

COMPARAISON SIMULATION/EXPÉRIENCE DE L'ÉVAPORATION DE CALCIUM D'UN FOUR DE SOURCE D'IONS ECR

T. Thuillier¹, A. Leduc^{1,2}, L. Maunoury², O. Bajeat², P. Sole¹, J. Giraud¹

¹ CNRS-LPSC, Université Grenoble Alpes, INP Grenoble, France

² GANIL, Université Caen Normandie, France



25^{ème} Journées Accélérateur de la SFP, 12-15 oct. 2021, Roscoff

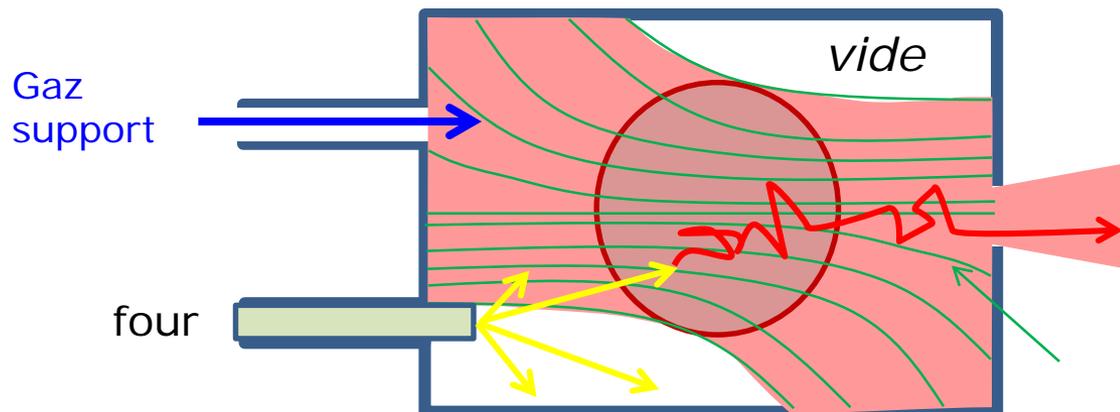
Plan



- Motivation
- Four calcium
- Mesures
- Simulation
- Conclusion

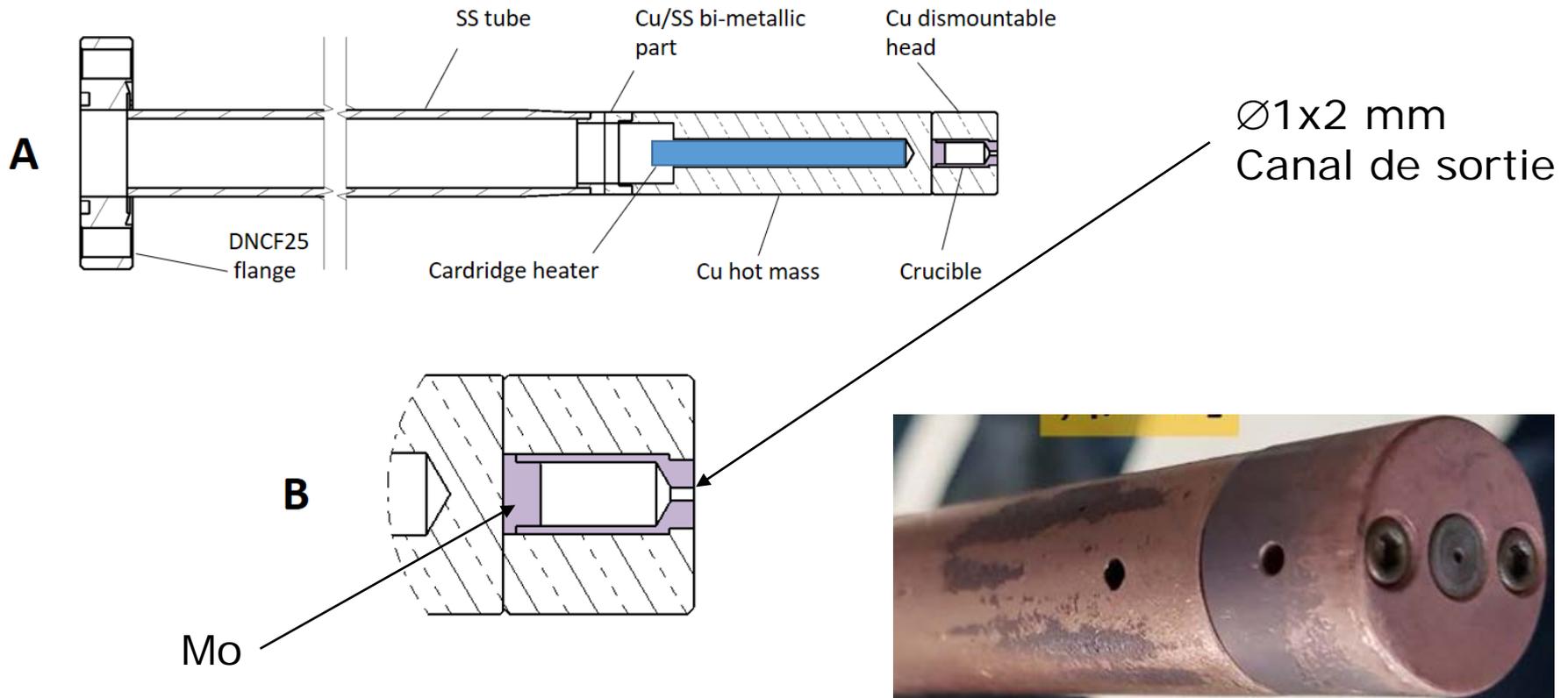
Motivations

- Dans les sources ECR, la conversion atome- \rightarrow ion depuis un four vers le plasma s'étend de qq % à ~20%
- Coût du ^{48}Ca > 200k€/g : faire une étude peut être très rentable
- Comment les ions sont ils extraits du four? La distribution des atomes peut elle être optimisée?
- Peut on reproduire les données expérimentales avec une simulation numérique?

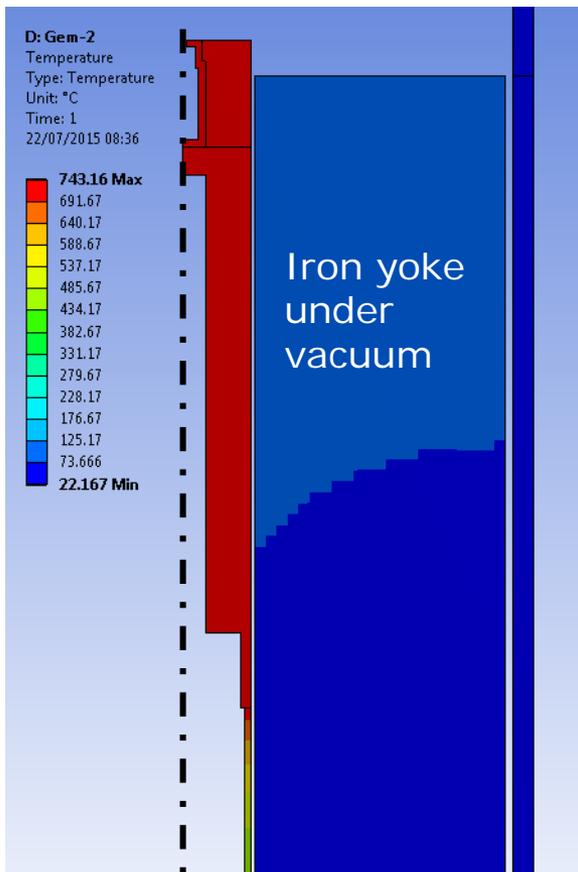


Four Calcium

- Adapté d'une conception du LBL
- Four massif, énergétiquement inefficace, adapté à l'opération à forte puissance de chauffage HF du plasma
- 200W ~ 650° C



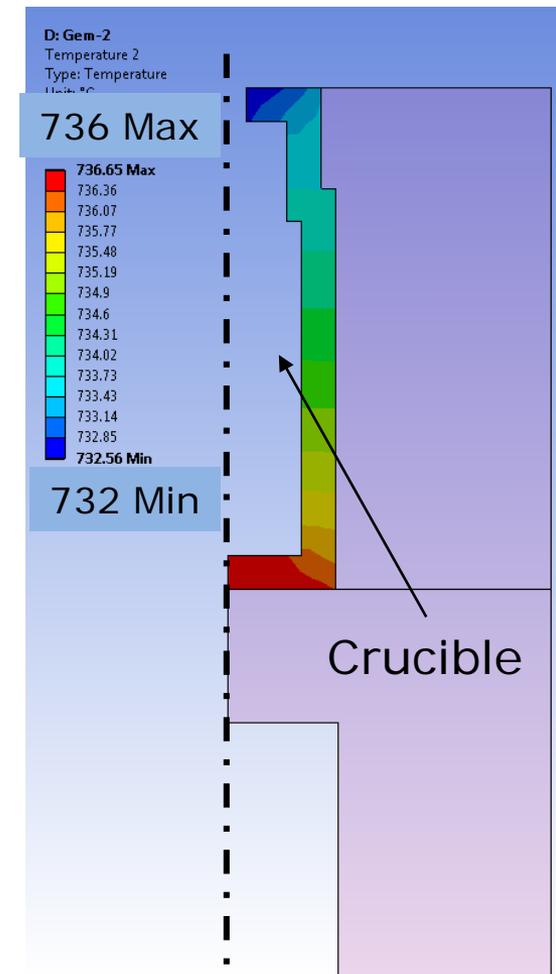
Simulation thermique



Comsol multiphysics

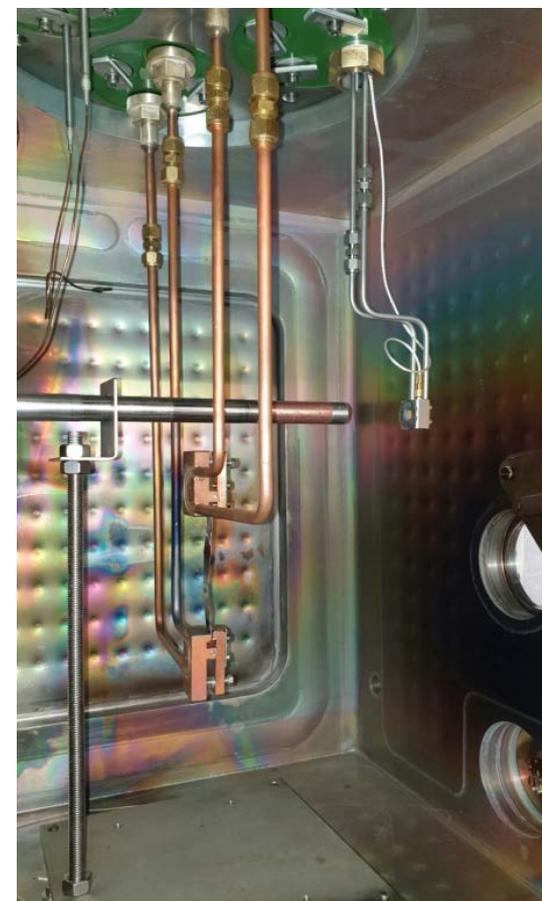
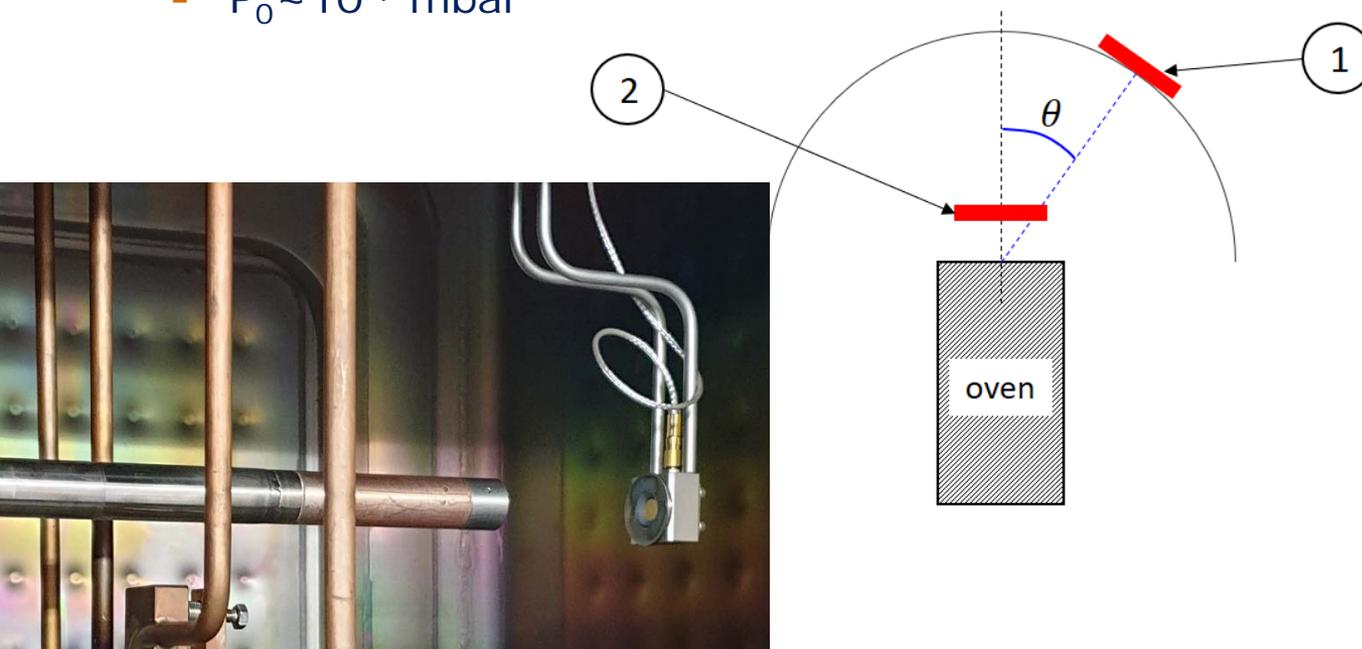
Application à la source PHOENIXV3 (SPIRAL2)

➤ Four isotherme



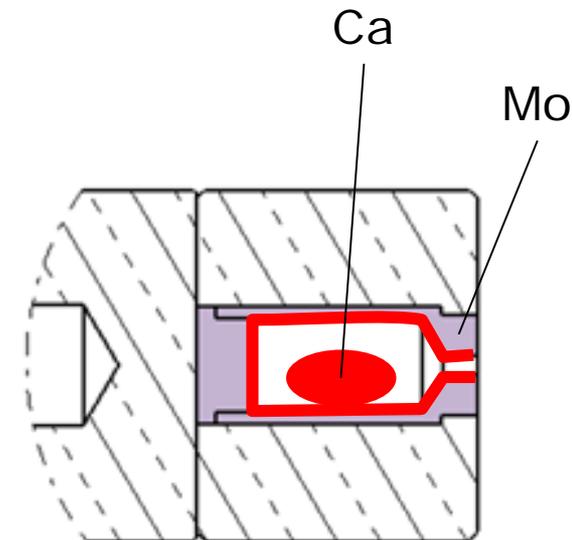
Dispositif Experimental

- AUDA6 Neyco quartz microbalance @3 MHz
- Température du four mesurée par un thermocouple
- Mesure du flux d'atome vs angle (1) et vs Temperature (2)
 - Active diamètre actif balance : 8.1 mm
 - Distance 1 : 60 mm
 - Distance 2 : 10 mm
 - $P_0 \sim 10^{-7}$ mbar

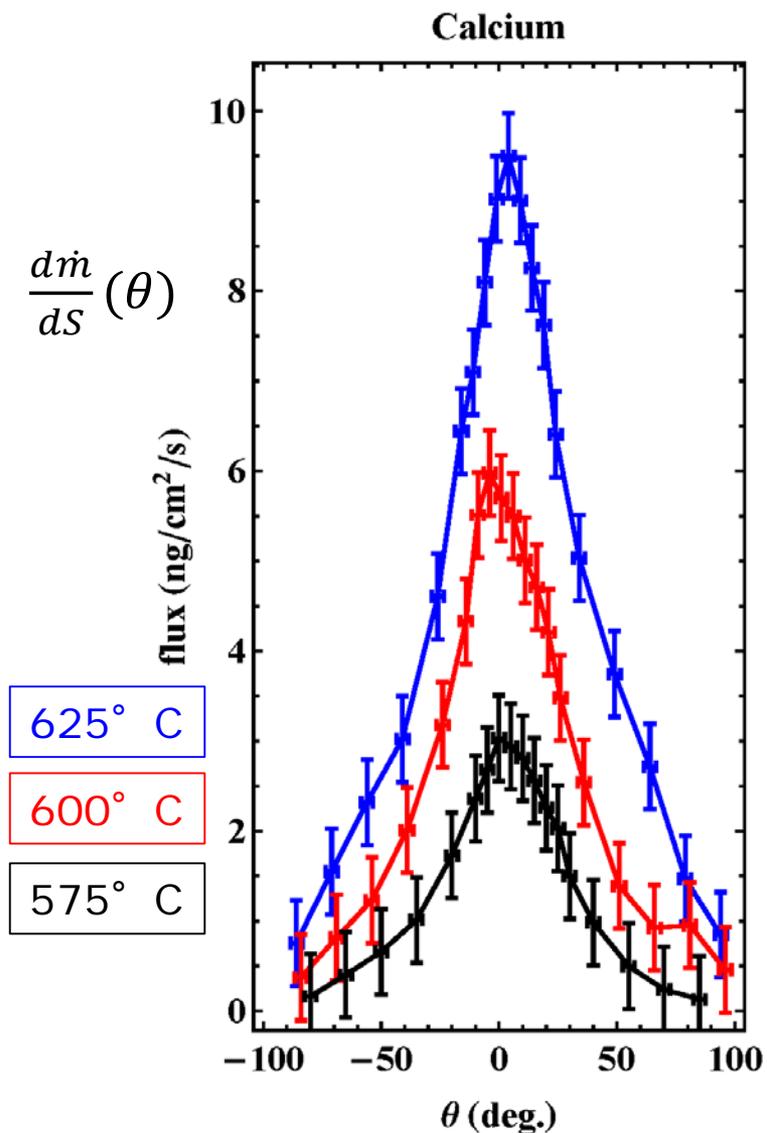


Thermodynamique du Four

- Temps de Collage (Frenkel) : $\tau = \tau_0 e^{\frac{H}{kT}}$
- Small aperture => Pressure builds up to the saturating vapor pressure:
 - (Antoine's law) $\log_{10} P = A - \frac{B}{T}$
- Flux Massique (Hertz-Knudsen) :
 - $\dot{M} = P \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} S$
- évaporation de Ca dans un creuset Mo
 - Enthalpie Mo-Ca >> enthalpie Ca-Ca
 - Formation couche liée de Ca sur Mo
 - Puis le Ca re-évapore sur la couche de Ca
- La surface d'évaporation de de Ca inclut celle du creuset
 - Surface échantillon Ca : $s_{Ca} \approx 0.8 \pm 0.2 \text{ cm}^2$
 - Surface creuset $s_c = 2.8 \text{ cm}^2$
 - Hystérésis du flux massique en operation



Résultat Expérimental (1)



Flux différentiel vs angle d'émission

- Temps d'intégration : 180s
- Gamme de mesure > 575°C
- Pas assez de signal pour T <

~900 K

~875 K

~850 K

$r = 60$ mm

Résultat Expérimental(2)

Flux total de calcium vs température

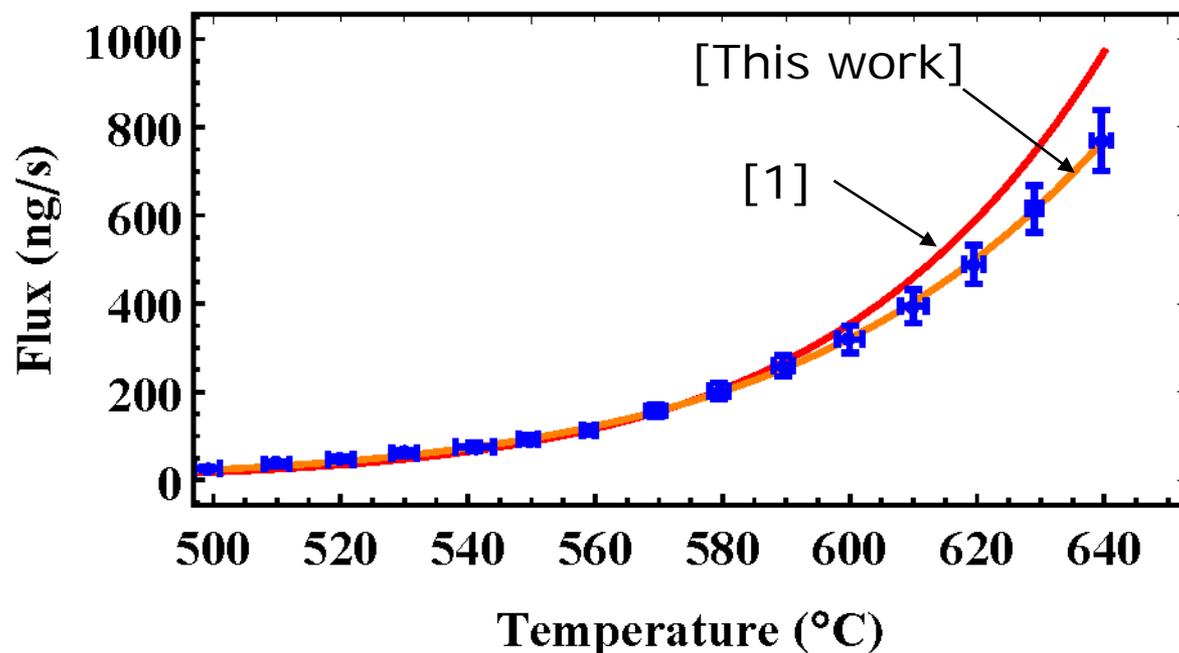
- $\frac{dm}{d\omega}(\theta)$ dans pos. (1) utilisé pour calculer le flux total en pos. (2) :
- $\dot{M} = 2\pi r^2 \int \frac{dm}{d\omega}(\theta).d\Omega$
- Comparé à :
Hertz Knudsen eq. + Antoine's law
- Bon ajustement si:
 $s = s_{Ca} + s_c$

$$\log_{10} P = A - \frac{B}{T}$$

$$\dot{M} = P \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} s$$

Antoine's coeff. For Ca

	A	B
[1]	10.34	$8,94 \times 10^3$
This work	8.98	$7,79 \times 10^3$

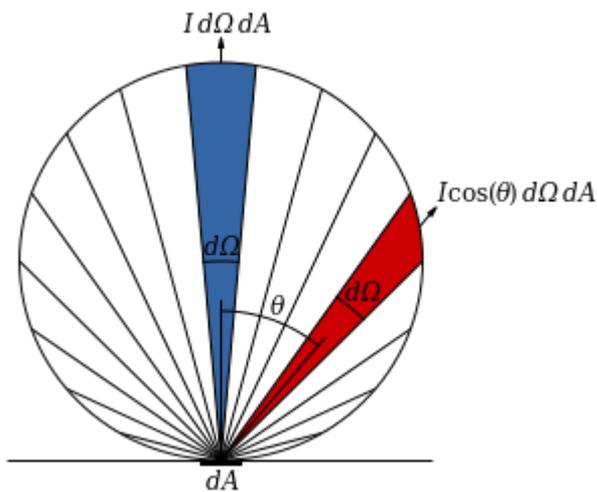


[1] S. DUSHMAN and J/M. LAFFERTY – Scientific foundations of vacuum technique. 806 p., 2nd ed. New York, Wiley and Sons (1962).

Simulation

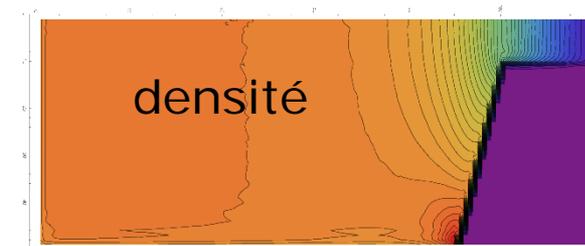
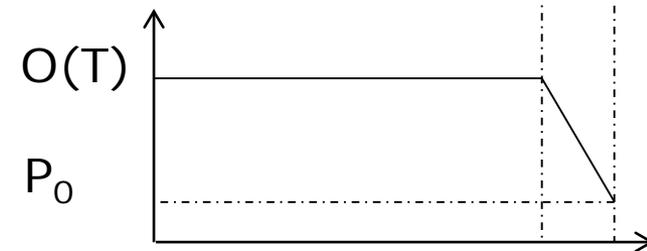
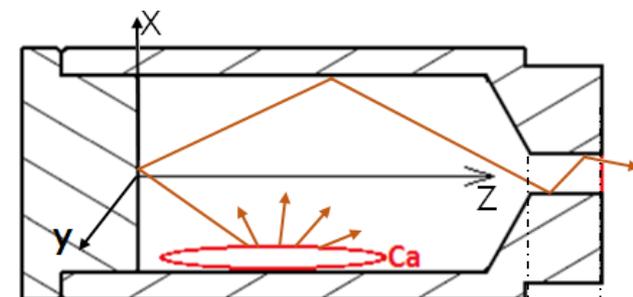
Code Monte Carlo 3D

- Température comme paramètre
- Atoms générés au fond du creuset
- Loi de Lambert ($\cos \theta$) depuis la surface
- Collision en volume considéré
 - Profile de densité imposé
 - Profil densité comparé à postériori => validé
- Vitesse thermique moyenne pour ts les atomes



Collision MFP:

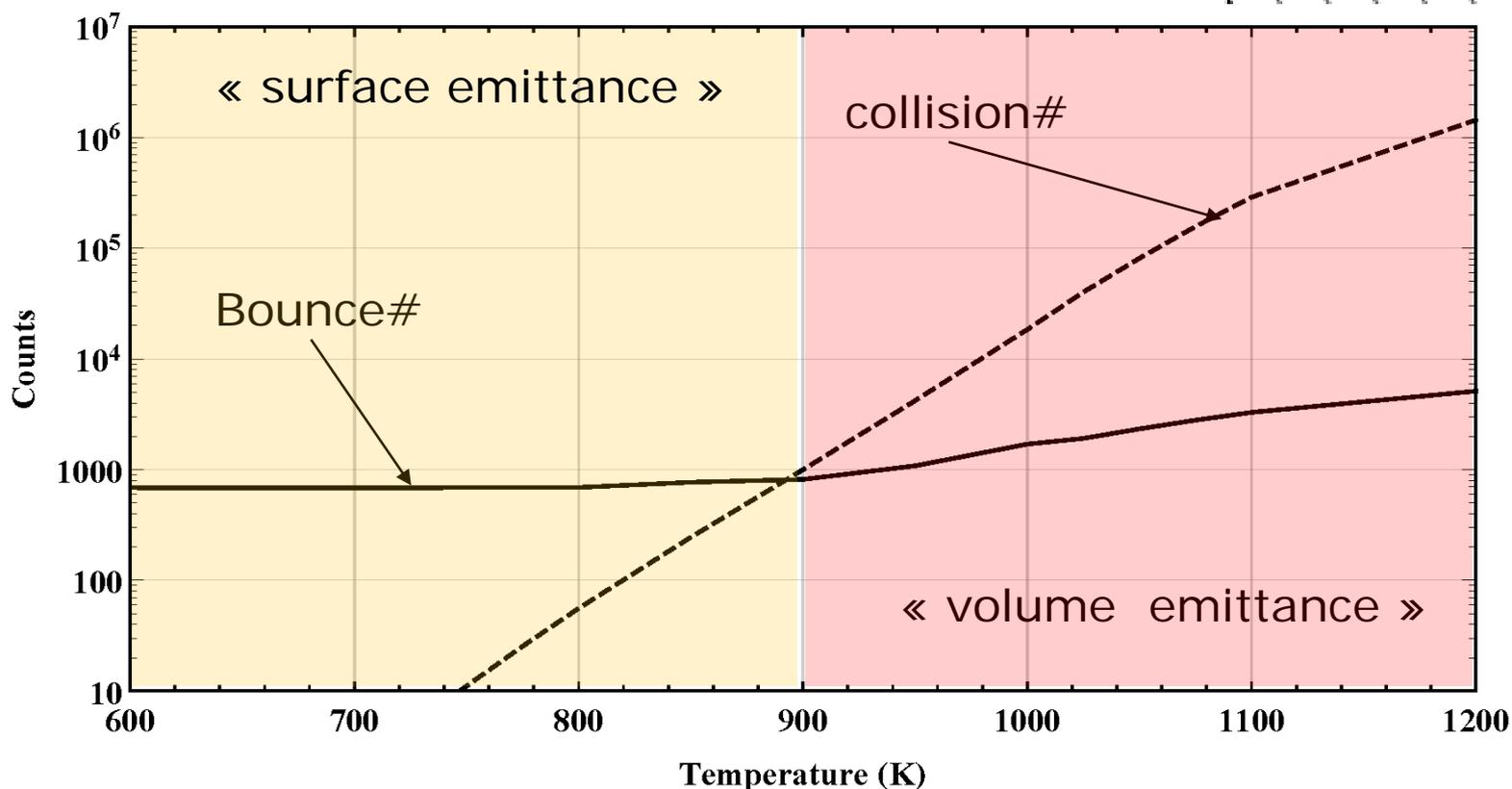
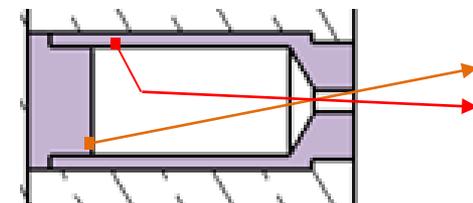
$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi P d_{atom}^2}$$



Régime du gaz de calcium

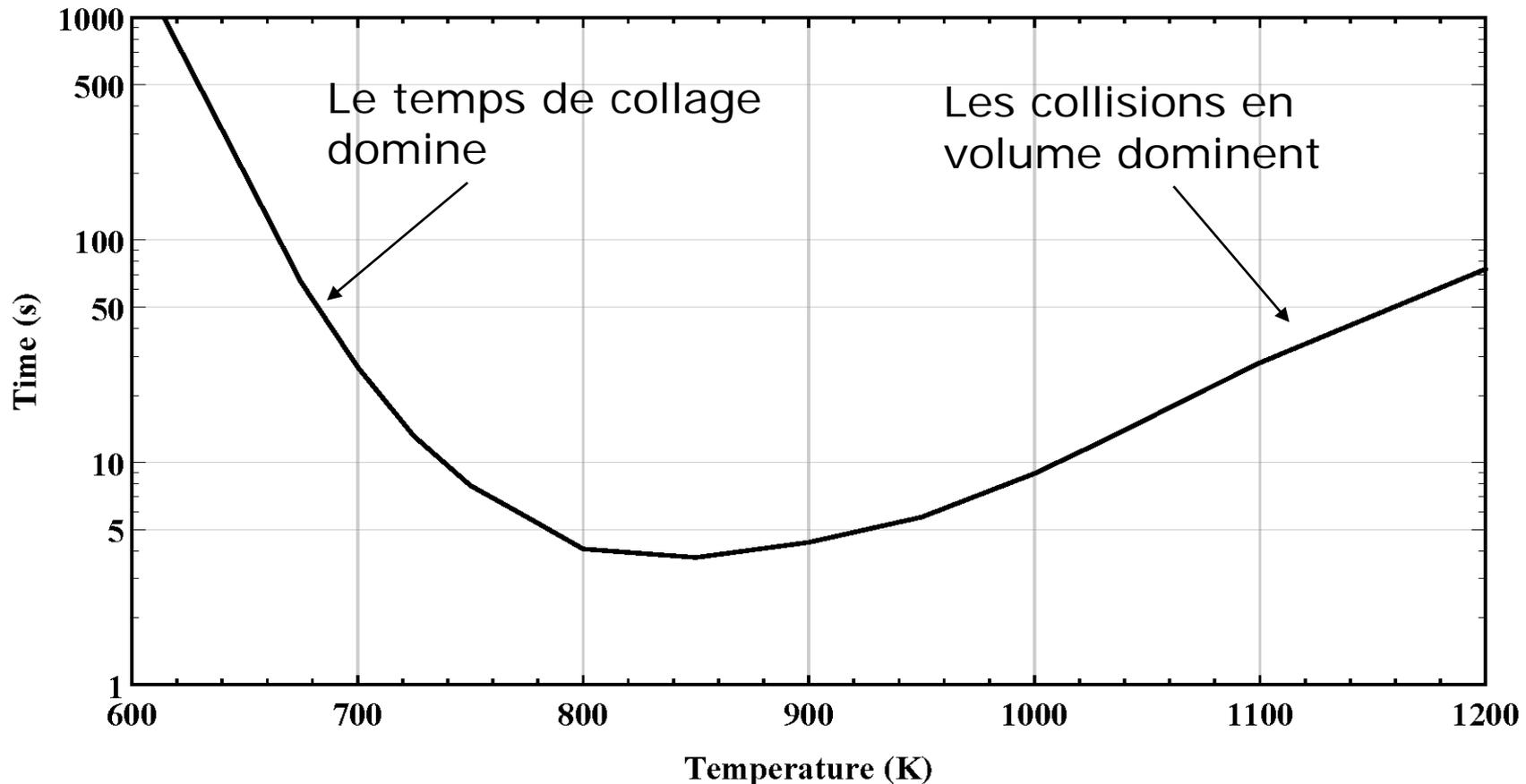
➤ Gaz Ca non collisionnel jusqu'à 900K (625° C)

- $T < 900\text{K}$: atoms extracted directly coming from walls
- $T > 1000\text{K}$: atoms coming from the volume
- $T \sim 900\text{K}-1000\text{K}$: transition



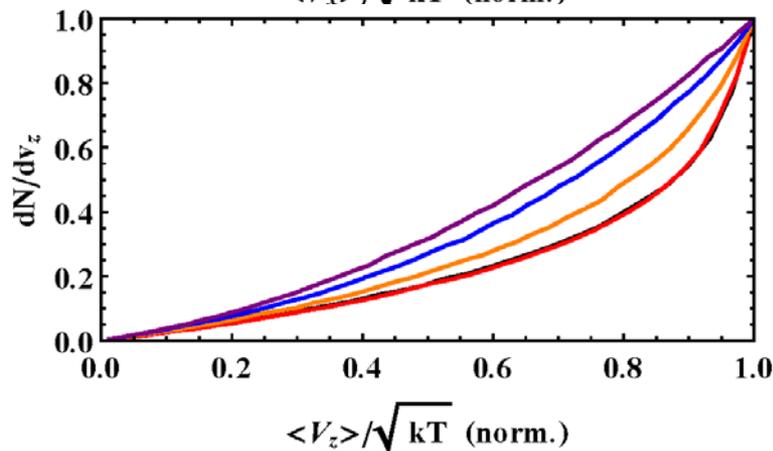
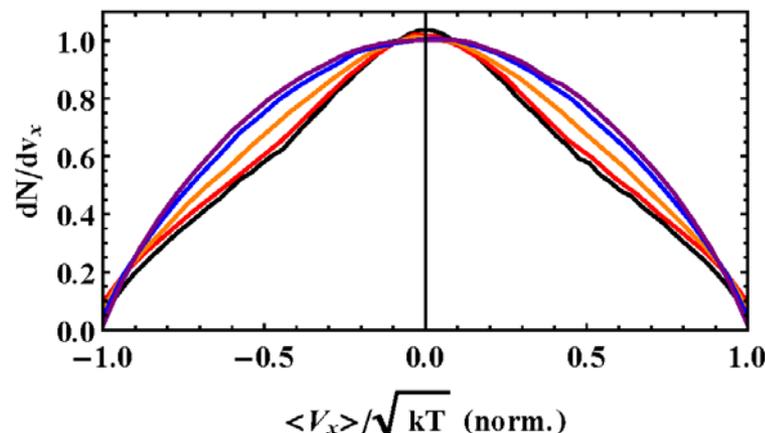
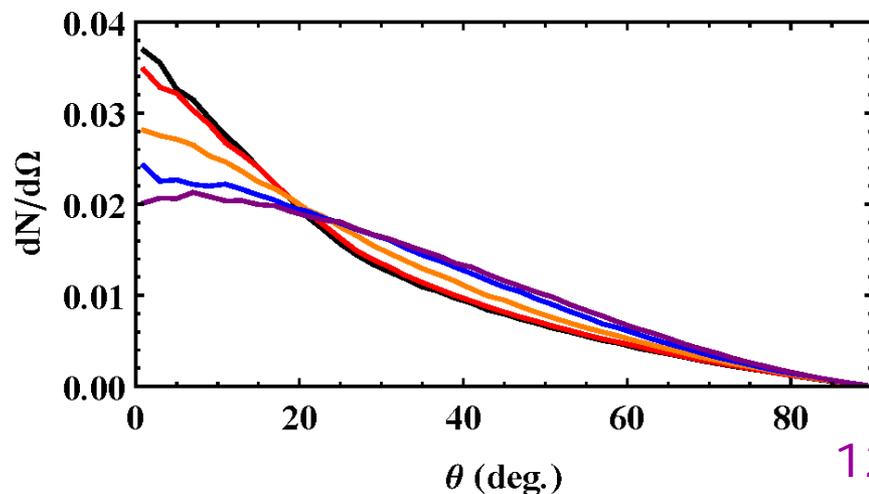
Temps d'extraction des atomes

- Compétition entre le temps de collage et les collisions en volume

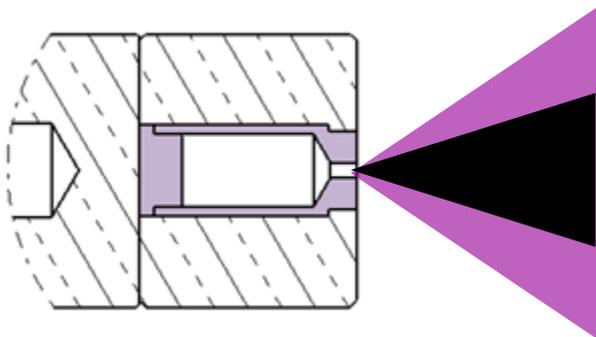


Résultats de la simulation

- L'émittance des dépend de la température
 - Le canal de sortie impose l'émittance jusqu'à $T \sim 900$ K
 - Les collisions dispersent le flux d'atome pour $T > 900$ K



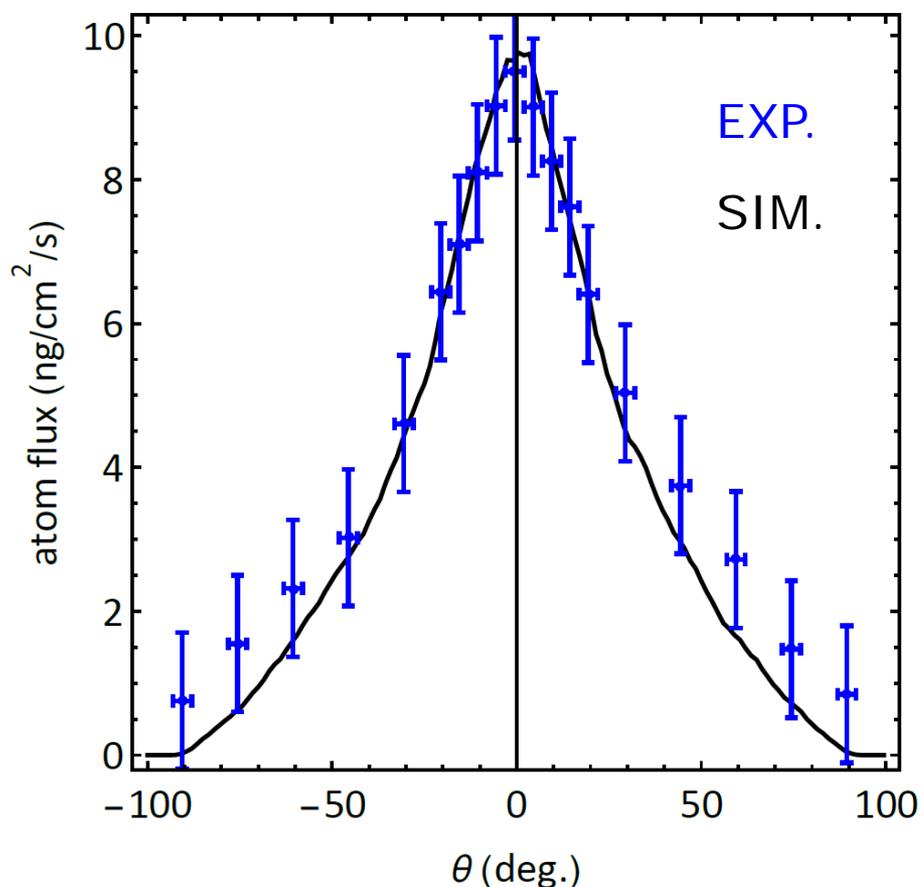
1200K
1100K
1000K
900K
800K



Comparaison simulation expérience

➤ Assez bon ajustement

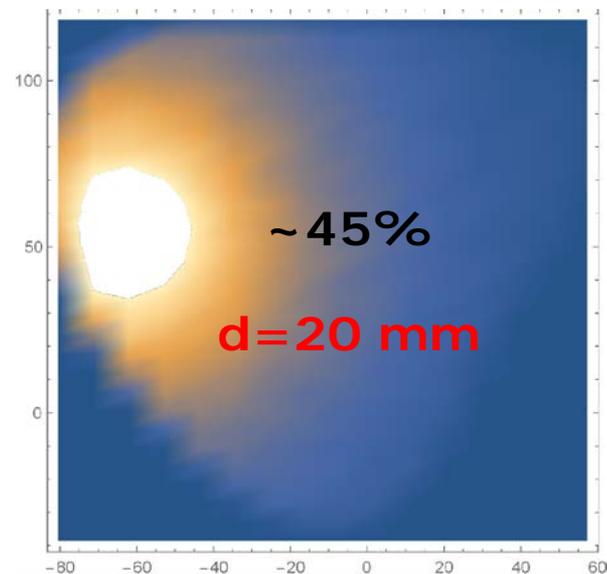
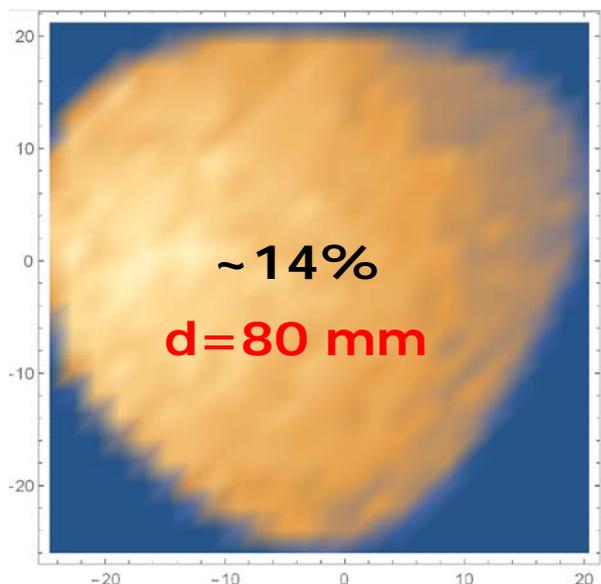
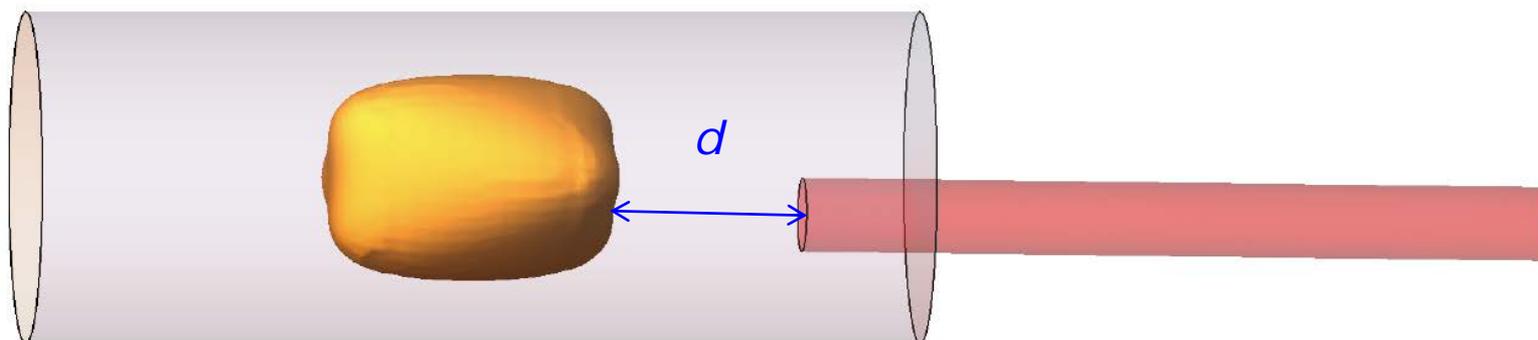
- Flux à fort angle sous estimé par la simulation
- Mais résultat compatible avec les incertitudes



Conversion atom > ion dans la source

➤ Simulation dans la source PHOENIX V3 ECRIS

- Température du four $T \sim 425^\circ\text{C}$ (700K)



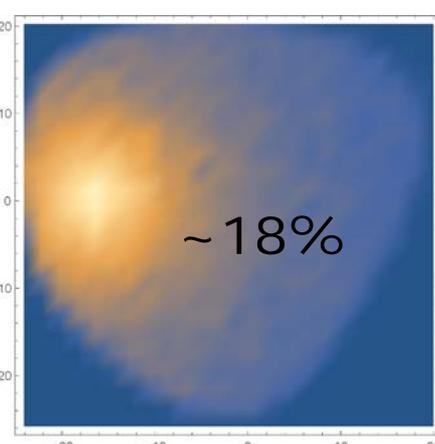
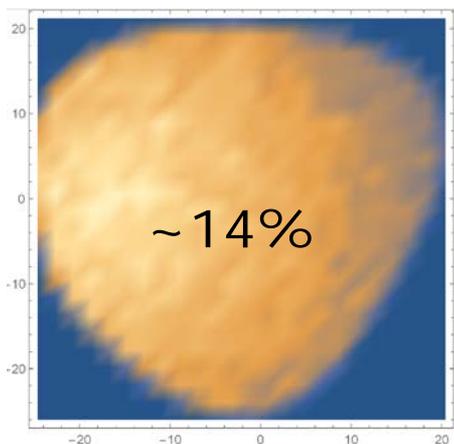
Effet de la géométrie du canal

- Evolution du rendement avec la forme du canal est secondaire / à l'effet de la distance four / plasma ECR

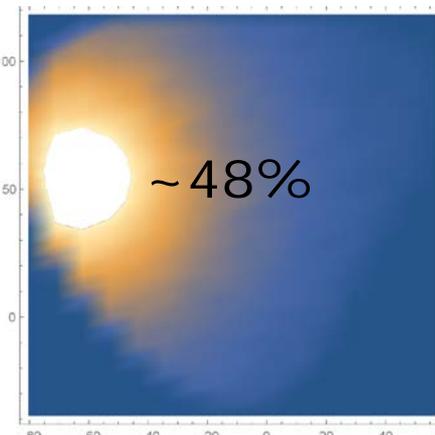
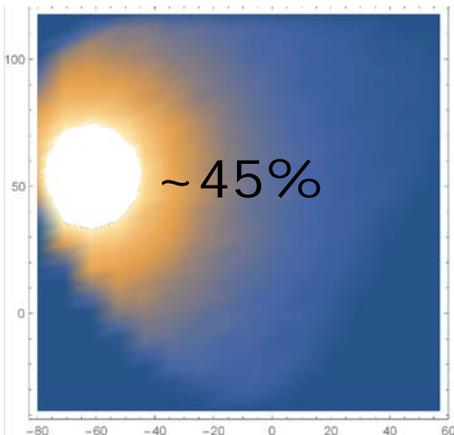
$\varnothing = 1$ L=2 mm

$\varnothing = 0.5$ L=5 mm

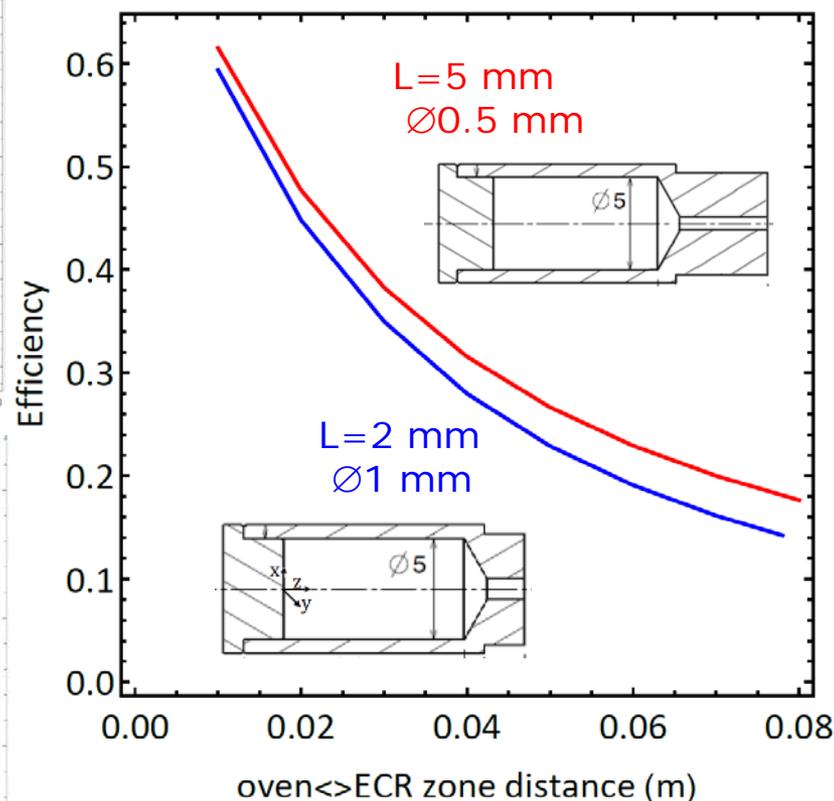
d=80 mm



d=20 mm



Atome capture Efficiency



Conclusion

- Physique du four bien comprise
 - Le Ca forme une couche sur le Mo Mo
 - La surface d'évaporation inclut la surface du creuset
- La mesure du flux de Ca permet d'obtenir une mesure des coefficients de l'équation d'Antoine
- La simulation reproduit bien le flux par unité d'angle solide
- Le taux de conversion atome ion dépend de la distance au plasma ECR. (14% à 45%)
- La géométrie du canal ne change pas significativement ce taux
 - À condition que le four point vers la zone ERC
 - Mesure vs distance à programmer au GANIL



**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION**