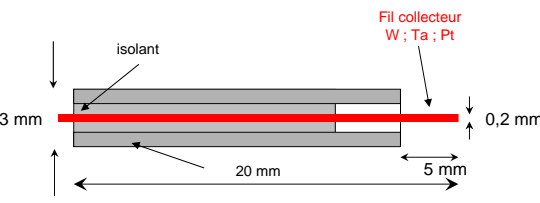


Quel est le problème ?

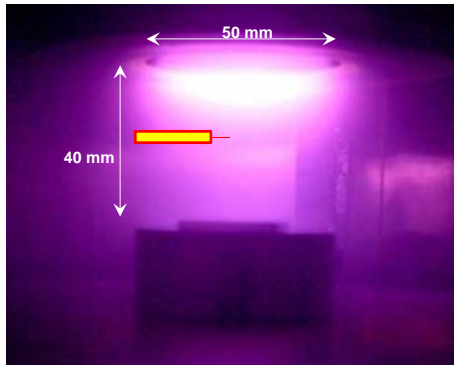
Sondes  
*(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
émisive cf Viviana Lago)*

Mesure de la densité électronique


Perturbation apportée au plasma ?




isolant  
3 mm  
20 mm  
5 mm  
0,2 mm  
Fil collecteur  
W ; Ta ; Pt



50 mm  
40 mm



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

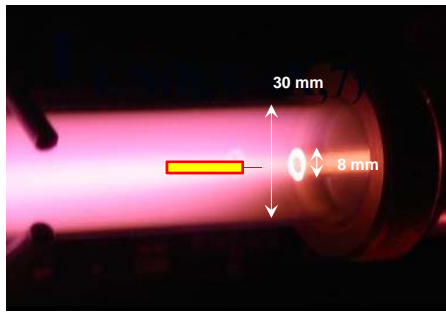
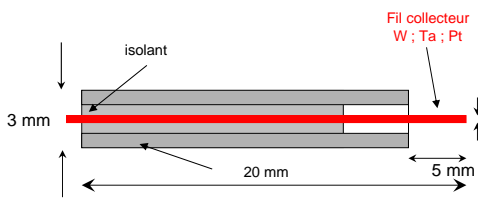

4

Introduction    Théorie    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

Quel est le problème ?      Mesure de la densité électronique

Perturbation apportée au plasma ?

Sondes  
(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
émisive cf Viviana Lago)



3 mm    20 mm    5 mm    0,2 mm

Fil collecteur  
W ; Ta ; Pt

isolant

30 mm    8 mm

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

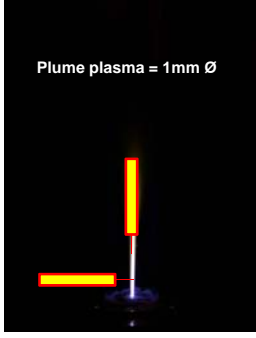
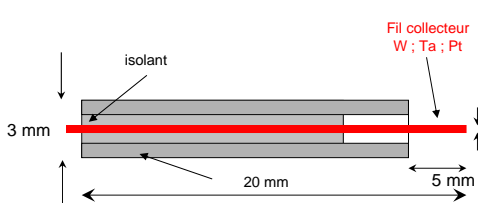
5

Introduction    Théorie    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

Quel est le problème ?      Mesure de la densité électronique

Perturbation apportée au plasma ?

Sondes  
(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
émisive cf Viviana Lago)



3 mm    20 mm    5 mm    0,2 mm

Fil collecteur  
W ; Ta ; Pt

isolant

Plume plasma = 1mm Ø

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

6

Introduction    Théorie    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion


---

Quel est le problème ?


Mesure de la densité électronique



Perturbation apportée au plasma ?  
Quid en plasma micro-onde ?

Sondes  
(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
émisive cf Viviana Lago)



sonde = antenne

sonde métallique / micro-ondes 

 Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014  7

Introduction    Théorie    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---


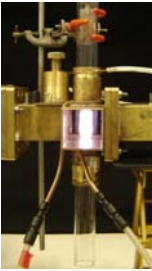
Quel est le problème ?



Mesure de la densité électronique

Perturbation apportée au plasma ?  
Quid en plasma micro-onde ?  
Plasmas haute température ?

Sondes  
(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
émisive cf Viviana Lago)

Plasma PA :  
 $T_{\text{gaz}} = 2500 \text{ K} !!$

 Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014  8

Introduction    Théorie    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---


Quel est le problème ?

Mesure de la densité électronique

Perturbation apportée au plasma ?  
 Quid en plasma micro-onde ?  
 Plasmas haute température ?  
 Plasmas haute pression : Collisions ?  
 Hypothèses ?

Sondes  
*(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
 émissive cf Viviana Lago)*

Diagnosics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
 1-3 décembre 2014



9

Introduction    Théorie    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

Quel est le problème ?

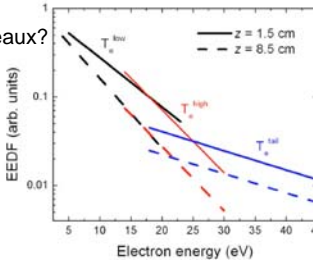
Mesure de la densité électronique

Perturbation apportée au plasma ?  
 Quid en plasma micro-onde ?  
 Plasmas haute température ?  
 Plasmas haute pression : Collisions ?  
 Hypothèses ?

Sondes  
*(Langmuir cf. Stéphane Béchu  
 émissive cf Viviana Lago)*


Spectroscopie d'émission

TRGOES : fdee par morceaux?  
 Hypothèses ?






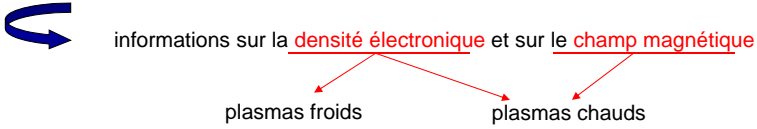


*L. Stafford et al., Appl. Phys. Lett. 94 (2009) 021503*

Diagnosics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
 1-3 décembre 2014



10

Introduction	Théorie	Interférométrie exp.	Exemples	Reflectométrie	Conclusion
	Quel est le problème ?		Mesure de la densité électronique		
	Sondes <i>(Langmuir cf. Stéphane Béchu émissive cf Viviana Lago)</i>		Perturbation apportée au plasma ? Quid en plasma micro-onde ? Plasmas haute température ? Plasmas haute pression : Collisions ? Hypothèses ?		
	Spectroscopie d'émission		TRGOES : fdee par morceaux ? Hypothèses ?		
	Diffusion Thomson		Triple monochromateur ! $N_e > 10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$		
<p>Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014</p> <p>  11</p>					

Introduction	Théorie	Interférométrie exp.	Exemples	Reflectométrie	Conclusion
	Idée ?	Champ de l'onde interagit avec les électrons du plasma	→	Utilisation d'ondes pour sonder le plasma	
<p><b>Quelle est le lien entre la population d'électrons et la propagation de l'onde ?</b></p>					
<p>Famille de méthodes de diagnostic (<i>interférométrie, réflectométrie, polarimétrie</i>) reposent sur la <b>mesure de l'indice de réfraction</b> d'un plasma</p>					
<p>informations sur la <u>densité électronique</u> et sur le <u>champ magnétique</u></p> <p style="margin-left: 100px;">  </p>					
<p>Interaction d'une onde électromagnétique avec le plasma :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microondes (interférométrie, réflectométrie),</li> <li>• IR lointain (interférométrie)</li> <li>• Visible (interférométrie, polarimétrie)</li> </ul>					
<p>Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014</p> <p>  12</p>					

## 2

# Propagation des ondes dans les plasmas



### 2-1 Propagation des ondes dans les plasmas – équations de dispersion

- ❖ On considère l'interaction d'une onde électromagnétique dans un plasma uniforme, homogène et isotrope.

$$\vec{A} = \vec{A}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial t} = -i\omega \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} = i\vec{k}$$

$$\vec{A} = \begin{cases} \vec{E}, \vec{B} & \text{champs de l'onde} \\ \vec{J} & \text{densité de courant induit par le mouvement des électrons} \\ & \text{dans le champ de l'onde} \\ \vec{v} & \text{vitesse des électrons dans le champ de l'onde} \end{cases}$$

- ❖ perturbation apportée par l'onde aux électrons est faible

$$\text{❖ Maxwell} \quad \begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ c^2 \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \frac{\vec{J}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases}$$



Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

Différentes situations selon la propagation de l'onde et la présence ou non d'un champ magnétique


- **Pas de champ magnétique :  $B_0 = 0$**

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\frac{\partial (\vec{\nabla} \wedge \vec{B})}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\frac{\partial \vec{J}}{c^2 \epsilon_0} - \frac{\partial^2 \vec{E}}{c^2 \partial t^2}$$

$$-\vec{k} (\vec{k} \cdot \vec{E}) + k^2 \vec{E} = \frac{i\omega}{c^2 \epsilon_0} \vec{J} + \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E} \quad \text{Onde électromagnétique sans champ magnétique externe} \quad \vec{k} \perp \vec{E}$$

→  $(\omega^2 - k^2 c^2) \vec{E} = -\frac{i\omega}{\epsilon_0} \vec{J}$

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014  15

Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

$$\vec{J} = -n_e e \vec{v}_e \quad \begin{array}{l} \vec{v}_e = \text{vitesse des électrons due à l'onde} \\ n_e = \text{densité d'électrons} \end{array}$$

Mouvement des électrons dans le champ de l'onde


$$m \left( \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} + \vec{v}_e (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}_e) \right) = -e \vec{E} \quad \text{on suppose que la perturbation apportée par l'onde est faible} \\ \rightarrow \text{termes quadratiques} = 0$$

$$-i\omega m \vec{v}_e = -e \vec{E} \quad \rightarrow \quad \vec{v}_e = \frac{e}{im\omega} \vec{E}$$

$$(\omega^2 - k^2 c^2) \vec{E} = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m} \vec{E} \quad \omega_p^2 = \text{pulsation plasma}$$

$$\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$$

→ Indice (complexe) du plasma  $N^*$  :  $v_\varphi = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{N^*} \quad \rightarrow \quad N^{*2} = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$  On notera au passage que  $N^2 < 1$

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014  16



Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

- $B_0 = B_{0z} \neq 0$      $\vec{k} \perp \vec{B}_0$

**Onde ordinaire :  $\vec{E} \parallel \vec{B}_0$**

Mouvement des électrons dans le champ de l'onde

$$m \left( \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} + \vec{v}_e \cdot \nabla \right) = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}_0 \right)$$

*perturbation faible*                       $\vec{v}_e \parallel \vec{B}_0$

→  $\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$

$$N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

*Similaire cas  $B_0 = 0$*

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

17

Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

- $B_0 = B_{0z} \neq 0$      $\vec{k} \perp \vec{B}_0$     ( $k=k_x$ )

**Onde extraordinaire :  $\vec{E} \perp \vec{B}_0$**

Mouvement des électrons dans le champ de l'onde

$$m \left( \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} + \vec{v}_e \cdot \nabla \right) = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e(x, y) \wedge \vec{B}_0 \right)$$

*perturbation faible*

$$-im\omega \vec{v}_e = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e \wedge \vec{B}_0 \right)$$

→ 
$$\begin{cases} v_x = \frac{e}{m\omega} \left( -iE_x - \frac{\omega_c}{\omega} E_y \right) \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right)^{-1} \\ v_y = \frac{e}{m\omega} \left( -iE_y - \frac{\omega_c}{\omega} E_x \right) \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right)^{-1} \end{cases}$$

*En fait une composante de E se développe dans la direction de propagation, et l'onde est le plus généralement elliptique*

*pulsation cyclotron électronique*

$$\omega_c = \frac{|e| B_0}{m}$$

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

18

Introduction	Théorie	Interférométrie exp.	Exemples	Reflectométrie	Conclusion
$-\vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) + k^2 \vec{E} = \frac{i\omega}{c^2 \epsilon_0} \vec{J} + \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}$ <p style="margin-left: 20px;">→ <math>(\omega^2 - k^2 c^2) \vec{E} + c^2 k E_x \vec{k} = -\frac{i\omega}{\epsilon_0} \vec{J} = \frac{in_e e \omega}{\epsilon_0} \vec{v}</math></p> <p style="margin-left: 20px;">→ <math display="block">\begin{cases} \left[ \omega^2 \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right) - \omega_p^2 \right] E_x + i \frac{\omega_c \omega_p^2}{\omega} E_y = 0 \\ \left[ (\omega^2 - k^2 c^2) \left( 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2} \right) - \omega_p^2 \right] E_y - i \frac{\omega_c \omega_p^2}{\omega} E_x = 0 \end{cases}</math></p> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <math display="block">N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_h^2} \right)</math> </div>				<p>on reprend l'équation de Maxwell</p> $-\vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) + k^2 \vec{E} = \frac{i\omega}{c^2 \epsilon_0} \vec{J} + \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}$ <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">Det = 0</p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">fréquence hybride haute</p> $\omega_h^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2$	
Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014				19	

Introduction	Théorie	Interférométrie exp.	Exemples	Reflectométrie	Conclusion
<p>▪ <math>B_o = B_{oz} \neq 0</math>     <math>\vec{k} \parallel \vec{B}_o</math></p> $(\omega^2 - k^2 c^2) \vec{E} + c^2 k E_x \vec{k} = -\frac{i\omega}{\epsilon_0} \vec{J} = \frac{in_e e \omega}{\epsilon_0} \vec{v}$ <p style="margin-left: 20px;">→ <math display="block">\begin{cases} \left( \omega^2 - k^2 c^2 - \frac{\omega_p^2}{1 - \omega_c^2 / \omega^2} \right) E_x + i \frac{\omega_p^2}{1 - \omega_c^2 / \omega^2} \frac{\omega_c}{\omega} E_y = 0 \\ \left( \omega^2 - k^2 c^2 - \frac{\omega_p^2}{1 - \omega_c^2 / \omega^2} \right) E_y - i \frac{\omega_p^2}{1 - \omega_c^2 / \omega^2} \frac{\omega_c}{\omega} E_x = 0 \end{cases}</math></p> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <math display="block">N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( \frac{\omega}{\omega \pm \omega_c} \right)</math> </div>				<p style="text-align: center; margin-top: 20px;">Det = 0</p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">signe + : onde gauche (L) signe - : onde droite (R)</p>	
Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014				20	

## 2-2 Propagation des ondes dans les plasmas – coupures et résonances

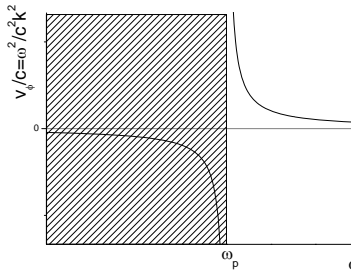
**Coupures :  $N^2 = 0$**  → Le plasma réfléchit l'onde

- Pas de champ magnétique :  $B_0 = 0$
- $B_0 \neq 0$   $\vec{E} \parallel \vec{B}_0$  Onde ordinaire :  $N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$

$$\omega_{cut} = \omega_p$$

**Densité de coupure**  $n_{cut} = \frac{\omega^2 \epsilon_0 m_e}{e^2}$

$$n_{cut} (cm^{-3}) \approx 1.27 \cdot 10^{10} f^2 (GHz)$$

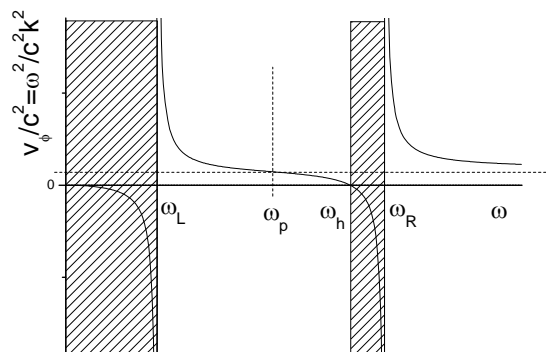


- $B_0 \neq 0$   $\vec{E} \perp \vec{B}_0$  Onde extraordinaire :  $N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_h^2} \right)$

2 fréquences de coupure

$$\omega_R = \frac{1}{2} \left( \omega_c + \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_p^2} \right)$$

$$\omega_L = \frac{1}{2} \left( -\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_p^2} \right)$$



Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

**Résonance :  $N^* = \infty$  → Le plasma absorbe l'onde**



- Pas de champ magnétique :  $B_0 = 0$
- $B_0 \neq 0$   $\vec{E} \parallel \vec{B}_0$  Onde ordinaire :  $N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$

**pas de résonance**

- $B_0 \neq 0$   $\vec{E} \perp \vec{B}_0$  Onde extraordinaire :  $N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_h^2} \right)$

$\omega_{res} = \omega_h$       Bien utile pour créer des plasmas ECR par exemple

---

 Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014  23

Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

**2-3 Principe de la détermination de la densité électronique**



$N^*$  dépend de  $\omega_p$ ,  $\omega_c$  selon la direction de propagation ( $k$ ).

↓  
 $n_e$

Le principe des mesures consiste à mesurer  $N^*$  dans des conditions, convenablement choisies ( $k$ ,  $B_0$ ) et d'en déduire  $n_e$ .

$\omega > \text{fréquence de coupure}$ :	l'onde traverse le plasma	→	Interférométrie
$\omega = \text{fréquence de coupure}$ :	l'onde est réfléchie sur une couche de plasma ( $n_e = n_{cut}$ )	→	Réfectométrie
Onde longitudinale :	rotation du plan de polarisation	→	polarimétrie (rotation Faraday)

---

 Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014  24

### 2-4 Interférométrie : comment mesurer $N^*$ ?

On considère une onde de fréquence suffisamment élevée pour qu'elle puisse se propager dans le plasma

Dans le plasma : 
$$v_{\varphi} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{N^*}$$

En l'absence de plasma : 
$$v_{\varphi_0} = \frac{\omega}{k} = c$$

Le plasma introduit un déphasage de l'onde

$$\Delta\varphi = \int_0^L (k_{\text{plasma}} - k_{\text{air}}) dx \quad \left\{ \begin{array}{l} k_{\text{plasma}} = \frac{\omega}{c} N^* \\ k_{\text{air}} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad \Delta\varphi = \frac{\omega}{c} \int_0^L (N^* - 1) dx$$



### Cas $B_0 = 0$ ou onde ordinaire $B_0 \neq 0$

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{c} \int_0^L \left[ \left(1 - \frac{n_e}{n_c}\right)^{1/2} - 1 \right] dx$$

Si  $n_e \ll n_c$        $\omega \gg \omega_p$        $f = 26.5 \text{ GHz}$        $\omega \approx 160 \cdot 10^9 \text{ rad.s}^{-1}$

$$\rightarrow \Delta\varphi = \frac{\omega}{c} \int_0^L \frac{n_e(x)}{2n_c} dx = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m c f} \int_0^L n_e(x) dx = \frac{8.43 \cdot 10^{-7}}{f} \int_0^L n_e(x) dx$$

unités (SI)

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{c} \int_0^L \frac{n_e(x)}{2n_c} dx = \frac{\lambda e^2}{4\pi c^2 \epsilon_0 m_e} \int_0^L n_e(x) dx = 2.8 \cdot 10^{-15} \lambda \int_0^L n_e(x) dx$$

$$\Delta\varphi(^{\circ}) = \frac{4.83 \cdot 10^{-10}}{f(\text{GHz})} \int_0^L n_e(\text{cm}^{-3}) dx(\text{cm}) = 1.61 \cdot 10^{-11} \lambda(\text{cm}) \int_0^L n_e(\text{cm}^{-3}) dx(\text{cm})$$



Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---


### 2-5 Oui, mais...

Mesure de  $\Delta\phi$  → densité électronique **intégrée sur la ligne de visée**


→ Hypothèses sur le profil de densité

- ✓ cas particulier d'un plasma homogène :  $n_e(x) = n_0$        $\Delta\phi = \frac{\pi L}{\lambda n_c} n_0$
- ✓ profil parabolique :  $n_e = \frac{4n_0}{L} x(1 - \frac{x}{L})$        $\Delta\phi = \frac{2\pi}{3} \frac{L}{\lambda} \frac{n_0}{n_c}$

Quid des collisions?



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

 27

Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

### 2-6 Effet des collisions

$$m \left( \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} + \vec{v}_e \cdot \nabla \vec{v}_e \right) = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e(x, y) \wedge \vec{B}_0 \right) - m\nu_c \vec{v}_e$$

$\nu_c =$  fréquence de collisions

$$-im\omega \vec{v}_e = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e \wedge \vec{B}_0 \right) - m\nu_c \vec{v}_e$$


$$-im(\omega + i\nu_c) \vec{v}_e = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e \wedge \vec{B}_0 \right)$$

Onde extraordinaire (cf précédemment)


$$-im\omega \vec{v}_e = -e \left( \vec{E} + \vec{v}_e \wedge \vec{B}_0 \right)$$

$$N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2 (\omega - i\nu_c)^2}{(\omega^2 + \nu_c^2)^2} \left( \frac{(\omega + i\nu_c)^2 - \omega_p^2}{(\omega + i\nu_c)^2 - \omega_h^2} \right)$$

$$N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left( \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega^2 - \omega_h^2} \right)$$



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

 28

Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion

---

**Cas  $B_0 = 0$**  →  $\begin{cases} \omega_c = 0 \\ \omega_h = \omega_p \end{cases}$



$N^2 = 1 - \frac{\omega_p^2 / \omega^2}{(1 + j\nu_c / \omega)^2}$        $N^* = (N^{2*})^{1/2} = N + j\chi$       N = indice habituel  
 $\chi$  = atténuation de l'onde

$N = \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2} \right) + \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2} \right)^2 + \left( \frac{\omega_p^2 \nu_c}{\omega^2 + \nu_c^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$

$\chi = \left\{ -\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2} \right) + \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_c^2} \right)^2 + \left( \frac{\omega_p^2 \nu_c}{\omega^2 + \nu_c^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$

Approximations :  $\nu_c \ll \omega_p \ll \omega$

$N \approx \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{1/2}$        $\chi \approx \left( \frac{\omega_p^2 \nu_c}{2\omega^3} \right) \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{-1/2}$       proportionnelle à  $\nu_c$

      Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.       29  
1-3 décembre 2014

Introduction    **Théorie**    Interférométrie exp.    Exemples    Reflectométrie    Conclusion



---

L'atténuation est donnée par :  $\Delta A = \int_0^L \frac{\omega}{c} \chi dx = \frac{2\pi}{\lambda_p} \frac{\nu_c}{2\omega} \int_0^L \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \omega_p^2 / \omega^2}} dx$

cas particulier d'un plasma homogène :  $n_e(x) = n_0$  →  $\Delta\varphi = \frac{\pi L}{\lambda n_c} n_0$

$\Delta A = \frac{\pi \nu_c}{\lambda_p \omega} \frac{n_0}{n_c} \frac{L}{\sqrt{1 - n_0/n_c}}$  →  $\Delta A = \Delta\varphi \frac{\nu_c}{\omega} \left( 1 + \frac{\lambda_p \Delta\varphi}{4\pi L} \right)$

Mesure de  $\Delta A$  → estimation de la fréquence de collision globale  
*(processus de collision dominant)*

      Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.       30  
1-3 décembre 2014

# 3

## Interférométrie expérimentale

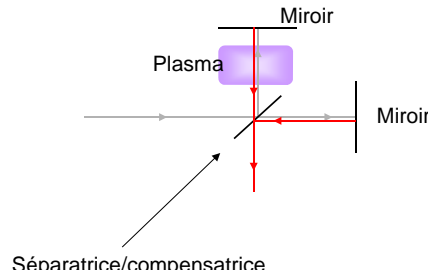


Introduction   Propagation   **Interférométrie exp.**   Exemples   Reflectométrie   Conclusion

### 3-1 Les interféromètres

On peut en principe utiliser n'importe quel type d'interféromètre.



- ✓ l'interféromètre de Michelson



La modification d'indice dans l'un des bras (due au plasma) provoque un déphasage entre les deux composantes

$\Delta\phi \rightarrow N$

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

  32



Introduction Propagation **Interférométrie exp.** Exemples Reflectométrie Conclusion

✓ l'interféromètre de Mach Zender

Voie de mesure :  $E_2 e^{(i\omega t + \Delta\phi)}$

Voie de référence :  $E_1 e^{(i\omega t)}$

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

Introduction Propagation **Interférométrie exp.** Exemples Reflectométrie Conclusion

✓ l'interféromètre UHF (onde mm ou cm)

La phase dans la voie de mesure est comparée à la phase de référence du faisceau qui a traversé la même longueur en l'absence de plasma

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

### 3-2 L'interféromètre du RPF

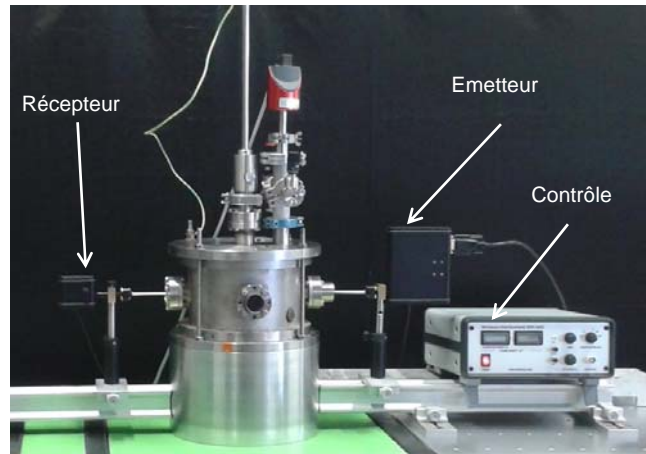
MiWitron

26,5 GHz ( $\omega = 166 \cdot 10^9 \text{ rad.s}^{-1}$ )

$n_e \text{ max} = 9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

Précision = 0,1°

Pour  $L=5,5 \text{ cm}$  ;  $0,1^\circ \approx 10^9 \text{ cm}^{-3}$



### 3-3 Quelques données numériques


Densité de coupure  $\rightarrow$  max de  $n_e$  mesurable

$$\omega_{cut} = 2\pi f_{cut} = \left( \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m} \right)^{1/2} \quad n_{cut} = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 m f_{cut}^2}{e^2} \quad n_{cut} (\text{cm}^{-3}) = 1.24 \times 10^{10} f_{cut}^2 (\text{GHz})$$

F(GHz)	2,45	10	26,5	37,5	75	28000	470000
$\omega$ ( $10^9 \text{ rad/s}$ )	15,4	62,8	166	235	471	$1,76 \cdot 10^5$	$2,95 \cdot 10^6$
$\lambda$ (mm)	122	30	11,3 Interféro. RPF	8	4	$10,6 \cdot 10^{-3}$ laser CO2	$633 \cdot 10^{-6}$ laser He-Ne
$n_{cut}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$7,41 \cdot 10^{10}$	$1,24 \cdot 10^{12}$	$8,7 \cdot 10^{12}$	$1,74 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$	$9,7 \cdot 10^{18}$	$2,7 \cdot 10^{21}$


- ✓ nécessité de disposer de plusieurs sources selon les plasmas
- ✓ mesure de  $n_e$  intégrée (ou moyennée sur la ligne de visée)
- ✓ faible résolution spatiale (qqs  $\lambda$  soit  $\approx 1 \text{ cm}$ )






# 4

## Quelques exemples



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014


37

Introduction
Propagation
Interférométrie exp.
Exemples
Reflectométrie
Conclusion

### 4-1 Exemple 1: plasma H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dépôt de diamant

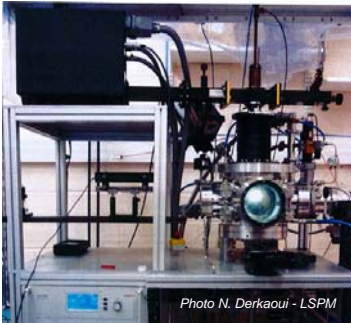
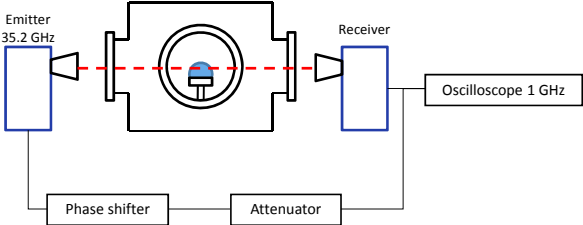



Photo N. Derkaoui - LSPM


Réacteur micro-onde  
moyenne pression : qqs 100 mbar  
moyenne puissance : qqs kW

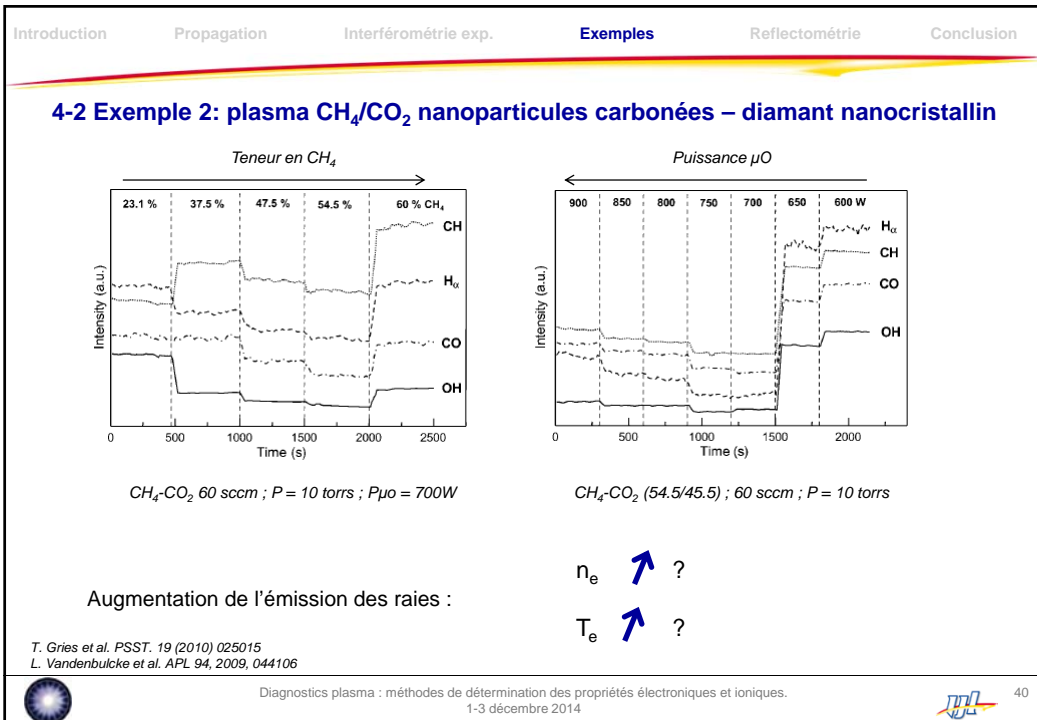
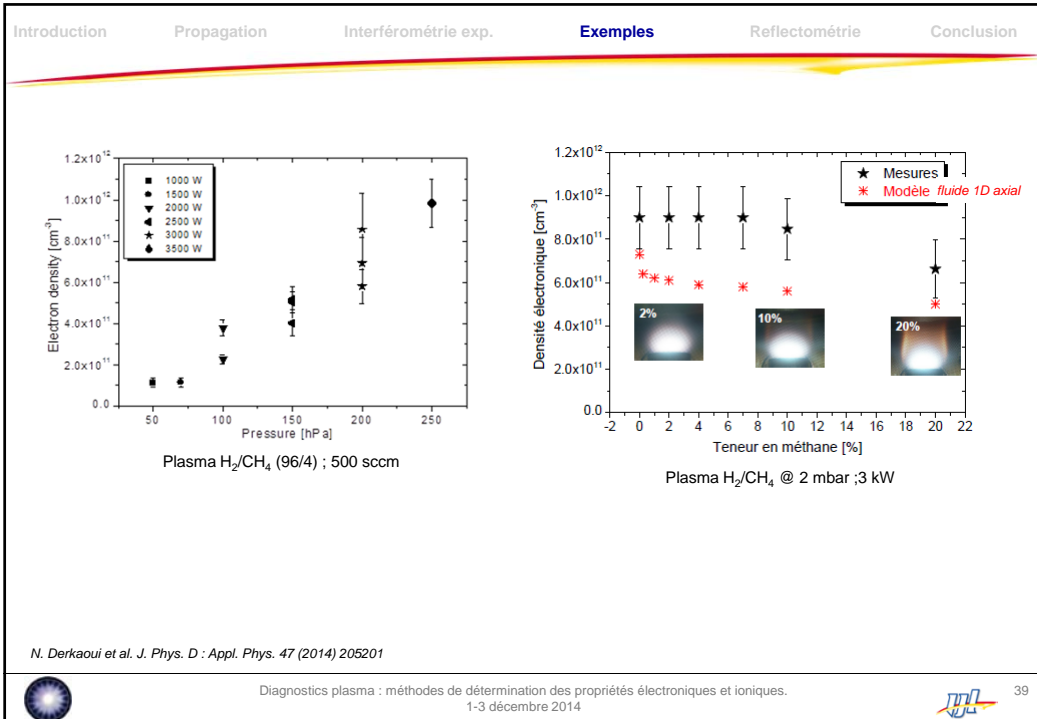


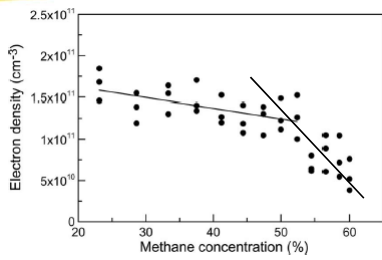
Profil de densité parabolique  $n_e = n_{max} \left(1 - \frac{4r^2}{R^2}\right)$



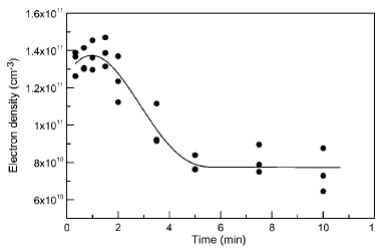
Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014


38





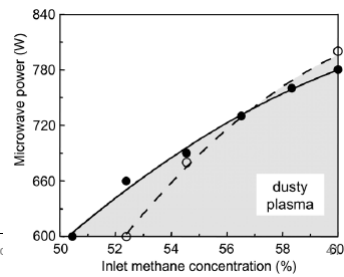
$CH_4-CO_2$  120 sccm ;  $P = 10$  torrs ;  $P\mu = 700W$



$CH_4-CO_2$  (60/40) ; 60 sccm ;  $P = 10$  torrs ;  $P\mu = 700W$

Formation de poudres carbonées qui pompent les électrons.  
Parallèlement forte augmentation de  $T_e$  pour maintenir le plasma

T. Gries et al. PSST. 19 (2010) 025015  
L. Vandenbulcke et al. APL 94 (2009) 044106






# 5

## Reflectométrie



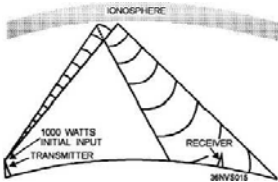
Introduction Propagation Interférométrie exp. Exemples **Reflectométrie** Conclusion

### Principe du radar de détection

$$\varphi = 2 \frac{\omega}{c} L - \frac{\pi}{2}$$

Onde ordinaire ou sans champ magnétique

$$N^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} < 1$$


Plasma peut réfléchir l'onde; Exemple ionosphère :  $n_e \approx 10^{12} \text{ m}^{-3}$   $\omega_p \approx 56 \text{ MHz}$   $f_p \approx 9 \text{ MHz}$

La réflexion est plasma-dépendante  $\omega_p = \left( \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$  typ. < VHF

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

Introduction Propagation Interférométrie exp. Exemples **Reflectométrie** Conclusion

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{c} \int_0^L (N^* - 1) dx \quad \text{interférométrie}$$

on ne mesure pas de déphasage par rapport à la situation sans plasma


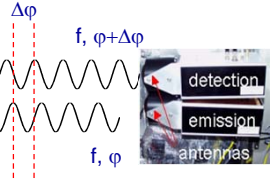
le faisceau sonde fait un aller-retour dans le plasma

le faisceau sonde est réfléchi sur la couche de coupure

$$\Delta\varphi = 2 \frac{\omega}{c} \int_0^{R_c} N^*(r, t) dr - \frac{\pi}{2}$$

$\Delta\varphi \gg 2\pi$  indétermination du déphasage

élimination de la composante  $2\pi$

Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

Introduction Propagation Interférométrie exp. Exemples **Reflectométrie** Conclusion

$\omega = \text{cste}$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2}{c} \frac{\partial \omega}{\partial t} \left[ \int_0^{R_c} N(r,t) dr \right] + \frac{2\omega}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_0^{R_c} N(r,t) dr \right)$$

Mesure des fluctuations de  $\langle n_e \rangle$  au cours du temps sur le trajet de l'onde sonde

$\omega = \text{variable}$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2}{c} \frac{\partial \omega(t)}{\partial t} \left[ \int_0^{R_c} N(r,t) dr \right] + \frac{2\omega(t)}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_0^{R_c} N(r,t) dr \right)$$

Mesure du profil de densité (position variable de  $n_c$ )

Diagnosics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014

Introduction Propagation Interférométrie exp. Exemples **Reflectométrie** Conclusion

**Mesure de temps de vol**

Phase en fct de la fréquence

$$\Delta \varphi = 2 \int_0^{x_c} k(x, \omega) dx$$

Inversion d'Abel (mode O)

$$x_c(\omega) = \frac{c}{2\pi^2} \int_0^{\omega} \frac{\partial_f \Delta \varphi(f)}{\sqrt{\omega^2 - f^2}} dx$$


En réalité, on mesure le temps de vol

$$\tau(t) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial f} \right)_t$$

d'où  $x_c(\omega) = \frac{c}{\pi} \int_0^{\omega} \frac{\tau(f)}{\sqrt{\omega^2 - f^2}} df$  et  $n_{cut} = \frac{\omega^2 \epsilon_0 m_e}{e^2} \rightarrow n(r)$


**Profil de densité**

Diagnosics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014




# 6


## Conclusion



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014


47

Introduction
Propagation
Interférométrie exp.
Exemples
Reflectométrie
Conclusion



### 6-1 A propos des hypothèses et simplifications


Plasma uniforme, homogène, isotrope :

Ca se gâte dans les plasmas directs ou en fort champ magnétique


→

Assez souvent le cas dans les plasmas froids basse pression


Constante diélectrique n'est plus scalaire mais tensorielle



200 W



Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques.  
1-3 décembre 2014


48



Introduction Propagation Interférométrie exp. Exemples Reflectométrie **Conclusion**



### 6-1 A propos des hypothèses et simplifications

Plasma uniforme, homogène, isotrope : Assez souvent le cas dans les plasmas froids basse pression

Ca se gâte dans les plasmas directifs ou en fort champ magnétique → Constante diélectrique n'est plus scalaire mais tensorielle

Ca se complique également dans les plasmas haute pression (e.g. PA) ... →  $v_c \ll \omega_p \ll \omega$  n'est plus vraiment vérifiée  
 $v_c \cong 10^{10} - 10^{11} \text{ s}^{-1}$   
 (f = 26,5 GHz ;  $\omega \cong 1,6 \cdot 10^{11} \text{ rad.s}^{-1}$ )

et dans les plasmas à forte densité (e.g. PA) →  $v_c \ll \omega_p \ll \omega$  n'est plus vraiment vérifiée  
 $\omega_p \cong 5,6 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$  ( $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )

 Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014  49

Introduction Propagation Interférométrie exp. Exemples Reflectométrie **Conclusion**



### 6-2 Inconvénients ...

- ✓ nécessité de disposer de plusieurs sources selon les plasmas
- ✓ mesure de  $n_e$  intégrée (ou moyennée) sur la ligne de visée
- ✓ faible résolution spatiale (qqs  $\lambda$  soit  $\cong 1 \text{ cm}$ )

#### ... et avantages

L'interférométrie est une méthode qui présente plusieurs avantages

- ✓ ne perturbe pas le plasma (ou très peu)
- ✓ utilisable en champ magnétique
- ✓ bonne résolution temporelle
- ✓ pas d'hypothèses sur la pression, la fdee, ...

 Diagnostics plasma : méthodes de détermination des propriétés électroniques et ioniques. 1-3 décembre 2014  50

# 7

## Quelques références



### Ouvrages

R.L. Huddelstone, S.L. Leonhard (ed.), « *Plasma Diagnostic Techniques* », Academic Press, New-York, London (1965)

F.F. Chen, « *Introduction to plasma physics* », New York: Plenum press, (1984)

H. Hermansdorfer « *Microwave diagnostic techniques* » in W. Lochte-Holtgreven (ed.), *Plasma diagnostics (1968)* Elsevier Science Publishing

I.H. Hutchinson, « *Principles of plasma diagnostics* », (1987), Cambridge University Press

### Articles

Andrasch, M., J. Ehlbeck, et al. (2014). *Influence of the dielectric surrounding of plasma on the electron density measurement by microwave interferometer*. Measurement Science & Technology 25(7): 075004.

Dittmann, K., C. Kuellig, et al. (2012). *160 GHz Gaussian beam microwave interferometry in low-density rf plasmas*. Plasma Sources Science & Technology 21(2): 024001.

Ehlbeck, J., K. Rackow, et al. (2011). *Electron Density Determination by Means of Tuneable 50 GHz and 150 GHz Interferometers*. Contributions to Plasma Physics 51(2-3): 131-136.

Gries, T., S. de Persis, et al. (2009). *Experimental and kinetic studies of C-H-O plasmas for polycrystalline and nano-smooth diamond deposition*. Diamond and Related Materials 18(5-8): 730-733.

Gries, T., L. Vandenbulcke, et al. (2009). *Diagnostics and modeling of CH(4)-CO(2) plasmas for nanosmooth diamond deposition: Comparison to experimental data*. Journal of Vacuum Science & Technology B 27(5): 2309-2320.



- Hartfuss, H. J., T. Geist, et al. (1997). Heterodyne methods in millimetre wave plasma diagnostics with applications to ECE, interferometry and reflectometry. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 39(11): 1693-1769.
- Hershkowitz, N. and R. A. Breun (1997). Diagnostics for plasma processing (etching plasmas). *Review of Scientific Instruments* 68(1): 880-885.
- Hong, I., W. Lee, et al. (2012). *Evaluation of the imaging properties of Microwave Imaging Reflectometry*. *Journal of Instrumentation* 7: C01077.
- Howard, J., J. Muir, et al. (2012). *A single-probe-beam double-heterodyne polarimeter-interferometer for plasma Faraday rotation measurements*. *Journal of Instrumentation* 7: P07009.
- Howlader, M. K., Y. Q. Yang, et al. (2005). *Time-resolved measurements of electron number density and collision frequency for a fluorescent lamp plasma using microwave diagnostics*. *IEEE Transactions on Plasma Science* 33(3): 1093-1099.
- Jindal, A. K., L. Overzet, et al. (2010). *Time Resolved Microwave Interferometry Measurement of the Electron Density in a Pulsed 1,3-Butadiene Discharge*. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 30(2): 287-297.
- Keister, K. E., C. J. Wagner, et al. (2014). *Determination of Ar-2(+) and N-4(+) recombination coefficients by subpicosecond multiphoton ionization at 248 nm and microwave interferometry*. *Physical Review A* 89(1): 013401.
- Klick, M., W. Rehak, et al. (1997). *Plasma diagnostics in rf discharges using nonlinear and resonance effects*. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers* 36(7B): 4625-4631.
- Kuellig, C., K. Dittmann, et al. (2011). *Electron Density Oscillations in CC-RF Oxygen Plasma Investigated by Gaussian Beam Microwave Interferometry*. *IEEE Transactions on Plasma Science* 39(11): 2564-2565.



- Laroussi, M. (1999). Relationship between the number density and the phase shift in microwave interferometry for atmospheric pressure plasmas. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 20(8): 1501-1508.
- Lukas, C., M. Muller, et al. (1999). Spatially resolved electron density distribution in an RF excited parallel plate plasma reactor by 1 mm microwave interferometry. *Plasma Sources Science & Technology* 8(1): 94-99.
- Manos, D. M., J. L. Cecchi, et al. (1991). *Diagnostics of low-temperature plasmas - the electron component*. *Thin Solid Films* 195(1-2): 319-336.
- Mase, A., N. Ito, et al. (2012). *Reflectometric measurement of plasma imaging and applications*. *Journal of Instrumentation* 7: C01089.
- Mattei, S., O. Boudreault, et al. (2011). *Characterization of a low-pressure chlorine plasma column sustained by propagating surface waves using phase-sensitive microwave interferometry and trace-rare-gas optical emission spectroscopy*. *Journal of Applied Physics* 109(11): 113304.
- Neumann, G., U. Banziger, et al. (1993). *Plasma-density measurements by microwave interferometry and langmuir probes in an RF discharge*. *Review of Scientific Instruments* 64(1): 19-25.
- Soltwisch, H. (1994). *Microwave diagnostics*. *Fusion Technology* 25(2T): 304-314.
- Thompson, B. E. and V. C. Jaiprakash (1993). *Comparison of microwave interferometry and impedance analysis measurements of electron concentrations in low-frequency sulphur hexafluoride glow discharges*. *Plasma Sources Science & Technology* 2(2): 112-118.
- Vandenbulcke, L., T. Gries, et al. (2010). *Molecular beam mass spectrometry and modelling of CH4-CO2 plasmas in relation with polycrystalline and nanocrystalline diamond deposition*. *Diamond and Related Materials* 19(7-9): 1103-1116.
- Waidmann, G. (1996). *Far infrared and microwave plasma diagnostics*. *Fusion Technology* 29(2T): 332-341.

