

ETUDE THERMIQUE D'UN DÉTECTEUR POUR LA CARACTÉRISATION D'UN FAISCEAU D'IONS À BASSE ENERGIE

Présentation équipe

IPHC : équipe Instrumentation des Accélérateurs

Lignes de transport de faisceaux radioactifs et de hautes puissances

Eléments actifs (sources d'ions, déviateurs, quadrupôle...)

Eléments passifs (cible de production, échangeur de chaleur, collimateur ...)

Instrumentation sur faisceaux (diagnostiques, profils ...)

Introduction

Diagnostic de faisceau => Emittance => Emittance mètre

Effet Thermique => Limite Énergie/Intensité Faisceau

Simulation Thermique

Quelles sont les limites d'utilisation ?

Innovation

Plan

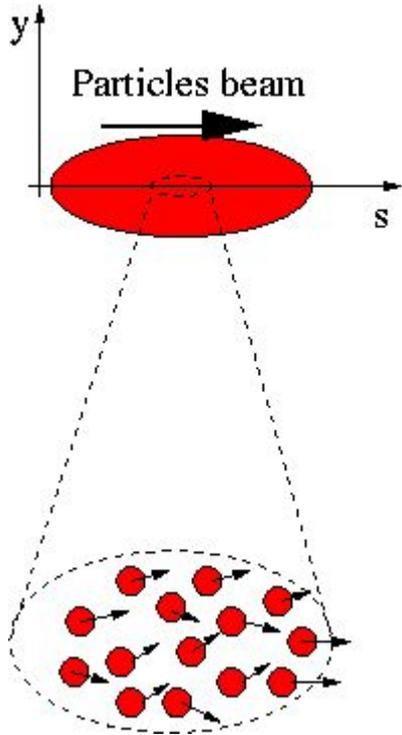
I) Prérequis

II) Présentation du modèle

III) Résultats

IV) Perspective

Diagnostic de faisceaux



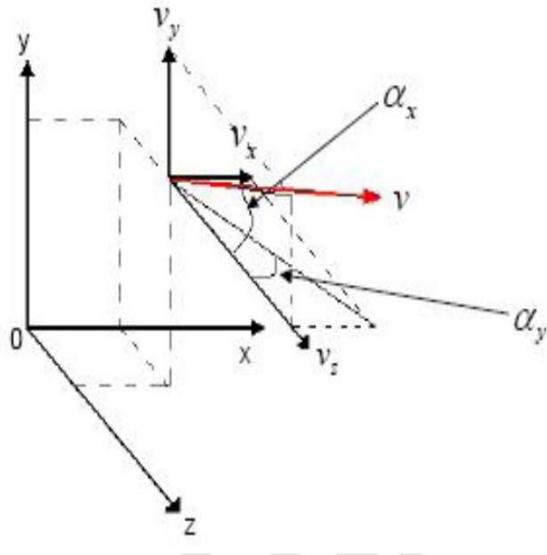
Faisceau : nombreuses particules aux mouvements et positions propres

Diagnostic de faisceau \Leftrightarrow quantifier statistiques de ces mouvements

\Rightarrow Emittance

Emittance

On considère un faisceau de particules se propageant selon Oz



(Transverse)Emittance => quantifie mouvements transversaux des particules.

On s'intéresse à la distribution de ces particules dans les plans (x,x') et (y,y'). Appelées espace de trace

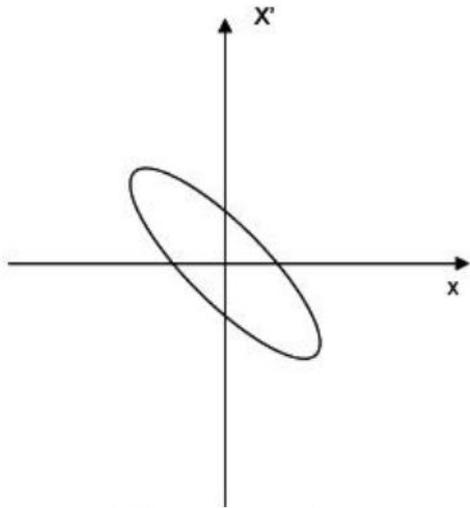
x', y' : angles de divergences

$$x' = \frac{v_x}{v_z} = \tan \alpha_x \approx \alpha_x$$

$$y' = \frac{v_y}{v_z} = \tan \alpha_y \approx \alpha_y$$

Emittance dans le plan (x,x')

$$x' = \frac{v_x}{v_z} = \tan \alpha_x \approx \alpha_x$$



Faisceau convergent

Equation Ellipse :

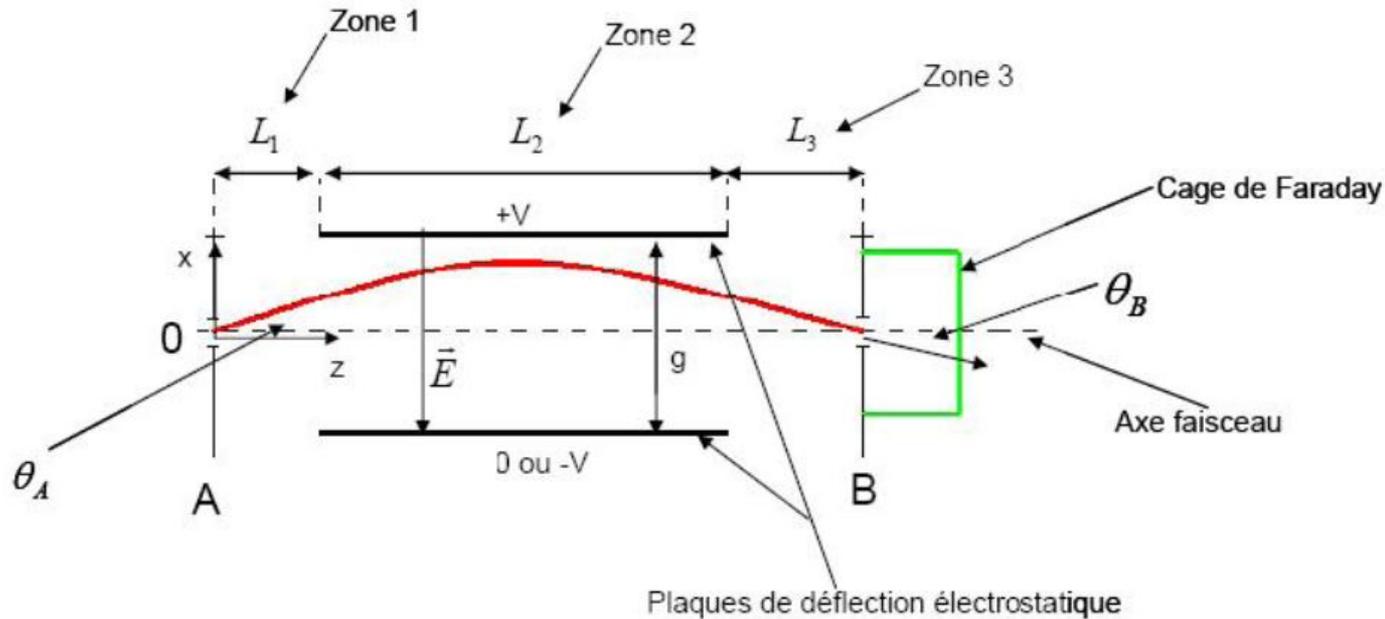
$$\beta x'^2 + 2\alpha x x' + \gamma x^2 = \epsilon$$

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1$$

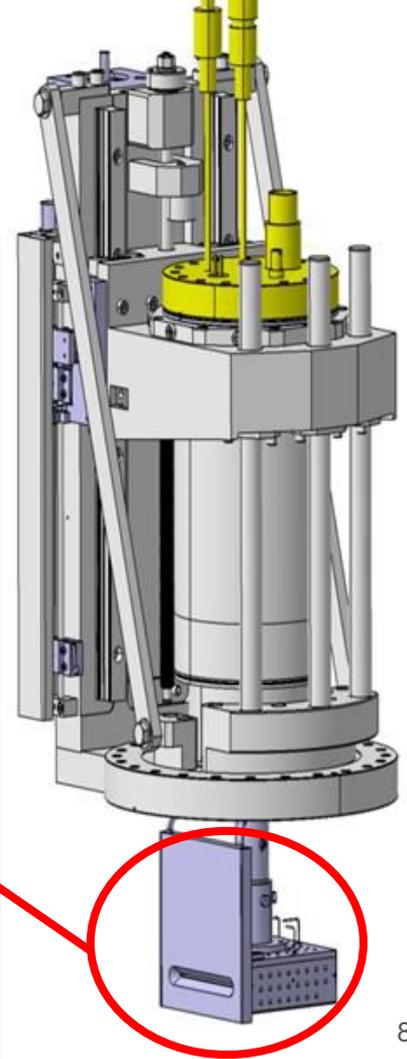
Emittance statistique :

$$\epsilon_{rms} = \sqrt{\overline{x^2 x'^2} - \overline{(x x')}^2}$$

Emittance mètre IPHC de type Allison



$$\theta \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta V}{U} \frac{L_2}{g} \frac{(L_2 + 2L_3)}{(L_1 + L_2 + L_3)}$$



Physique du modèle

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T - \sigma \epsilon T^4 + Q$$

Puissance apportée
par le faisceau

ρ densité de matière (kg.m^{-3})

c_p Capacité thermique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Conduction

λ Conductivité thermique ($\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$)

Rayonnement

σ Constante de Stefan-Boltzmann

ϵ Emissivité de surface (1)

Présentation de la modélisation

Simulation thermique avec Comsol

Ordinateur => fonctionnement numérique => ne peut pas simuler problème continu

=> Méthode des éléments finis : discrétisation du temps et de l'espace

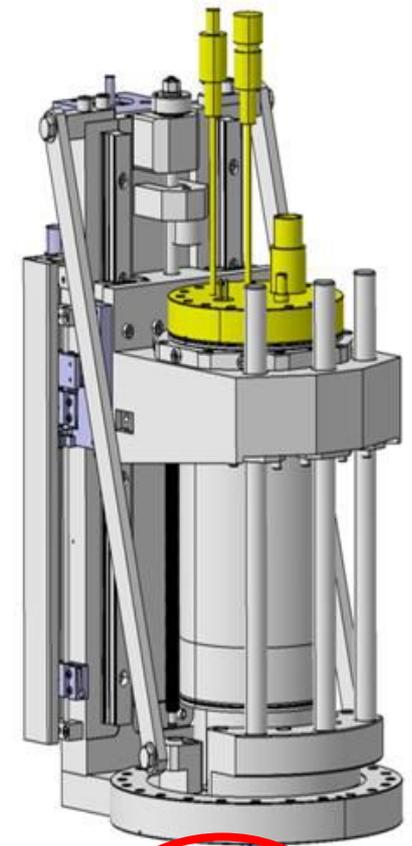
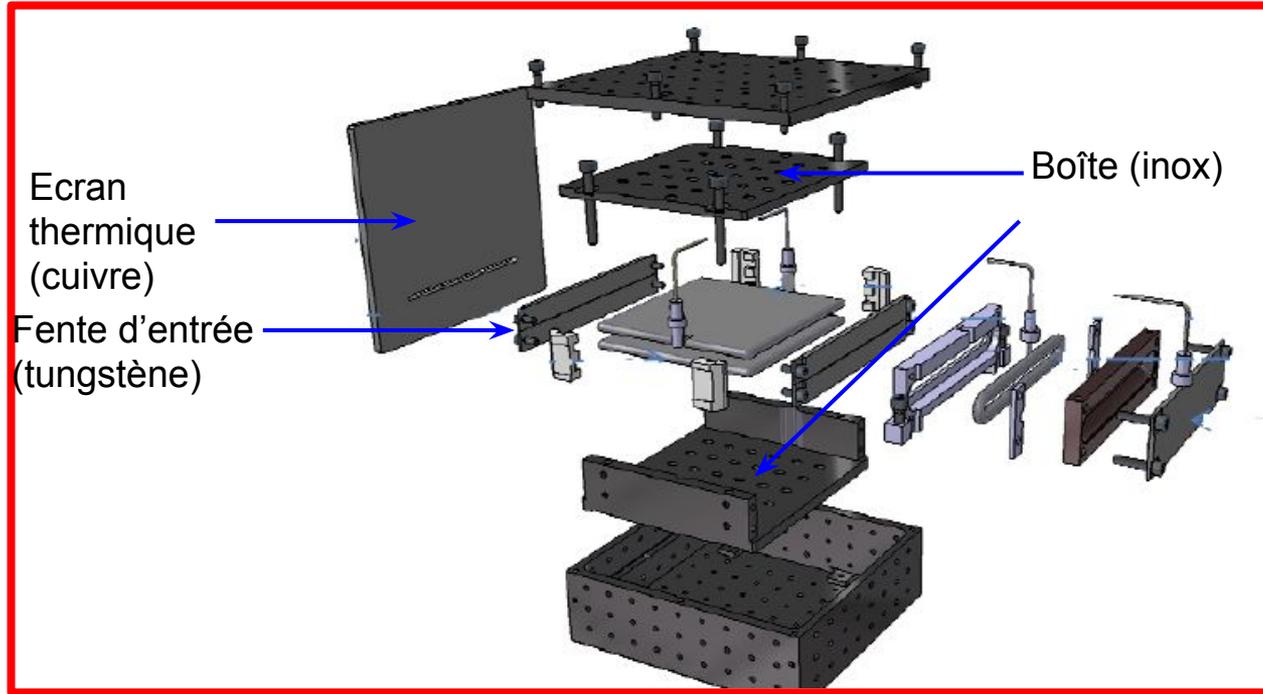
Maillage : découpage de l'espace

Pas de temps de calcul : découpage du temps de calcul

Spécifications (14/02/2018)

Diamètre maximum du faisceau	80 mm	Etats de charge positive	1-25
Dynamique d'intensité	0.01 mA - 1mA	Résolution spatiale	0.1 mm
Energie d'accélération	10-80 keV/q	Résolution angulaire	0.1 mrad
Puissance thermique à dissiper	1600 W (?)		

Emittance mètre IPHC



Approximations

Fente d'entrée

Rayon faisceau : 1-10 mm

Puissance traversant la fente :

~0.5%-5%

=>effet thermique moins important

Dépôt en surface

Cas majorant : protons 2 MeV

Pouvoir d'arrêt : 888 MeV/cm

Profondeur : 0.02 mm

Epaisseur fente : 0.3 à 2 mm

=>Dépôt en surface

Présentation modele : Montages

<p>Ligne Basse Energie (LBE) (<80 keV/q)</p>	<p>Ligne Moyenne Energie (LME) (>80 keV/q)</p>
<p>Lèvres sans contact avec l'écran thermique.</p> <p>Unique contact avec une boîte en inox</p> <p>=>Unique échange thermique</p> <p>Facile à monter</p>	<p>Lèvre en contact avec l'écran thermique</p> <p>=> système de refroidissement à eau</p> <p>=>échange thermique important</p> <p>Difficile à monter</p>

Présentation modele : Montages

Ligne Basse Energie (LBE) (<80 keV/q)

Lèvres sans contact avec l'écran thermique.

Unique contact avec une boîte en inox

=>Unique échange thermique

Facile à monter

Ligne Moyenne Energie (LME) (>80 keV/q)

Lèvre en contact avec l'écran thermique

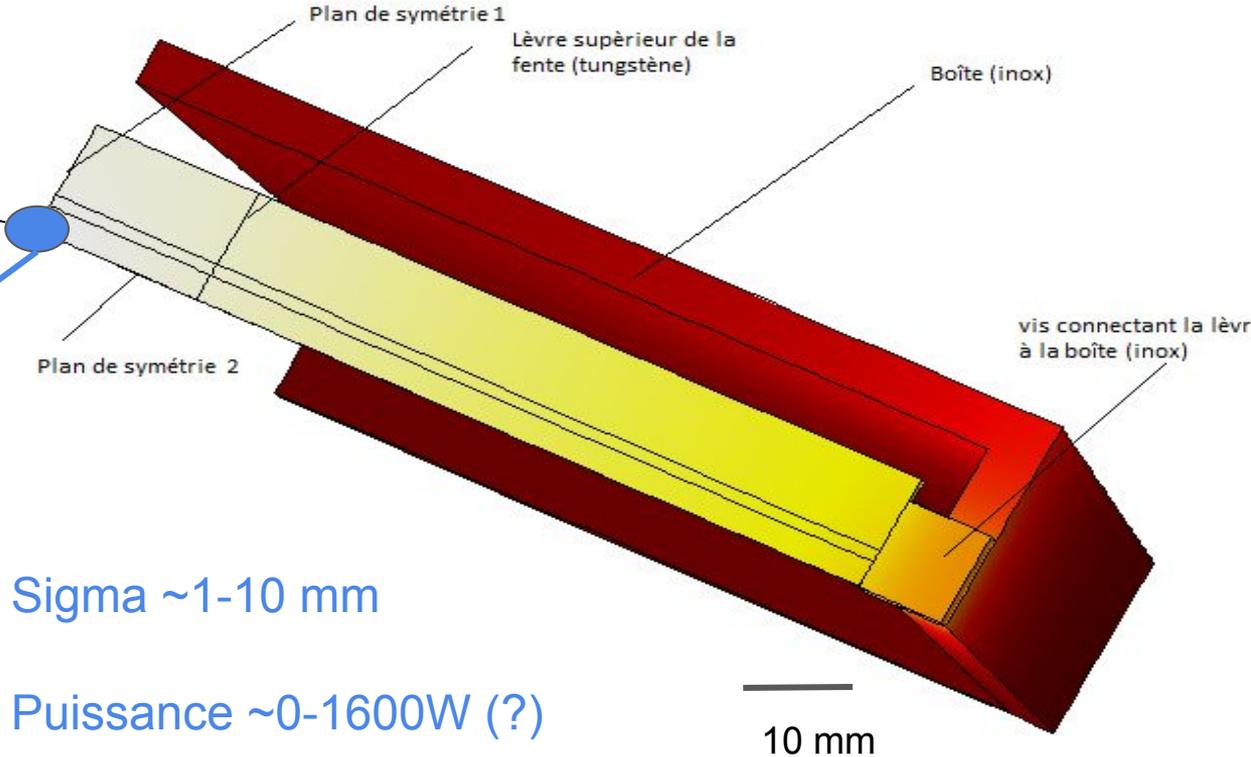
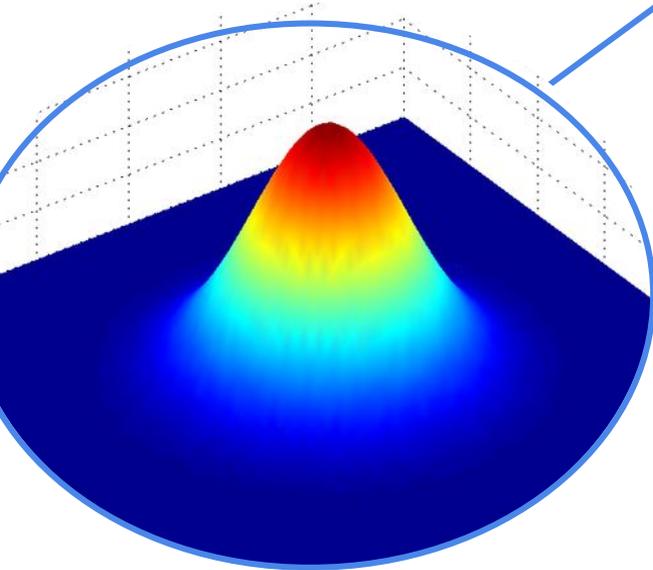
=> système de refroidissement à eau

=>échange thermique important

Difficile à monter

Présentation modèle : Modèle géométrique LBE

Centre
d'impact du
faisceau



Présentation modèle : Faisceau

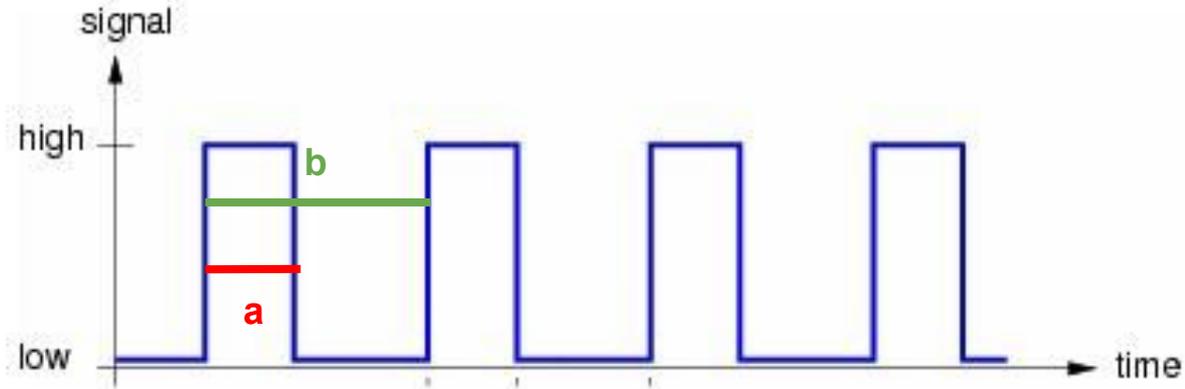
Puissance Faisceau(P): difficile à changer

Pulser=>Moduler puissance
Efficace

$b \sim < 1s$

Cycle utile (CU) = a/b

Puissance efficace : $CU * P$



Si $b \ll 1s$

=> Faisceau pulsé ~ Faisceau continu

Résultats

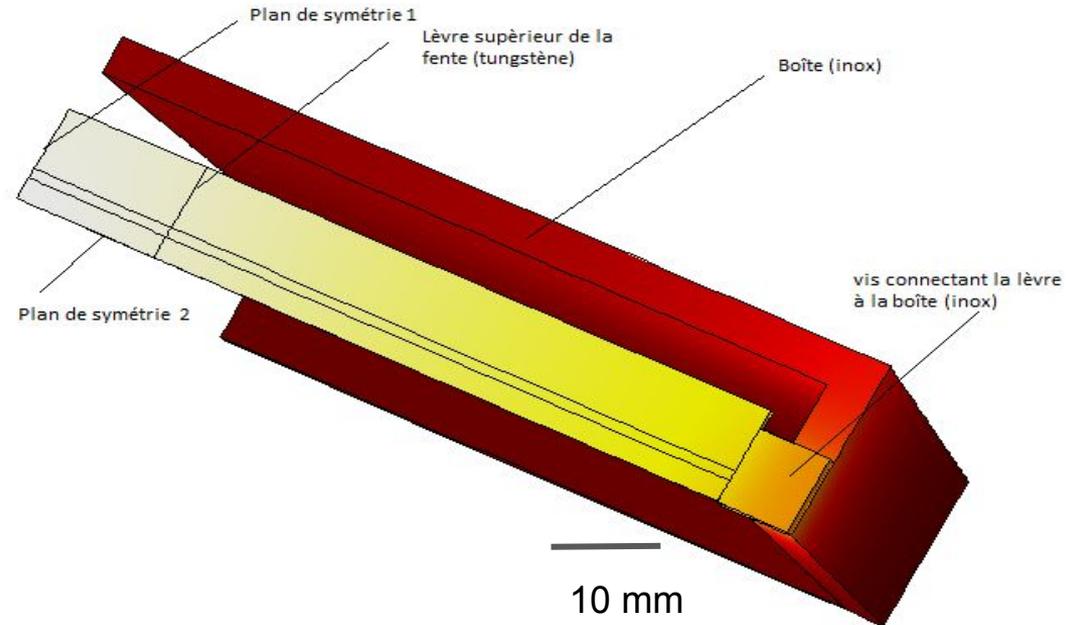
Préalable

Faisceau : 100 à 1000W, $\sigma = 10$ mm

1) Dilatation thermique

2) Faisceau continu

3) Faisceau pulsé



Dilatation thermique

Température de fusion du tungstène : 3 422 °C

Hauteur lèvre de la fente : 7.45 mm

Ouverture fente : 0.1 mm \ll 7.45 mm

=>dilatation thermique importante

=>dégrade qualité diagnostique

Dilatation thermique

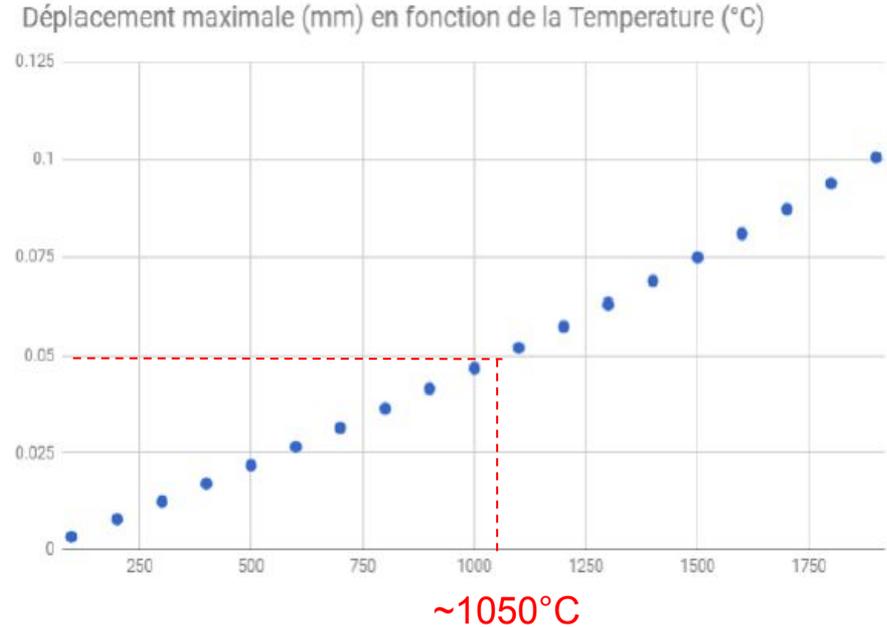
**Simulation uniquement
mécanique**

Fente ~ 0.1 mm

Déplacement ~ 0.05 mm

=> la fente se bouche

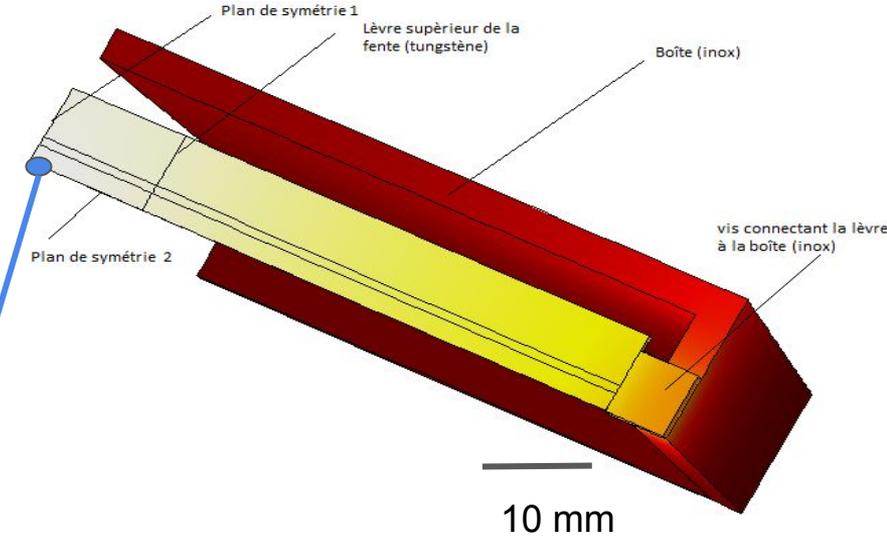
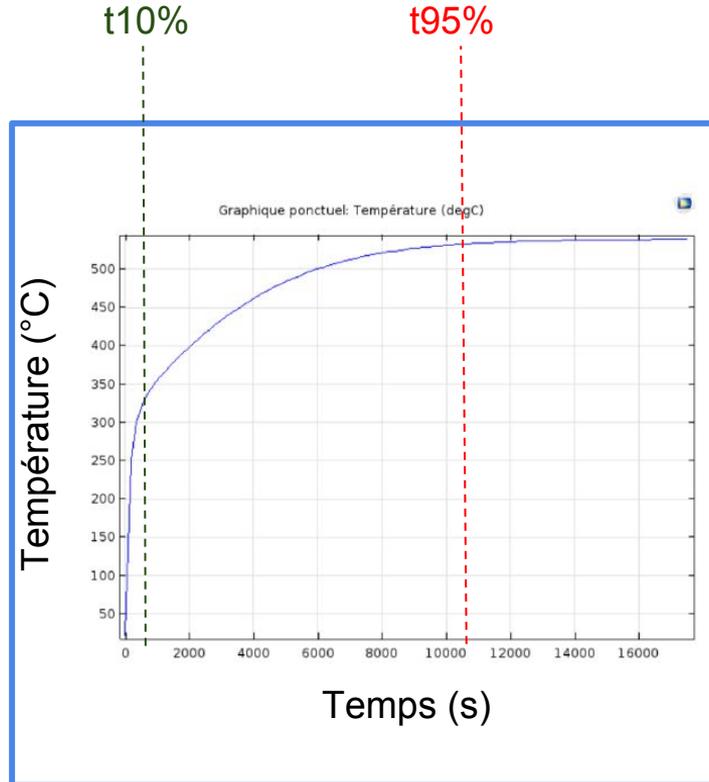
=> Température limite $\sim 1050^\circ\text{C}$



Faisceau continu et pulsé

Faisceaux continus	Faisceaux pulsés
<p data-bbox="108 394 407 452">$T_{\max}(P, \sigma)$</p> <p data-bbox="108 511 591 561">5 P, 5 σ => 25 cas</p> <p data-bbox="108 631 253 670">=> OK</p>	<p data-bbox="909 394 1128 452">$P_{\text{eff}} = CU * P$</p> <p data-bbox="909 511 1537 561">période $\ll 1$ s : Pulsé ~ Continu</p> <p data-bbox="909 631 1470 689">$T_{\max}(P, \sigma, CU, \text{période})$</p> <p data-bbox="909 746 1837 798">5 P, 5 σ, 5 CU, 5 périodes => 625 cas !</p> <p data-bbox="909 867 1653 907">=> Développement d'une méthode</p>

Faisceau continu : Etude de la température



$$0.1 * (dT/dt)_{\max} \Rightarrow t_{10\%}$$

$$0.95 * T_{\max} \Rightarrow t_{95\%}$$

Faisceau continu : Etude de la température

$$0.1 * (dT/dt)_{\max} \Rightarrow t_{10\%}$$

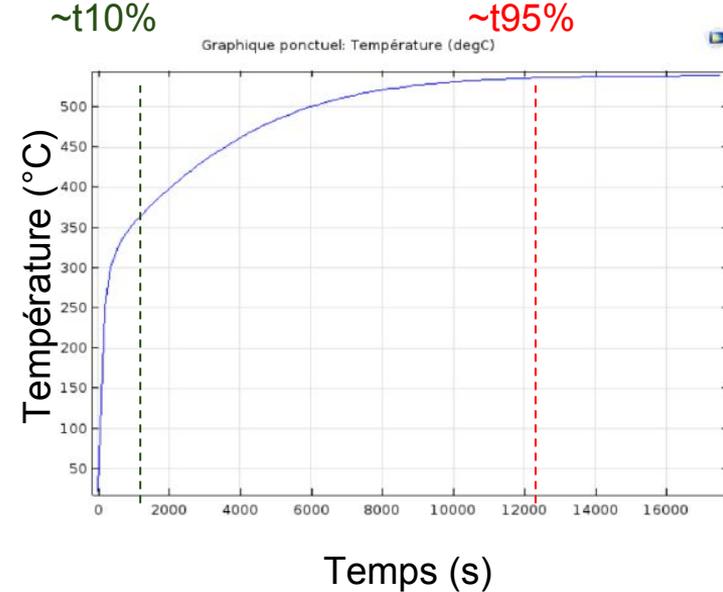
$$0.95 * T_{\max} \Rightarrow t_{95\%}$$

Puissance (W)	200	400	600	800	1000
Température maximale (°C)	783,1	1041	1164	1273.3	1376.93
t95% (s)	3020	534,24	202,66	89,7	67,5
t10% (s)	61,2	34,2	21,5	15,1	11,53
t10/t95 (10 ⁻²)	2,0	6,4	11	17	17

t10 et t95 délimitent les régimes (arbitraire)

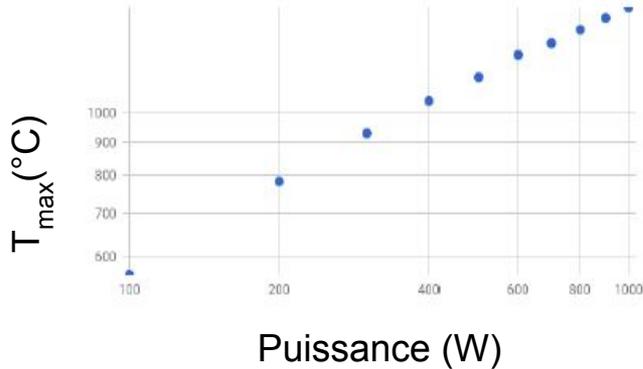
Puissance augmente => régime de conduction négligeable

Température limite ~400W (montage LBE)

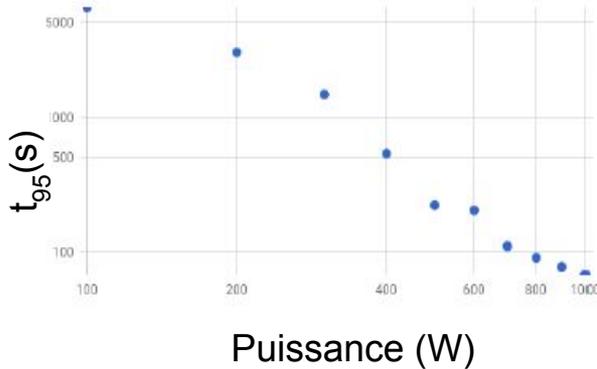


Faisceau continu : Etude de la température

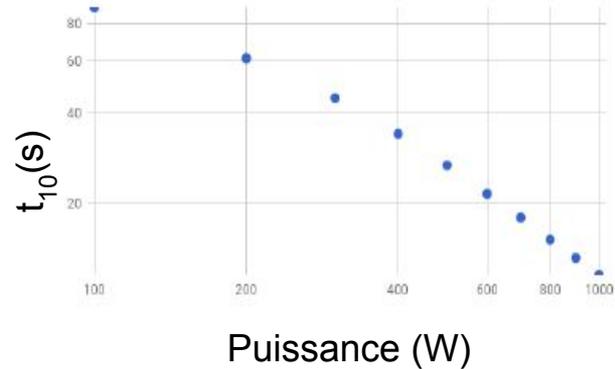
tmax (degC) vs. puissance (W)



t95max(s) vs. puissance (W)



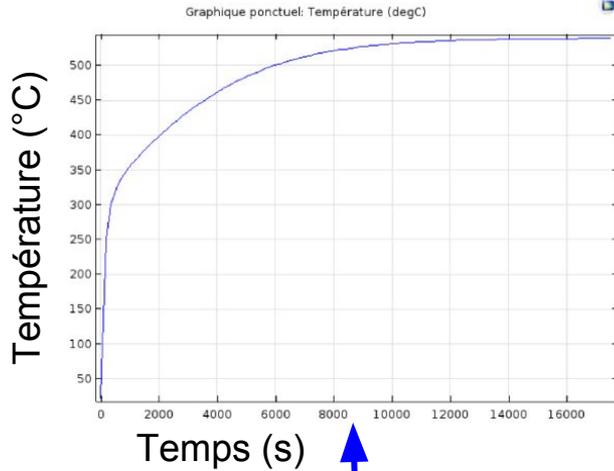
t10 (s) vs. puissance (W)



Abscisse et Ordonnée en échelles logarithmiques

Régression linéaire : $\log(y)=a*\log(x)+b \Leftrightarrow y=x^{a*10^b}$

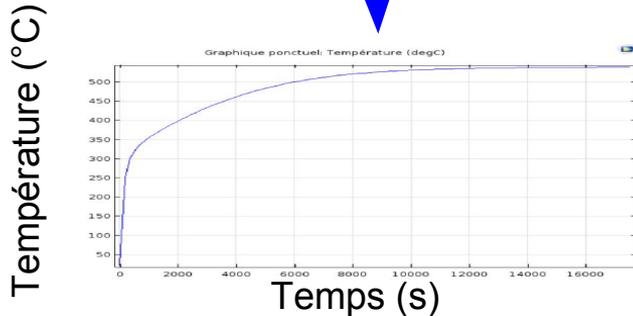
Faisceau continu : reconstruction courbe P1->P2



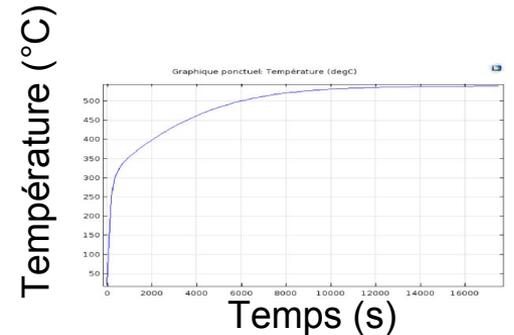
$$T2(t) = T_{\max}(P2) / T_{\max}(P1) * T1(t)$$

$$t2 = t_{10\%}(P1) / t_{10\%}(P2) * t1$$

$T1(t1) \rightarrow T2(t1)$

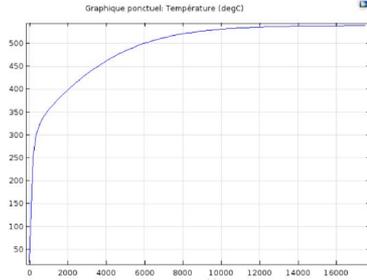


$T2(t1) \rightarrow T2(t2)$

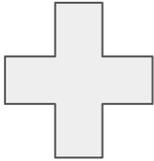


Faisceau pulsé méthode

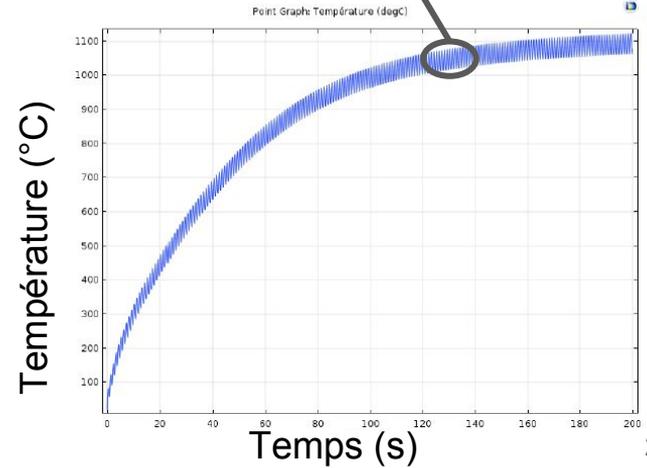
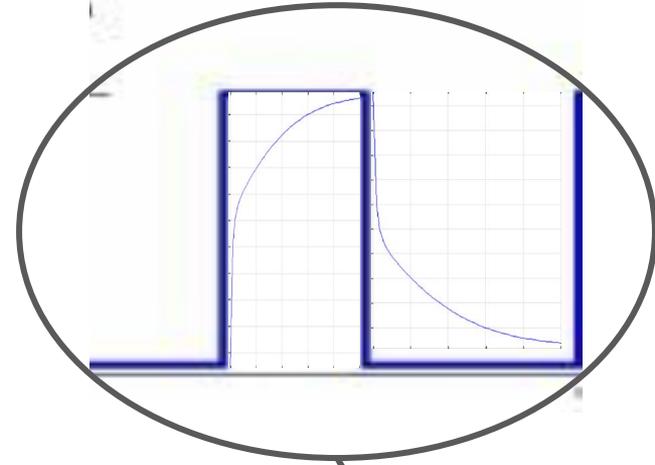
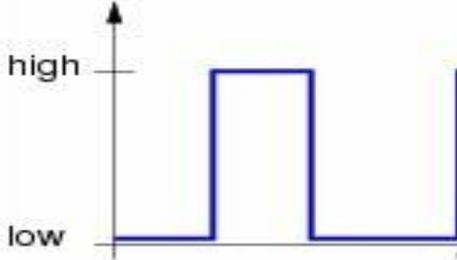
Température (°C)



Temps (s)



signal



Résultats méthode

TABLE 3.3 – Comparaison entre la méthode décrite dans 3.3.1 et les résultats de la simulation pour un faisceau de 1000W, un sigma de 10mm et une période de 5.3s.

Cycle Utile	1/10	1/4	1/2	3/4	9/10
Tmax réelle	355.9	799.5	1159	1330	1399
Tmax prédite	636.8	998.9	1253	1389	1432
erreur relative	0.79	0.25	0.08	0.04	0.02

Perspectives

Montage LME : Ecran thermique, Brasure, Refroidissement

Dégradation : Activation, Défauts structure cristalline, Réaction chimique, Pulvérisation

Matériaux : Tantale, diamant pur synthétique, MoGr

Emittance-mètres : poivrière, fente-fente, laser (non invasif)

Application Comsol

Merci de votre attention

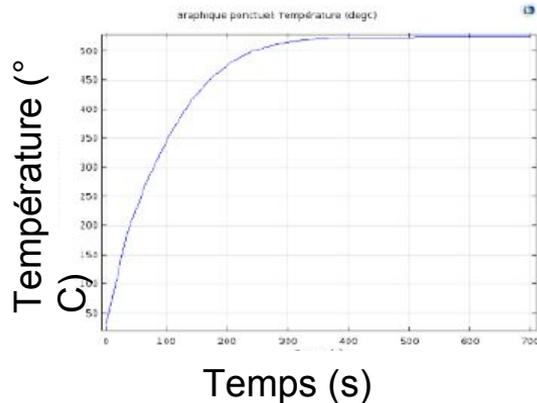
Pistes d'améliorations : matériaux

TABLE 4.1 – Conductivité thermique de différents matériaux à température ambiante

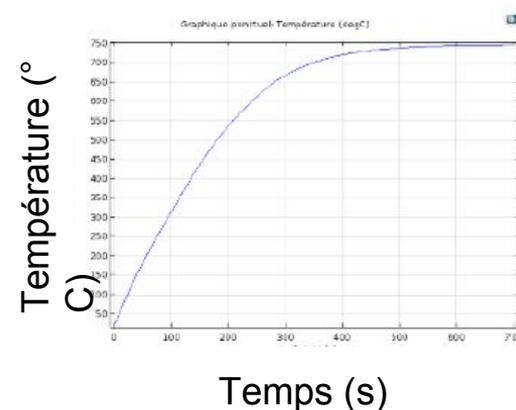
Matériau	Tungstène	Tantale	Diamant pur synthétique	MoGR
Conductivité Thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	174	57.5	2000-2500	800

MoGr : mélange de Carbure de Molybdenum et de Carbone

Tantale ~530°C



Tungstène ~750°C



Etude comparative : Tantale et Tungstène

Caractéristiques	Tantale	Tungstène
Thermiques	$T_{\max} = 530^{\circ}\text{C}$ $T(100\text{s}) = 350^{\circ}\text{C}$	$T_{\max} = 750^{\circ}\text{C}$ $T(100\text{s}) = 300^{\circ}\text{C}$
Mécaniques	Dilatation (1000°C) = 0.067 mm Dureté : 6.5 HV	Dilatation (1000°C) = 0.047 mm Dureté : 7.5 HV

Pistes d'améliorations : matériaux

Temperature ($^{\circ}C$)	100	500	1000
Déplacement max (mm) Tantale	0.0051112	0.031648	0.067
Déplacement max (mm) Tungstène	0.003468	0.021789	0.04674

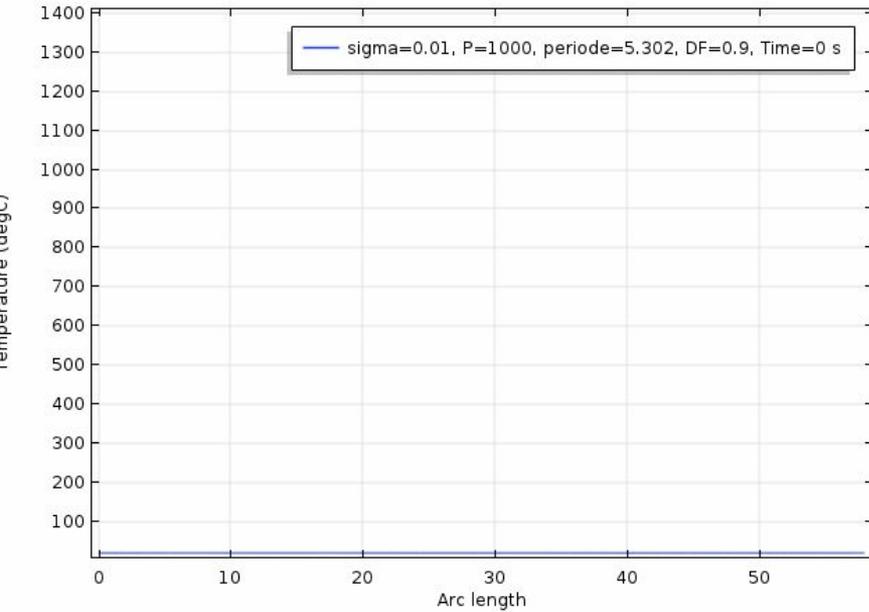
Pour une même puissance : tantale~tungstène

Tantale moins dur que Tungstène

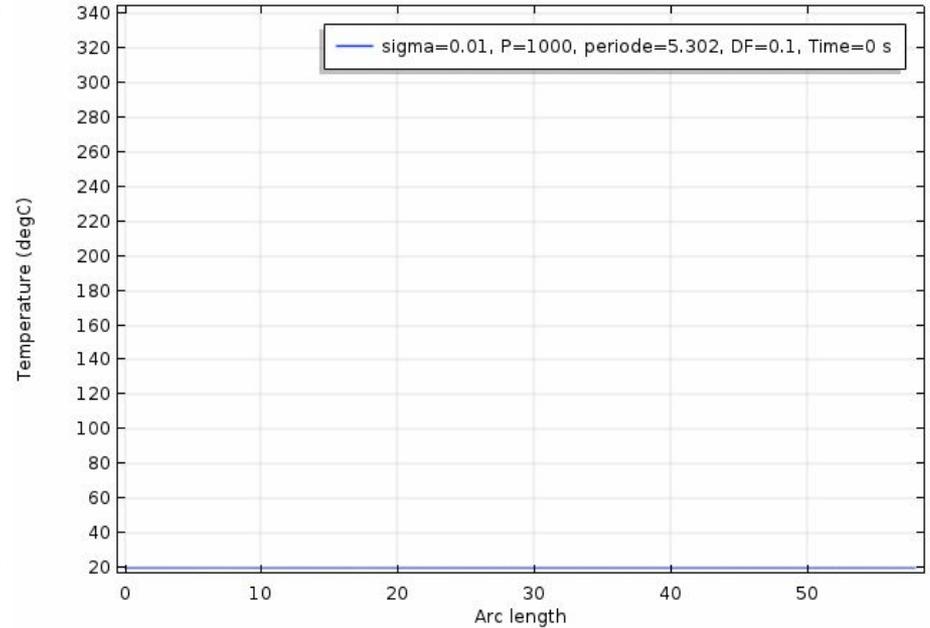
=>Tantale plus facile à manipuler mécaniquement

Profil température

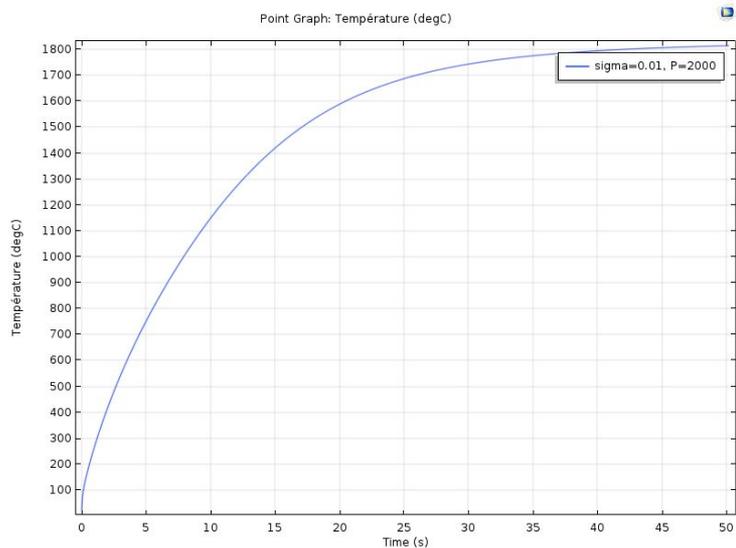
Line Graph: Temperature (degC)



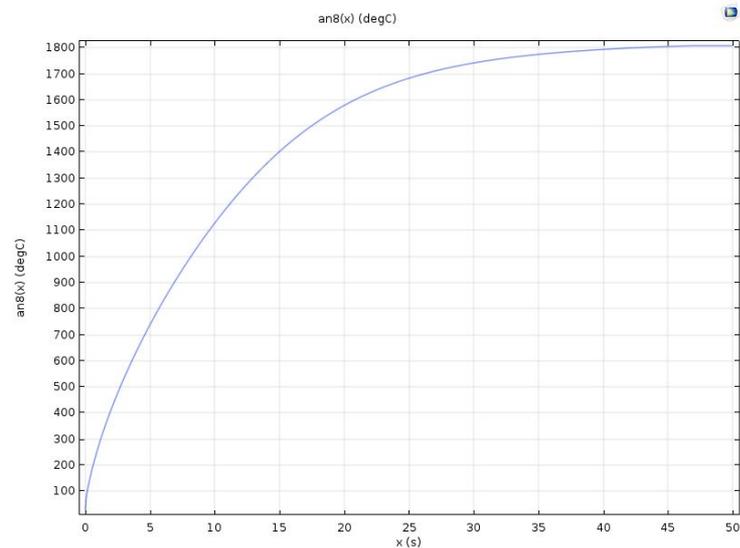
Line Graph: Temperature (degC)



Reconstruction courbe



2000W



1000W=>2000W

Faisceau continu : Etude de la température

$$\log(y)=a*\log(x)+b$$

	a	b	erreur relative pour a	erreur relative pour b
Température maximale	0,35	2,08	0,02	0,01
t95	-2,20	8,39	0,09	0,07
t10	-1,19	4,64	0,002	0,002

Différentes conception d'émittance mètre "fente-fente"

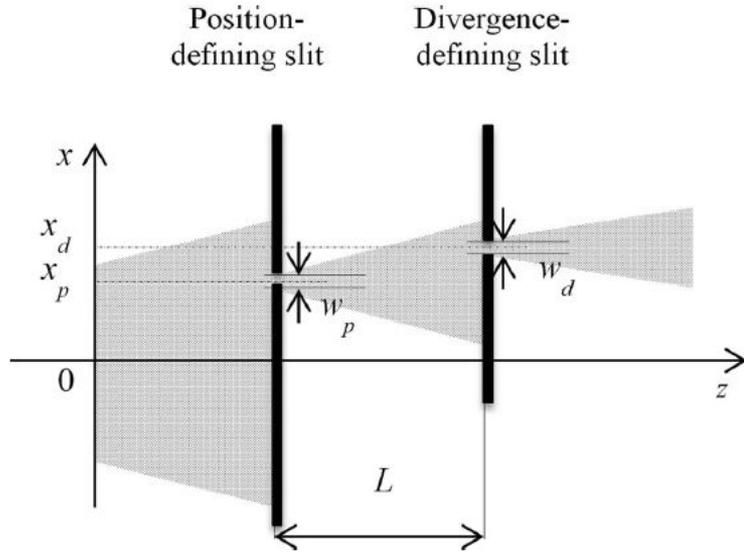


FIG. 2. Schematic representation of the pair of slits for defining the horizontal (x - x') plane.

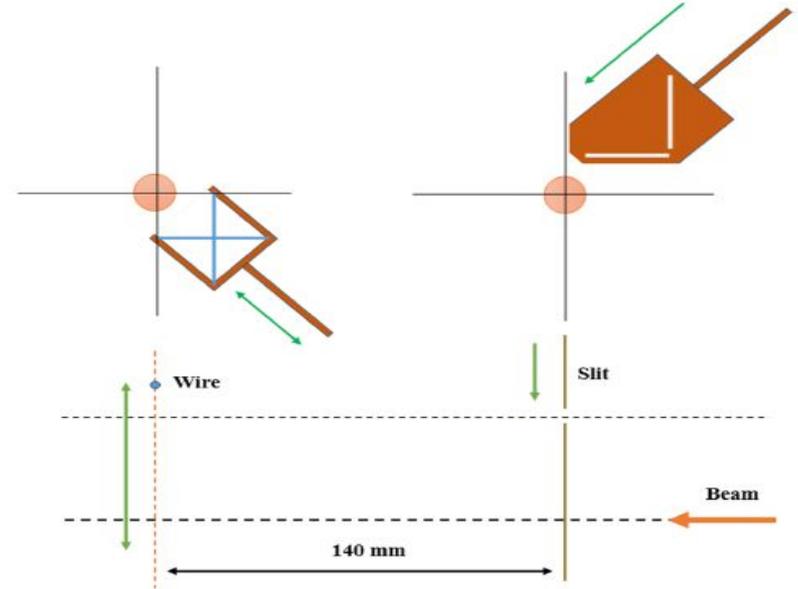


FIG. 2. Schematic of the slit wire emittance measurement setup.

Différentes conception d'émittance mètre poivrière

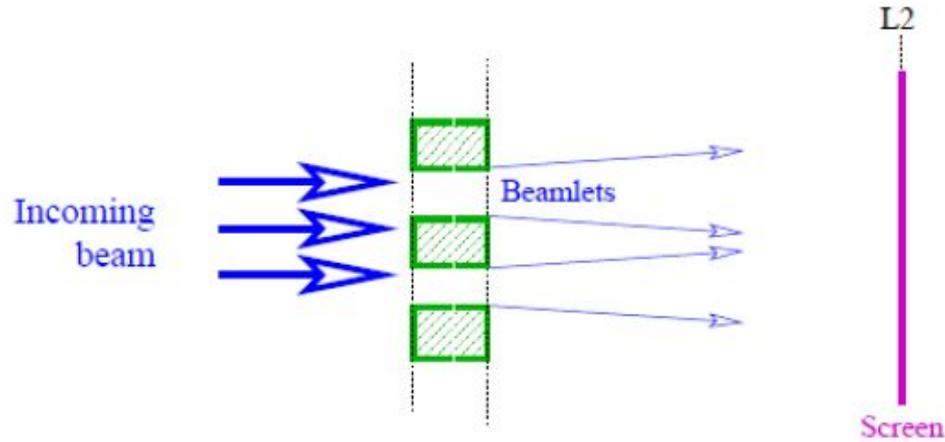


FIGURE 4.1 – Schéma de principe des émittances-mètres de type poivrière

Faisceau continu :Intérêt

Parfois : Faisceau pulsé de puissance P ~ Faisceau continu de puissance $CU * P$

CU: Cycle utile

De plus :

Température moyenne pour faisceau pulsé de puissance P

↔ Température max faisceau continu de puissance $CU * P$

Idem pour le temps que met le système à être en régime pseudo-stable

Faisceau pulsé

Periode $\ll t_{10} \Rightarrow \sim$ continu

$T_{\text{continu}}(P, \sigma)$

$T_{\text{pulsé}}(P, \sigma, \text{période}, \text{CU}) \Rightarrow$ plus délicat à analyser

Développement d'une approche différente \Rightarrow faciliter et accélérer futures études

Première estimation des limites du système \Rightarrow simuler pour résultats plus précis

Résultats continu \Rightarrow résultats pulsés