
Ondes dans les Plasmas

[Partie II]

**Chauffage et génération de courant
par ondes RF dans un tokamak**

R. Dumont (CEA / DRFC)

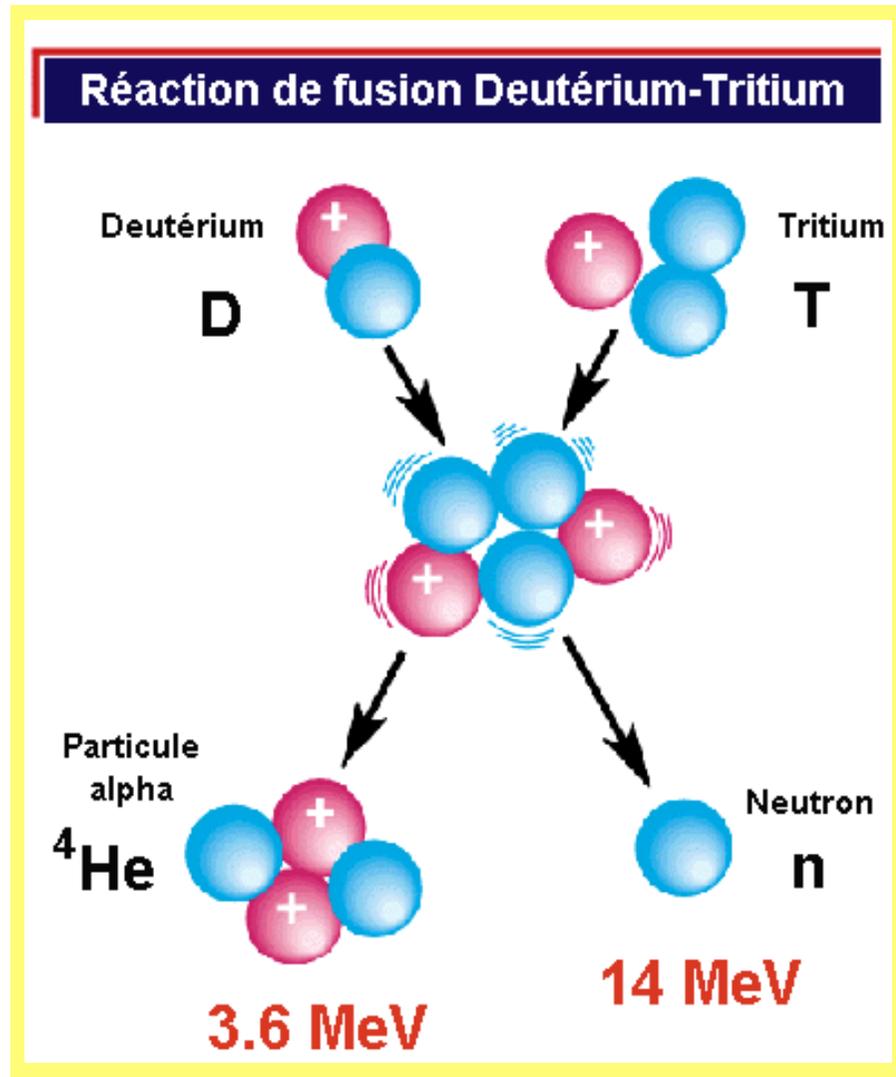
Polycopié: A. Bécoulet



Ecole d'été Plasmas Chauds - Cadarache - 03-04/2004

Introduction

Chauffage non-inductif



- **Critère de Lawson:**

$$n_e \cdot T_i \cdot \tau_E > 5 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

- **Réactions de fusion D-T**

$$T_i \approx 5 - 30 \text{ keV}$$

→ { Chauffage des ions
Chauffage des électrons

- **Chauffage par effet Joule**

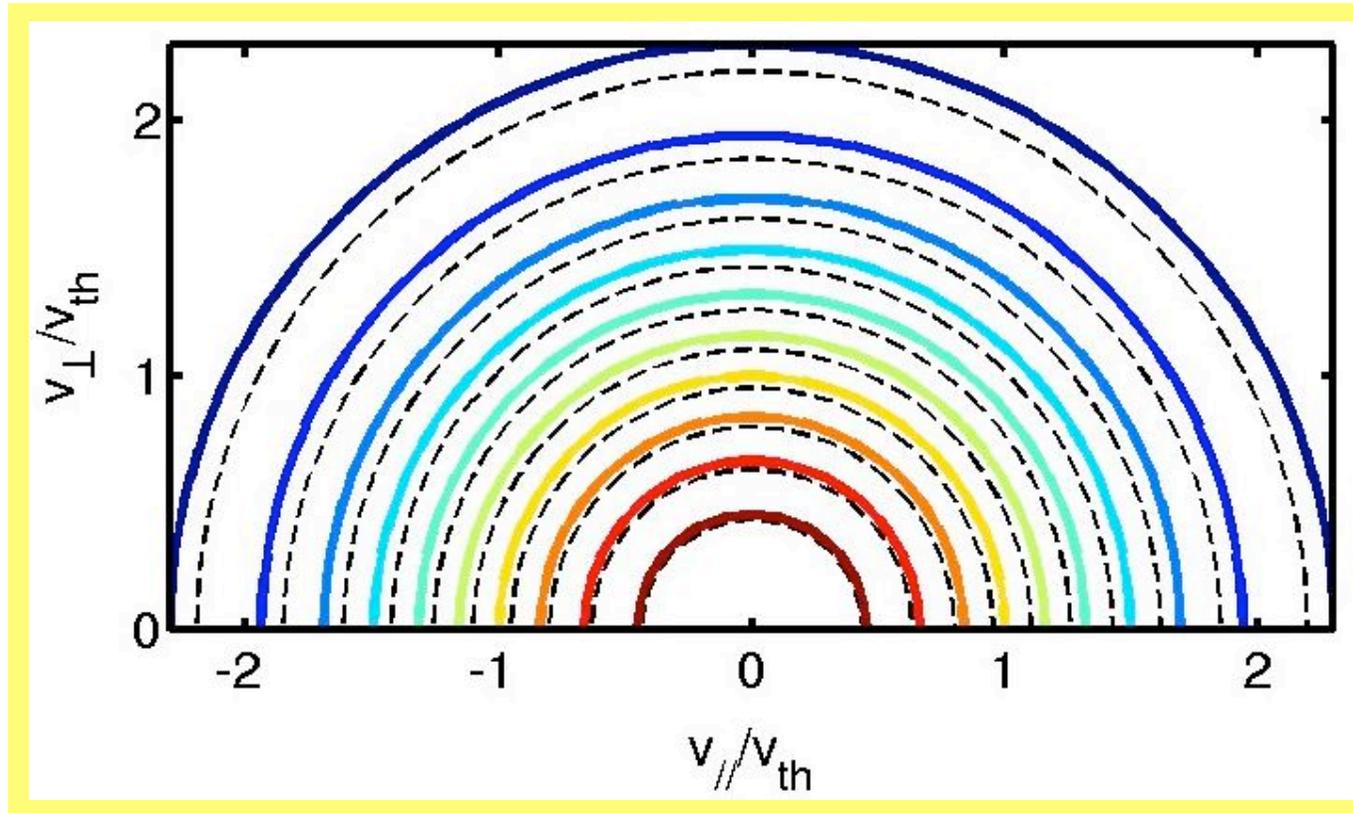
$$\begin{cases} P_h & \propto (T_e) \cdot I_p^2 \\ \tau_e & \propto T_e^{-3/2} \end{cases}$$

→ Température limitée

→ **Nécessité d'un chauffage non inductif**

Principe du chauffage

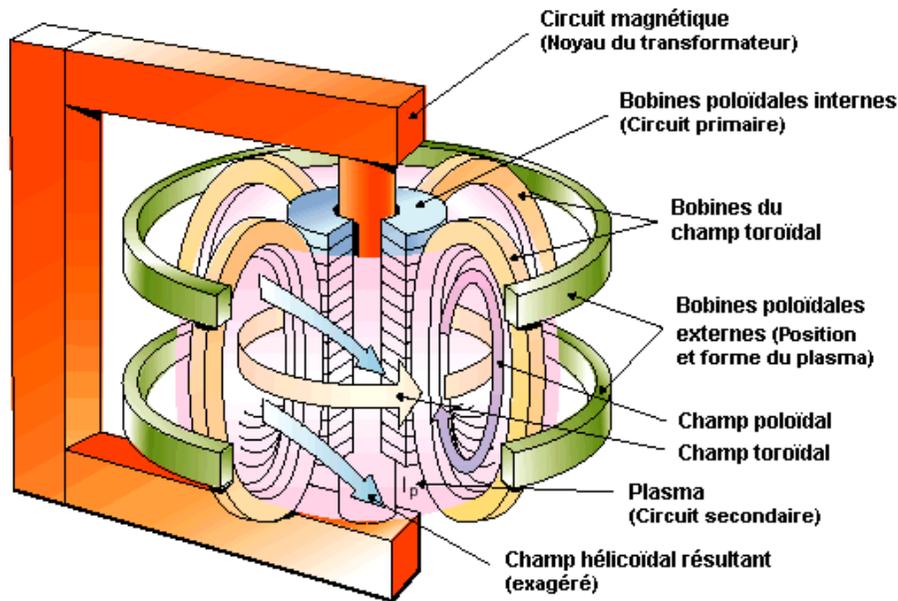
- Contours de la fonction de distribution:



Densité d'énergie (espèce s):

$$\varepsilon_s = n_s \frac{m_s}{2} \int d^3\mathbf{v} v^2 f_s(\mathbf{v})$$

Courant toroïdal dans un tokamak



• Confinement stable:

Champ magnétique toroïdal

→ Circuit magnétique

+

Champ magnétique poloïdal

→ Courant toroïdal dans le plasma

• Courant toroïdal: 3 sources

- Courant variable dans les bobines
- Courant auto-généré (bootstrap)
- Sources extérieures : faisceaux, ondes radiofréquence

• Opération continue:

→ Courant totalement non inductif ($V_{loop}=0$)

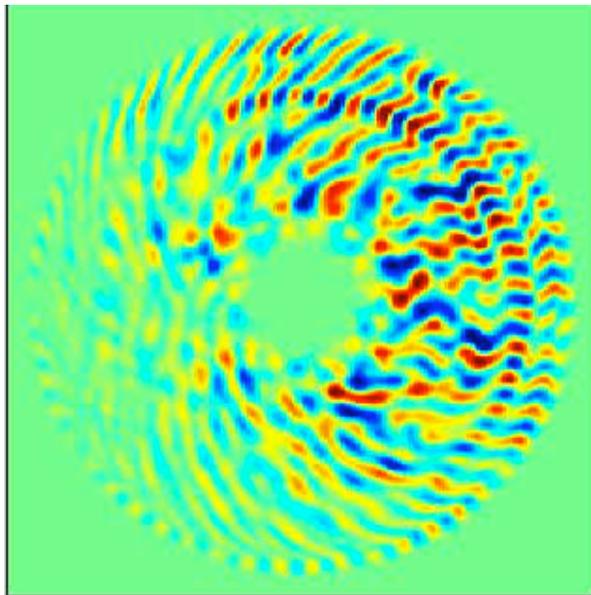
Influence du profil de courant

- **Turbulence:**

- Transport anormal de l'énergie
- **Dégradation du confinement**

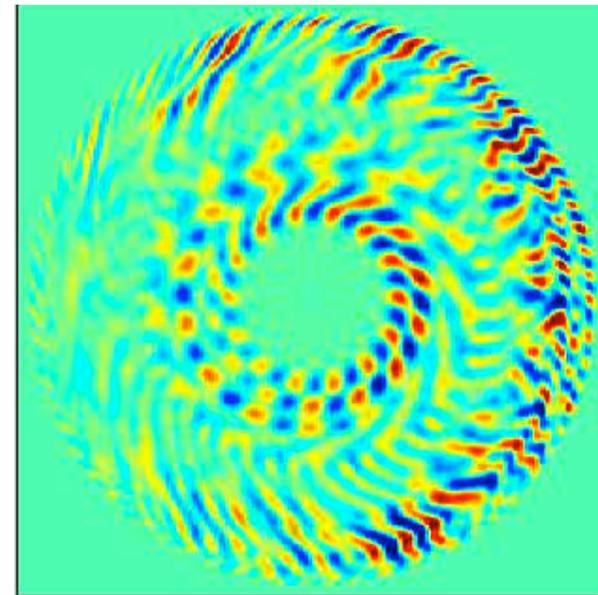
- **Suppression (réduction) de la turbulence:**

- Cisaillement de la vitesse de rotation du plasma
- **Cisaillement magnétique** → Profil de courant optimisé



Profil de q monotone

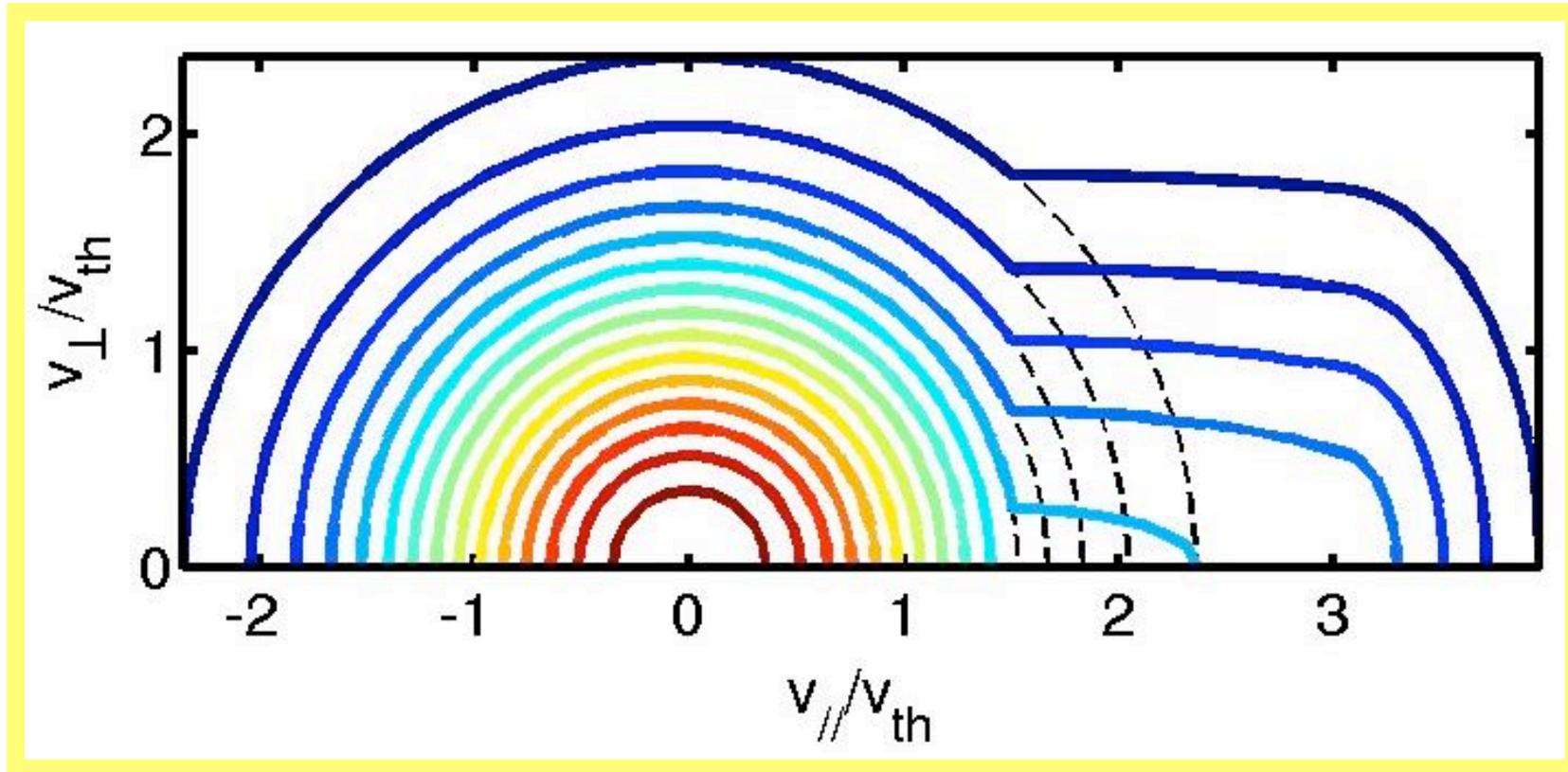
Profil de courant
→
optimisé



Profil de q inversé

Principe de la génération de courant

- Contours de la fonction de distribution:



Densité de courant:

$$j = \sum_s n_s q_s \int d^3\mathbf{v} v_{\parallel} f_s(\mathbf{v}) \approx -en_e \int d^3\mathbf{v} v_{\parallel} f_e(\mathbf{v})$$

Electrons suprathermiques

- Physique de la génération de courant:



- Courant élémentaire: $\Delta j = -e\Delta v_{||}$

- Puissance dépensée: $p = \nu_e m_e v_{||} \Delta v_{||}$

Efficacité de génération de courant: $\eta \equiv \frac{|\Delta j|}{p} = \frac{e}{m_e v_{||} \nu_e}$ ↑ Fréquence de collision

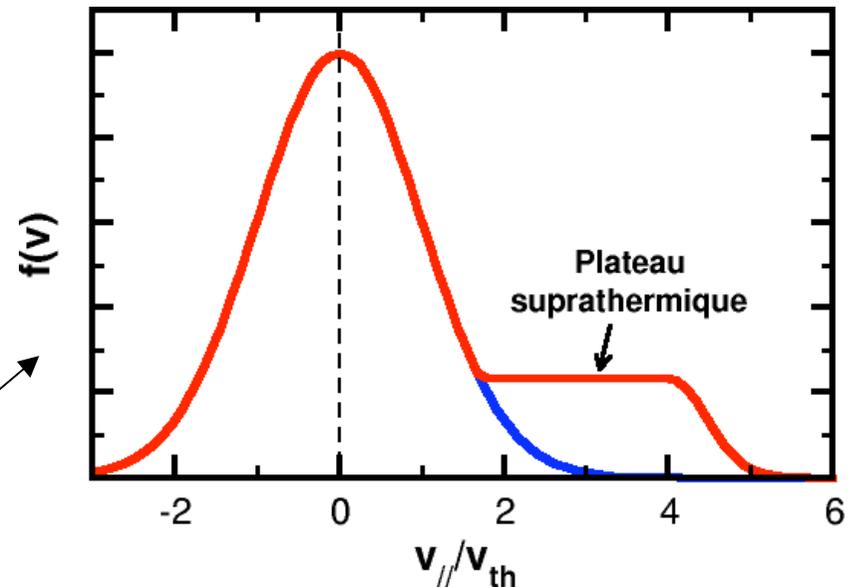
Electrons thermiques:

$\nu_e \approx \text{const.} \rightarrow \eta \propto 1/v_{||}$

mais effets d'électrons piégés

Electrons suprathermiques:

$\nu_e \propto v_{||}^{-3} \rightarrow \eta \propto v_{||}^2$



Meilleure efficacité obtenue avec les électrons rapides

Ondes Radiofréquence

Diffusion Thomson, spectroscopie, X-durs, ...

Interférométrie, infrarouge

Fréq. cyclo. électronique, réflect.

Fréq. hybride basse

Fréq. cyclo. ionique

turbulence

Chauffages par Ondes

Tétrodes
50-100 MHz

Klystrons
2.5-5 GHz

Gyrotrons
50-170 GHz

Fréquence(Hz)

10^{12}

10^{10}

10^8

10^6

10^4

Le plasma du tokamak

- **Aspect géométrique:**

- Système anisotrope
- Géométrie des antennes
- Structure magnétique de confinement
- Trajectoires non perturbées

- **Caractéristiques du plasma cible:**

- Composition
- Profil(s) de densité
- Profil(s) de température
- Profil de courant

- **Effets cinétiques**

- Plasma chaud
- Présence de populations suprathermiques
- Présence de populations piégées

Ondes à la fréquence cyclotronique ionique (ICRF)

Systeme ICRF

- **Gamme de fréquence:**

$$40 \text{ MHz} < f < 80 \text{ MHz}$$

$$\omega \# \omega_{ci}, \omega_{pi} \ll \omega_{ce}, \omega_{pe}$$

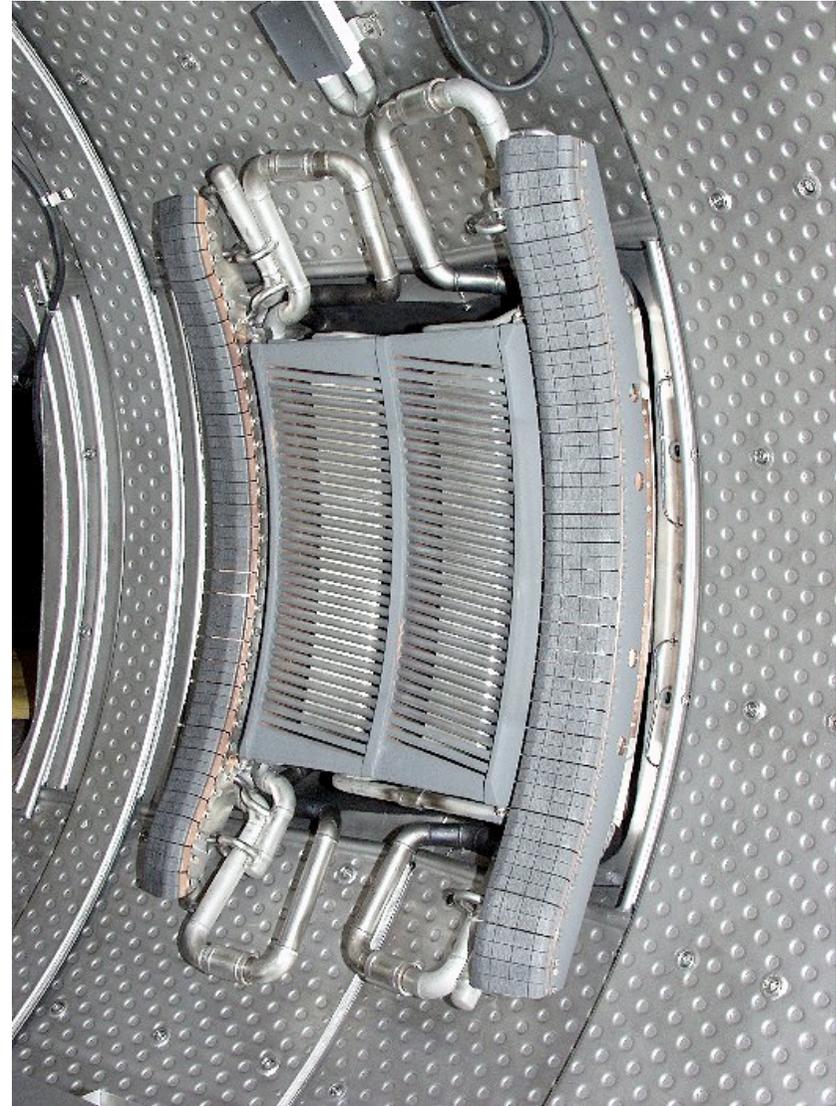
- **Générateurs:**

Tétrodes

- **Principe général:**

Absorption de l'onde
par les **ions** (cycl.) ou
par les **électrons** (ELD - TTMP)

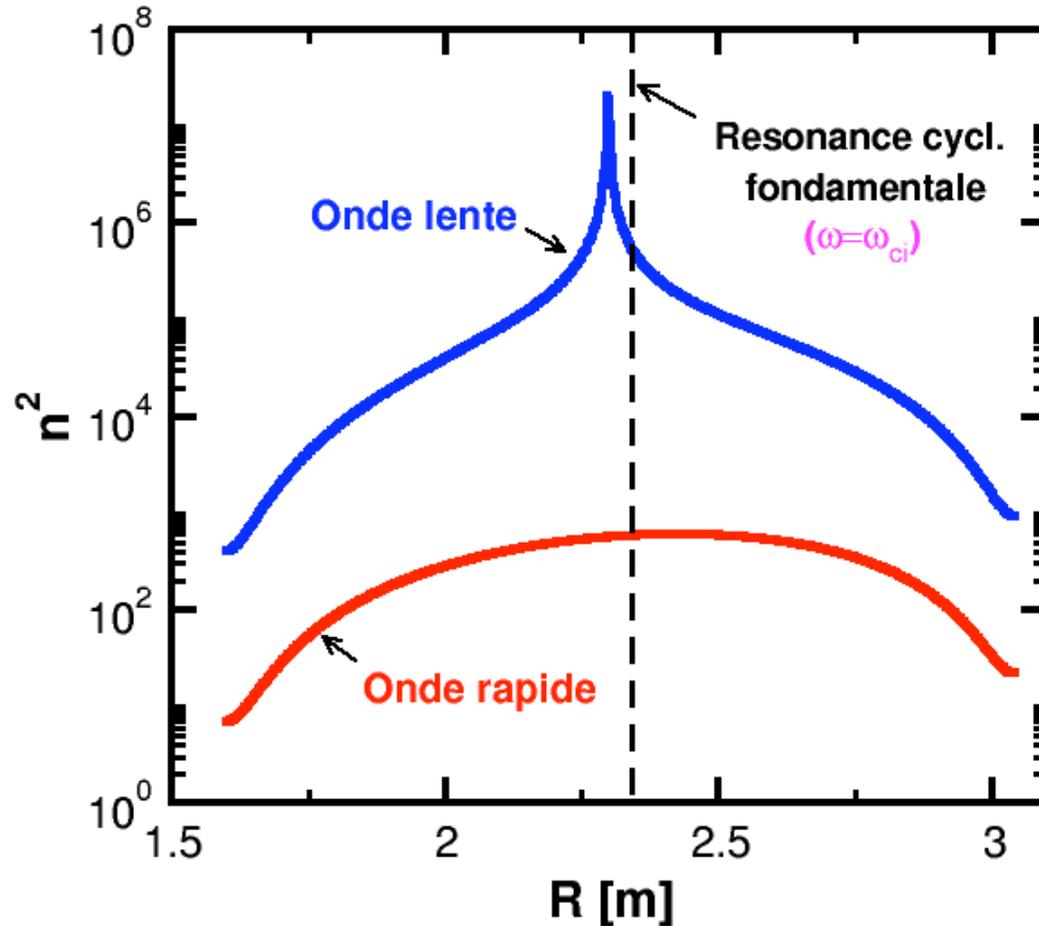
→ **Systeme de chauffage
(essentiellement)**



[Antenne Tore Supra]

Chauffage ionique fondamental

- Résonance cyclotronique: $\omega = \omega_{ci} + k_{||}v_{||}$
- Relation de dispersion:



[Plasma d'Hydrogène dans Tore Supra]

1) Onde lente (O)

- Sensible à la résonance cyclotronique fondamentale
- **Impossible à exciter en géométrie toroïdale**

2) Onde rapide (X)

- Excitable du bord du plasma
- **Insensible à la résonance cyclotronique**

A la résonance ($\omega = \omega_{ci}$)

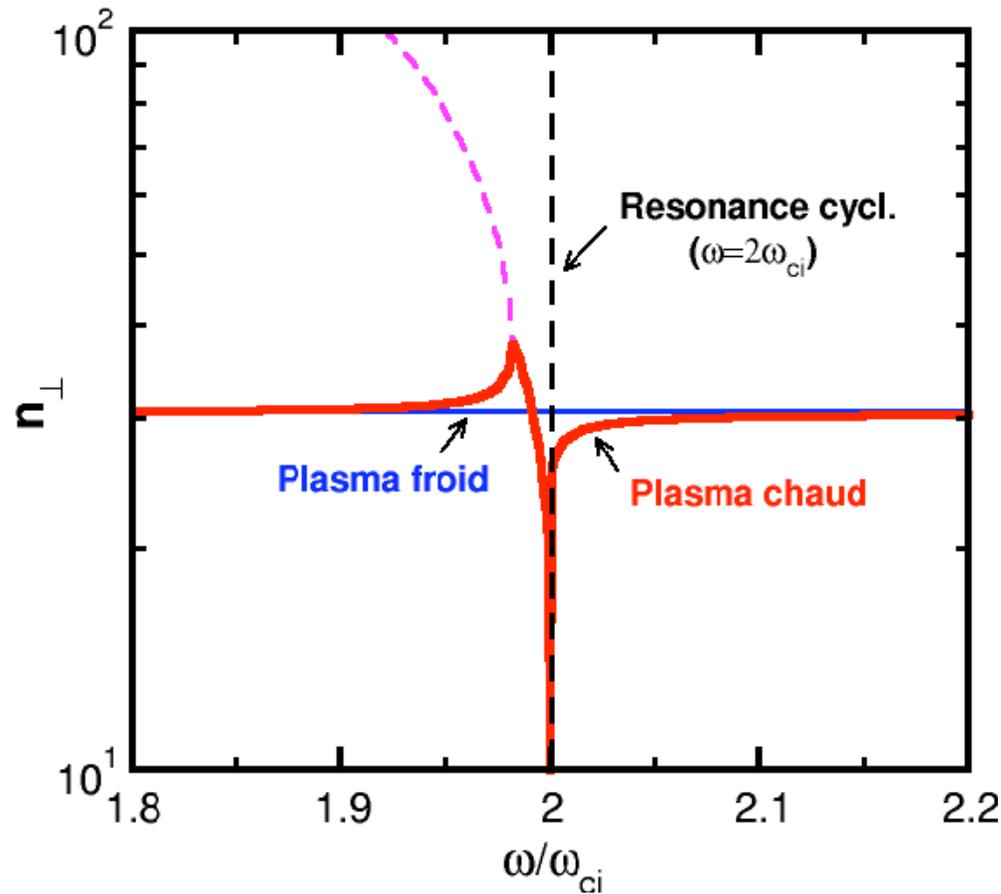
$$E_x \rightarrow -iE_y \quad (E_+ \rightarrow 0)$$

→ **Ecrantage**

→ **Pas de chauffage**

Chauffage au premier harmonique

- Relation de dispersion



[Plasma d'Hydrogène dans Tore Supra]

- Relation de résonance:

$$\omega = 2\omega_{ci} + k_{||}v_{||}$$

- Caractéristiques:

- Pas de problème d'écrantage
- Transfert d'énergie:

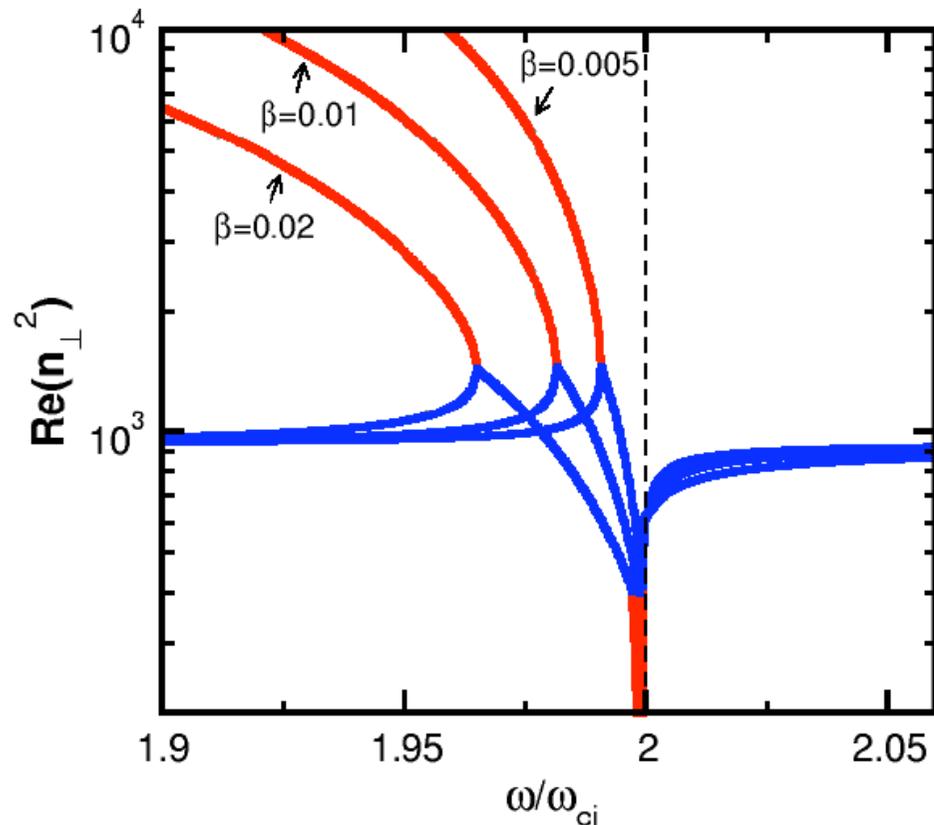
$$\frac{dW_{\perp}}{dt} \propto \rho_L^2 \propto T_i$$

- **Efficace en plasma chaud**
- **Auto-bootstrap**

- Effet de rayon de Larmor fini
- En compétition avec la conversion de mode.

Conversion de mode (premier harmonique)

- Propagation perpendiculaire



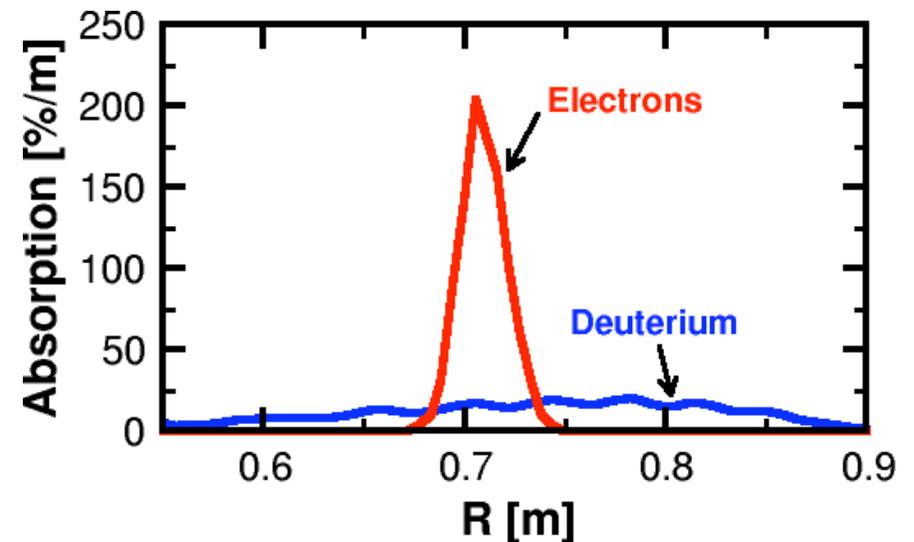
[Plasma d'Hydrogène dans Tore Supra]

- Conversion de mode

Onde rapide \square Onde lente (IBW)

- Onde de Bernstein ionique (IBW)

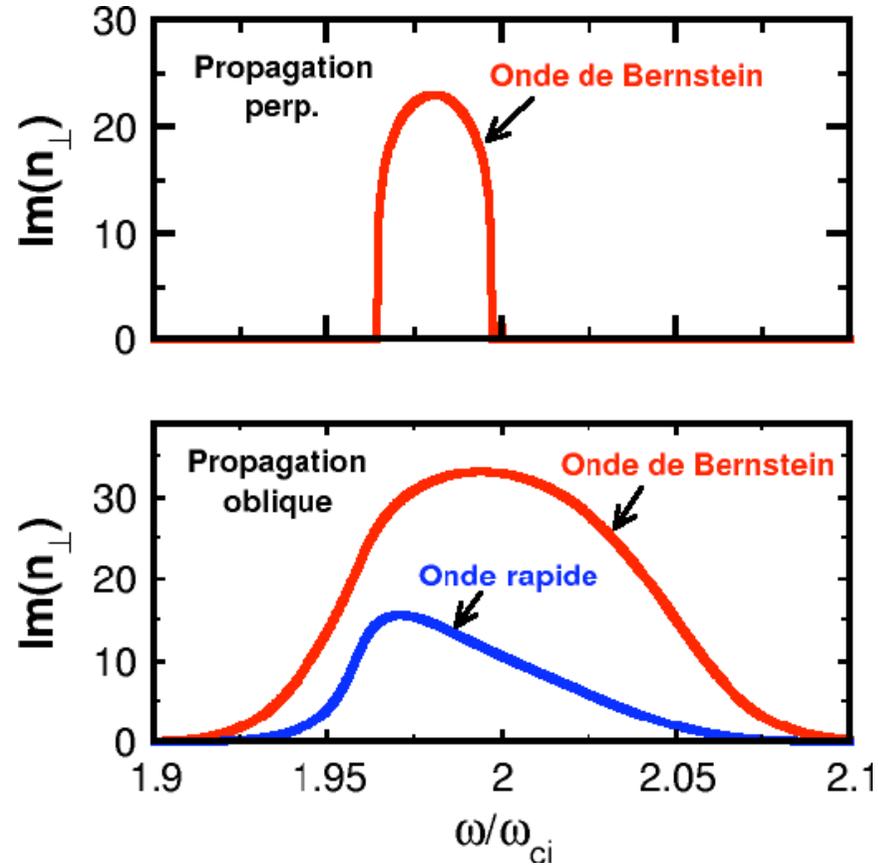
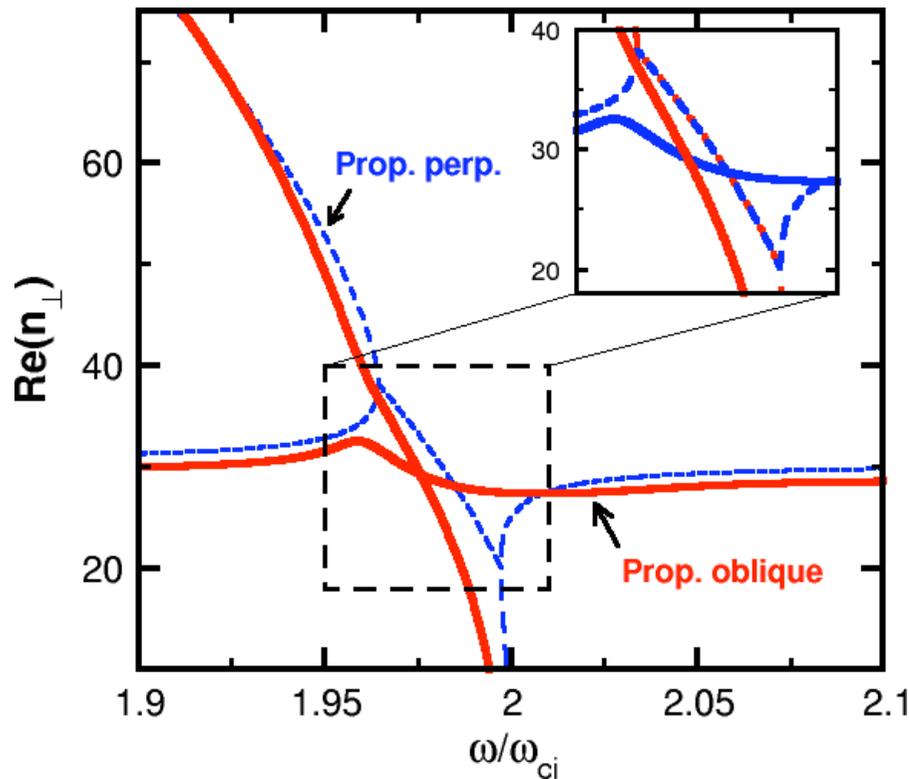
Absorbée par effet Landau sur les électrons



[Plasma de Deutérium dans C-Mod]

Chauffage ionique ou électronique ?

- Propagation perp. / oblique

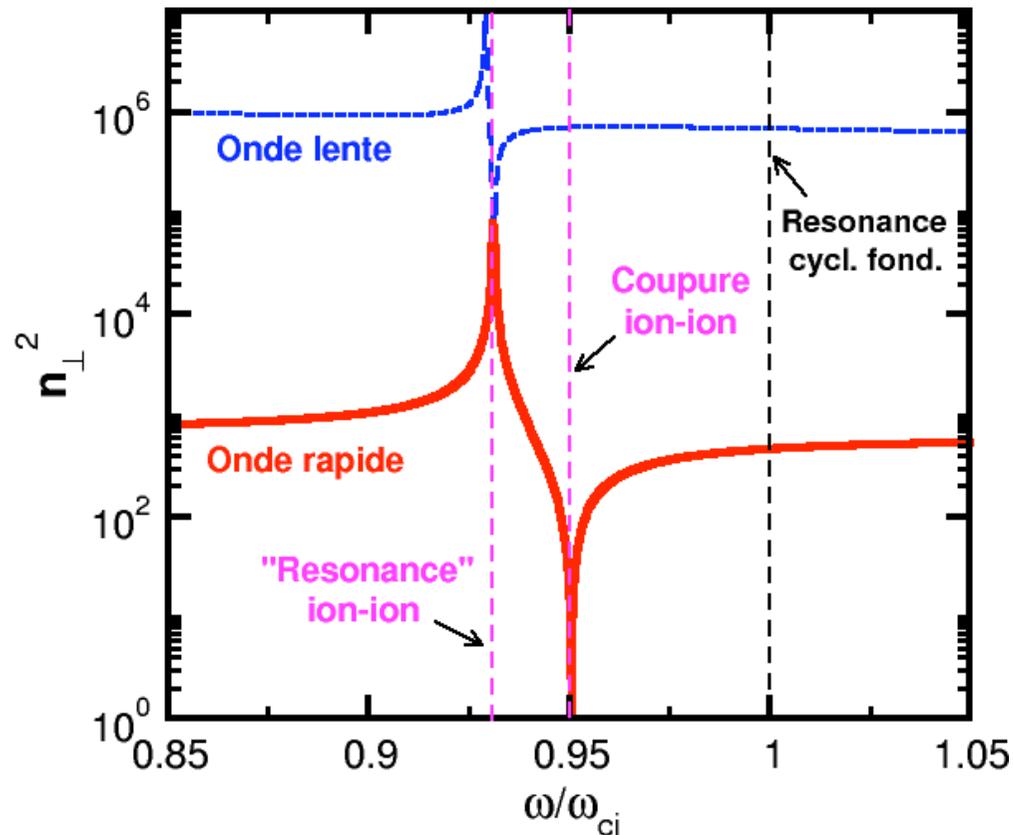


→ **Chauffage ionique possible en propagation oblique**

- Critère de recouvrement du gap: $|n_{\parallel}| \frac{v_{th,i}}{c} \gtrsim 2.5 \cdot \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{ci}^2} \cdot \frac{v_{th,i}^2}{c^2}$

Chauffage dans un plasma multi-ions

- Résonance fondamentale: $\omega = \omega_{ci} + k_{\parallel} v_{\parallel}$



90 % de Deutérium
+ 10 % d'Hydrogène (min.)

- Un seul ion:

- Pas de chauffage ionique possible à la résonance fondamentale

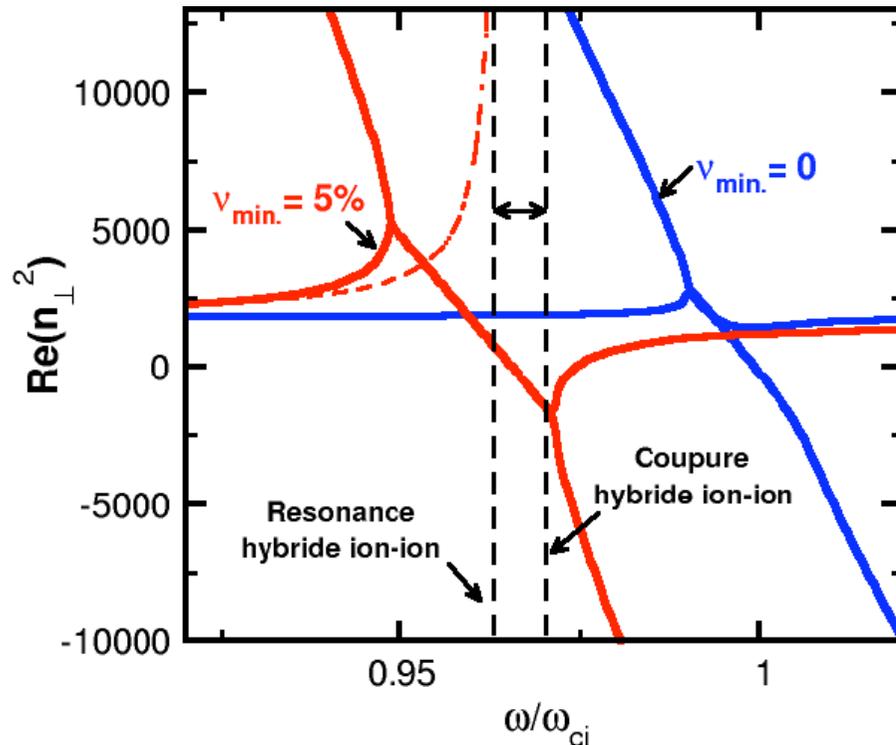
- Deux ions:

- Apparition d'un couple coupure-résonance hybride ion-ion.
- **Propagation** déterminée par l'ion majoritaire
- **Absorption** sur l'ion minoritaire

→ **Chauffage ionique possible**

Chauffage à la résonance fondamentale

- Principe du chauffage minoritaire:

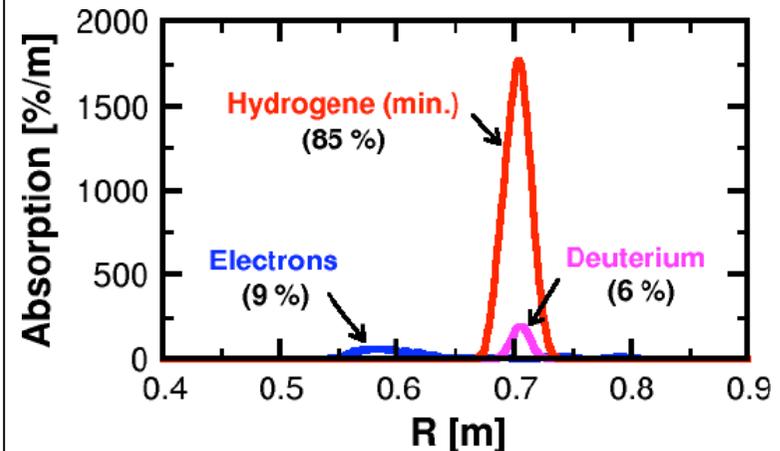


[Hydrogène minoritaire dans un plasma de Deutérium]

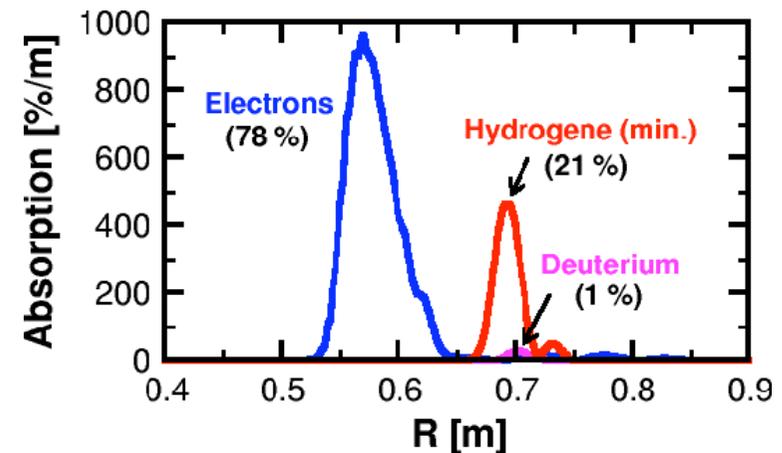
- Critère de chauffage minoritaire:

$$|n_{||}| \cdot \frac{v_{th,H}}{c} \gtrsim \frac{3}{2} \nu_H + \sqrt{\frac{3}{2} \beta_D \nu_H}$$

Concentration minoritaire: 5 %



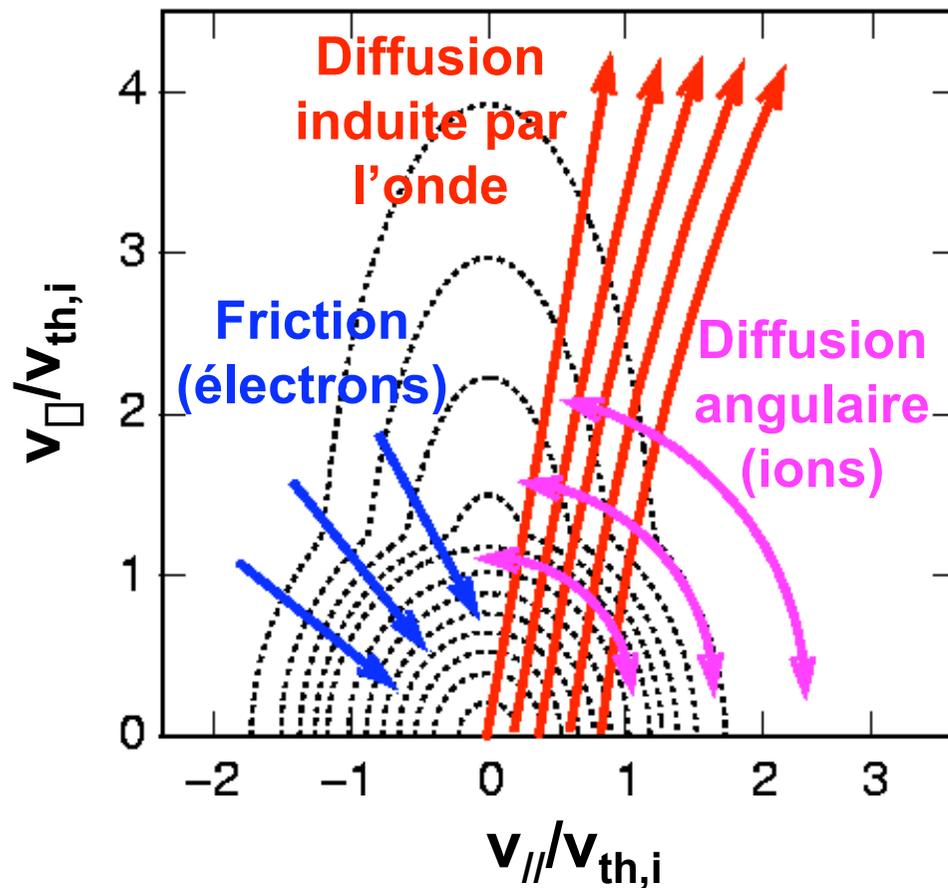
Concentration minoritaire: 15 %



[Plasma D(H) dans Alcator C-Mod]

Chauffage ionique: aspect cinétique

Dynamique quasilinéaire (Espace des vitesses)

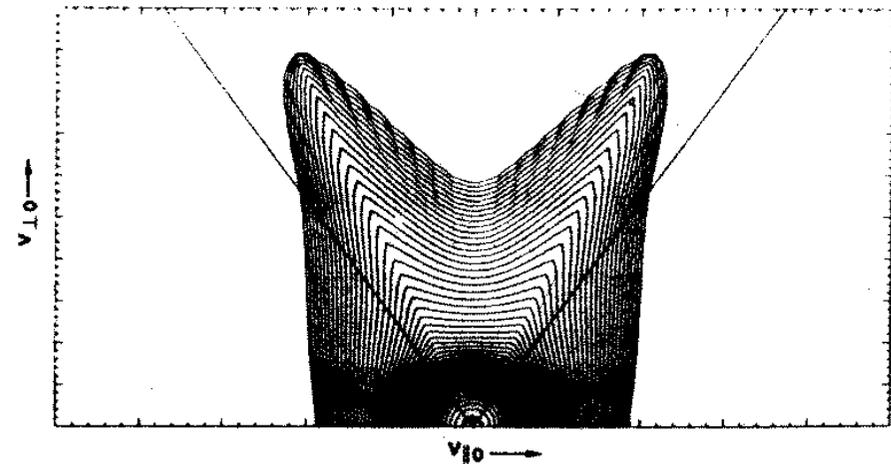


• Phénomènes antagonistes

- Effets de l'onde
- Effets des collisions

→ Création d'une queue d'ions rapides

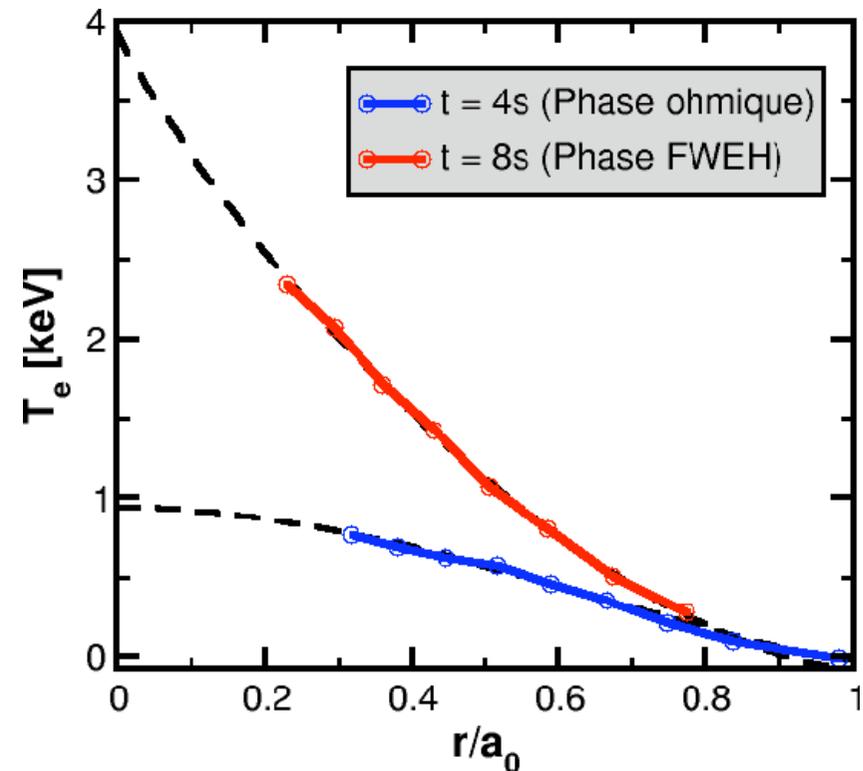
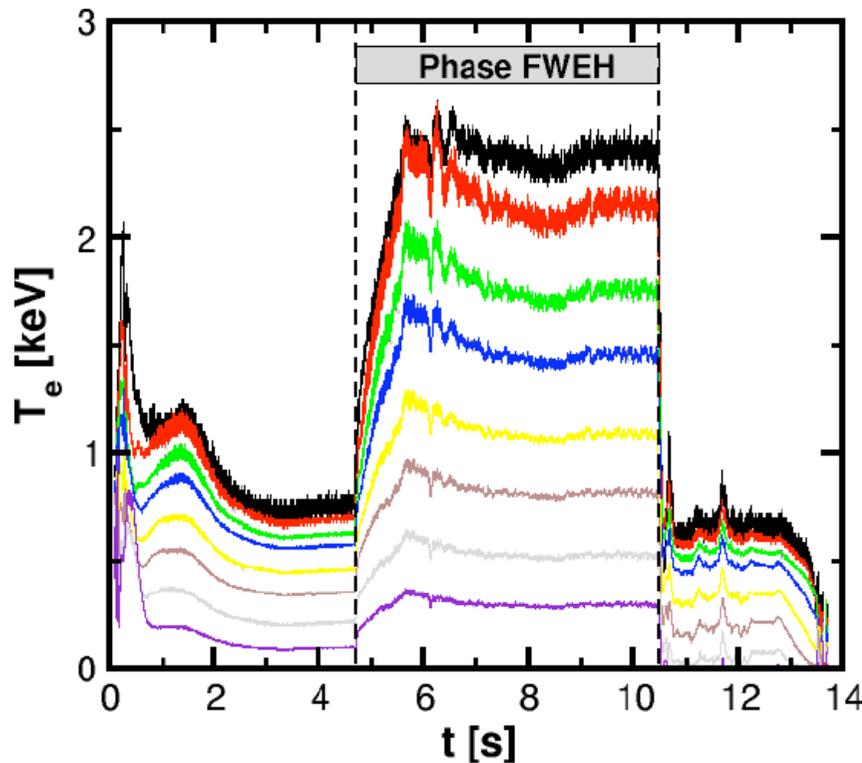
• Distribution "rabbit ear"



[G.D. Kennel and M.G. McCoy
Phys. Fluids **28** (12) 3629]

Fast Wave Electron Heating

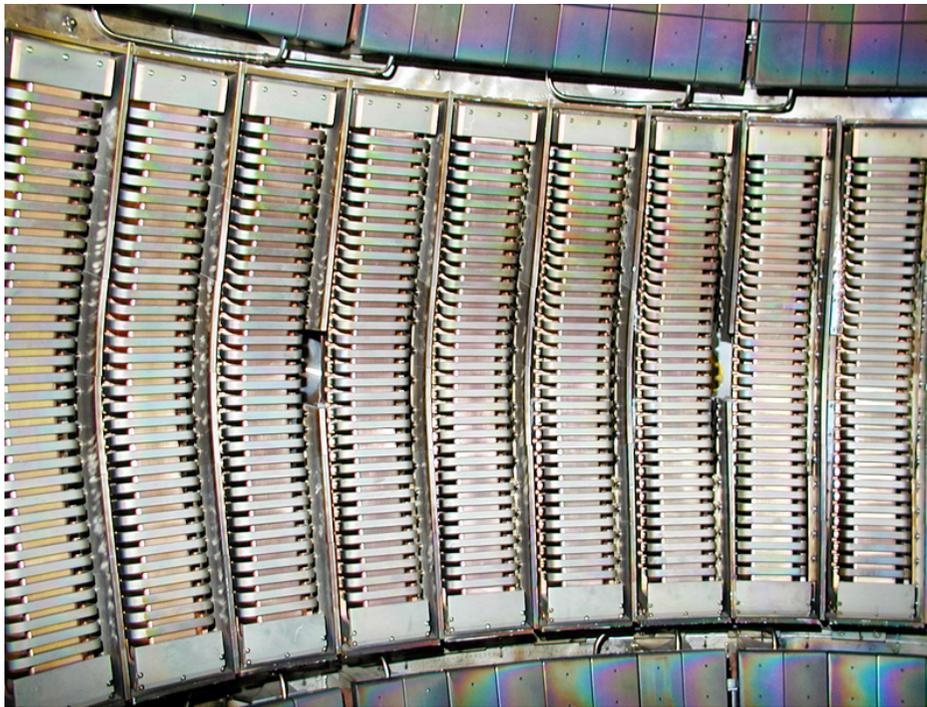
- **Résonance:** $\omega = k_{\parallel} v_{\parallel}$
- **But:** Eviter les résonances ioniques pour chauffer les électrons thermiques (effet Landau+TTMP)
- **Exemple:** Expériences Fast Wave (2T) sur Tore Supra



[Mesures radiomètre super-hétérodyne]

Cas particulier: HHFW sur NSTX

[Antenne NSTX]



[Source : PPPL]

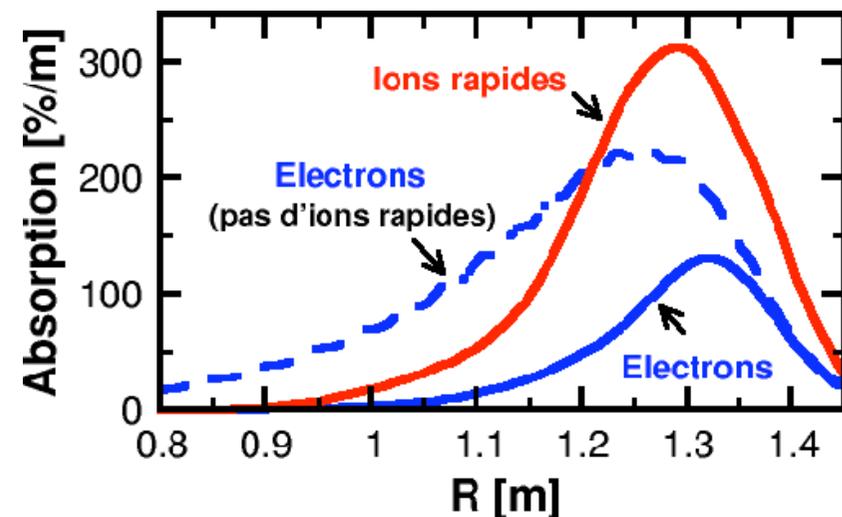
- Résonance:

$$\epsilon = n \epsilon_{ci} + k_{\parallel} v_{\parallel}, \quad 5 < n < 15$$

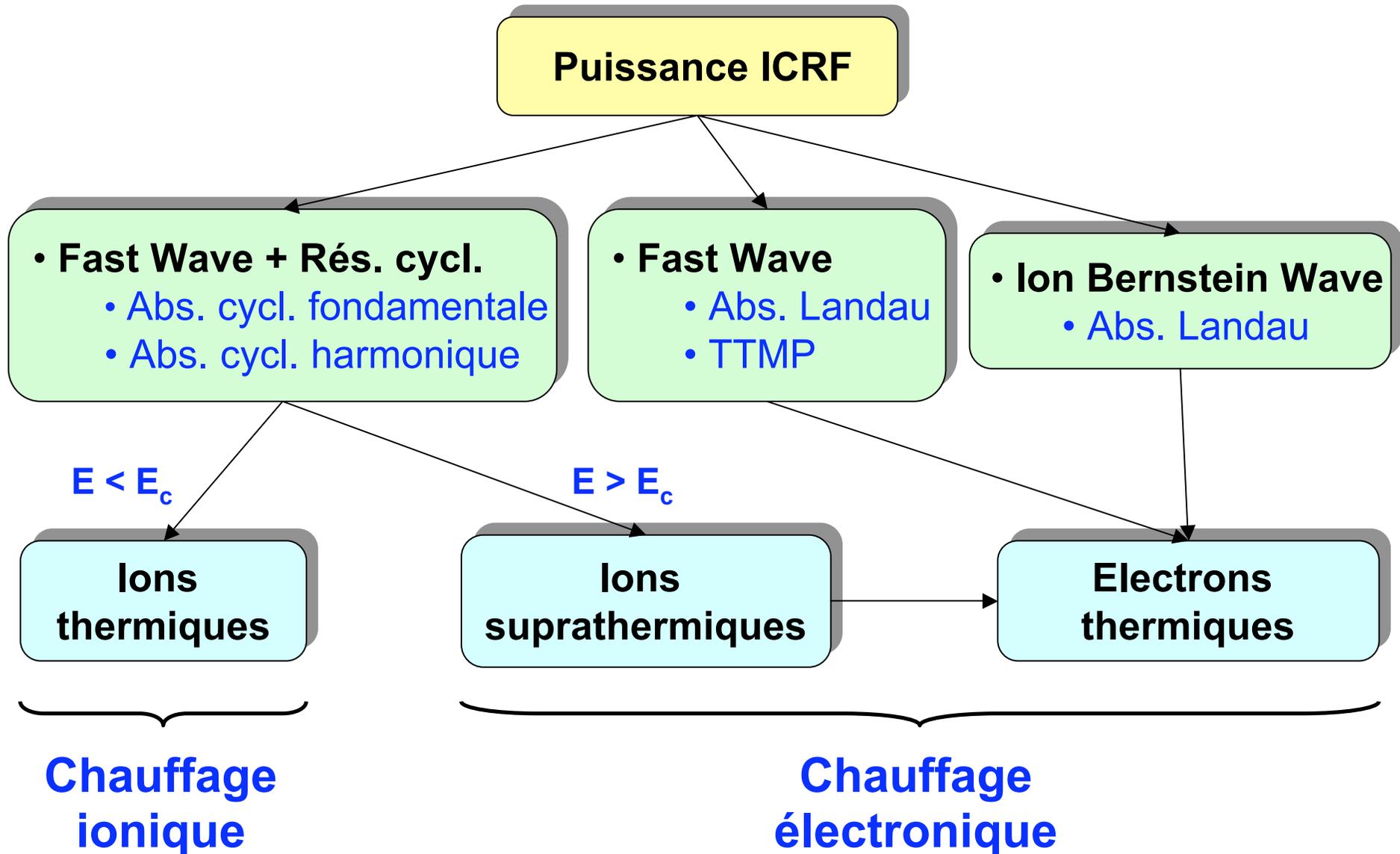
- Absorption ionique faible
- Absorption Landau + TTMP sur les électrons

- Absorption ionique:

En présence de particules rapides (NBI), l'onde est absorbée (en partie) par les ions.



ICRF: caractéristiques



Ondes à la fréquence hybride basse (LH)

Systeme LH

- **Gamme de fréquence:**

$$1 \text{ GHz} < f < 8 \text{ GHz}$$

$$\lambda_{ci} \ll \lambda \ll \lambda_{ce}$$

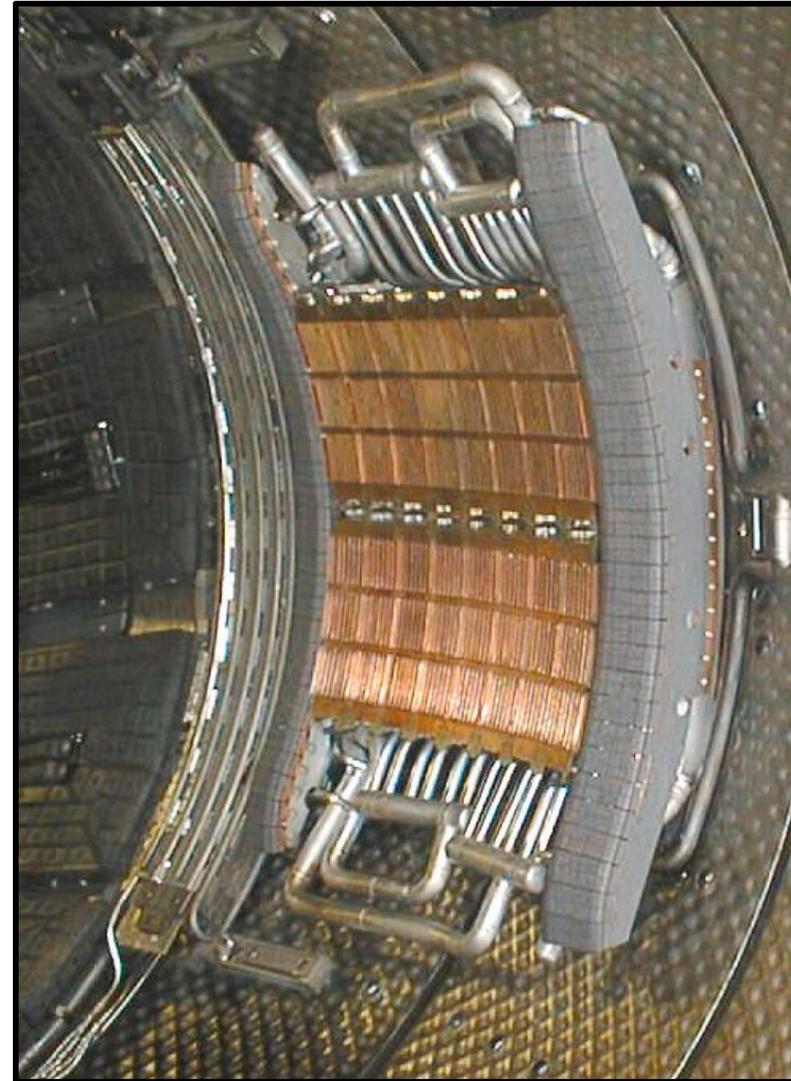
- **Générateurs:**

Klystrons (ou gyrotrons)

- **Principe général:**

Absorption Landau de l'onde
par les électrons rapides

→ **Systeme de génération
de courant**

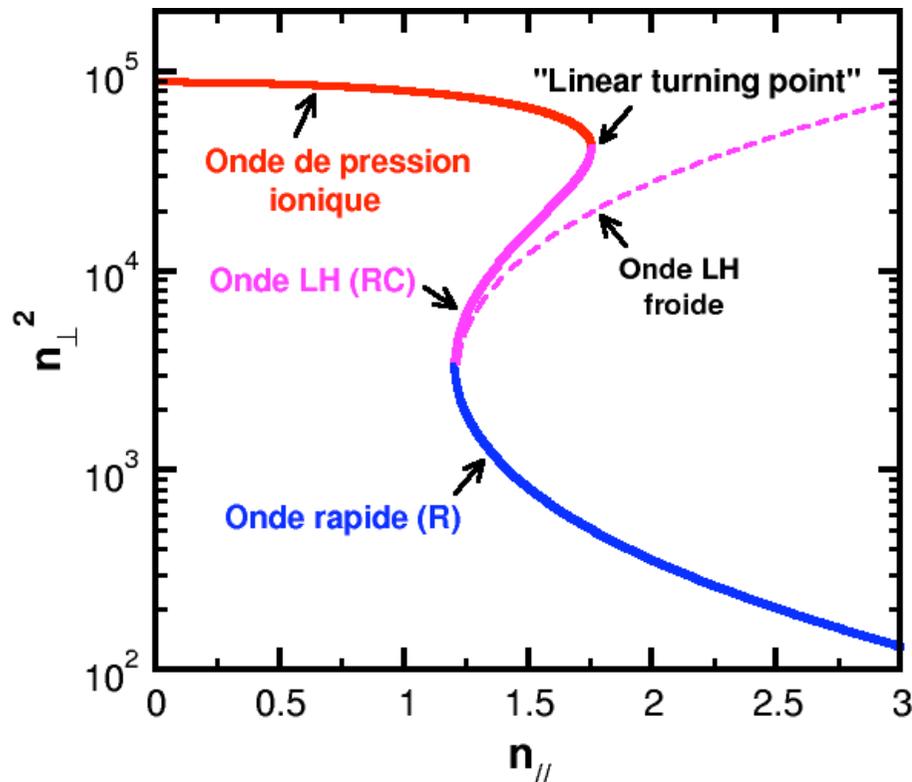


[Antenne Tore Supra]

Chauffage à la fréquence hybride basse

- **Idée originelle:** conversion de l'onde LH vers une onde de pression

→ **Chauffage ionique**



Problèmes:

- Gamme de (n_{\parallel}, ω) très étroite
- Excitation d'une onde de cône de résonance
→ **Effets non linéaires**
- Valeurs de l'indice perpendiculaire très élevées à la conversion.
→ **Instabilités paramétriques**
- Absorption de l'onde LH par les électrons avant la conversion

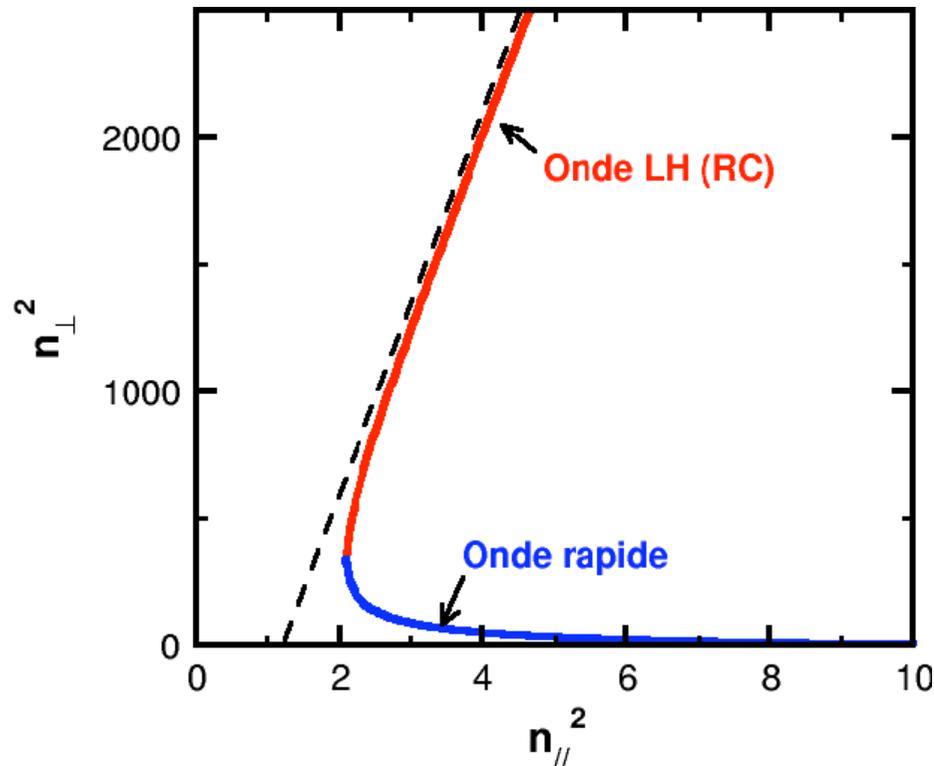
- **Utilisation "moderne":** exploiter l'absorption Landau par les électrons

→ **Chauffage électronique**

Onde de cône de résonance

- **Cône de résonance:**

$$n_{\perp}^2 \approx \frac{m_i}{m_e} \cdot \frac{\omega_{lh}^2}{\omega^2 - \omega_{lh}^2} \cdot n_{\parallel}^2$$

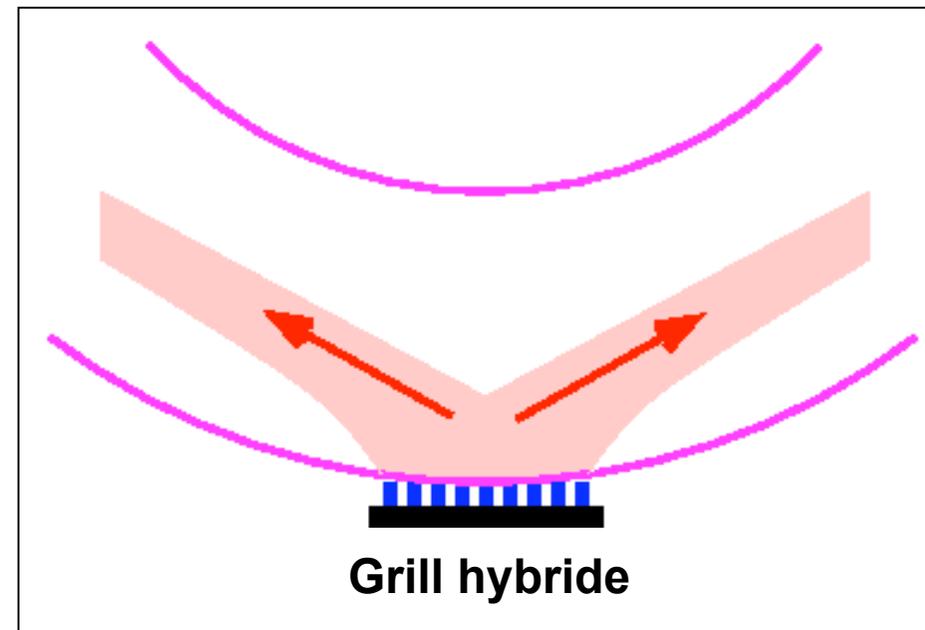


- **Polarisation - Vitesse de groupe:**

$$\left. \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} \right|_S \approx \frac{n_{\perp}}{n_{\parallel}} \rightarrow \mathbf{E} \parallel \mathbf{k}$$

$$\left. \frac{v_{g,\perp}}{v_{g,\parallel}} \right|_S \approx -\frac{n_{\parallel}}{n_{\perp}} \rightarrow \mathbf{v}_g \perp \mathbf{k}$$

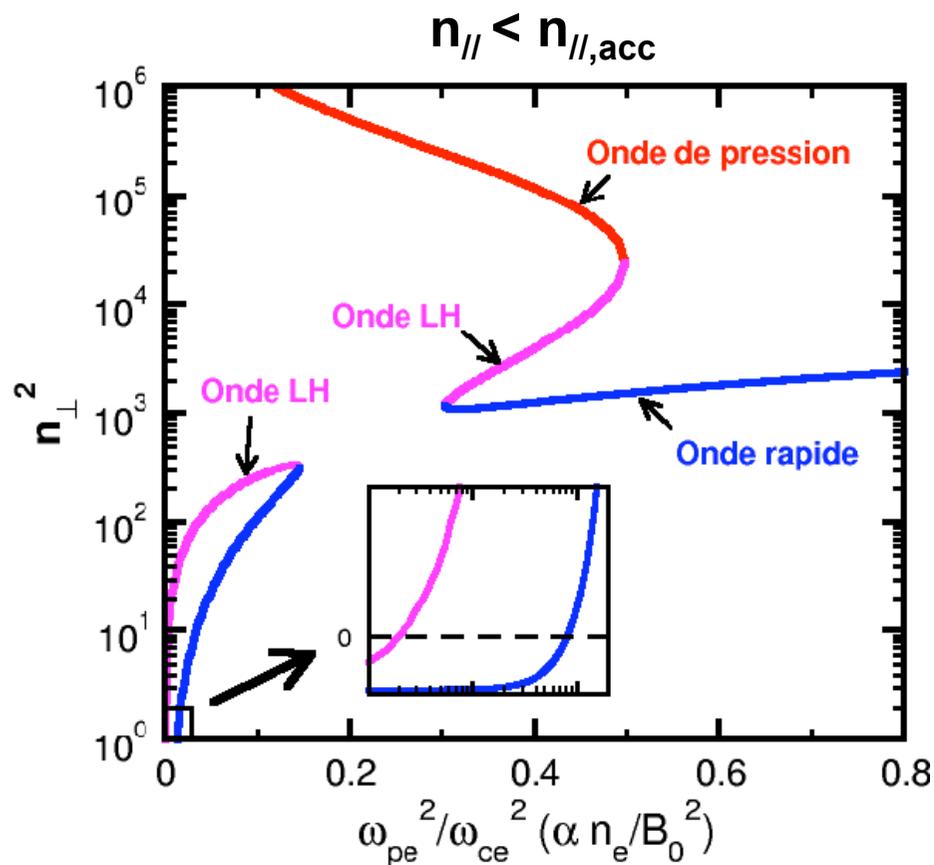
- **Directivité:**



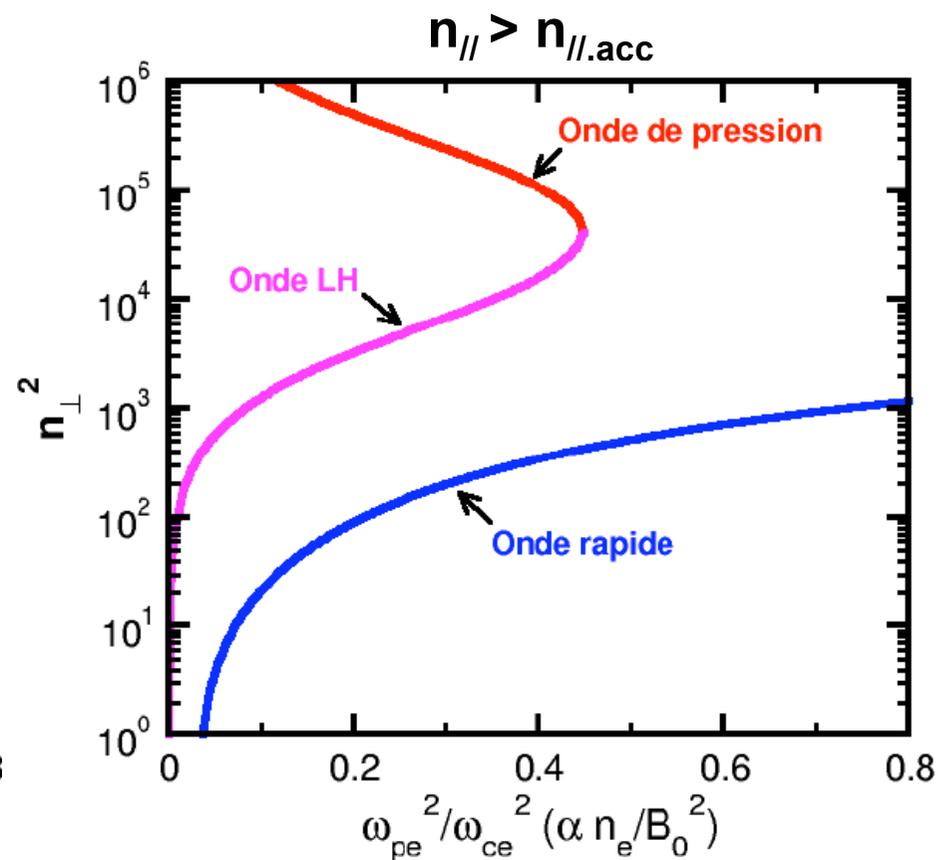
Accessibilité

- **Couplage et propagation de l'onde LH:**

- Evanescence au bord du plasma
- Présence éventuelle d'une confluence avec l'onde rapide



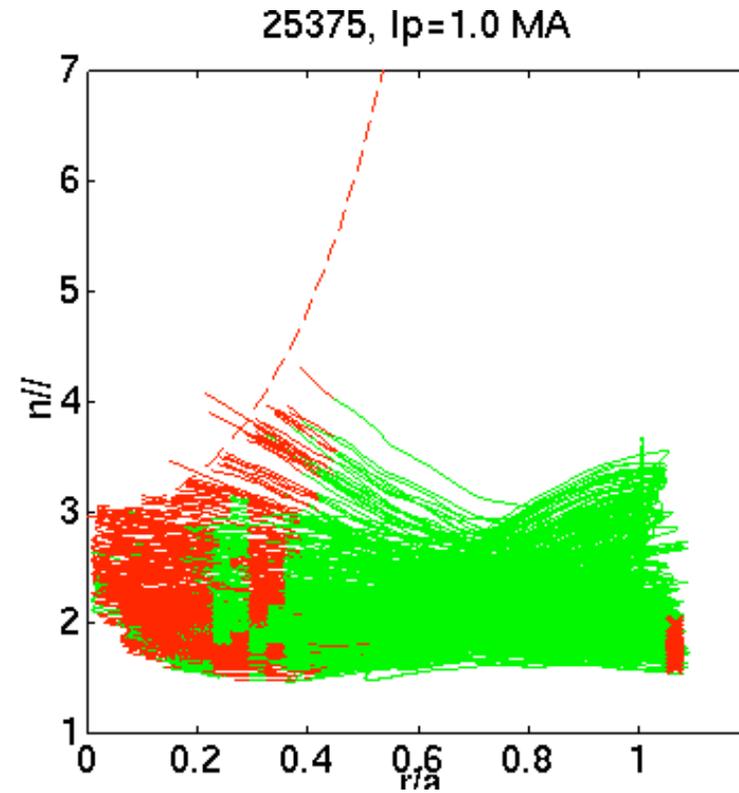
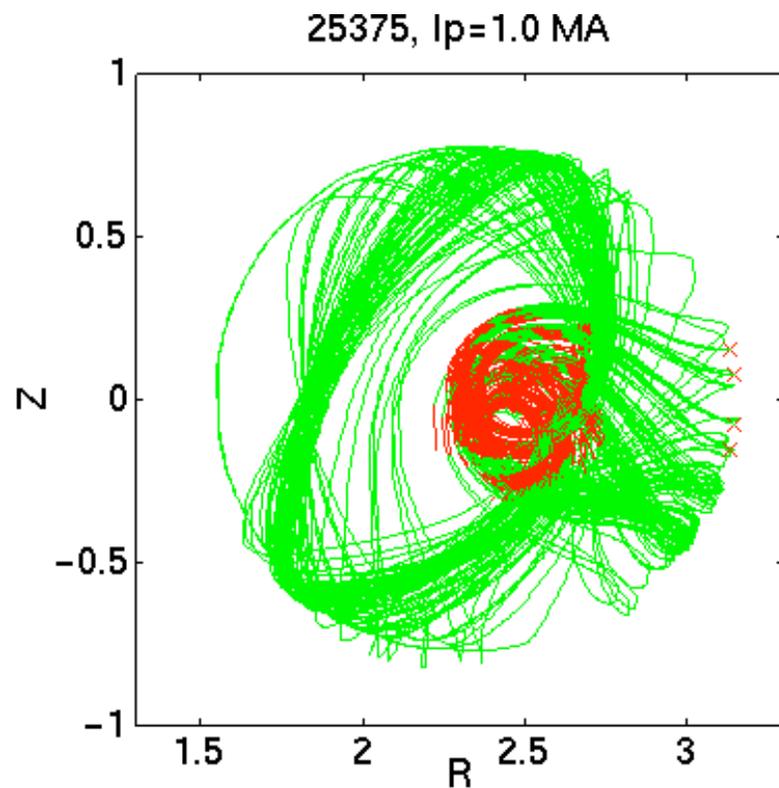
Situation inaccessible



Situation accessible

Propagation

- **Longueur d'onde:** $\lambda \ll L_B$
→ Propagation quasi-optique
- **Modélisation par tracé de rayon:**

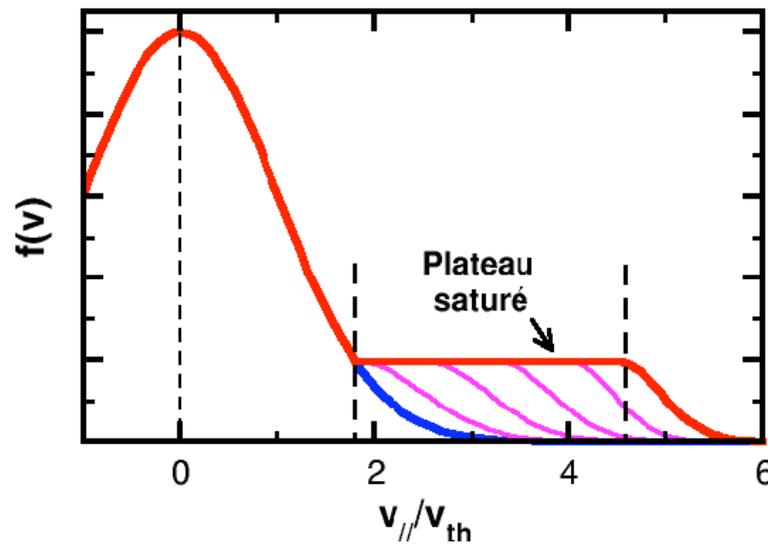
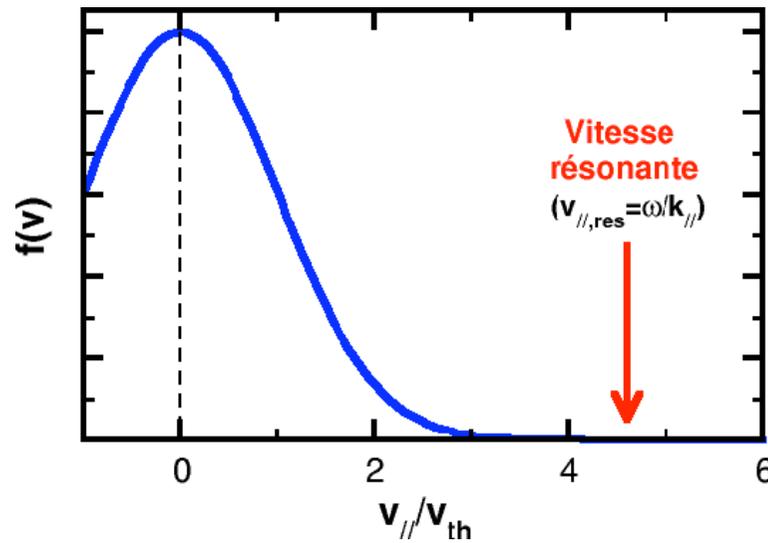


[Source : F. Imbeaux]

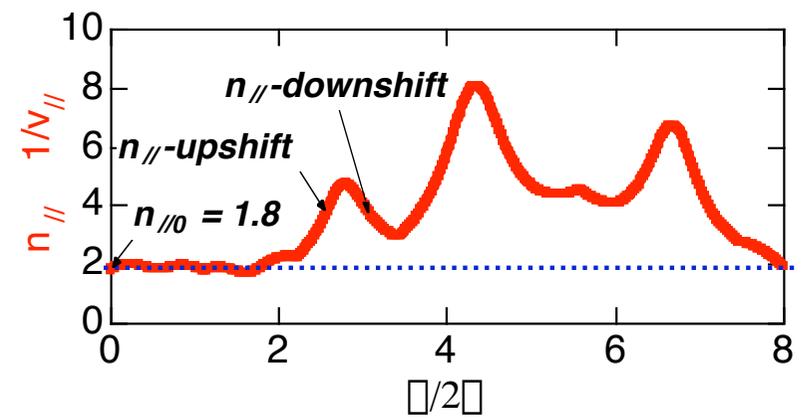
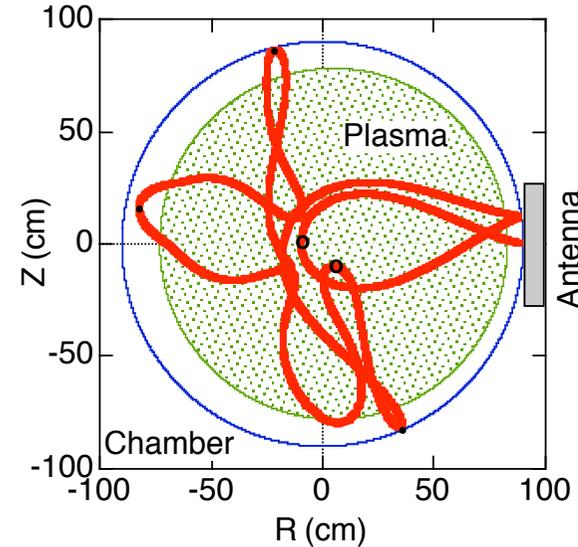
→ **Multiples réflexions (régime “multipass”)**

Aspect cinétique: le "gap" spectral

- Construction du plateau:



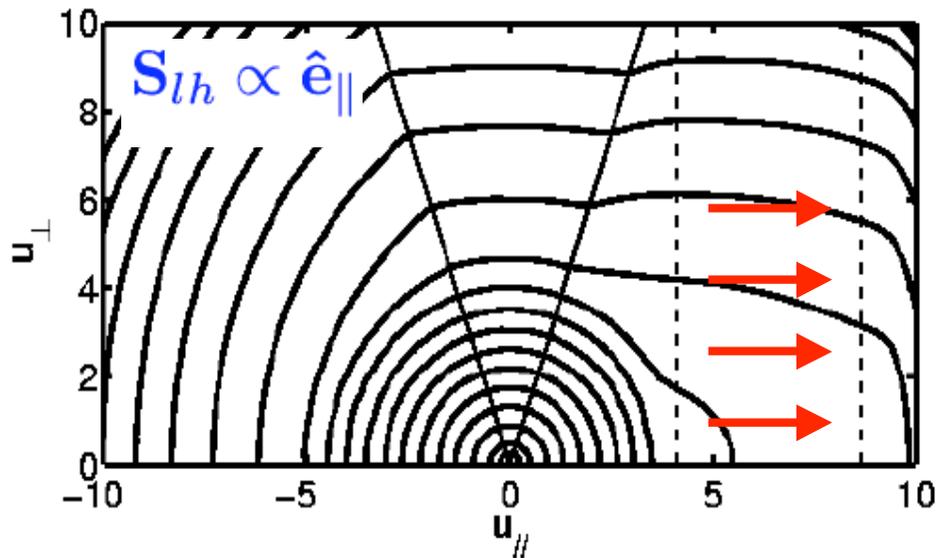
- Propagation d'un rayon:



[Source : Y. Peysson]

LHCD: caractéristiques

- **Fonction de distribution $f_e(\mathbf{v})$**



- **Courant généré**

$$j \approx -en_e \int d^3\mathbf{v} v_{\parallel} f_e(\mathbf{v})$$

Avantages:

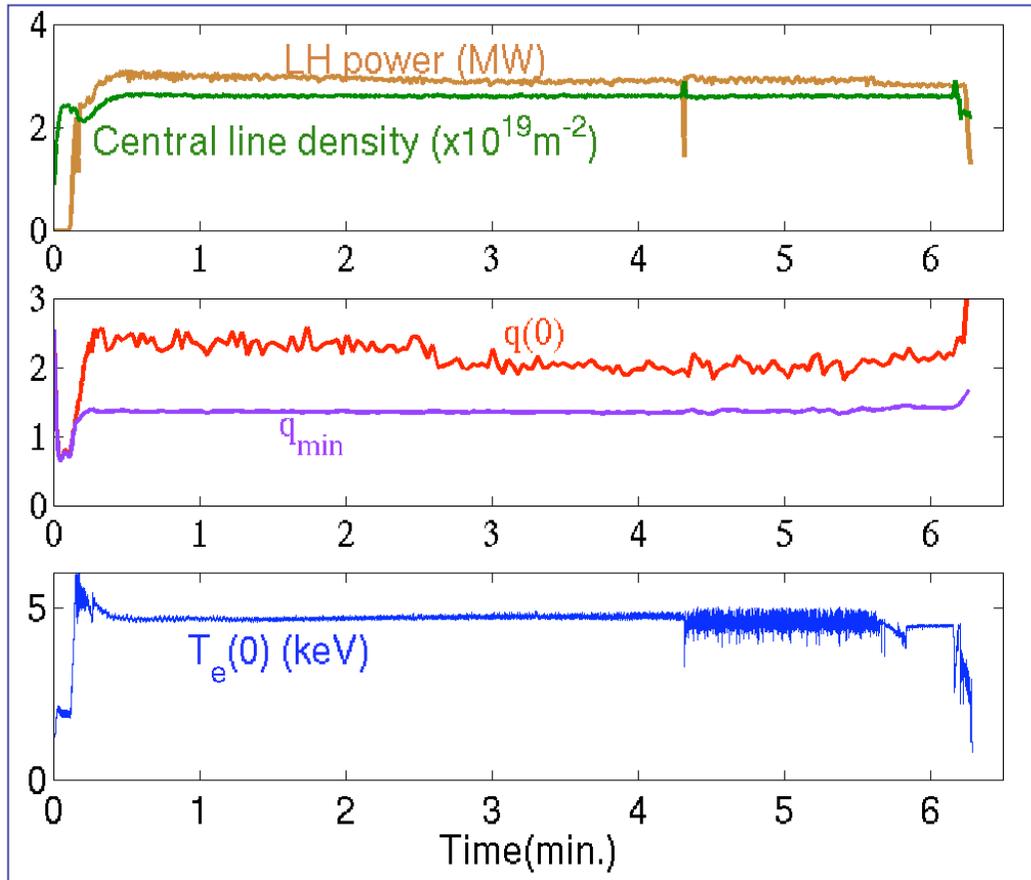
- Excitation d'électrons très rapides
- Transfert direct d'impulsion parallèle
- +
- Création d'une résistivité asymétrique
- Peu sensibles aux électrons piégés

→ Très efficace

Inconvénients:

- Délicat à contrôler
- Dépôt de puissance large
- Sensible aux conditions de bord

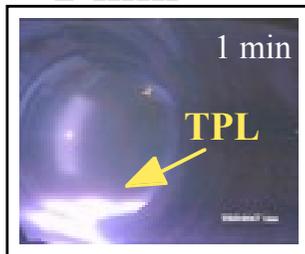
Décharge record sur Tore Supra



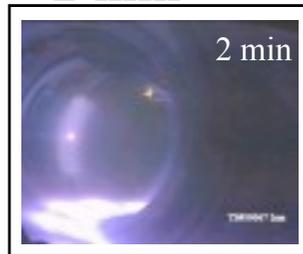
Choc GigaJoule:

- Durée: **> 6 minutes.**
- Energie injectée: **1.1 GJ.**
- Courant totalement non inductif, **généré par l'onde Hybride Basse.**

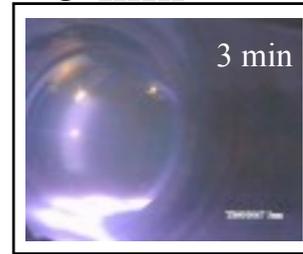
1 min



2 min



3 min



Ondes à la fréquence cyclotronique électronique (EC)

Systeme EC

- **Gamme de fréquence:**

$$110 \text{ GHz} < f_{ec} < 140 \text{ GHz}$$

$$\square \# \square_{ce}$$

- **Générateurs:**

Gyrotrons

- **Principe général:**

Absorption cyclotronique
de l'onde par les électrons
thermiques ou **rapides**

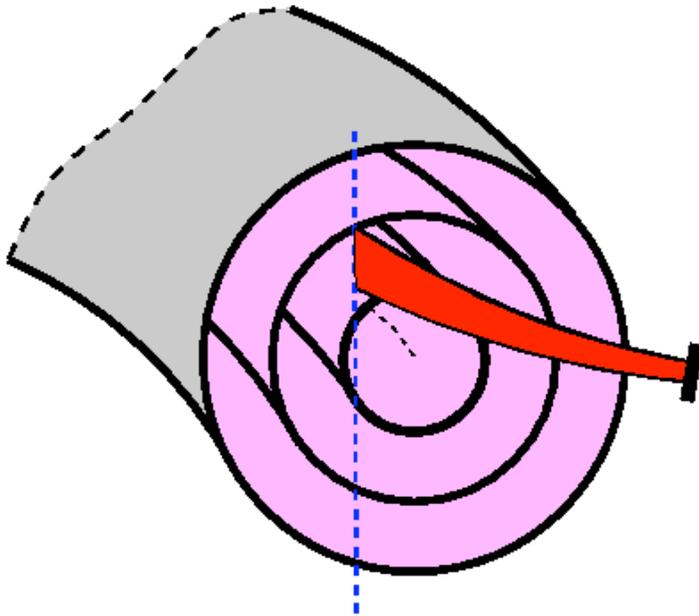
→ **Systeme de chauffage et/ou
de génération de courant**



[Antenne Tore Supra]

Chauffage EC: principe général

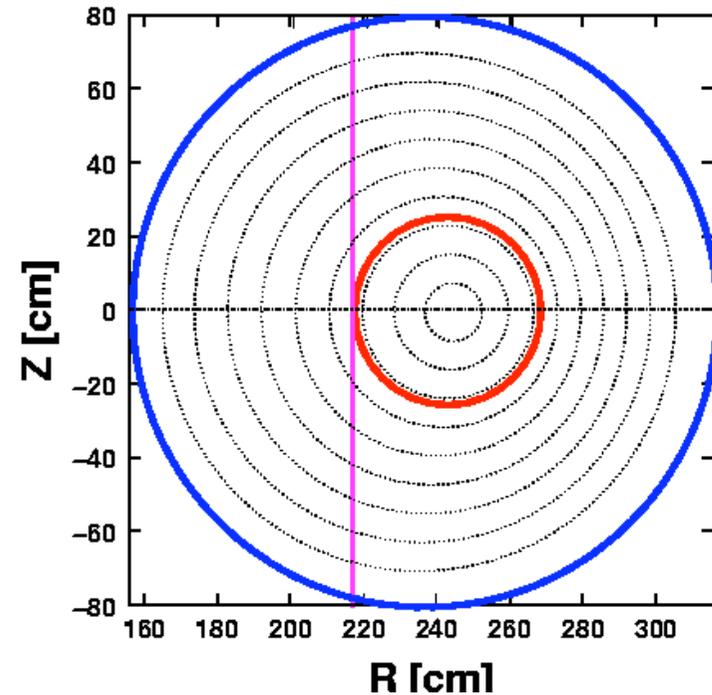
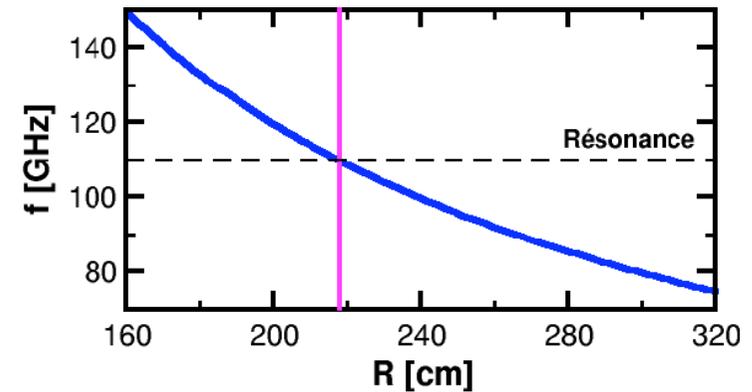
- Injection par miroirs optiques:



- Relation de résonance relativiste:

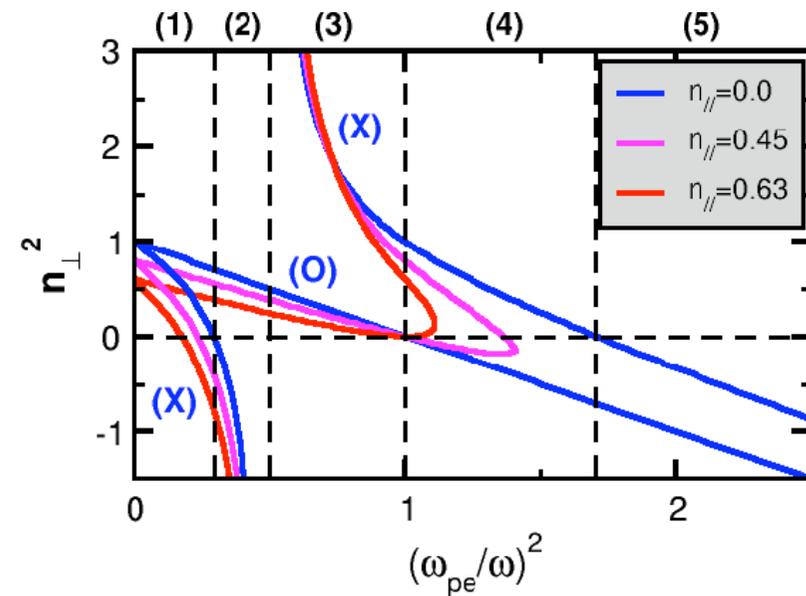
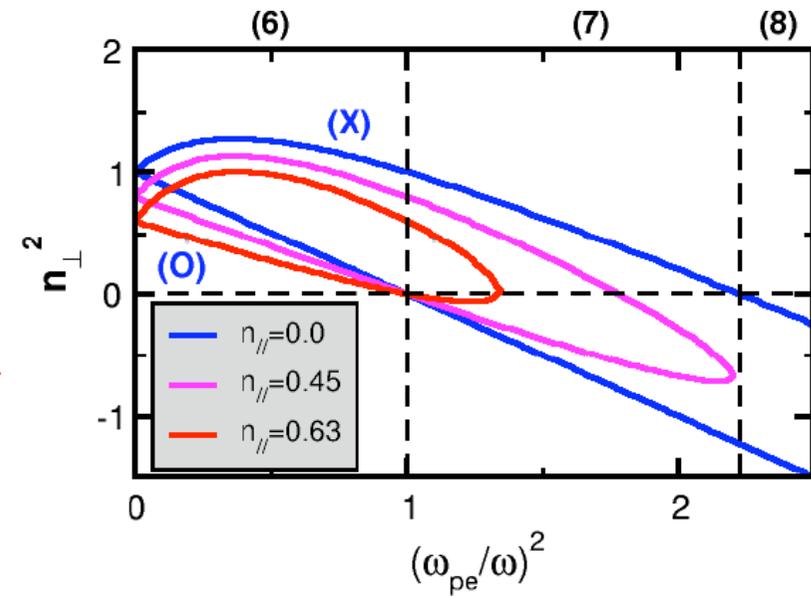
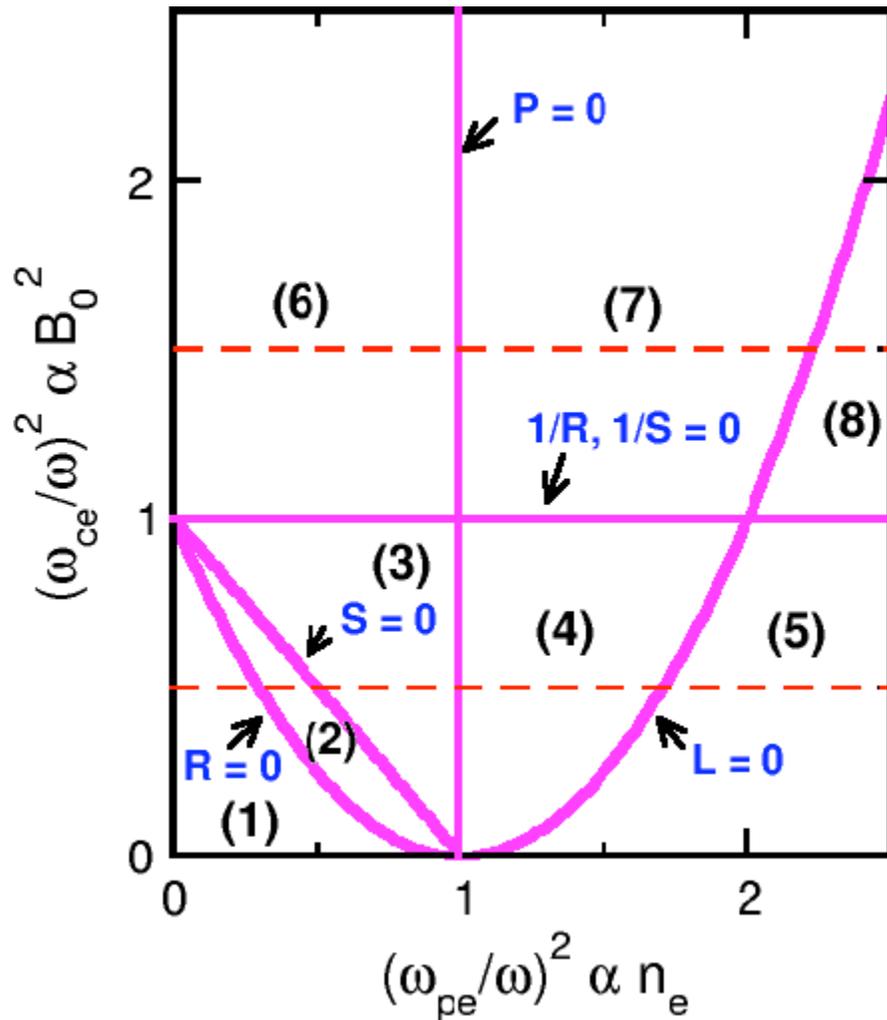
$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = n \frac{\omega_{ce}}{\gamma} + k_{\parallel} v_{\parallel} \\ \frac{\omega_{ce}}{\gamma} = \frac{eB_0}{m_{e0} / \sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right.$$

- Chauffage à la résonance:



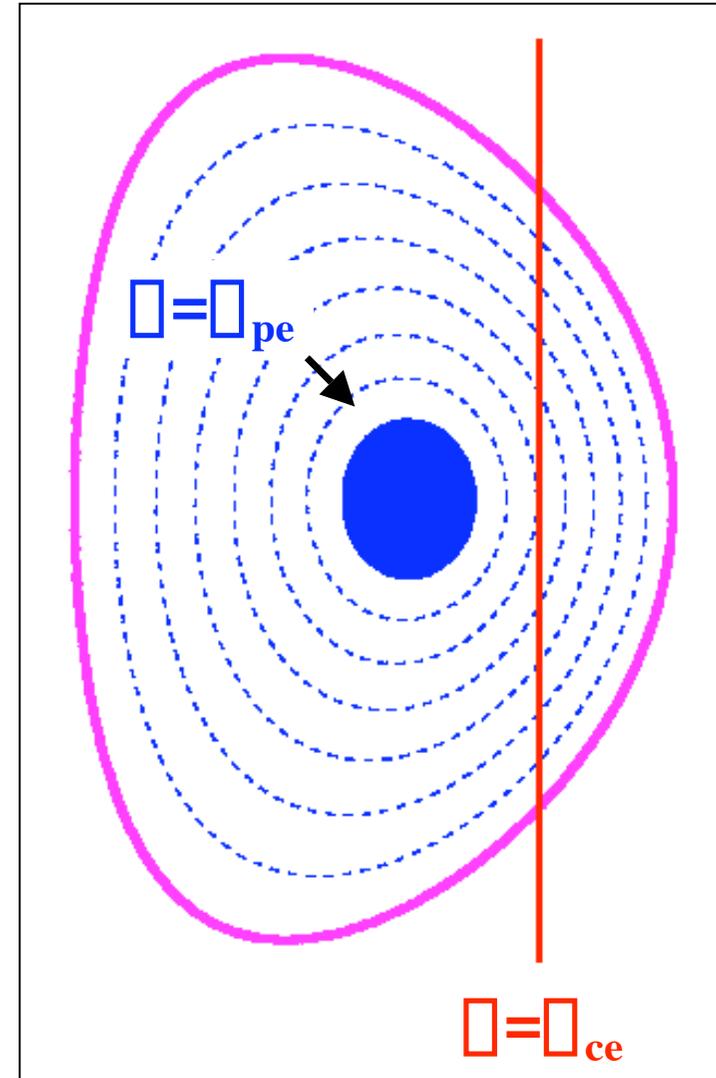
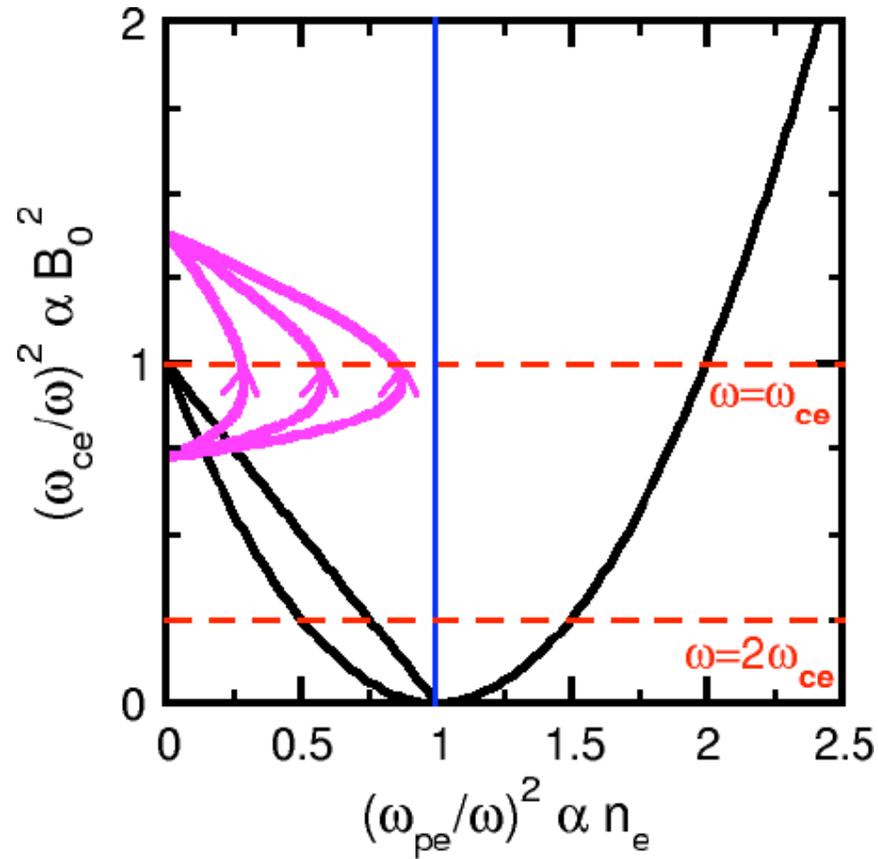
Ondes EC: relation de dispersion

- Diagramme CMA:



Mode O dans un tokamak

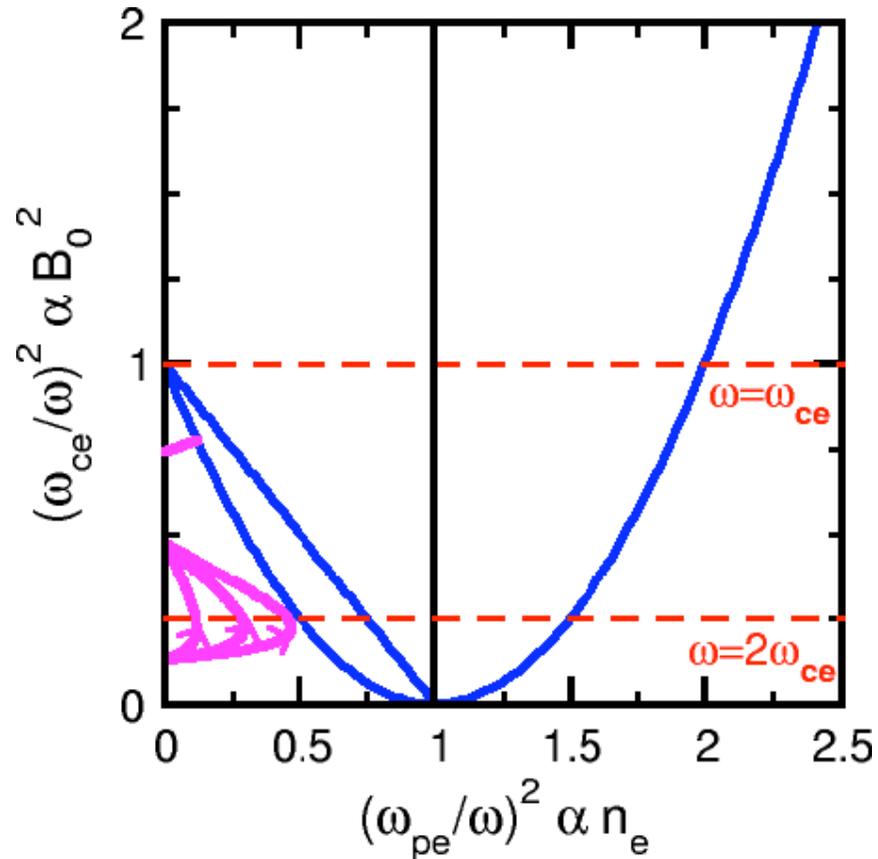
- Mode O injecté du côté bas champ:



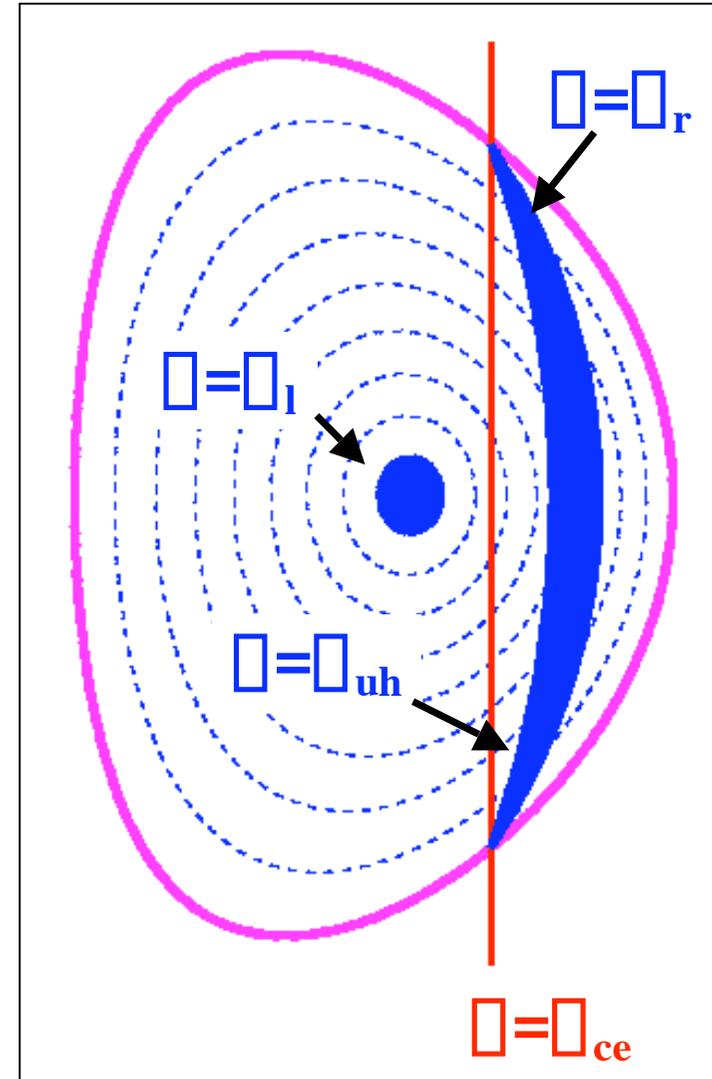
- Chauffage O fondamental (O-1): possible
- Chauffage O au 1^{er} harm. (O-2): possible

Mode X dans un tokamak

- Mode X injecté du côté bas champ:



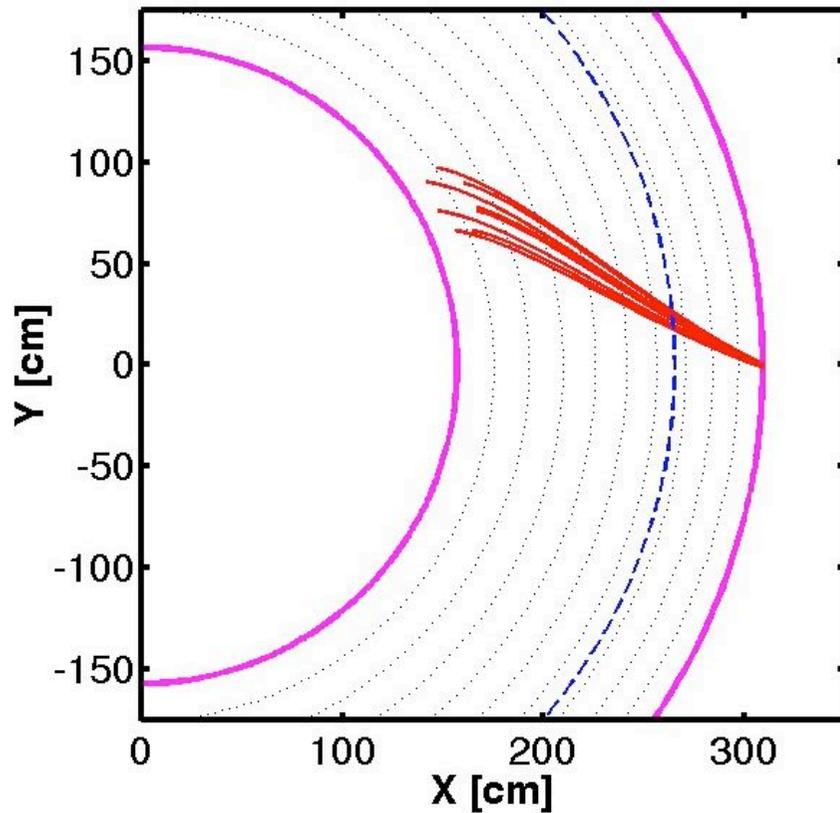
- Chauffage X fondamental (X-1): impossible
- Chauffage X au 1^{er} harm. (X-2): possible



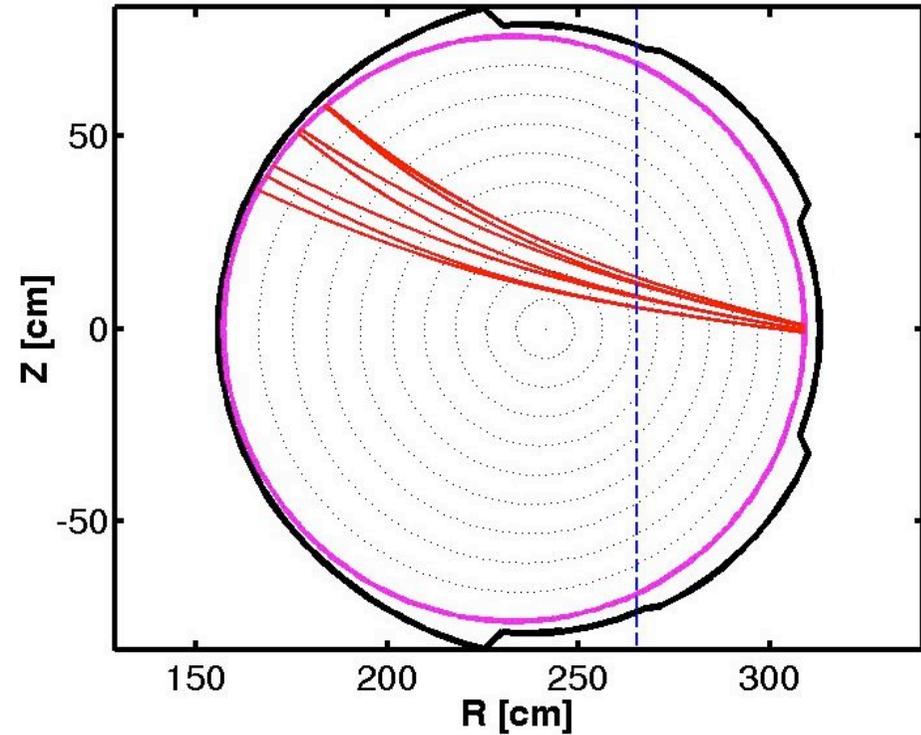
Propagation dans un tokamak

- **Longueur d'onde:** $\lambda \ll L_B \longrightarrow$ Propagation quasi-optique
- **Modélisation par tracé de rayon:**

Faisceau de 8 rayons dans Tore Supra



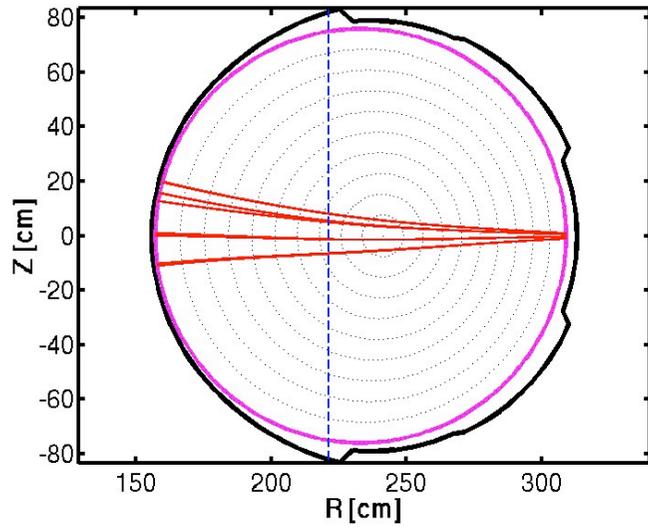
Projection toroïdale



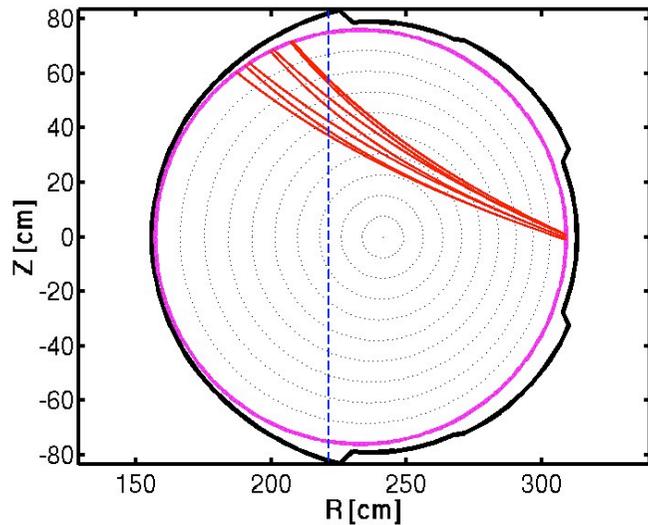
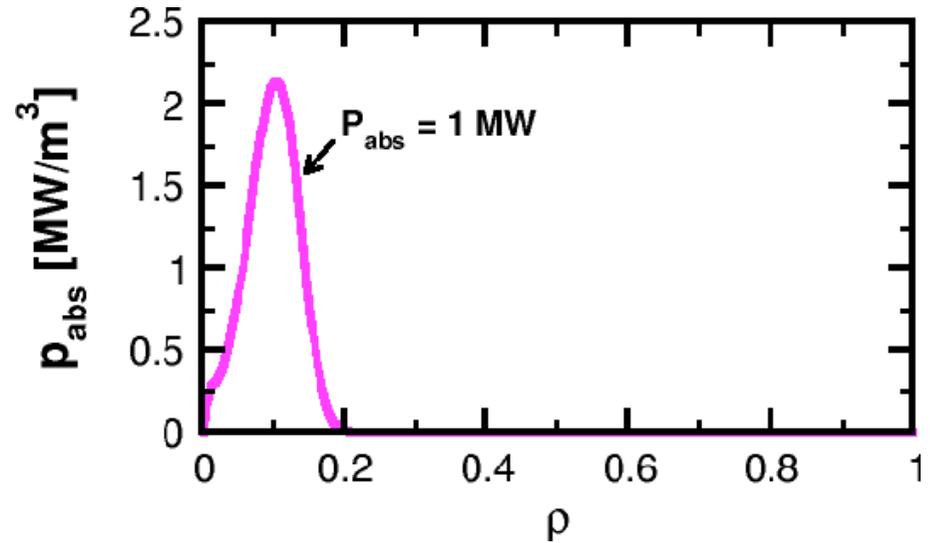
Projection polôïdale

Absorption dans un tokamak

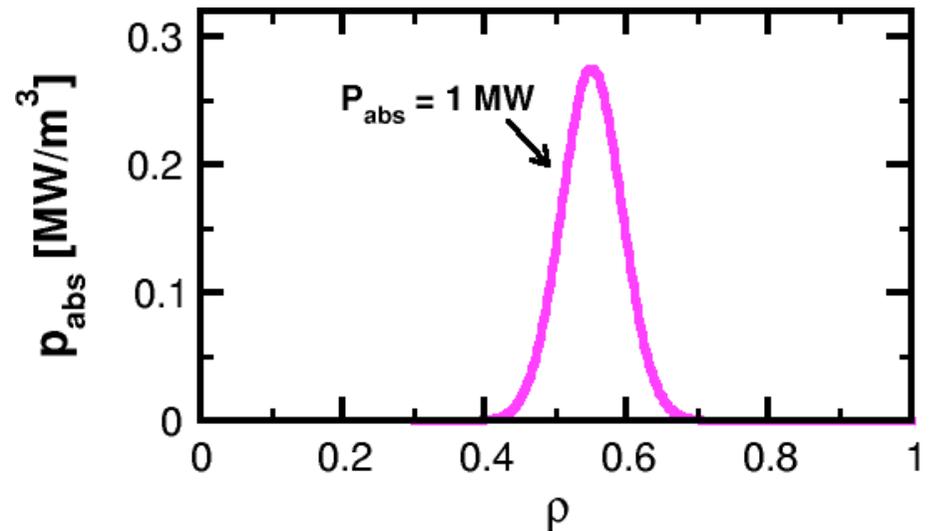
- Ex: modification de l'angle poloidal d'injection de l'onde



$\alpha = 0^\circ$

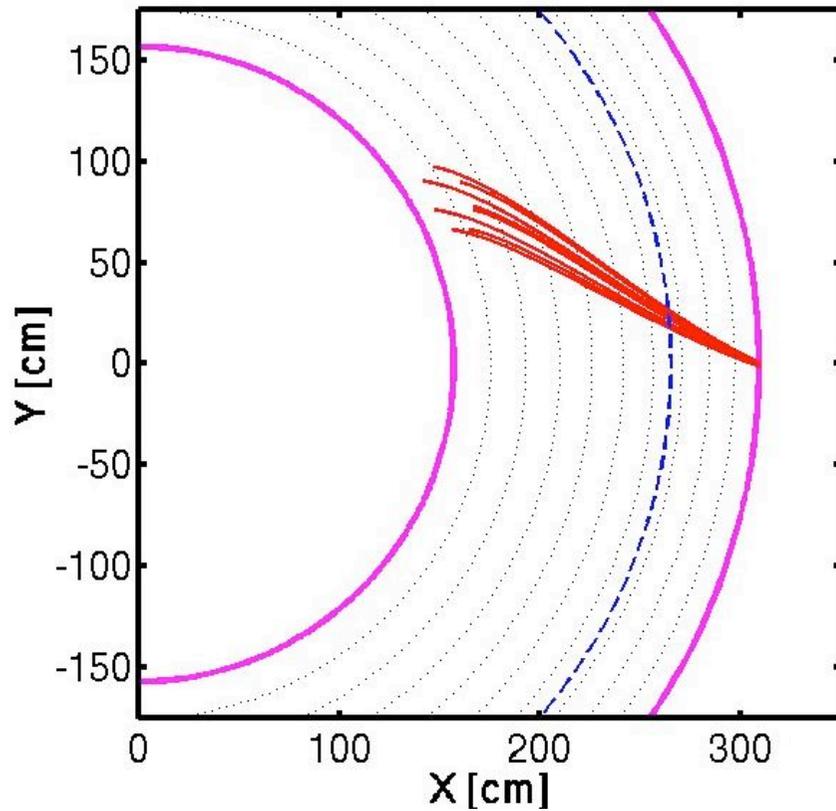


$\alpha = 20^\circ$

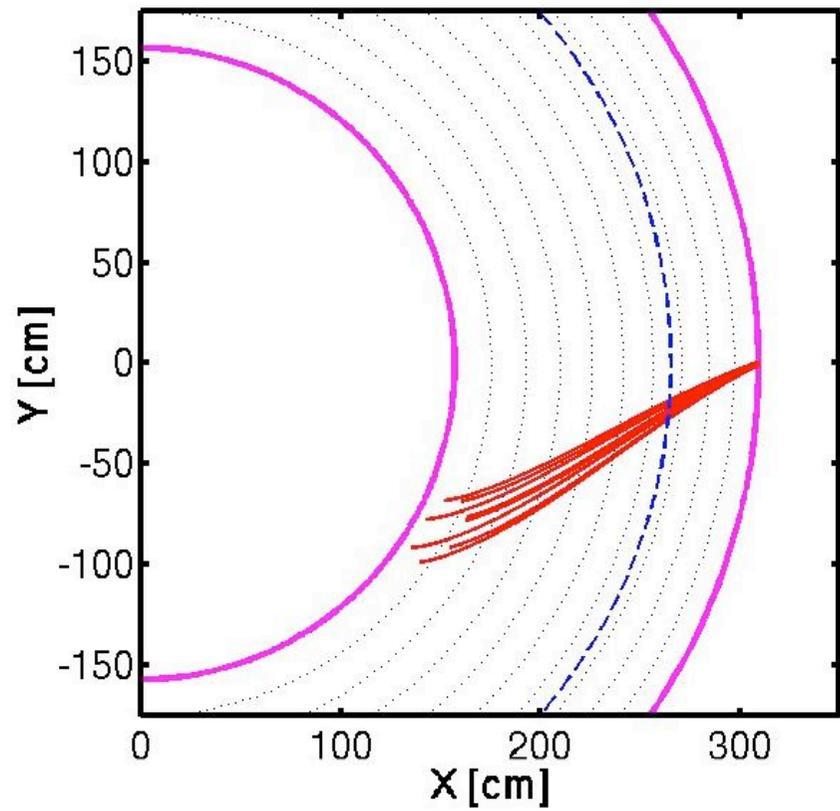


Génération de courant

- **Modification de l'angle toroïdal d'injection de l'onde**
 - Génération d'un courant très localisé
 - Contrôle fin du profil de courant



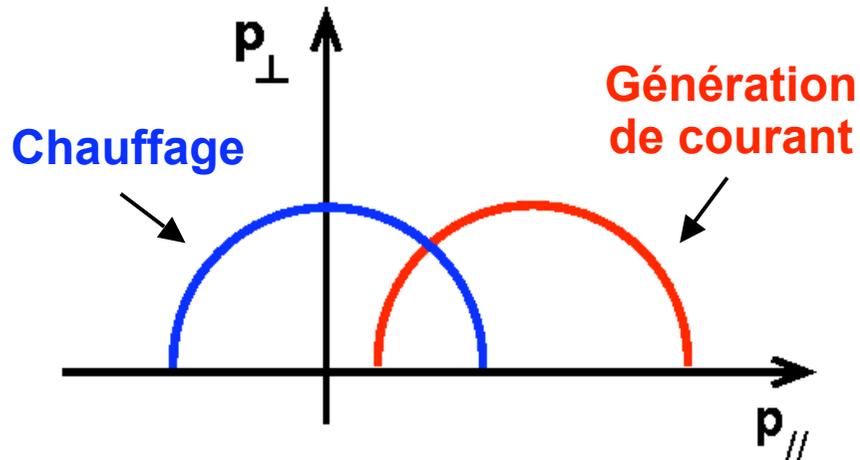
$\alpha = +20^\circ$: Co-courant



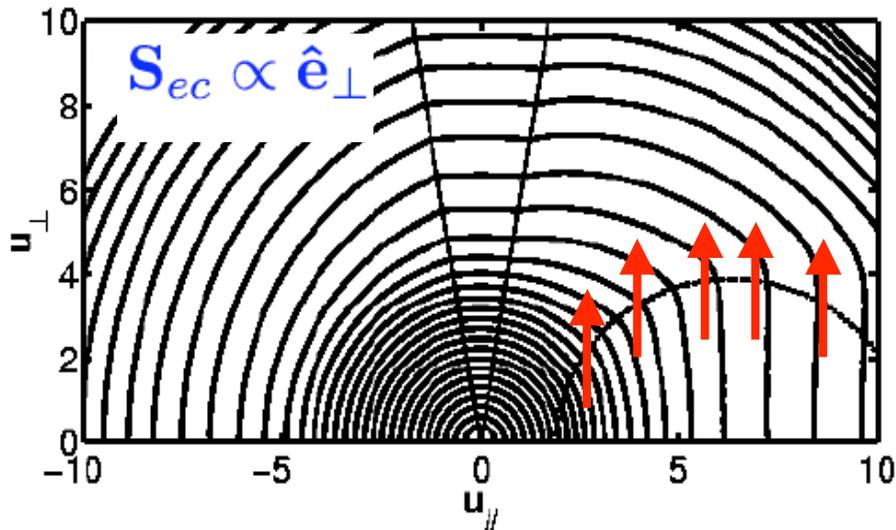
$\alpha = -20^\circ$: Contre-courant

ECRH - ECCD: caractéristiques

• Courbes de résonance



• Fonction de distribution $f_e(v)$



Avantages:

- Dépôt de puissance bien maîtrisé
- Profil de dépôt étroit
- Pas de problème de couplage
- Chauffage **ou** génération de courant
- Synergie possible avec l'onde hybride

→ Très flexible

Inconvénients:

- Sensible aux électrons piégés
- Pas de transfert direct d'impulsion

→ Moins efficace que l'onde LH

Quelques points non abordés

Ondes à la fréquence cyclotronique ionique (ICRF)

- Génération de courant (FWCD et MCCD)
- Génération de rotation du plasma

Ondes à la fréquence hybride basse (LH)

- LHCD dans un réacteur: absorption “single-pass”
- Chauffage des ions rapides par effet Landau

Ondes à la fréquence cyclotronique électronique (ECRF)

- Génération de courant au bord du plasma (effet Ohkawa)
- Etudes de transport, stabilisation de modes MHD

Autres

- Synergies: LH-EC, LH-Bootstrap...
- Couplage des ondes au plasma (ICRF et LH)
- Onde de Bernstein électronique (EBW)
- Transport induit par les ondes
- Aspect modélisation: code d'onde, codes cinétiques