



Décontamination d'un plasma poussiéreux grâce à l'action de la force thermophorétique.

S. Dap, D. Lacroix, R. Hugon, L. de Poucques,, J. Bougdira



Institut Jean Lamour - UMR 7198

**Matériaux-Métallurgie-
Nanosciences-Plasmas-Surfaces**

Département 2 - Equipe 201 ESPRITS

Plan de la présentation

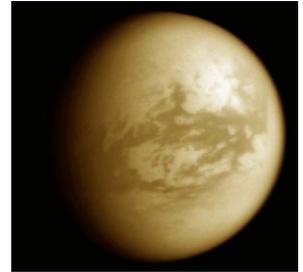
- **Contexte scientifique**
- **Introduction**
- **Dispositif expérimental & diagnostics utilisés**
- **Généralités sur les plasmas poussiéreux**
- **Mesures de transmittance, méthode d'inversion Monte-Carlo : principe, limites d'application**
- **Résultats expérimentaux**
- **Conclusion générale**

Contexte scientifique

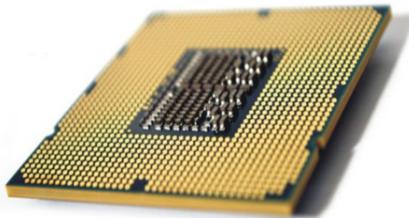
1924 : première observation d'un plasma poussiéreux par Irving Langmuir

Domaines de recherche concernés par les plasmas poussiéreux :

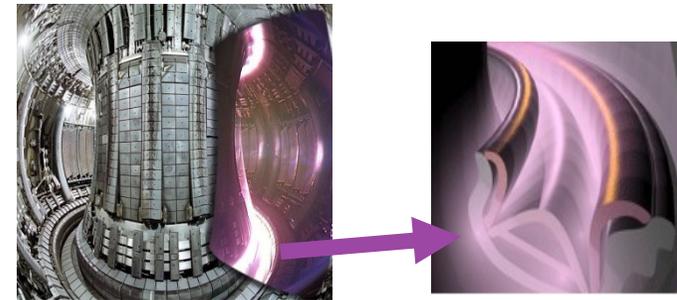
Astrophysique : milieux interstellaires, atmosphères planétaires...



Industrie microélectronique:
contamination des matériaux semi-conducteurs durant leur synthèse par des particules de poussière



Sciences de la fusion:
Érosion des parois des tokamaks par le plasma conduit à la formation de particules



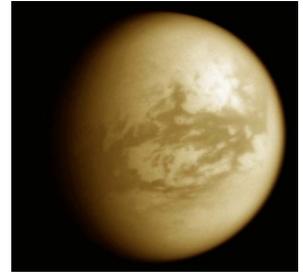
PROBLEMES

Contexte scientifique

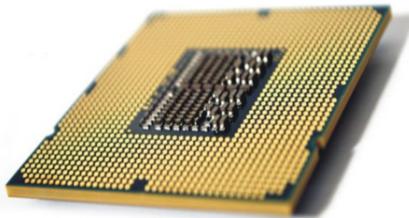
1924 : première observation d'un plasma poussiéreux par Irving Langmuir

Domaines de recherche concernés par les plasmas poussiéreux :

Astrophysique : milieux interstellaires, atmosphères planétaires...

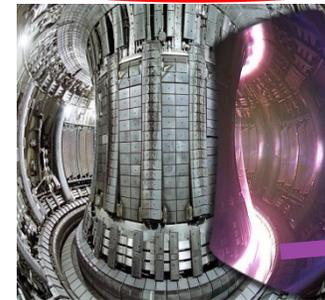


Industrie microélectronique:
contamination des matériaux semi-conducteurs durant leur synthèse par des particules de poussière



Sciences de la fusion:

Érosion des parois des tokamaks par le plasma conduit à la formation de particules



PROBLEMES

Introduction

Formation de poussière souvent nuisible et inévitable

Introduction

Formation de poussière souvent nuisible et inévitable

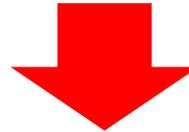


IDEE :

Extraire les particules du plasma (sans modifier toute la configuration expérimentale)

Introduction

Formation de poussière souvent nuisible et inévitable



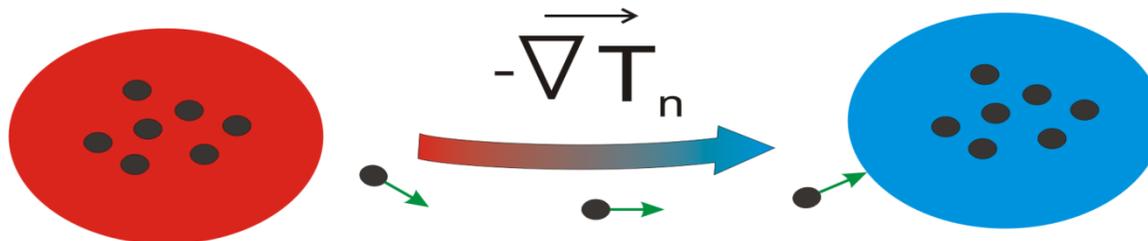
IDEE :

Extraire les particules du plasma (sans modifier toute la configuration expérimentale)



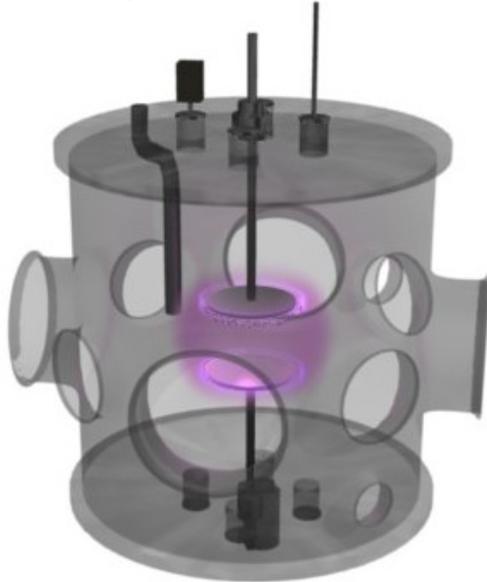
PRINCIPE DES EXPERIENCES:

Création d'un point froid → gradient de température → force thermophorétique



Dispositif expérimental: réacteur

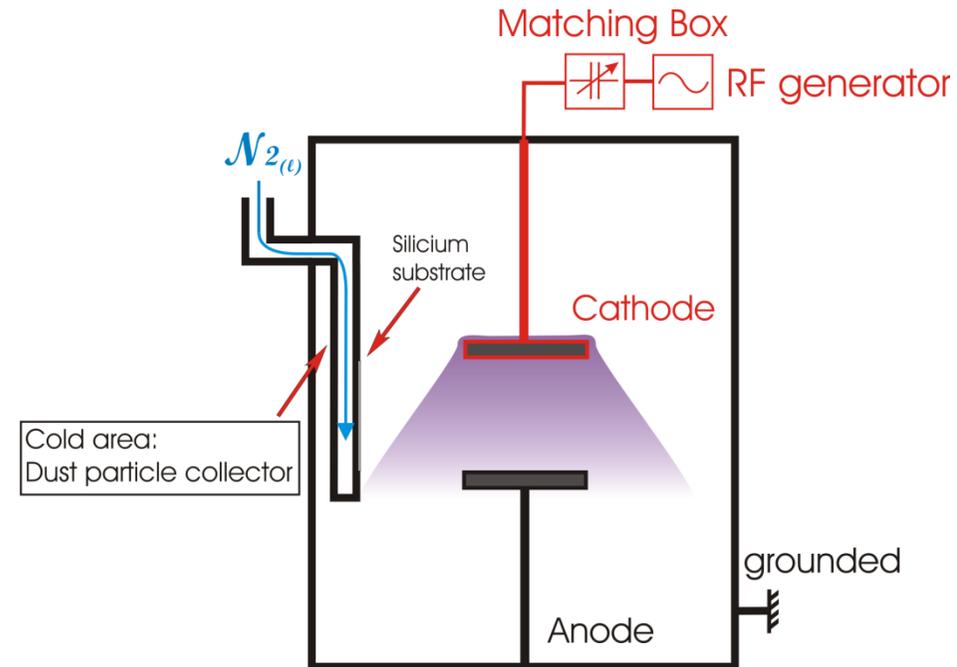
Décharge RF asymétrique \rightarrow existence d'une tension d'autopolarisation (cathode)



Production de particules de poussière par injection d'acétylène dans le plasma d'argon.

Paramètres typiques:

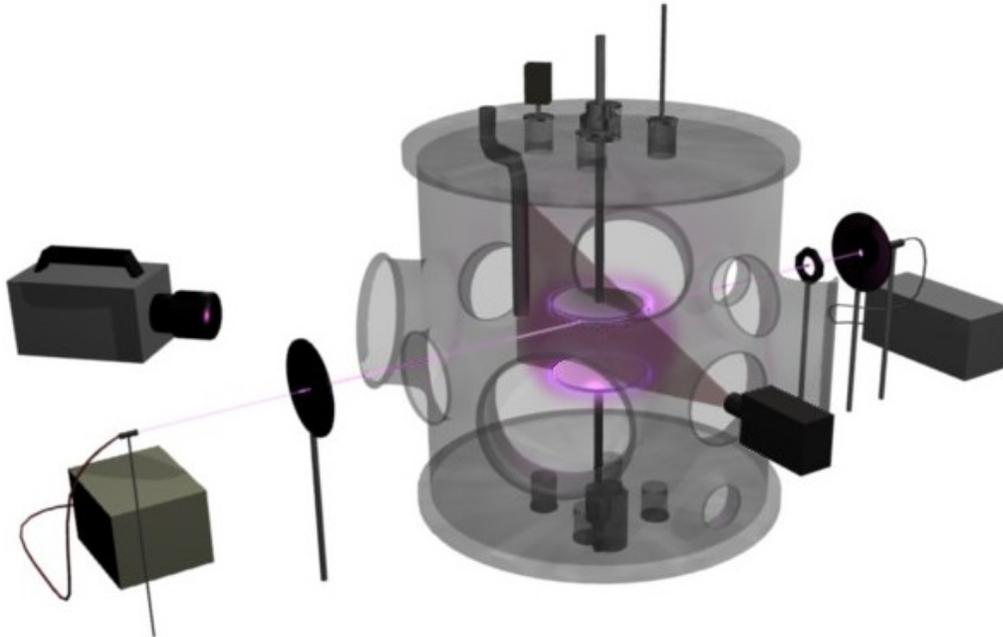
- RF power : 5 - 600 W
- Pressure : 10^{-2} - 1 Torr
- Plasma density : $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- T_e : 1 eV
- T_i : 0.03 eV



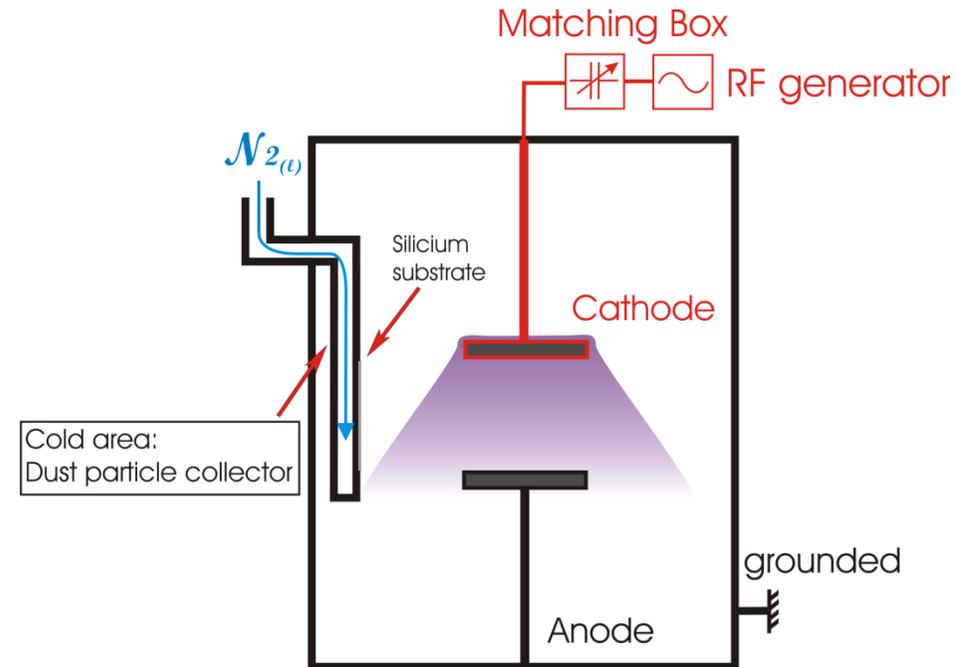
Utilisation d'azote liquide pour refroidir un tube métallique afin d'attirer les particules de poussière

Dispositif expérimental: réacteur

Décharge RF asymétrique \rightarrow existence d'une tension d'autopolarisation (cathode)



Production de particules de poussière par injection d'acétylène dans le plasma d'argon.



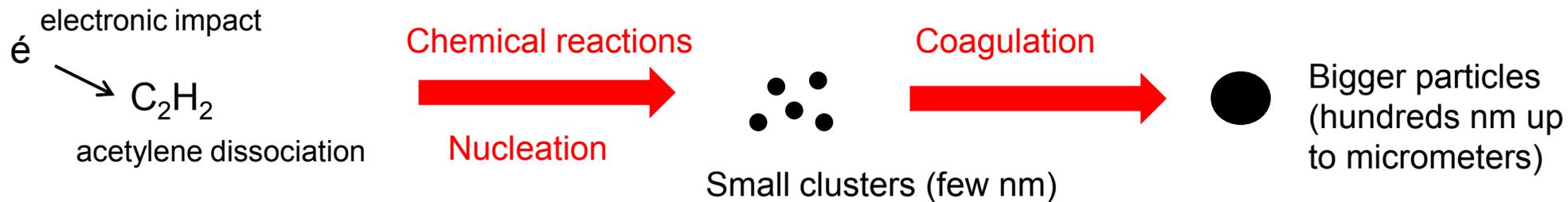
Utilisation d'azote liquide pour refroidir un tube métallique afin d'attirer les particules de poussière

Diagnostics:

- Tension d'autopolarisation (electrons collectés par les particules) \rightarrow **Présence de particules**
- Mesures de transmittance dans la gaine cathodique \rightarrow **Taille et densité des particules**
- Imagerie rapide des particules illuminées par une nappe laser \rightarrow **Dynamique des particules**

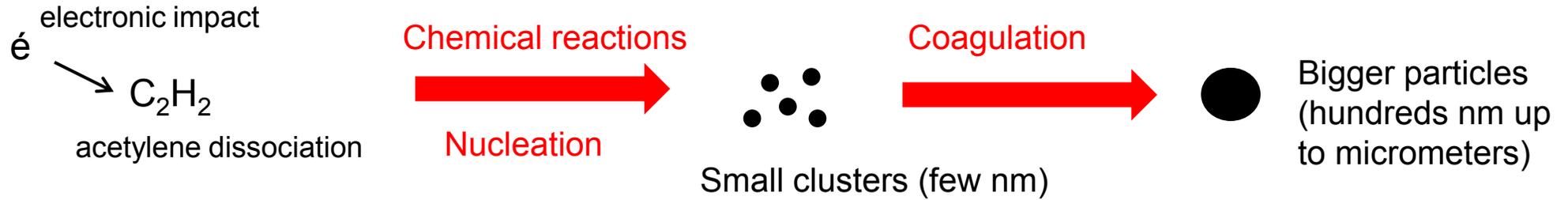
Formation et piégeage des particules

Formation des particules dans le plasma :

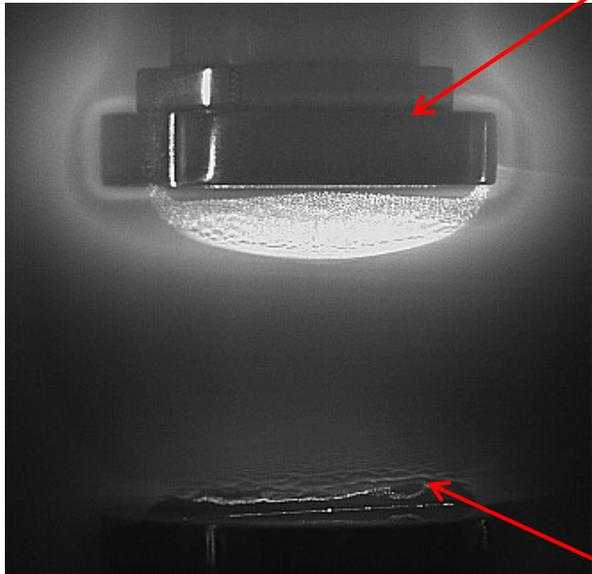


Formation et piégeage des particules

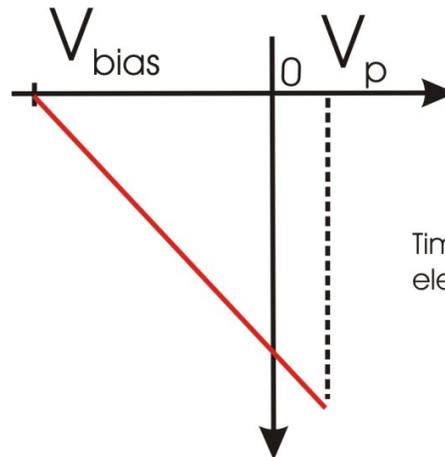
Formation des particules dans le plasma :



Expérience :

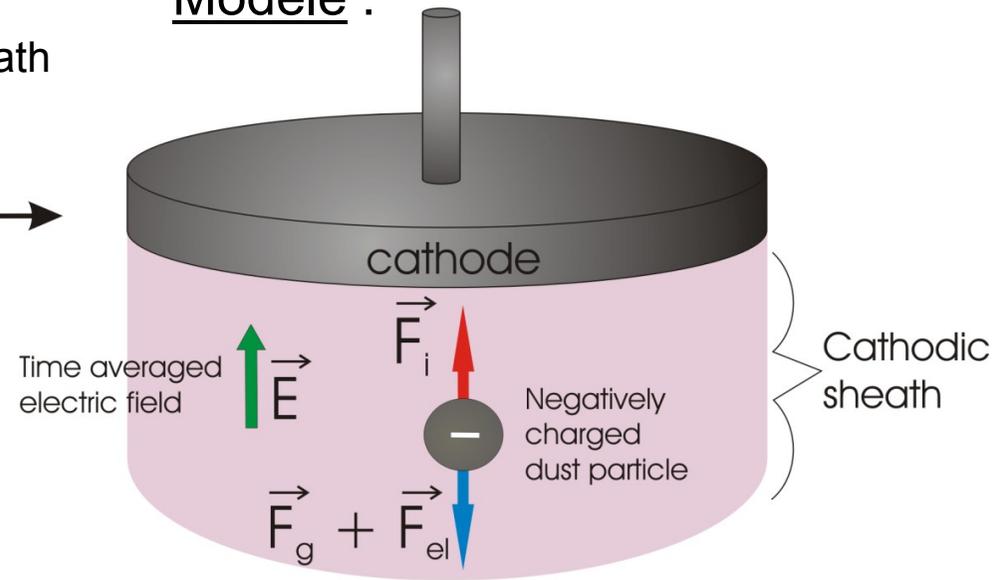


Particles trapped in the cathodic sheath

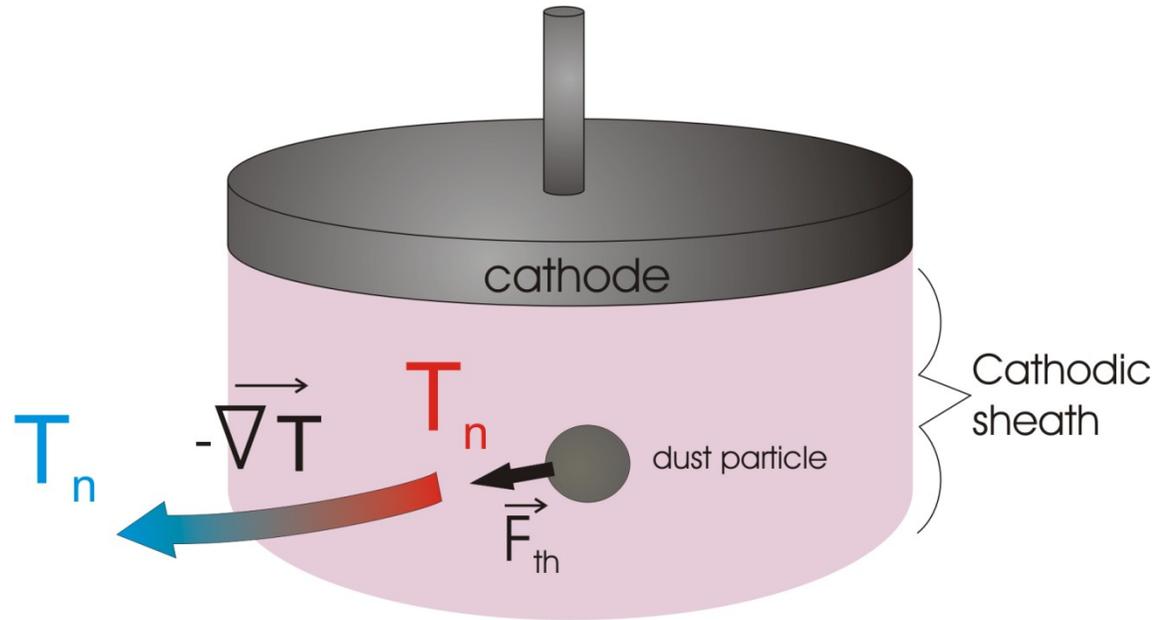
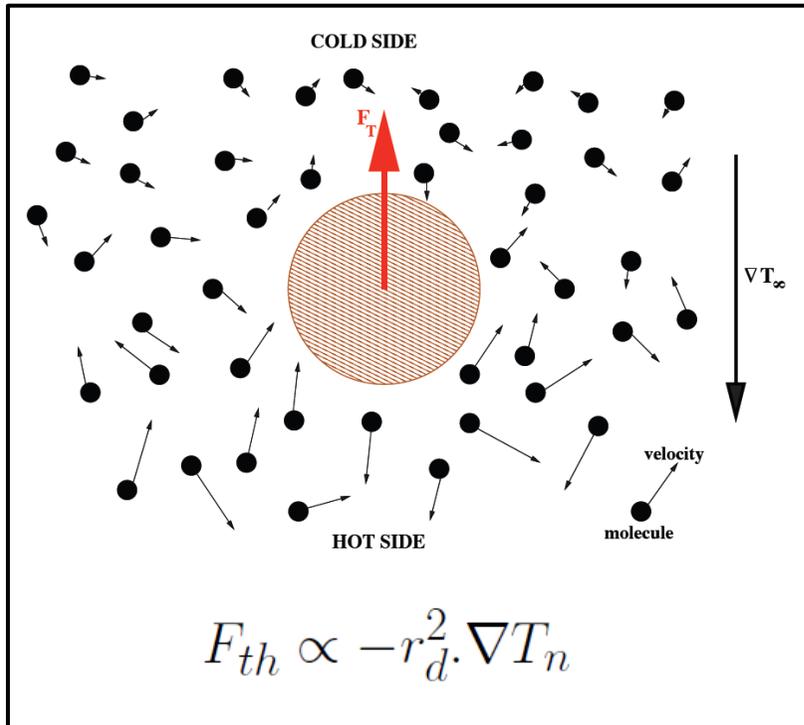


Particles trapped in the anodic sheath

Modèle :

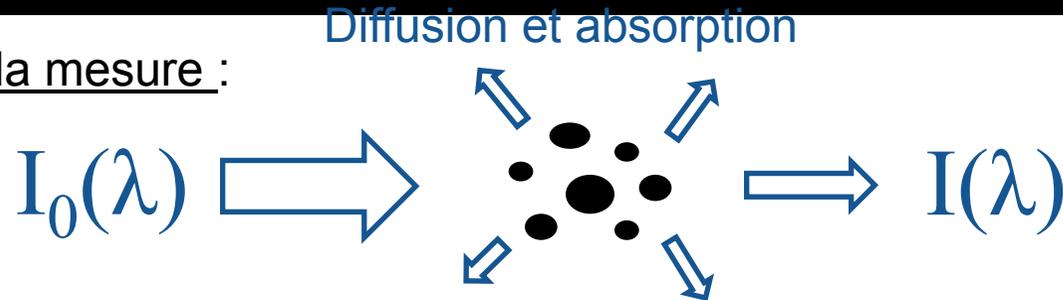


Force thermophorétique



Mesures de transmittance: détermination in-situ de la taille et de la densité des particules

Principe de la mesure :

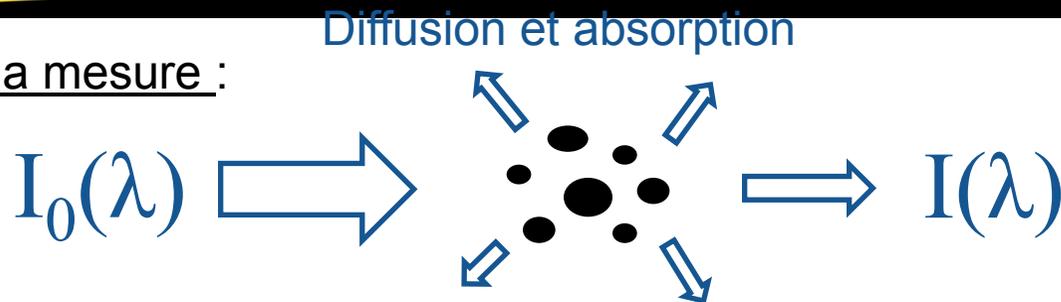


$$\text{Tr}(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

Propriétés de diffusion et d'absorption dépendent de la taille des particules vis-à-vis de la longueur d'onde utilisée.

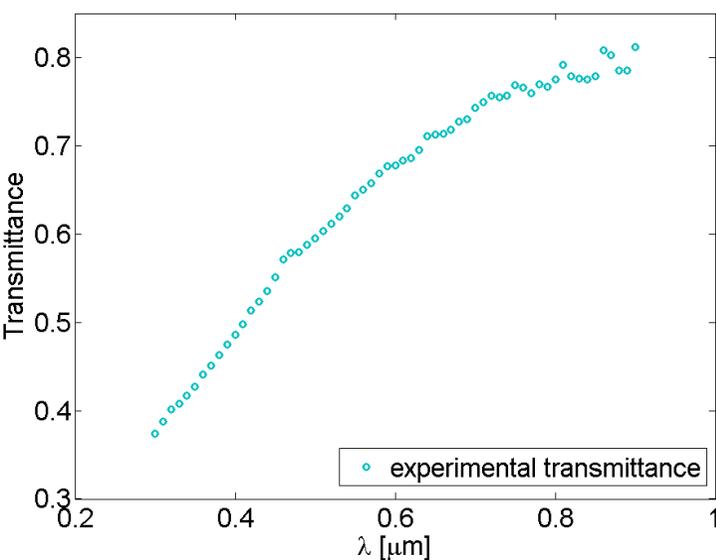
Mesures de transmittance: détermination in-situ de la taille et de la densité des particules

Principe de la mesure :



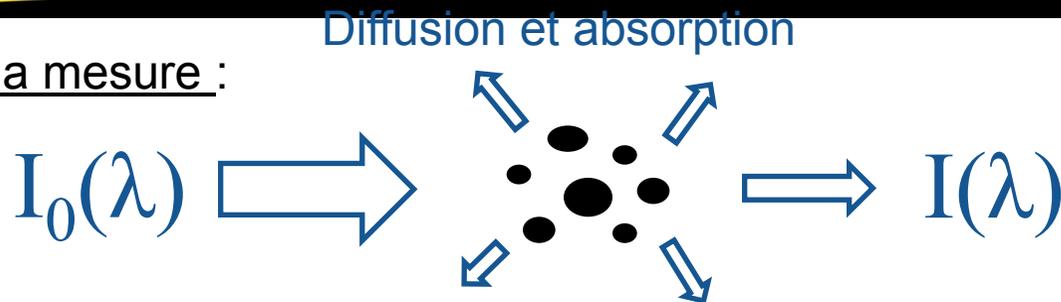
$$\text{Tr}(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

Propriétés de diffusion et d'absorption dépendent de la taille des particules vis-à-vis de la longueur d'onde utilisée.



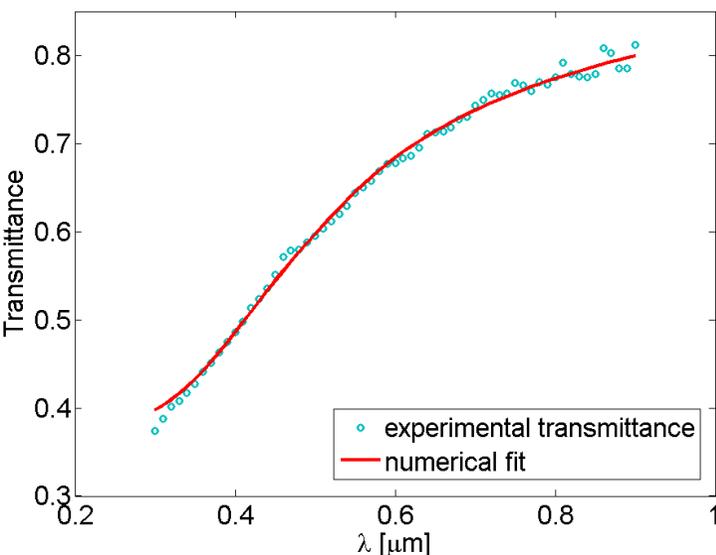
Mesures de transmittance: détermination in-situ de la taille et de la densité des particules

Principe de la mesure :



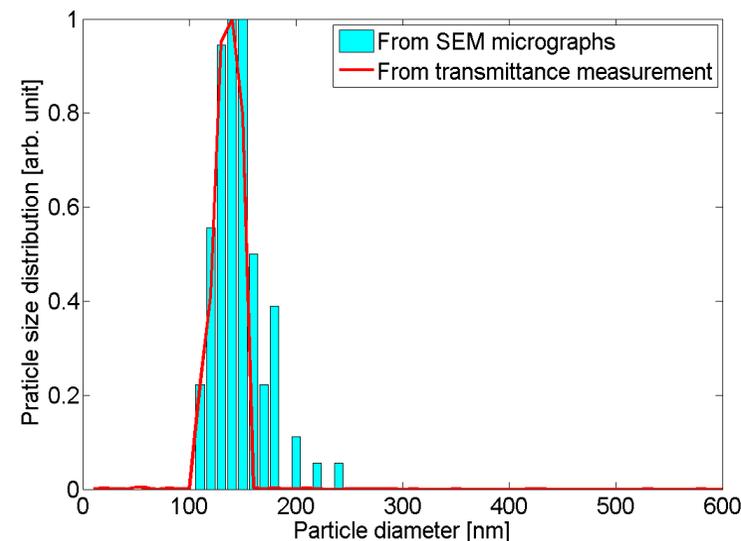
$$\text{Tr}(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

Propriétés de diffusion et d'absorption dépendent de la taille des particules vis-à-vis de la longueur d'onde utilisée.



Inversion Monte Carlo

David A. Ligon, James B. Gillespie and Paul Pellegrino,
Aerosols properties from spectral extinction and backscatter estimated by an inverse Monte Carlo method.
(2000) *Appl. Opt.*, 39(24): 4402-4410.



Mesures de transmittance : méthode d'inversion MC

Coefficient d'extinction volumique spectral :

$$c(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{ext} \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right) \left(\frac{dn}{dr} \right) dr$$

Facteur d'efficacité
d'extinction
(Théorie de Mie)

Distribution en taille des
particules

Loi de type Beer-Lambert

Valable si diffusion multiple négligeable.

Intérêt : calcul matriciel rapide

 adapté pour méthode d'inversion

- Discrétisation en taille des particules
- Discrétisation spectrale

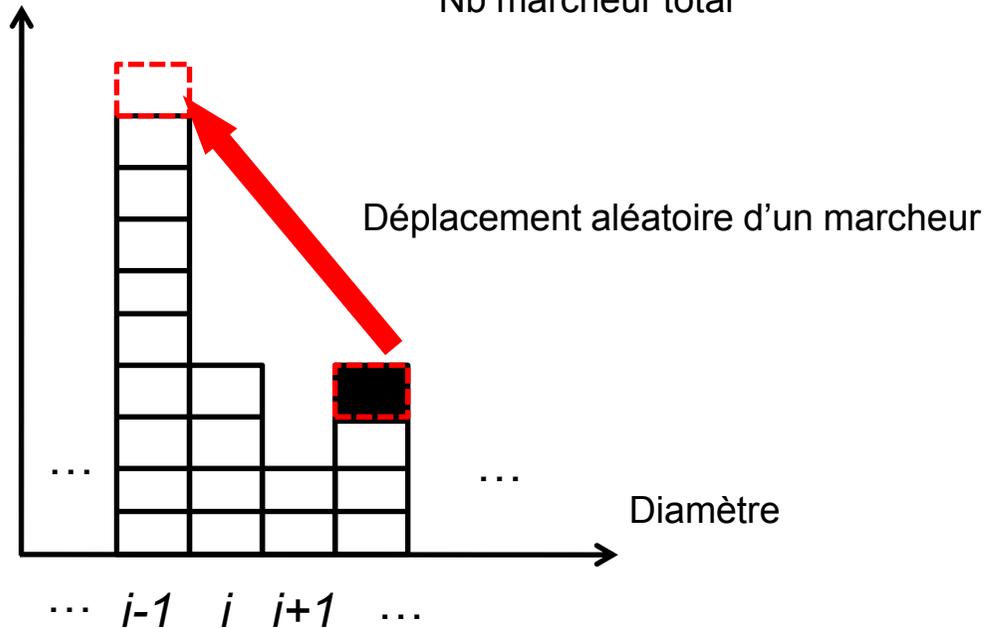


$$c_j = N_0 \sum_{i=1}^M (\bar{\sigma}_{ext})_{ji} f_i$$

Mesures de transmittance : méthode d'inversion MC

- Discrétisation de la fonction de probabilité pour la taille des particules

Fonction de probabilité : $\frac{\text{Nb marcheur (i)}}{\text{Nb marcheur total}}$



Déplacement accepté si il améliore la convergence vers le coefficient d'extinction expérimental.

$$c_j^0 = \frac{1}{nwalk} \sum_{i=1}^M (nw)_i (\bar{\sigma}_{ext})_{ji}$$

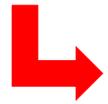
$$N_0^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left(\frac{c_j}{c_j^0} \right)^2$$

$$residu = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sqrt{\frac{(c_j - N_0 c_j^0)^2}{c_j^2}}$$

Mesures de transmittance : méthode d'inversion MC

Principales limites de la méthode :

- Connaissance des indices optiques ($m=n-ik$)
- Diffusion vers l'avant
- Diffusion multiple



Simulation complète du diagnostic pour étudier les limites de la méthode.

Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic

- Code Monte-Carlo,
- Géométrie 3D fidèle à l'expérience,
- Théorie de Mie pour le calcul des propriétés radiatives

Détermination du parcours d'un quanta :

propriétés
radiatives

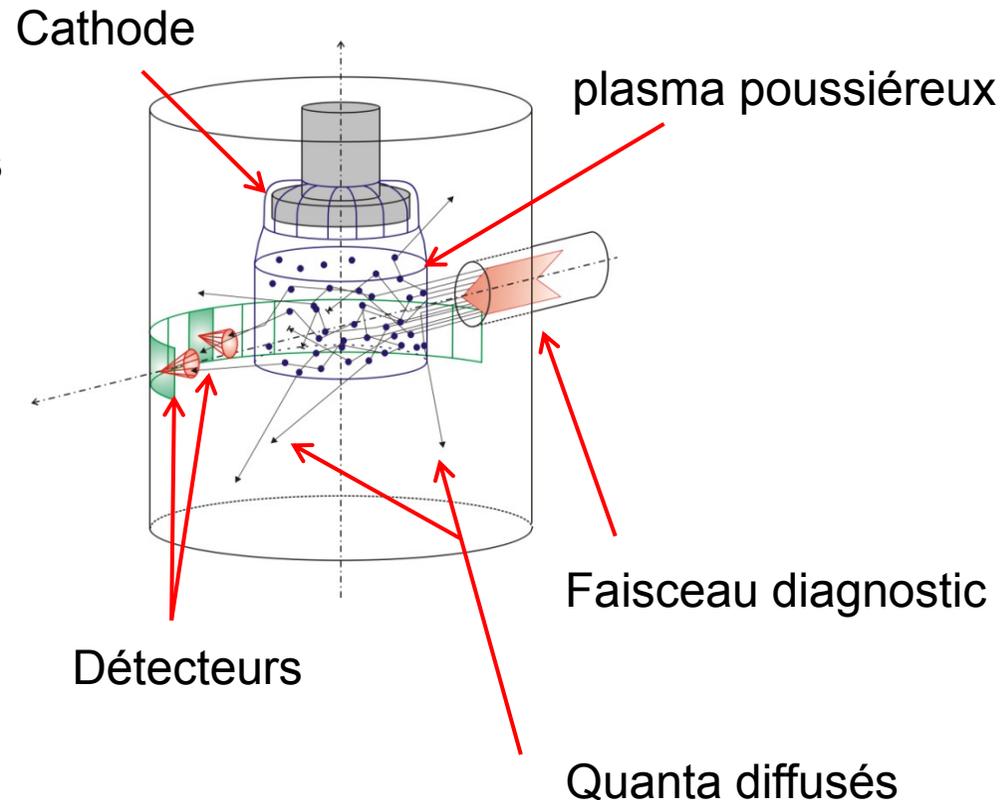
+

tirage de nombres
aléatoires

$$L_{diff/abs} \sim \frac{1}{\sigma_{diff/abs}}$$

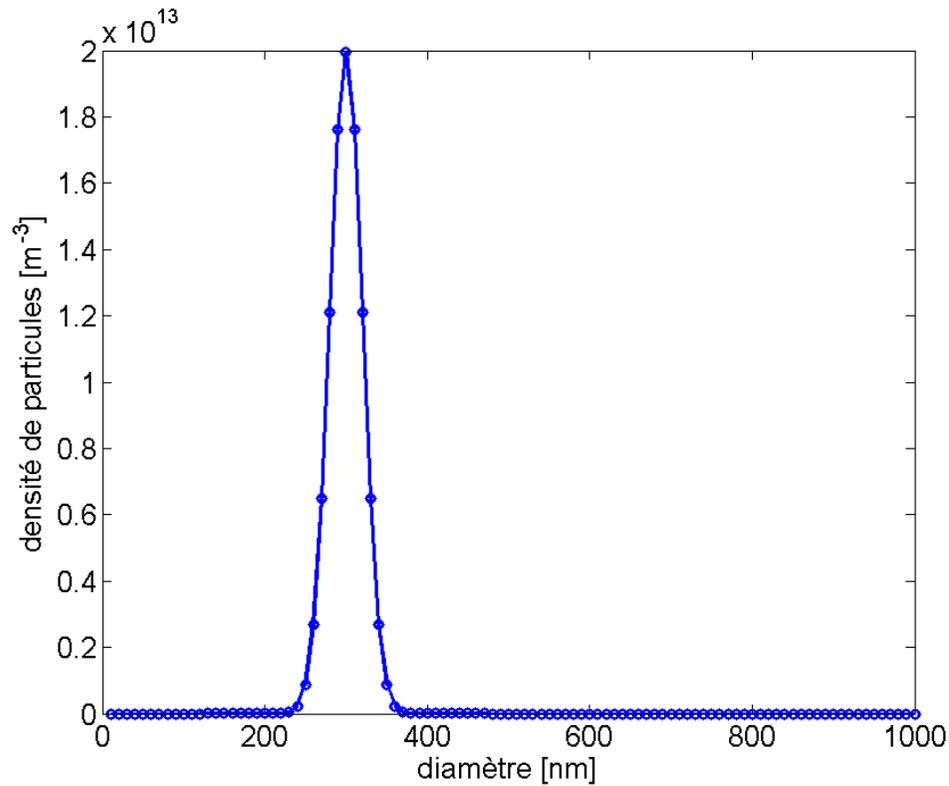


longueurs de diffusion
longueurs d'absorption
directions de diffusion

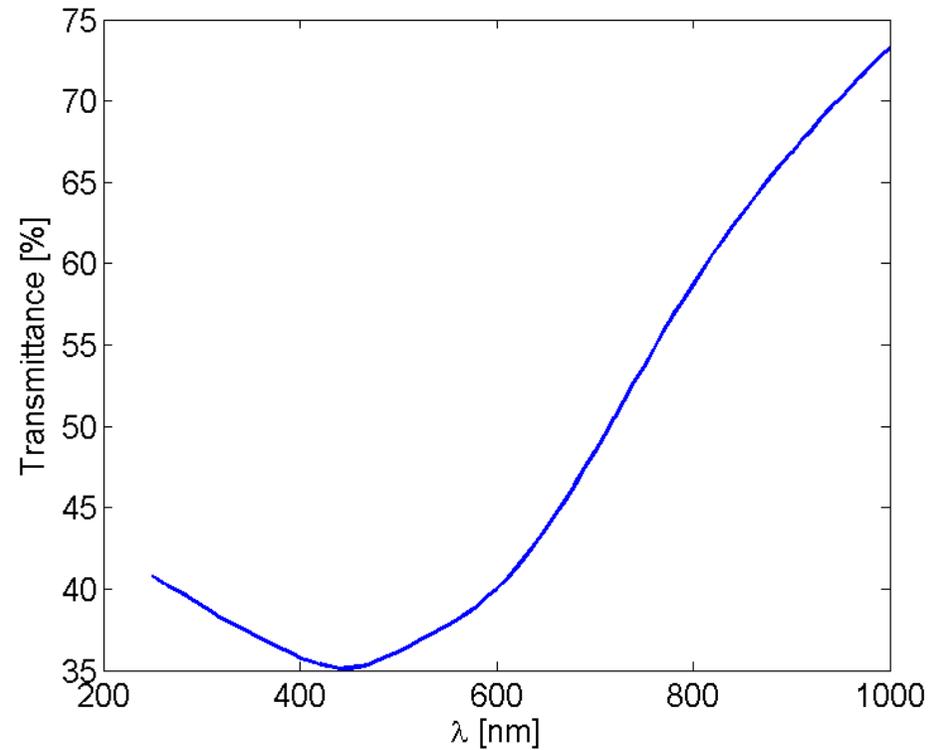


Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic

Distribution initiale de particules :

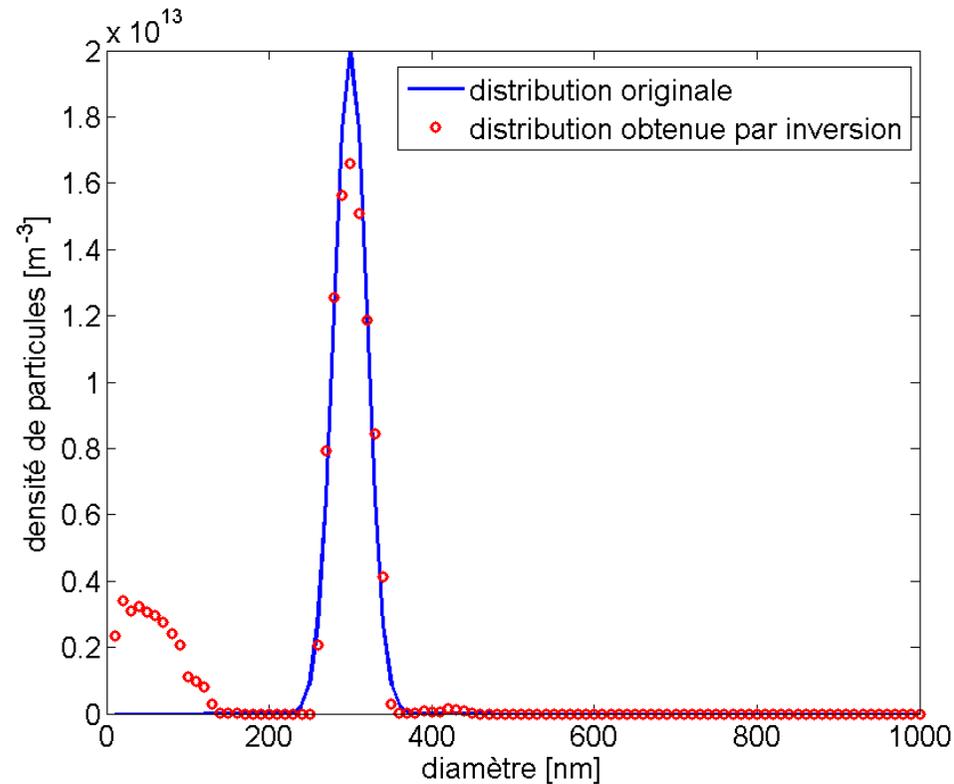


Transmittance originale :

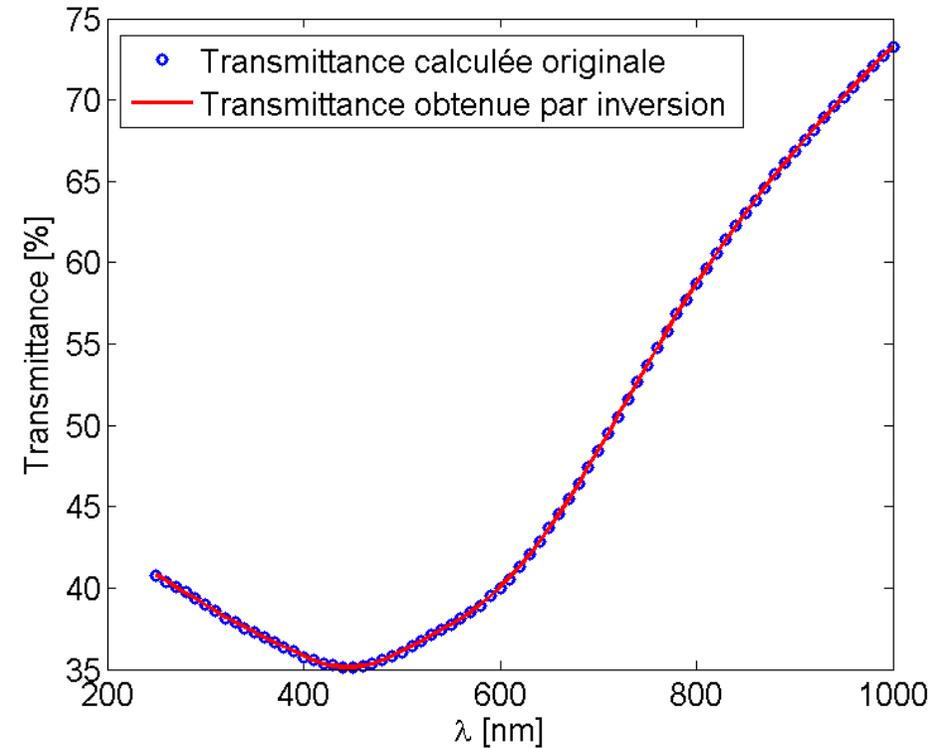


Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic

Distribution initiale de particules et distribution retrouvée par inversion :

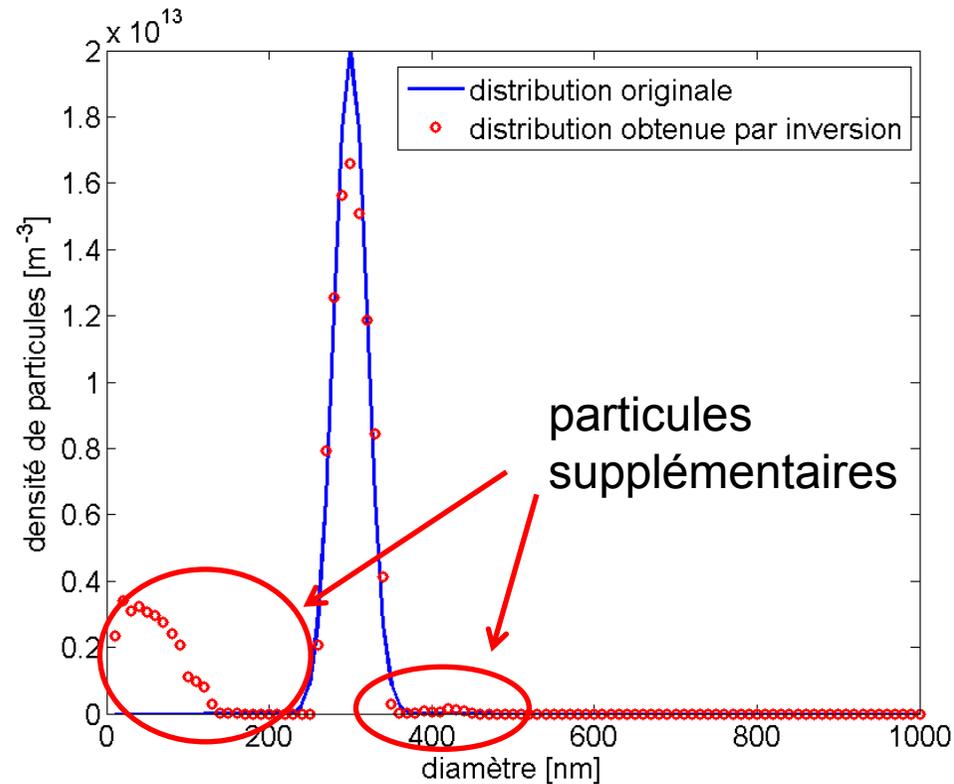


Transmittance originale et obtenue par inversion :

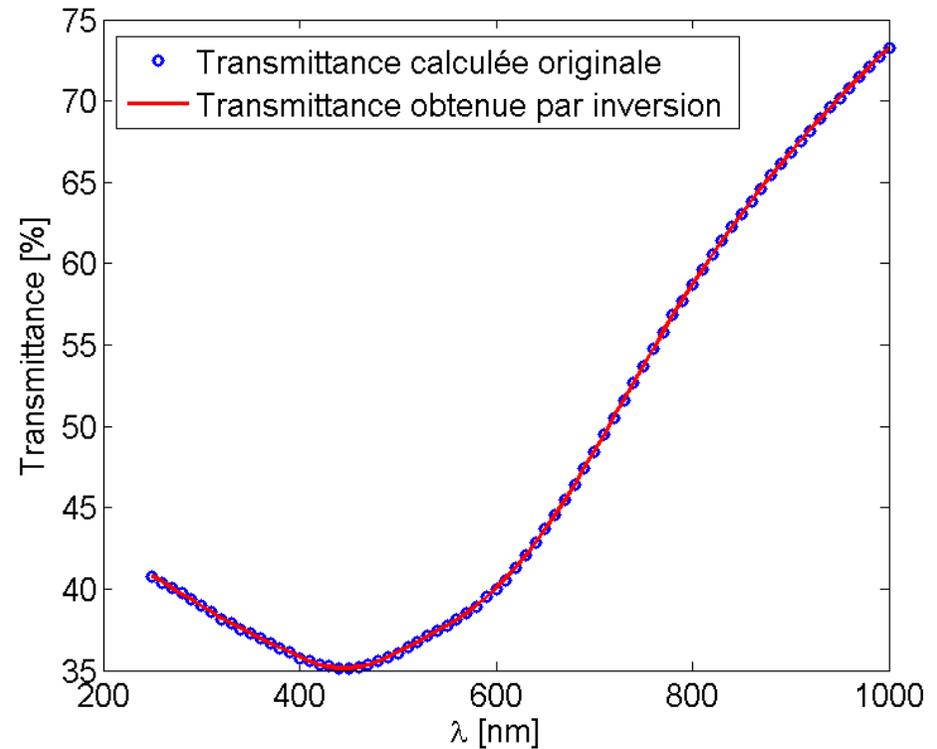


Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic

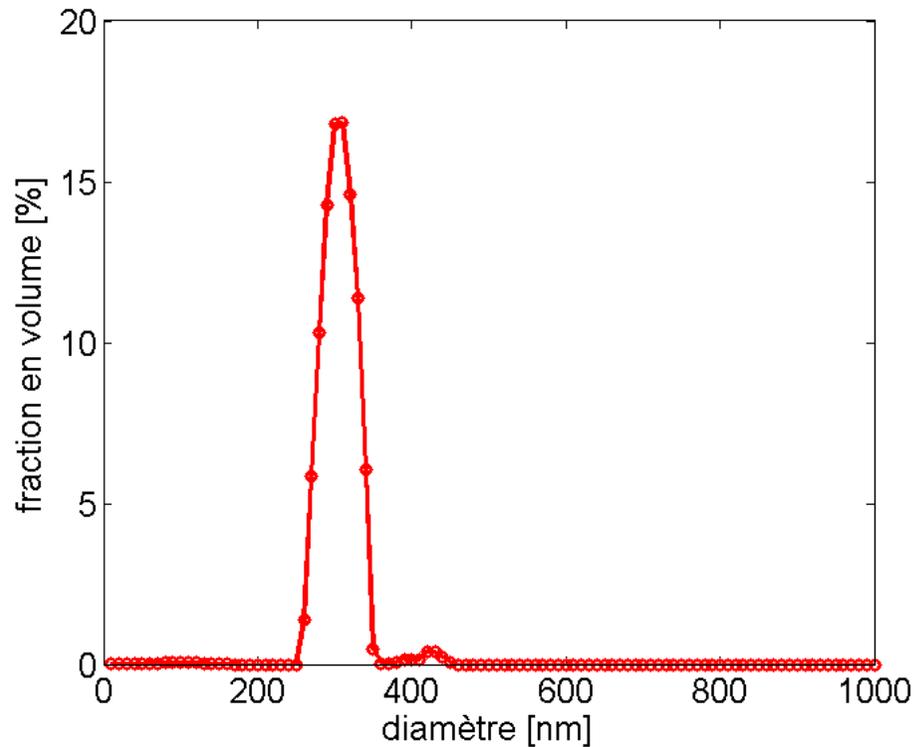
Distribution initiale de particules et distribution retrouvée par inversion :



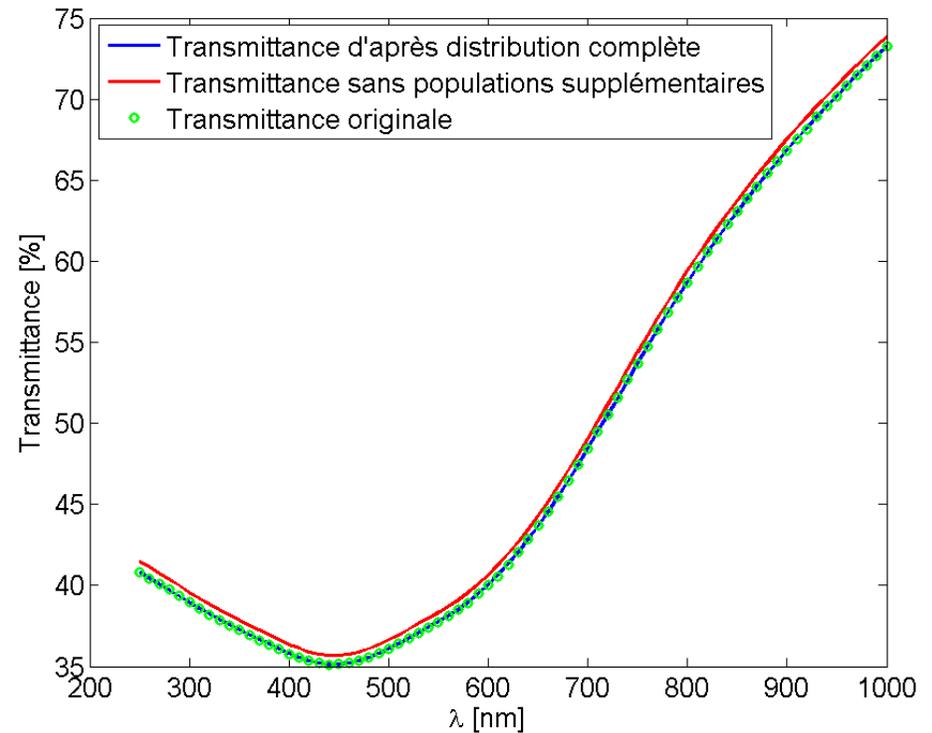
Transmittance originale et obtenue par inversion :



Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic



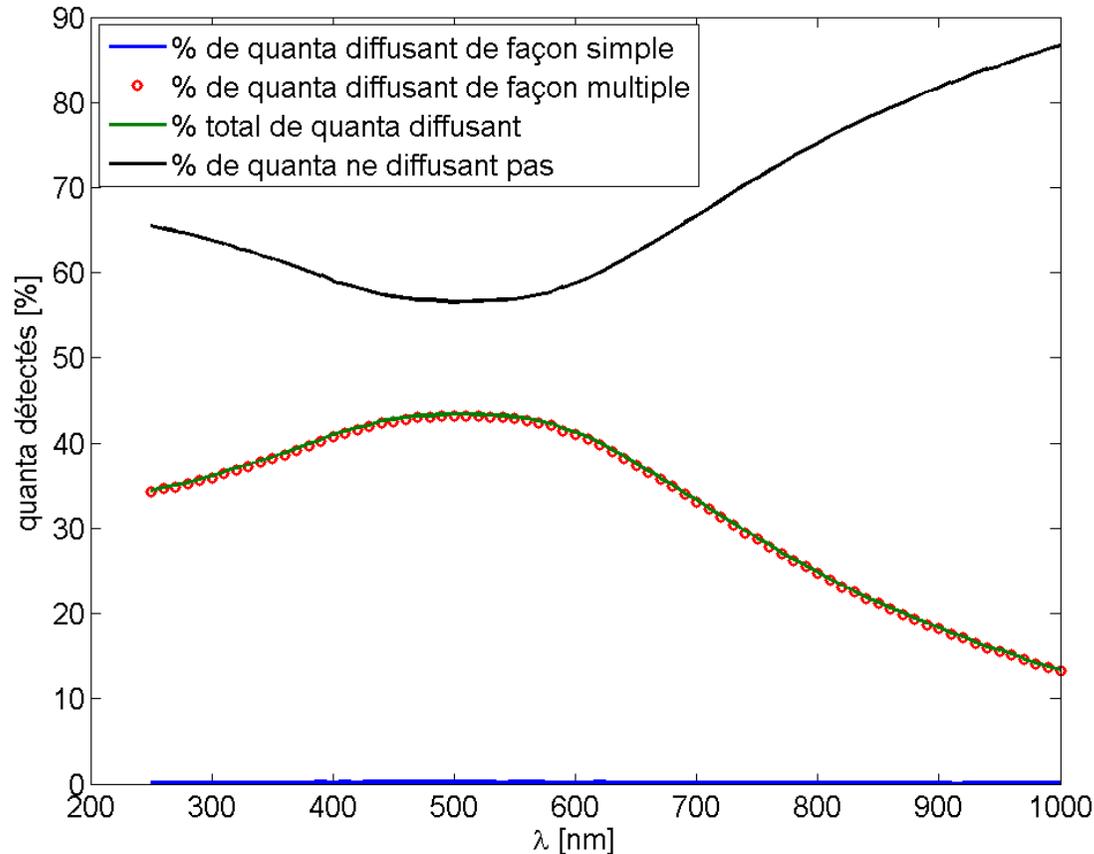
Ces particules ne représentent qu'une faible partie de la matière totale.



Mais elles permettent un fit correct de la courbe originale.

Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic

Statistique sur les quanta détectés :



- Diffusion multiple importante
➔ Beer-Lambert mis en défaut

densité sous estimée et apparition de tailles erronées

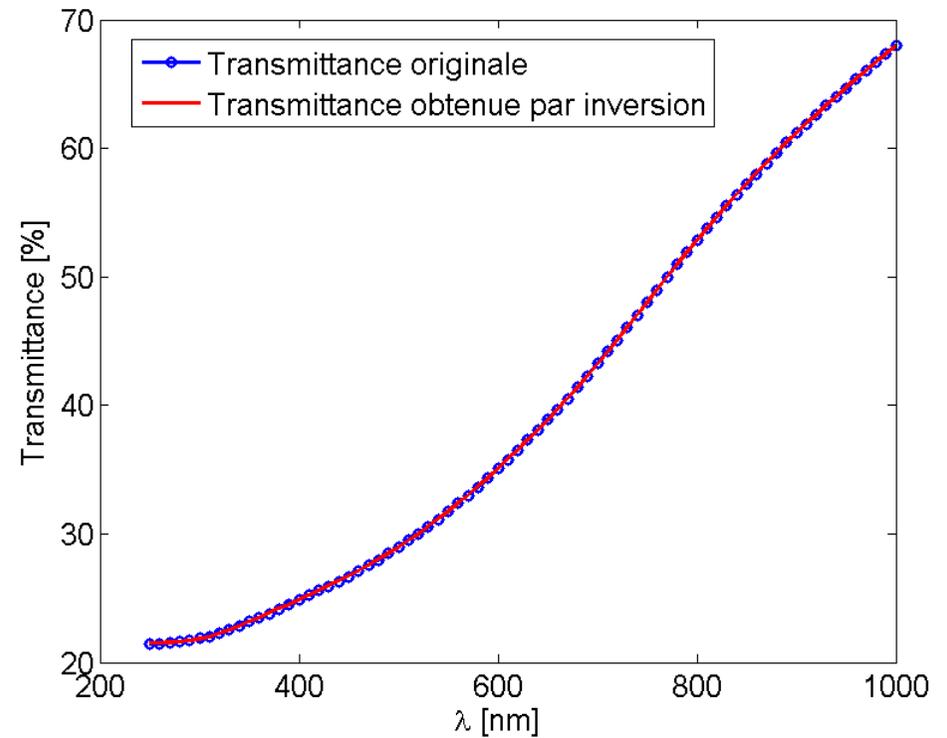
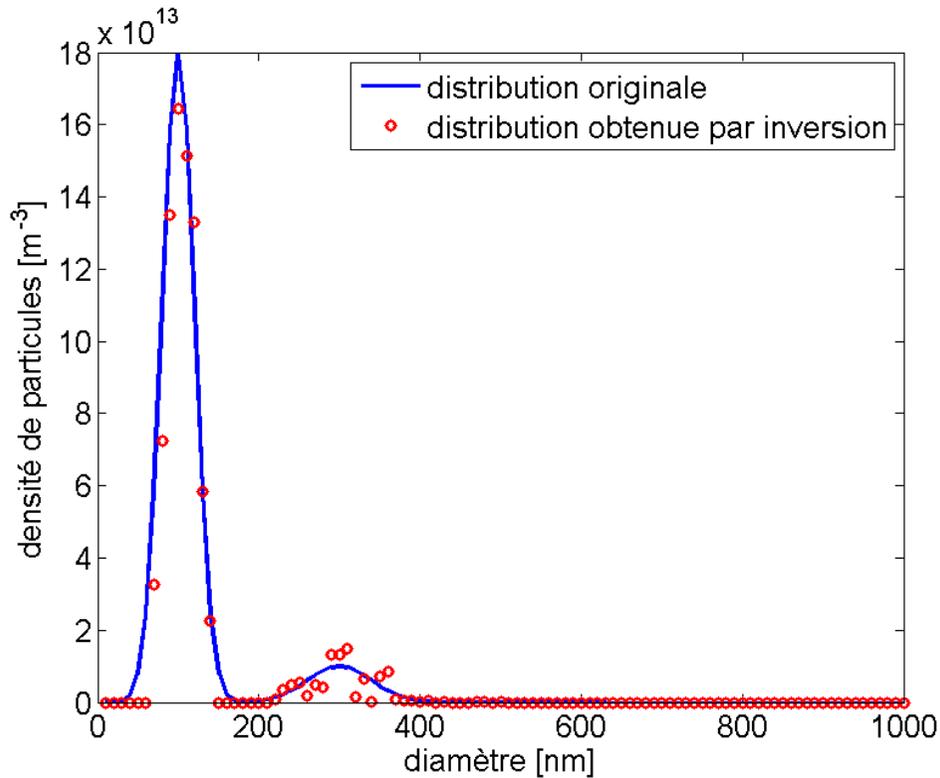
- Effet de la diffusion vers l'avant négligeable (également vérifié avec des particules plus grosses)

CEPENDANT :

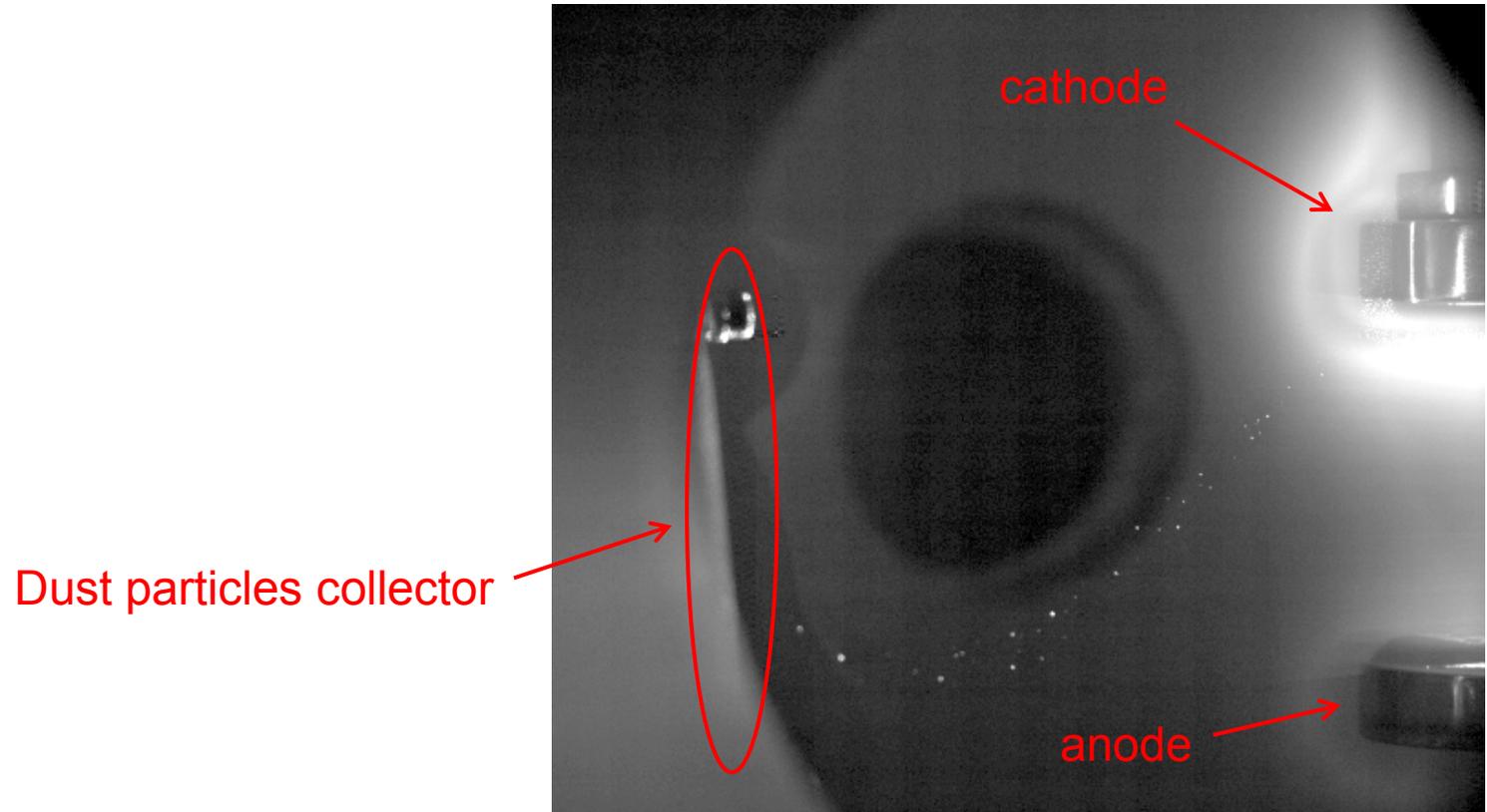
- Détermination approximative de la taille reste correcte
- Densité sous-estimée mais ordre de grandeur reste valable

Mesures de transmittance : simulation complète du diagnostic

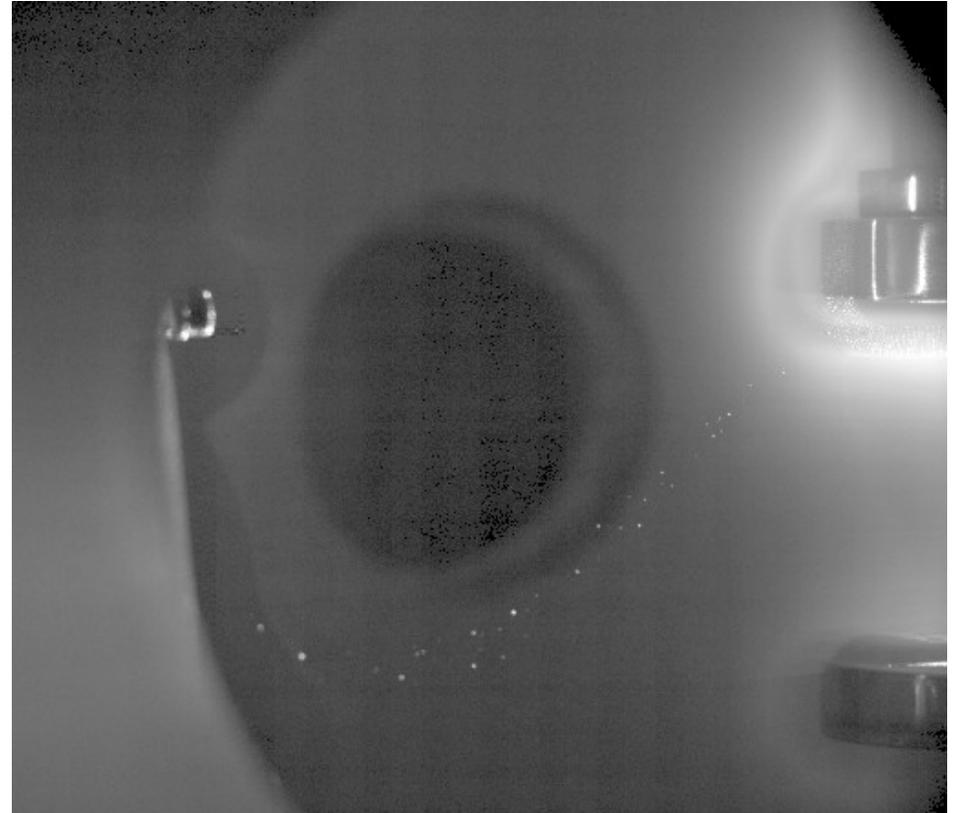
Et sur une distribution bimodale de particules ?



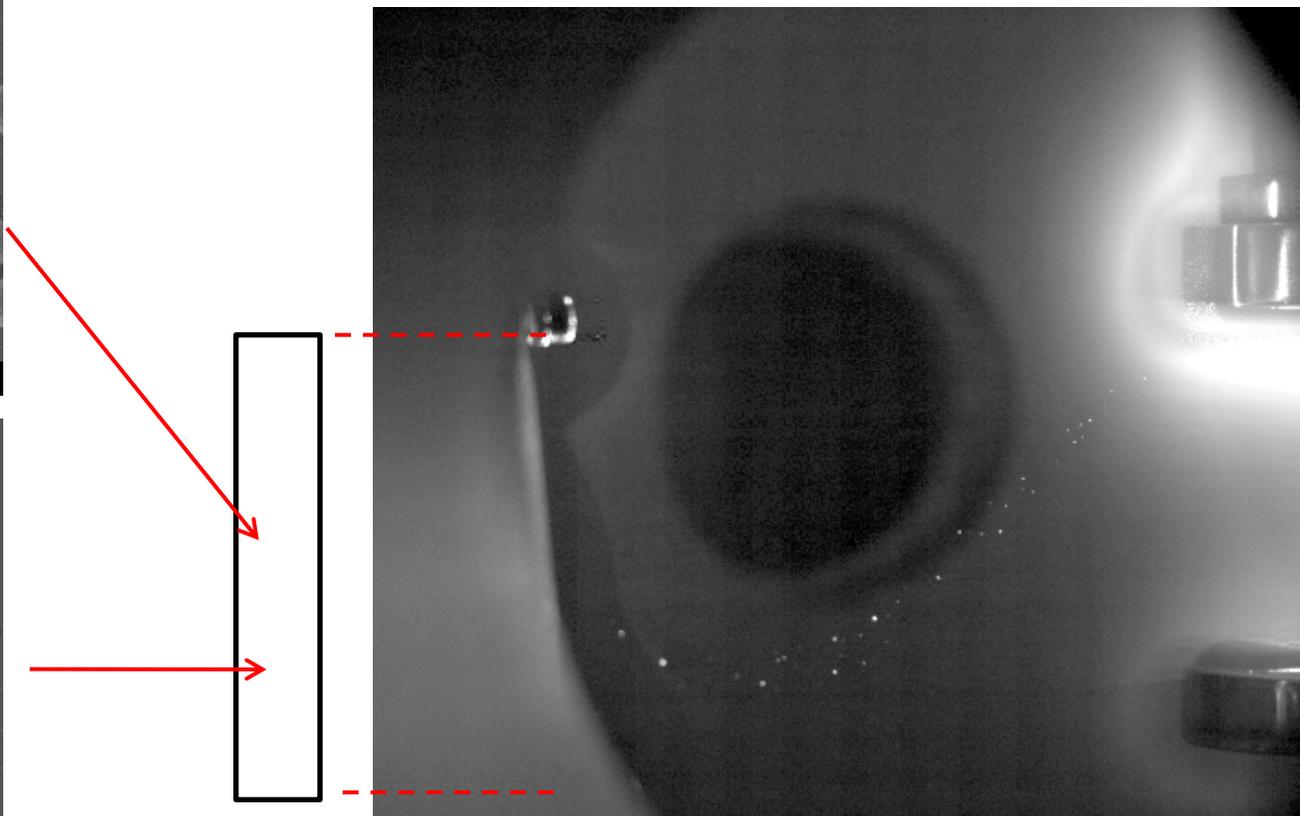
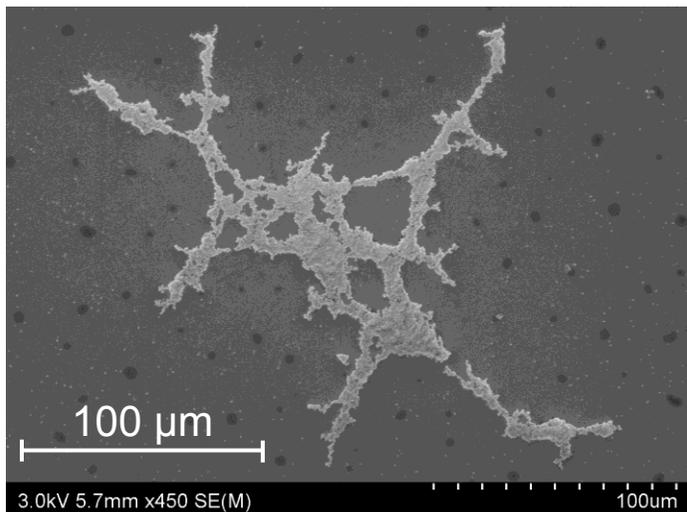
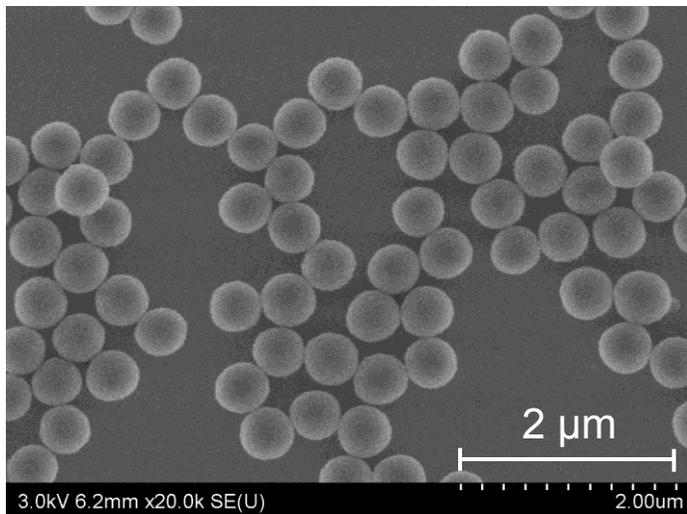
Résultats expérimentaux



Résultats expérimentaux



Résultats expérimentaux

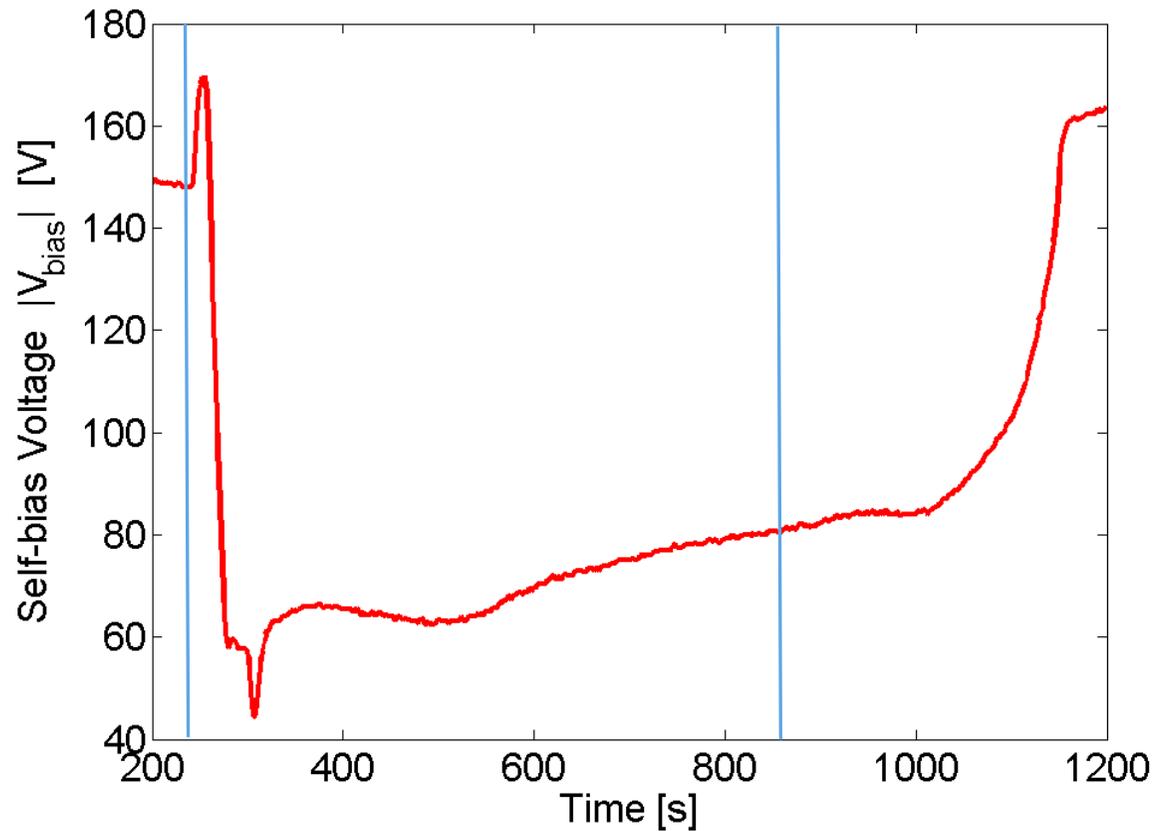


Silicium substrate

Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

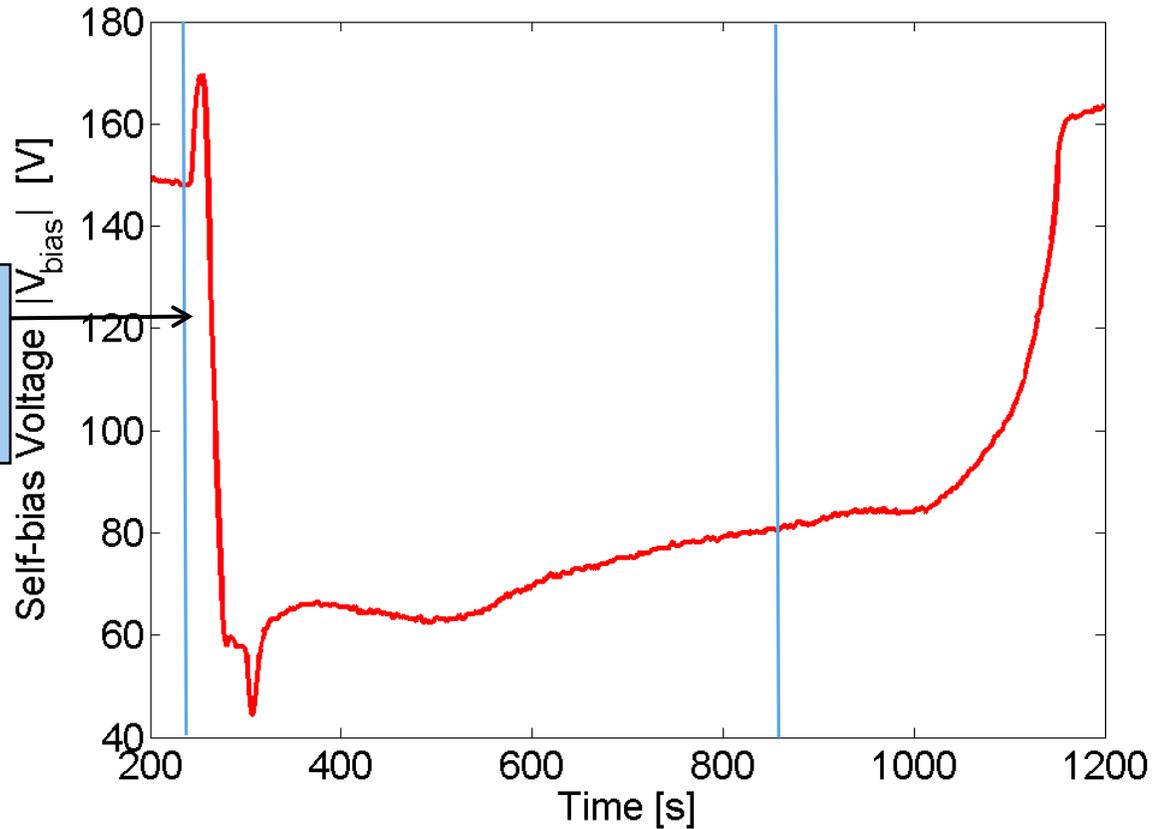
t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



Dust particles formation

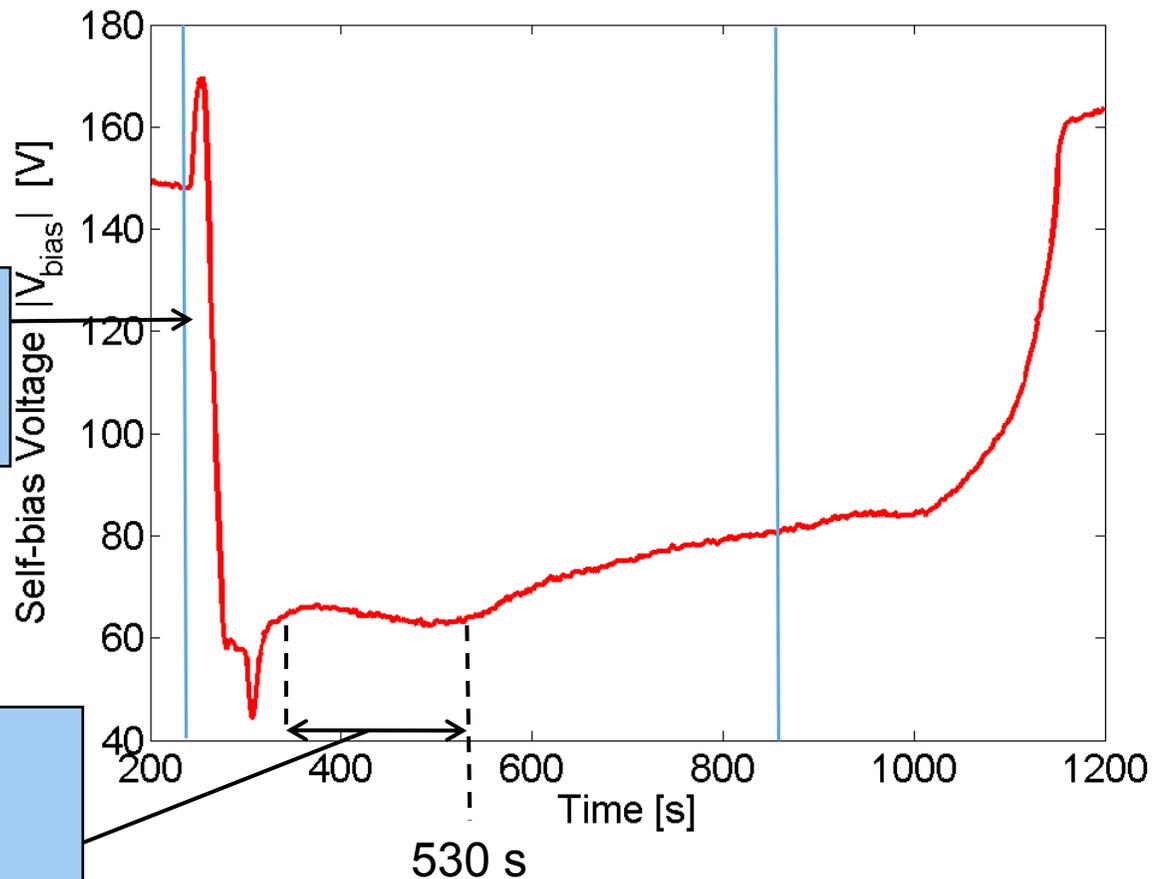


Collection of electrons

Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



I

Dust particles formation



Collection of electrons

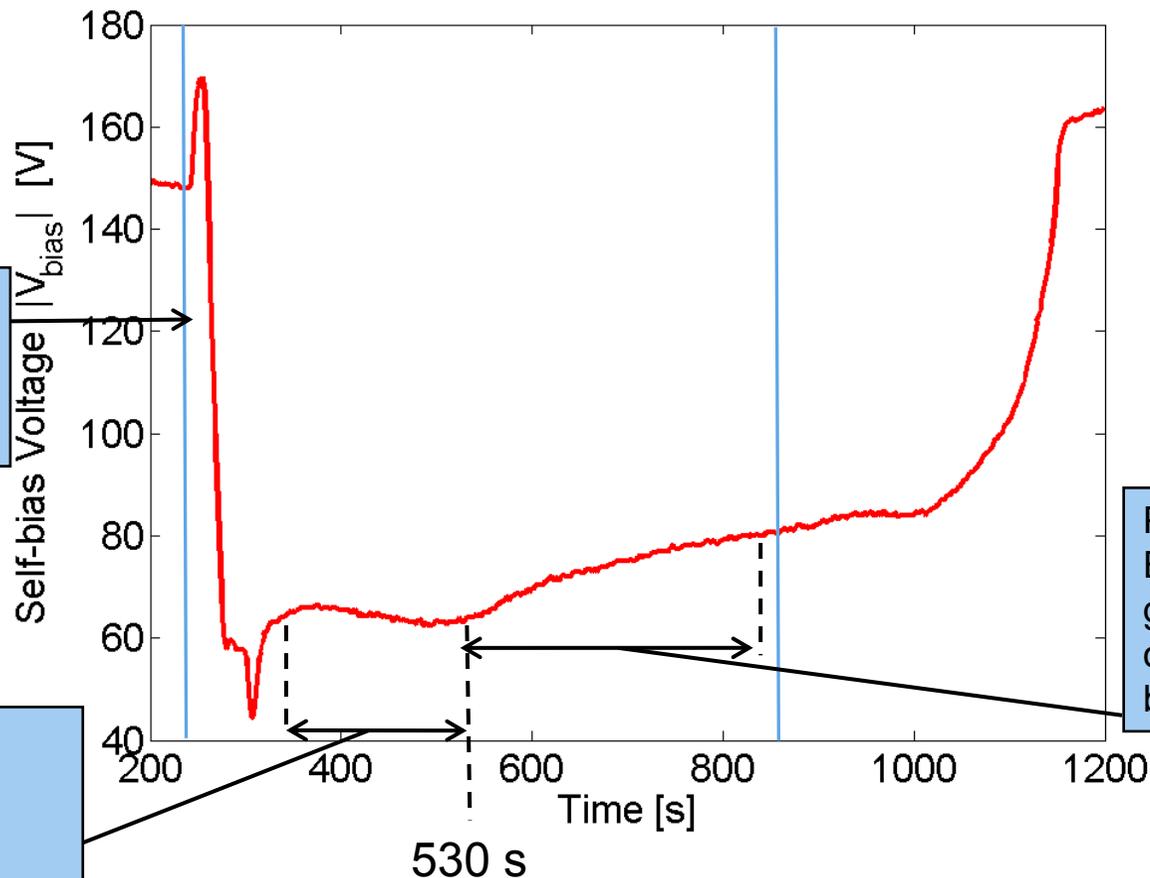
II

Formation of large agglomerates through agglomeration between little particles

Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



I

Dust particles formation



Collection of electrons

II

Formation of large agglomerates through agglomeration between little particles

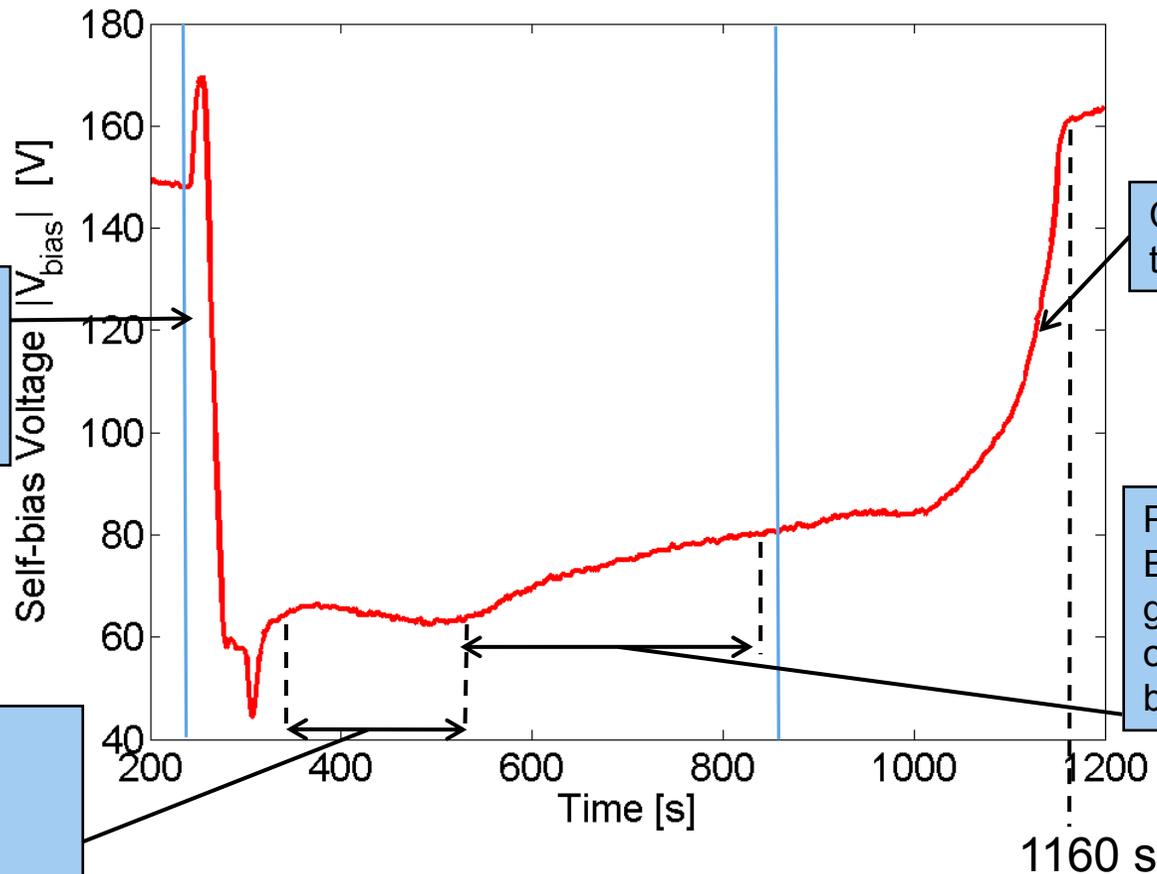
III

Particles losses:
Electrostatic force and gravity force are responsible of particles release from the bulk plasma

Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



I

Dust particles formation



Collection of electrons

II

Formation of large agglomerates through agglomeration between little particles

IV

Collection of particles by the cold area

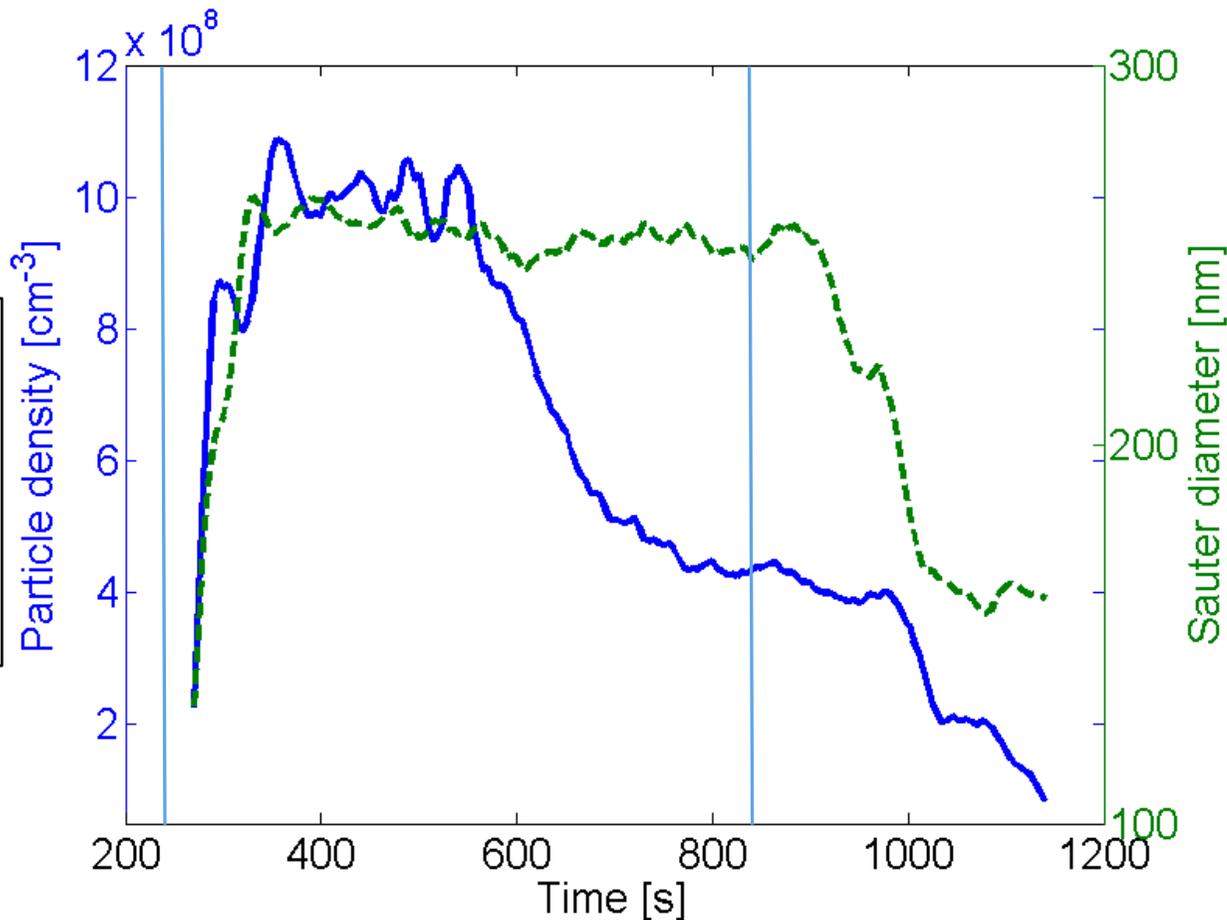
III

Particles losses:
Electrostatic force and gravity force are responsible of particles release from the bulk plasma

Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



Particle density :

$$N_{tot} = \sum_i N_i$$

Sauter diameter:

$$d_{Sauter} = \frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum_i N_i d_i^2}$$

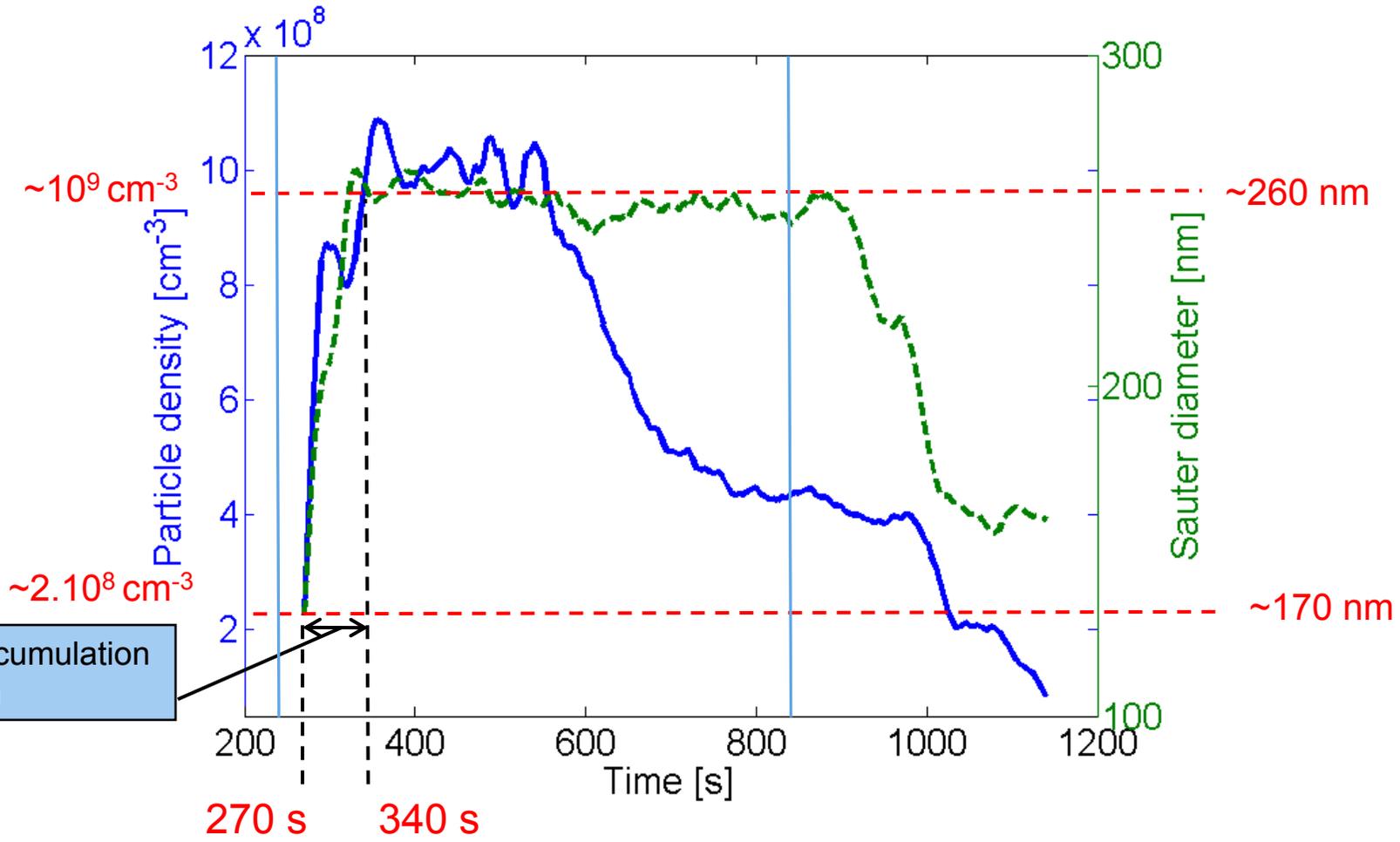
Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



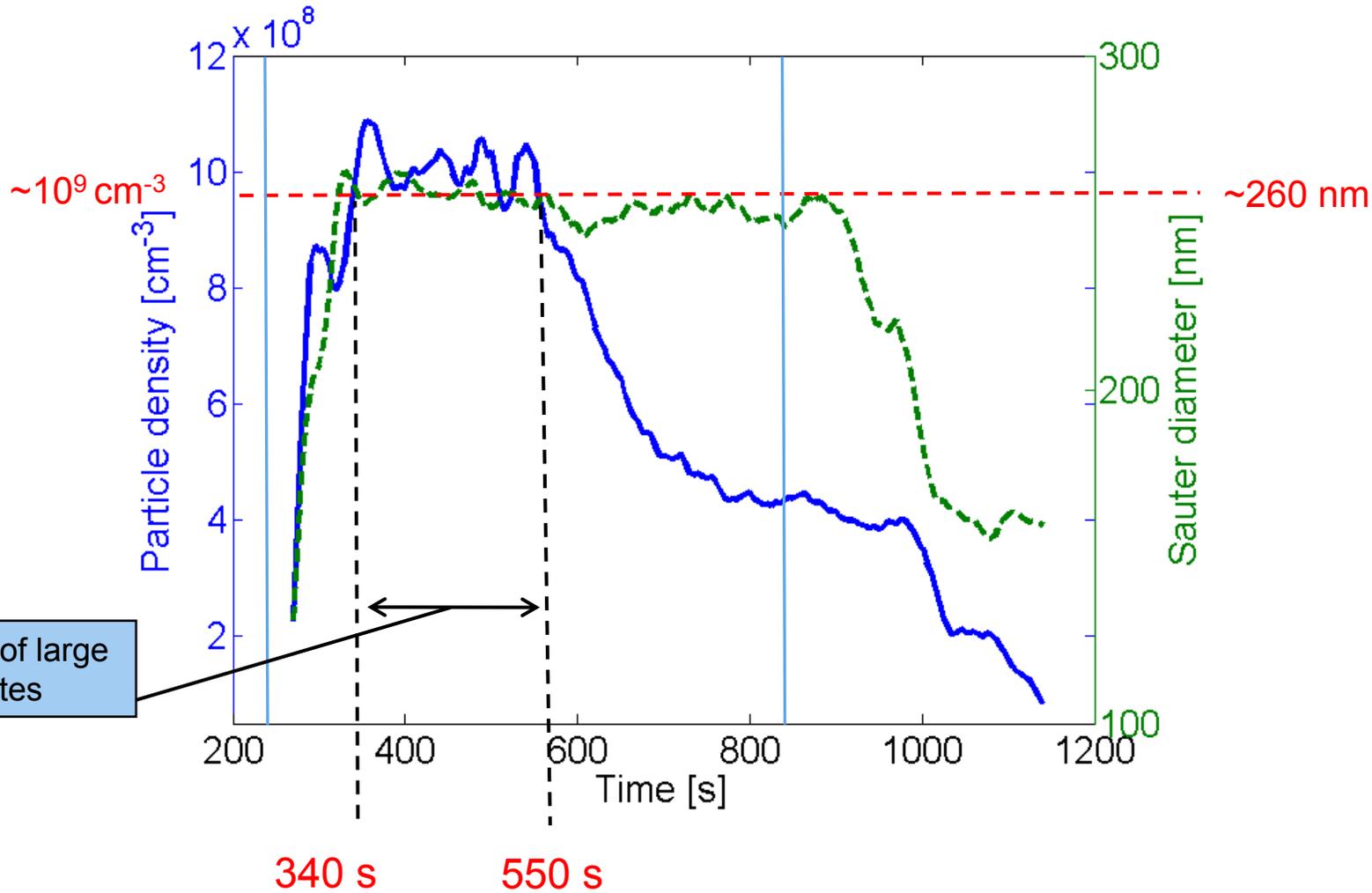
Particle accumulation and growth



Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion

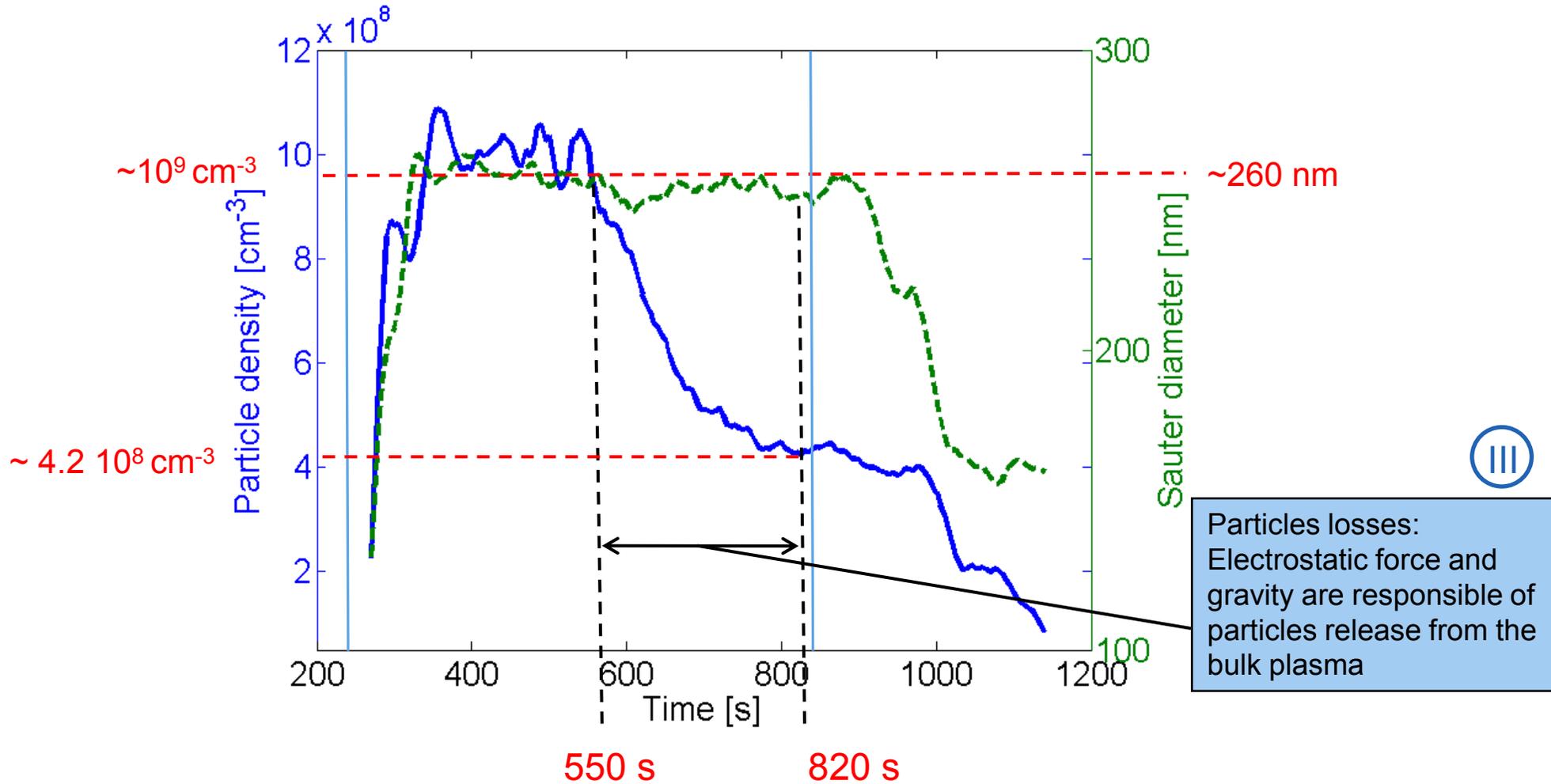


Formation of large agglomerates

Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

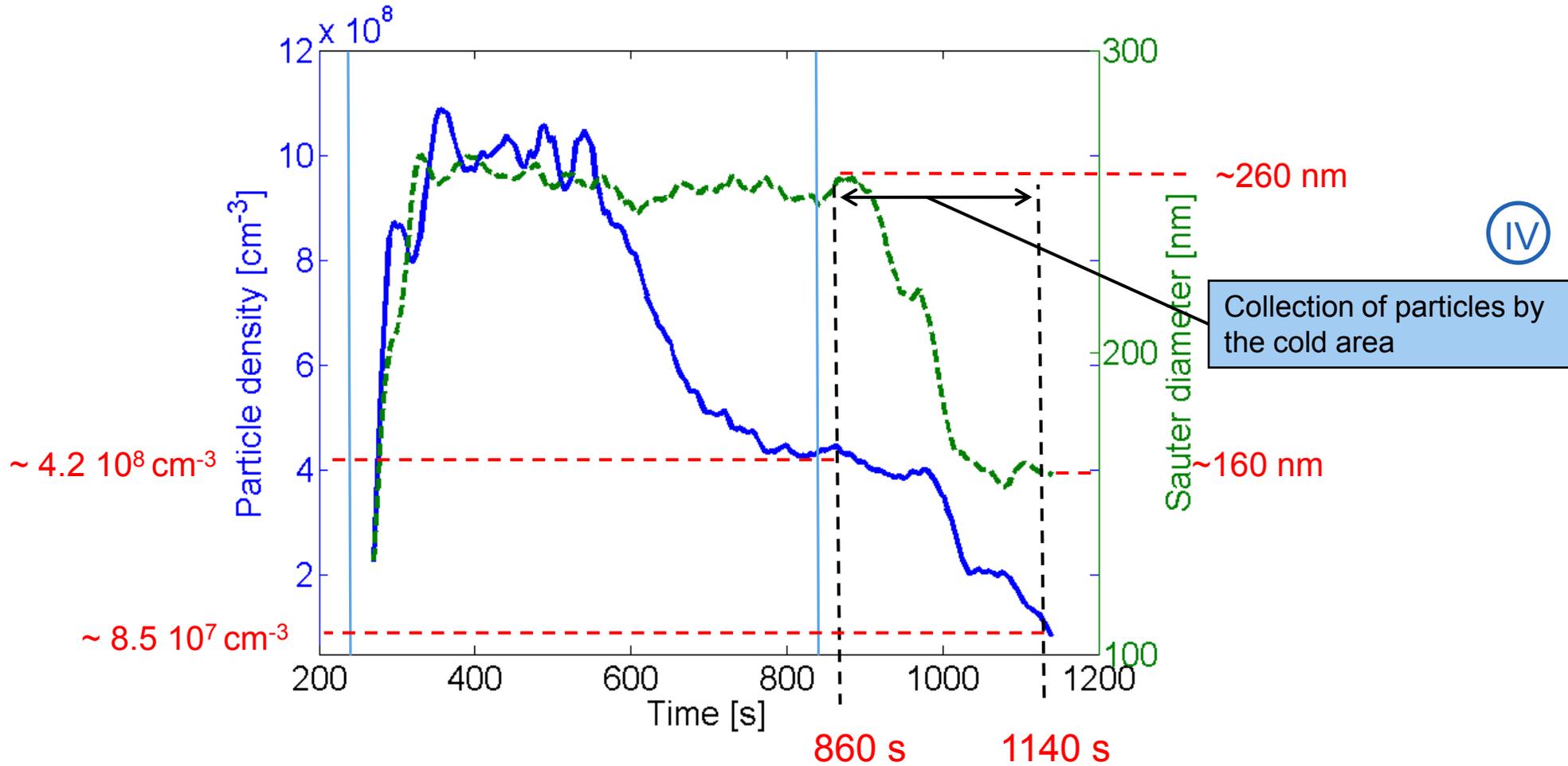
t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



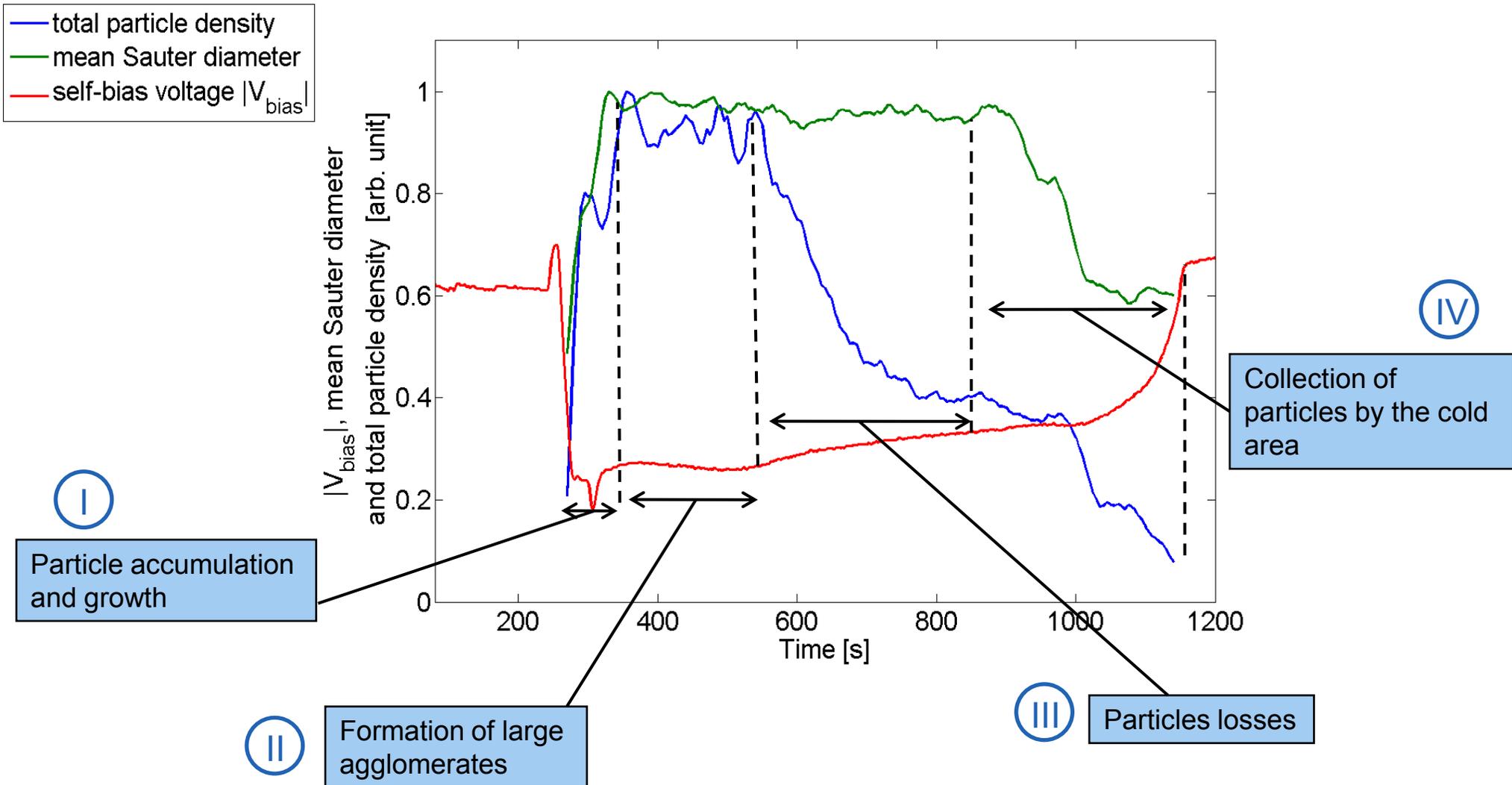
Résultats expérimentaux

t=240 s :
Acetylene injection

t=840 s :
Liquid nitrogen insertion



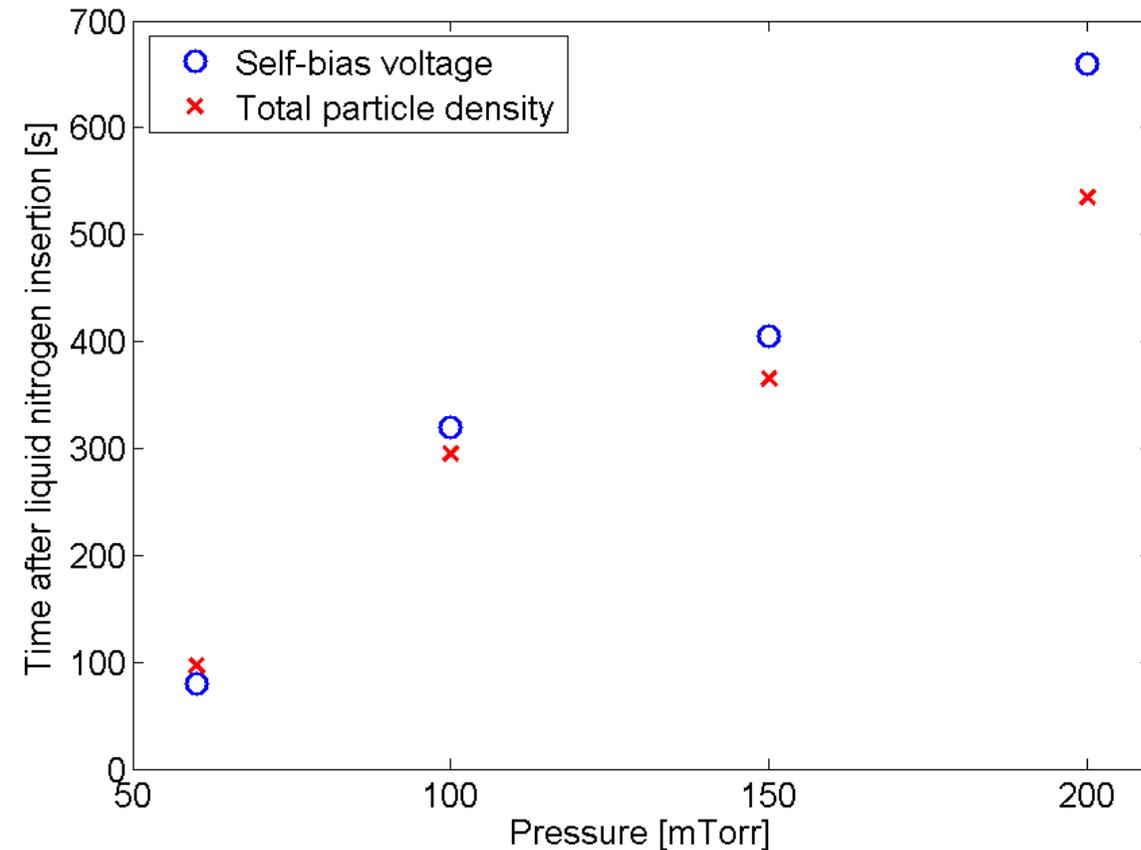
Résultats expérimentaux



Résultats expérimentaux: effet de la pression

Temps nécessaire après l'injection d'azote liquide pour :

- la tension bias pour retrouver sa valeur initiale
- la densité de particule pour atteindre 5% de sa valeur maximale



$P \nearrow$

 + difficile de collecter les particules

mais thermophorèse indépendante de pression

 { Force de résistance des neutres \nearrow
Force électrostatique \searrow

Conclusion and perspectives

- ✓ Force de thermophorèse → bon moyen pour extraire les particules de la décharge
 - ✓ Utile pour des applications industrielles
 - éviter la contamination des objets produits par procédé plasma
 - Diagnostic de transmittance permet de remonter (au – qualitativement) aux évolutions en taille et en densité des particules
- MAIS : - apparition de tailles erronées de particules
- sous-estimation de la densité des particules



Merci pour votre attention

This work, supported by the European Community under the contract of Association between EURATOM, CEA, and the French Research Federation for fusion studies, was carried out within the framework of the European Fusion Development Agreement. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission. Financial support was also received from the French National Research Agency through contract ANR-08-JCJC-0068-01.