



Création et nucléation de bulles lors de la fusion de verre issu de calcin

Damien Boloré
Franck Pigeonneau

Surface du Verre et Interfaces
Saint-Gobain Recherche
Aubervilliers



UTILISATION DE CALCIN

Situation actuelle :

25% pour la production de verre plat

70% pour la production de bouteilles

Avantages

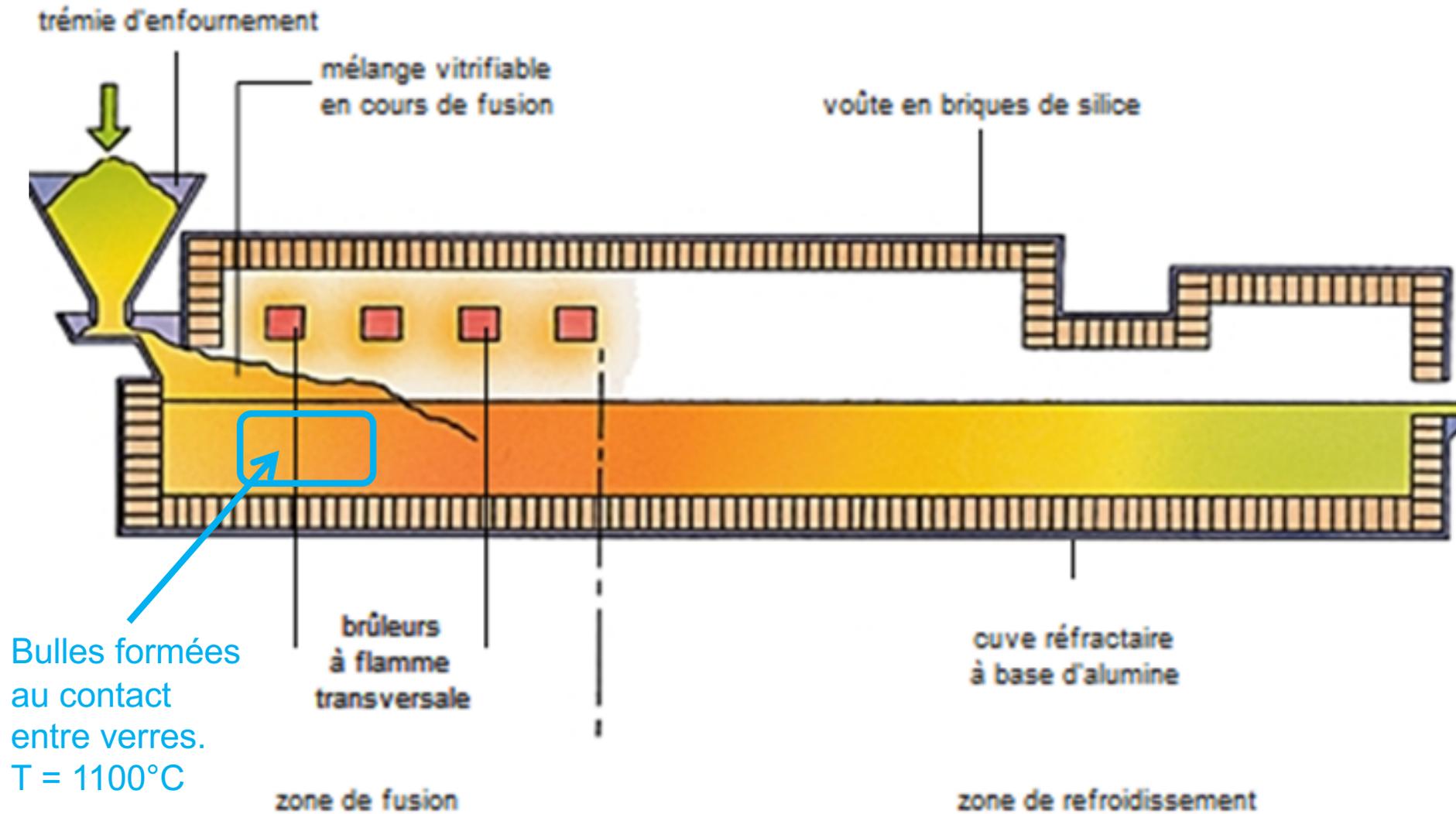
Economie de matières premières

Economie d'énergie

Homogénéisation facilitée

Faible émission de dioxyde de carbone

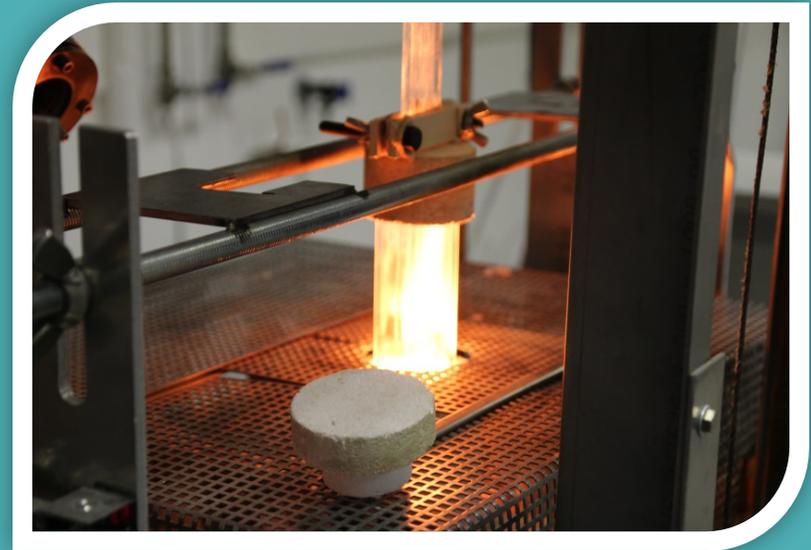
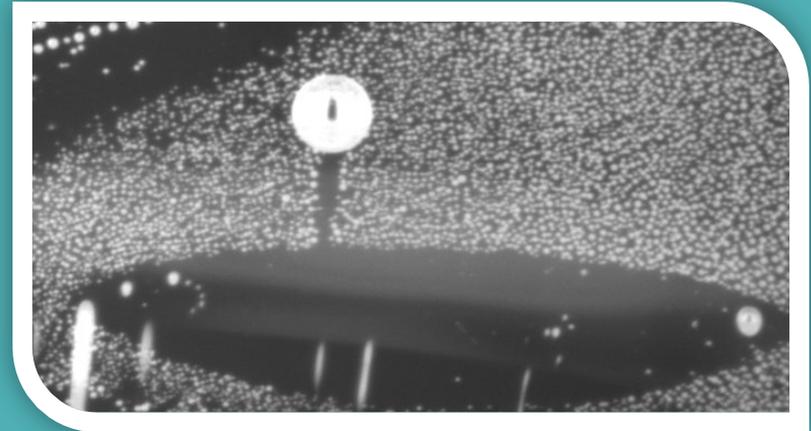




Four à bassin dans *Dictionnaire Larousse en ligne*

Effet de la face étain du verre floaté sur la nucléation de bulles

- Observations.
- Répartition spatiale des bulles nucléées.
- Effet de l'étain sur la surface du verre et lien avec la nucléation



STRUCTURE D'UNE FEUILLE DE VERRE PLAT

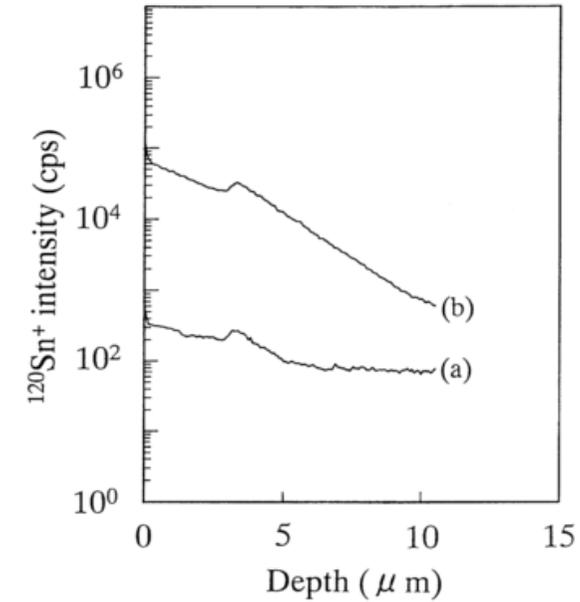
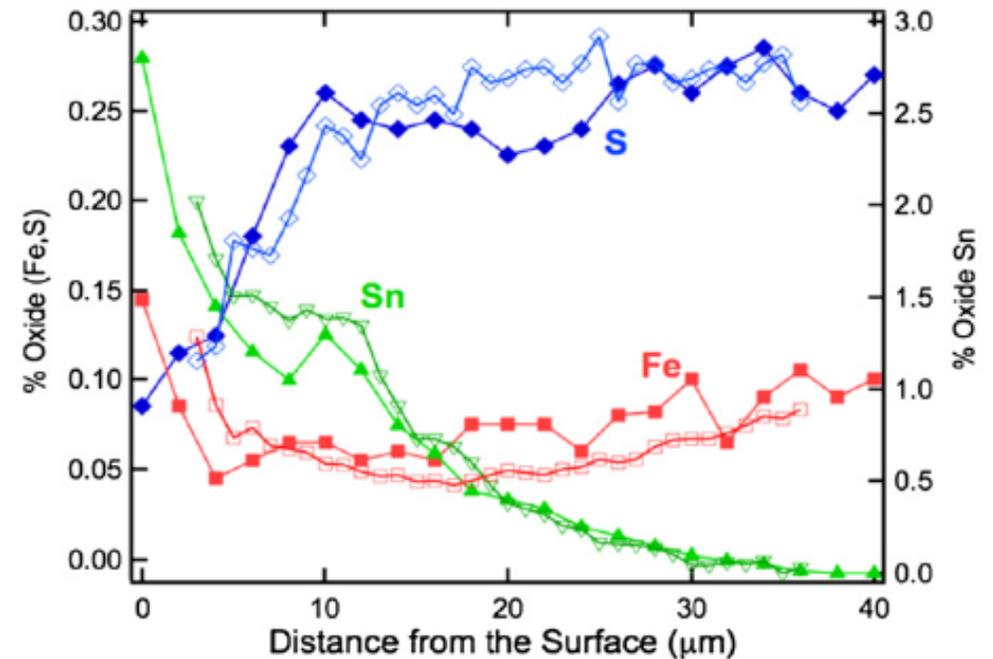


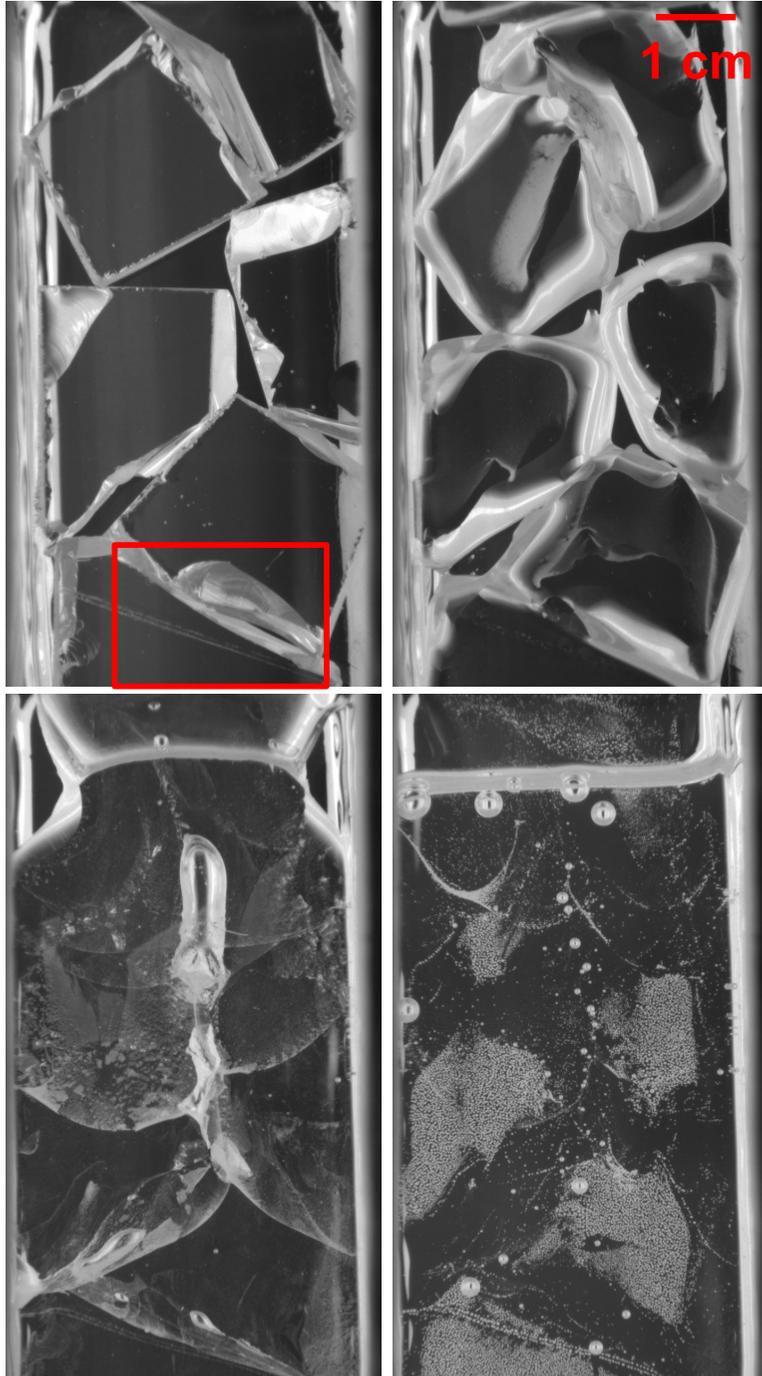
Fig. 1. SIMS depth profiles of tin from the top (a) and bottom faces (b) of commercial float glass with a thickness of 2 mm.

S^{2-} / S^{6+}	S^{6+}
Sn^{2+}	Sn^{4+}
Fe^{2+}	Fe^{3+}

Hayashi et al., JNCS 282 (2001) 188
 Flank et al., JNCS 357 (2011) 3200

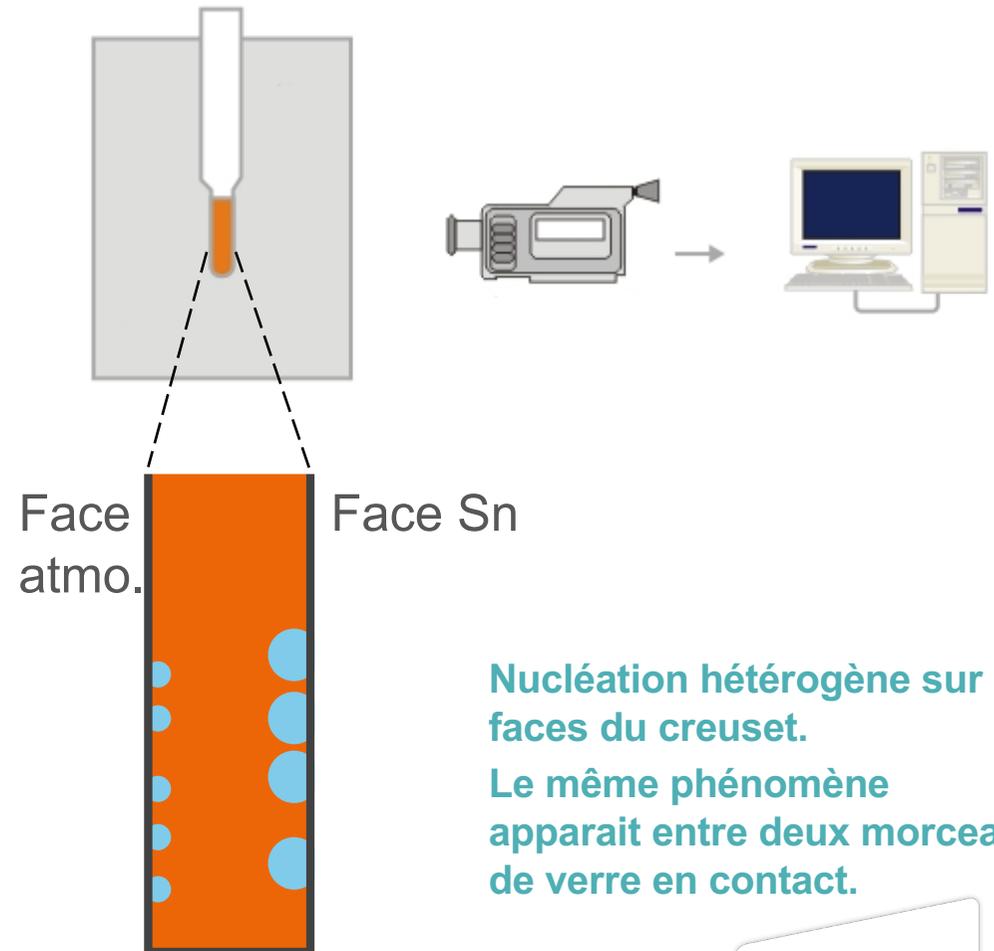


FUSION EN FOUR A HUBLOT



Morceaux de verre à vitre (PLX) dans un creuset en silice inséré dans un four à hublot.

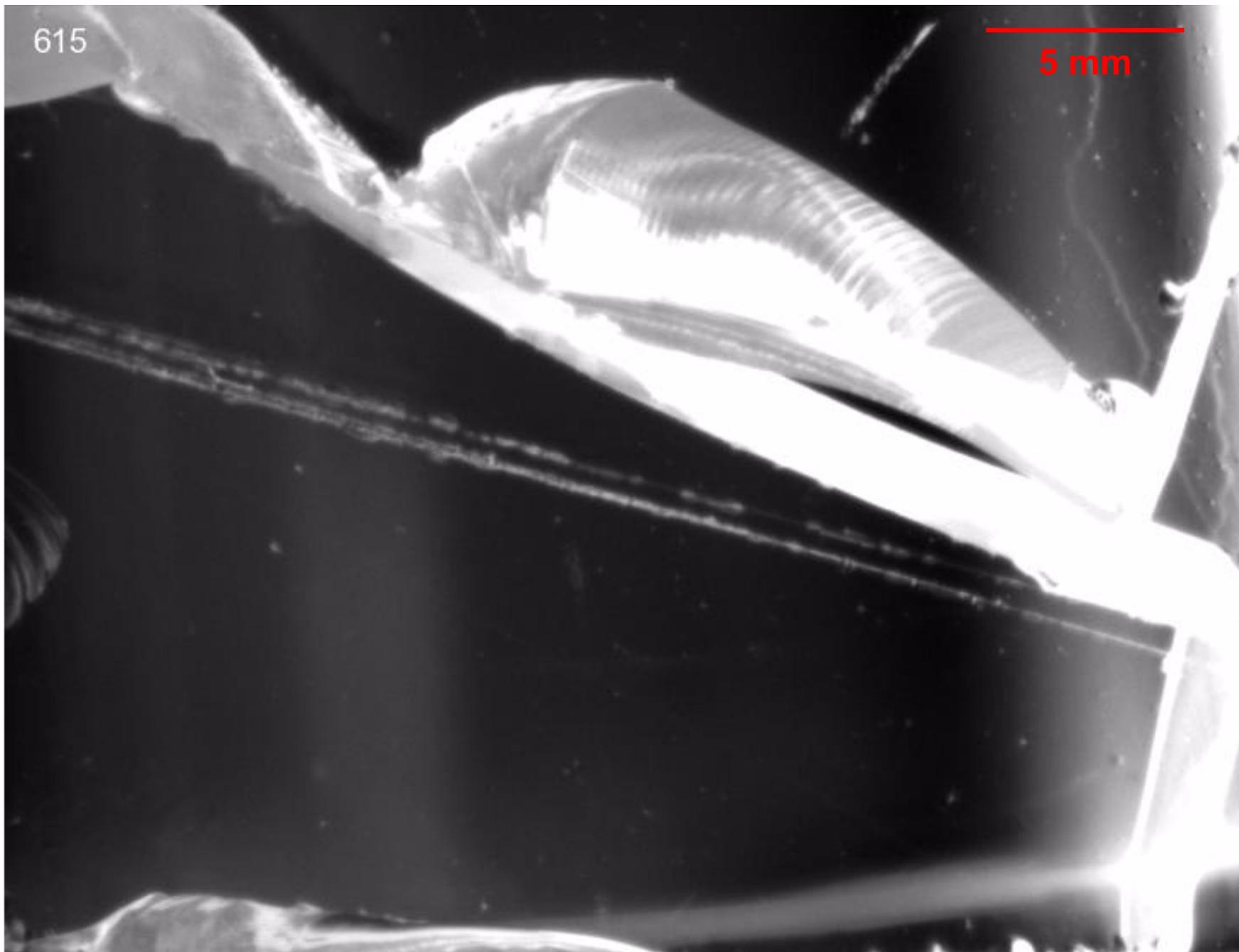
Durée réelle : 3 heures.

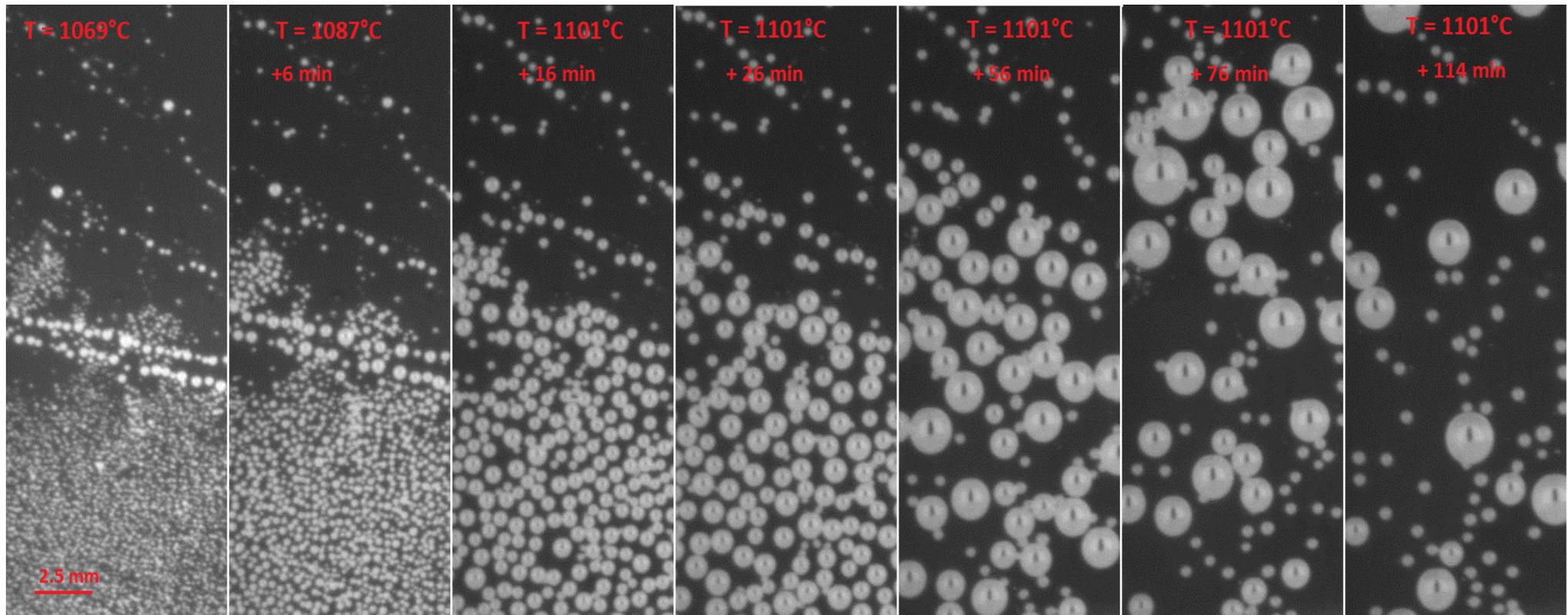


Nucléation hétérogène sur les faces du creuset.

Le même phénomène apparaît entre deux morceaux de verre en contact.

FUSION EN FOUR À HUBLLOT





- **Densité de bulles sur la face atmosphère à 1060°C : ~ 40 bulles/ cm^2**

Cette valeur reste constante au cours de l'expérience.

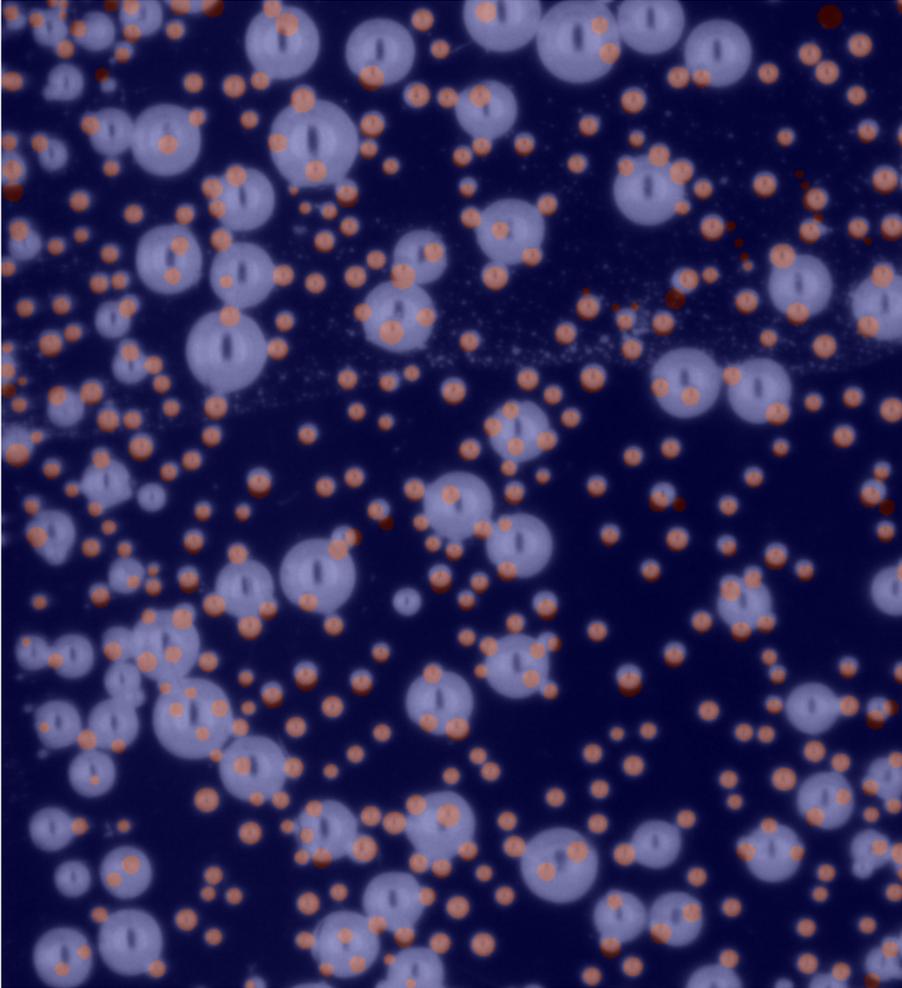
- **Densité de bulles sur la face Sn à 1060°C : ~ 4000 bulles/ cm^2**

A cause de la coalescence, cette valeur décroît de manière exponentielle au cours du temps.

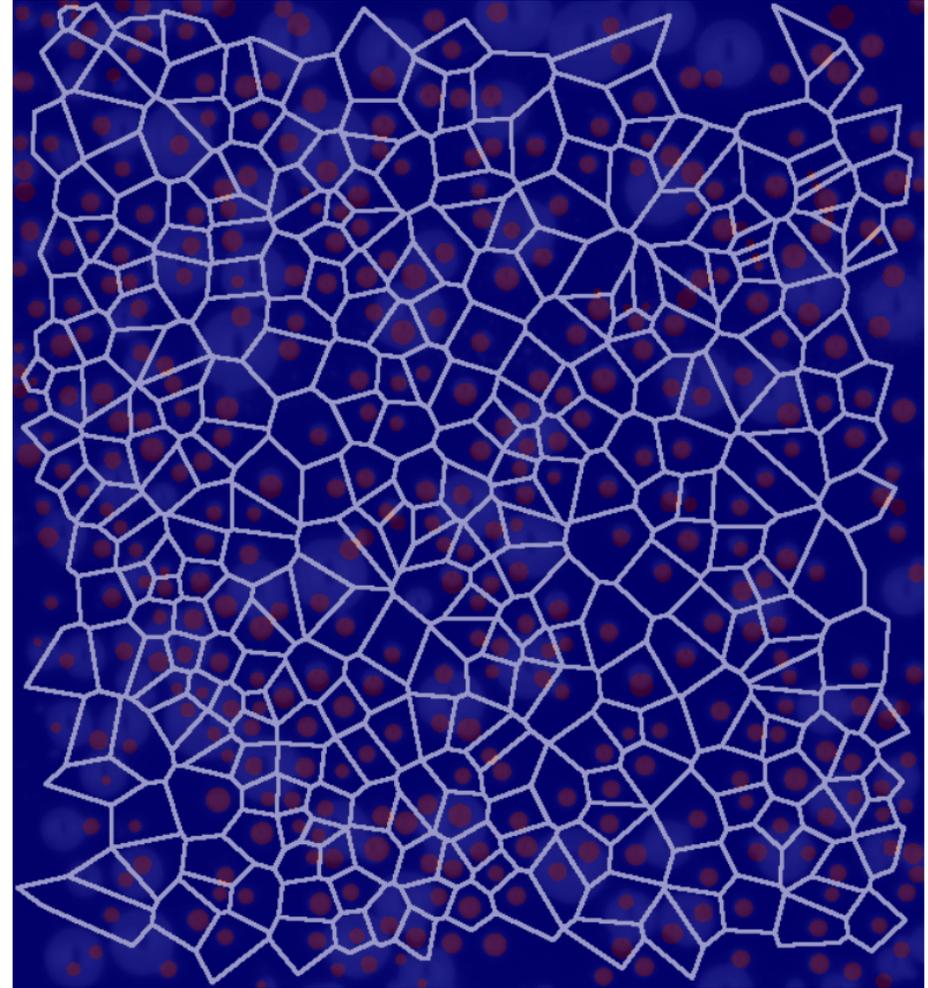
Sur la face Sn, quelle était la densité initiale de bulles lors de la nucléation?

ÉTUDE DE LA LOCALISATION SPATIALE DES BULLES : DIAGRAMME DE VORONOÏ

Detection of isolated bubbles

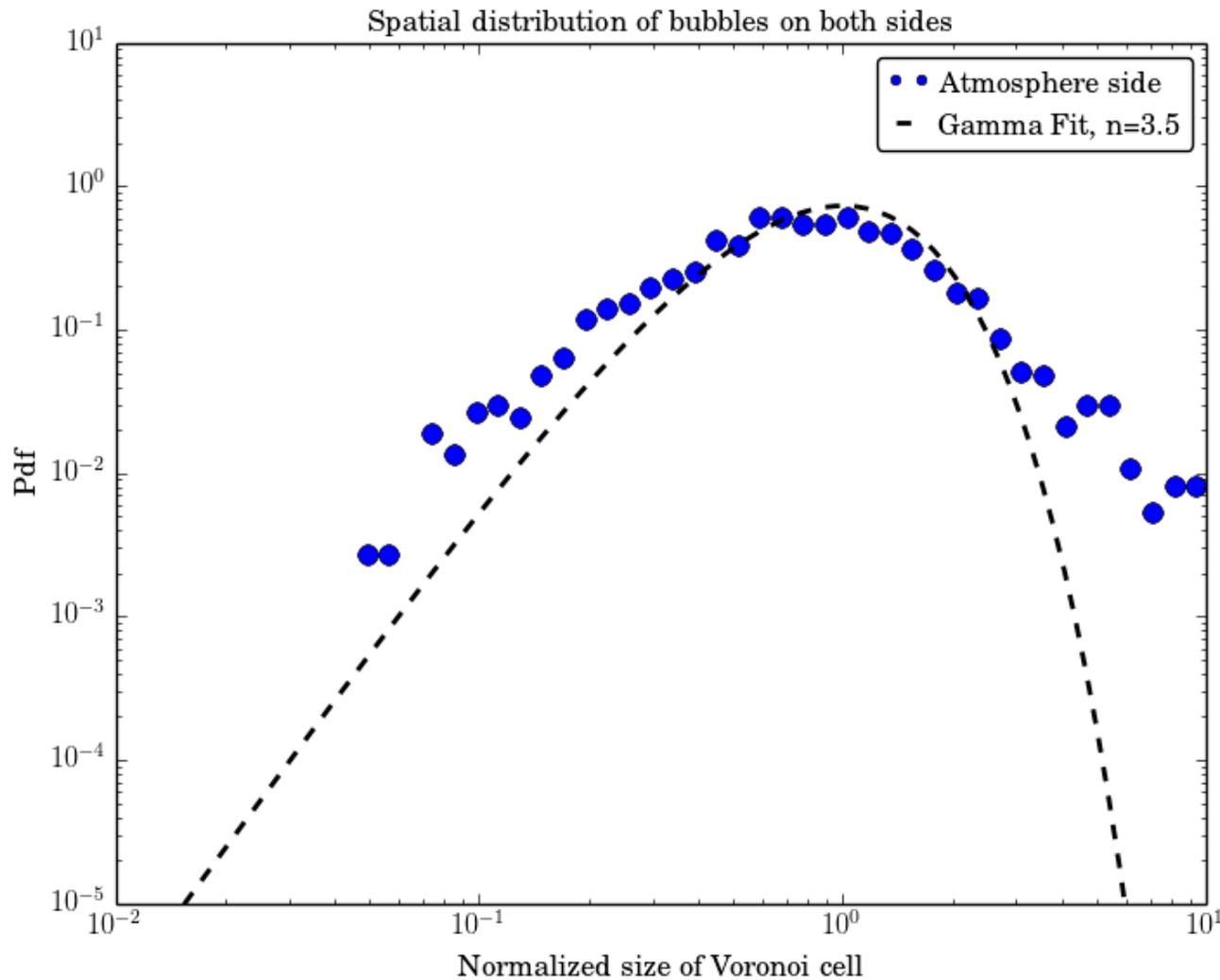


Voronoi Tessellation

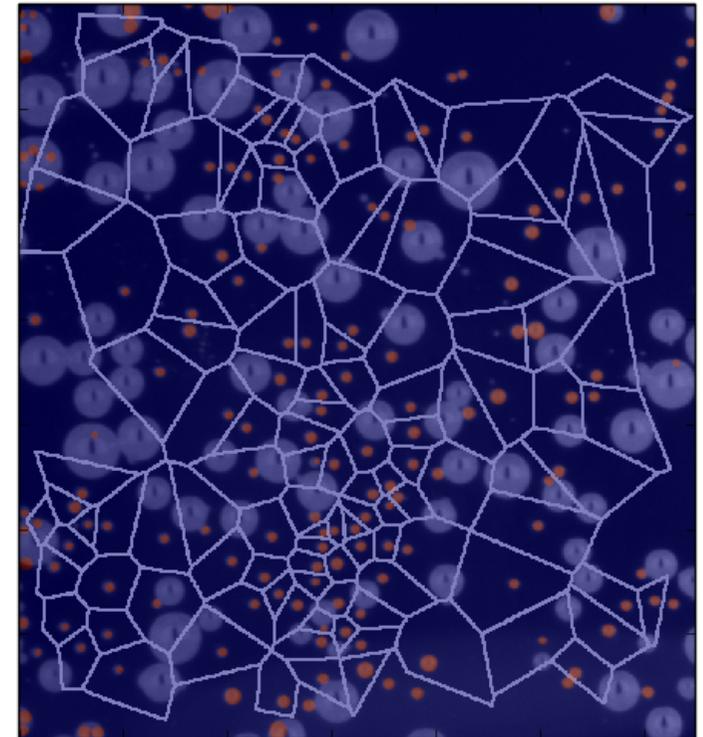


Une cellule de Voronoï est la « zone d'influence » de la bulle qu'elle contient.
Le diagramme de Voronoï permet une mesure de la densité locale de nuclei.

COMPARAISON DES DISTRIBUTIONS THÉORIQUE ET MESURÉE



1 mm

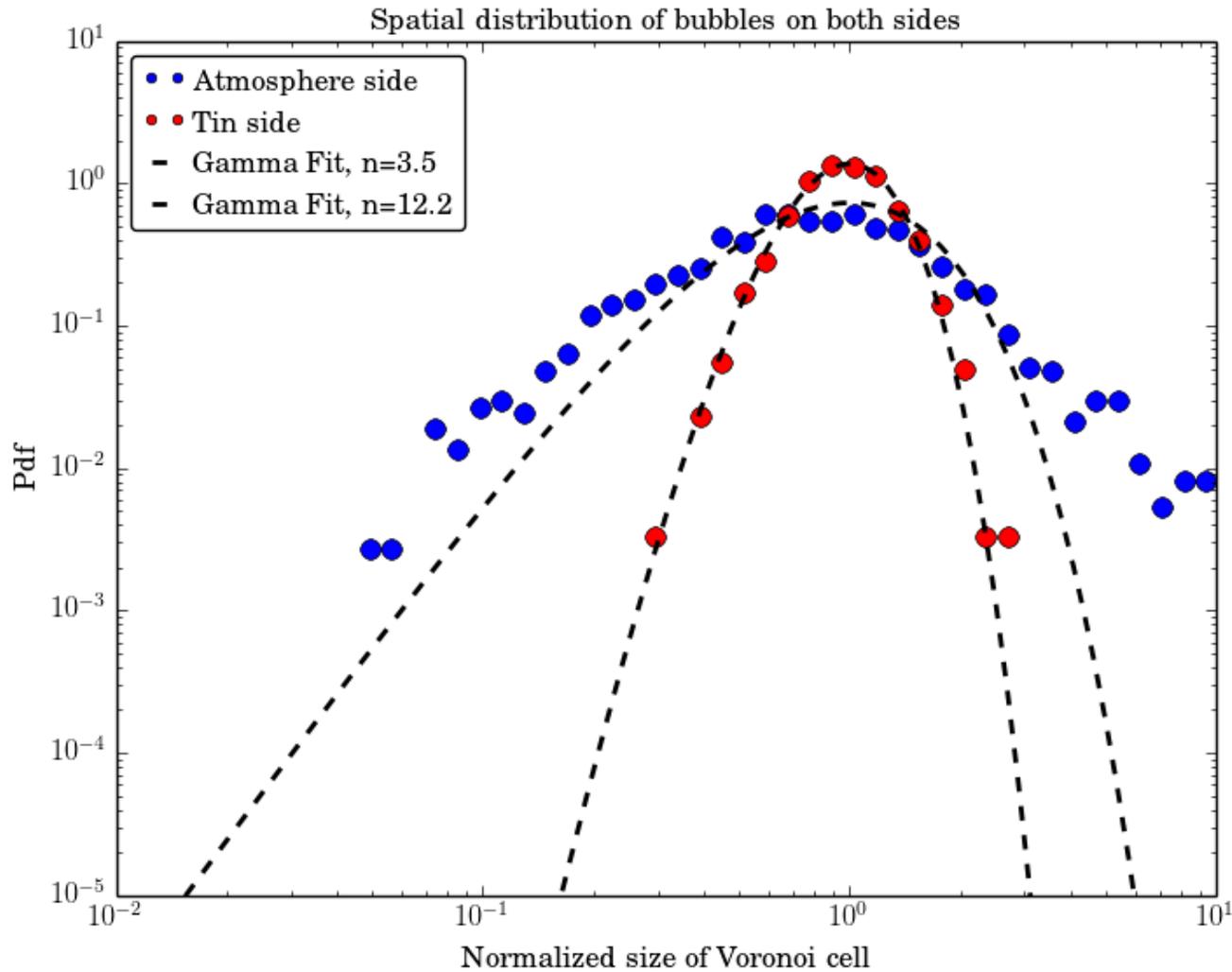


Pour une répartition aléatoire, la distribution des tailles normalisées de cellules suit

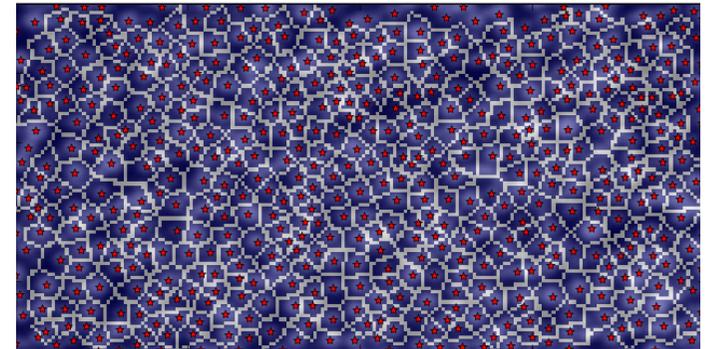
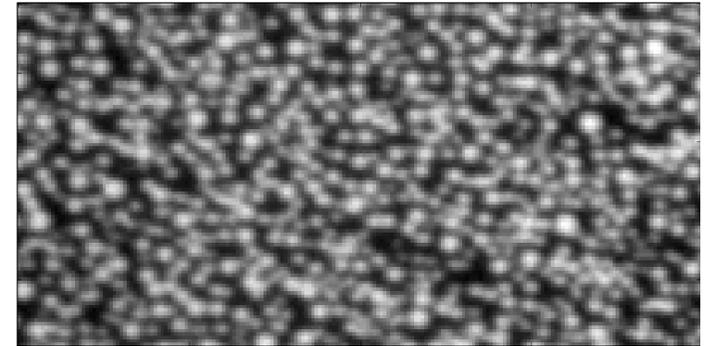
une loi théorique : $\Gamma(x, n) = \frac{n^n}{\Gamma(n)} x^{n-1} \exp(-nx)$, avec $n = 3,5$

Ferenc & Néda, Physica A (2007)

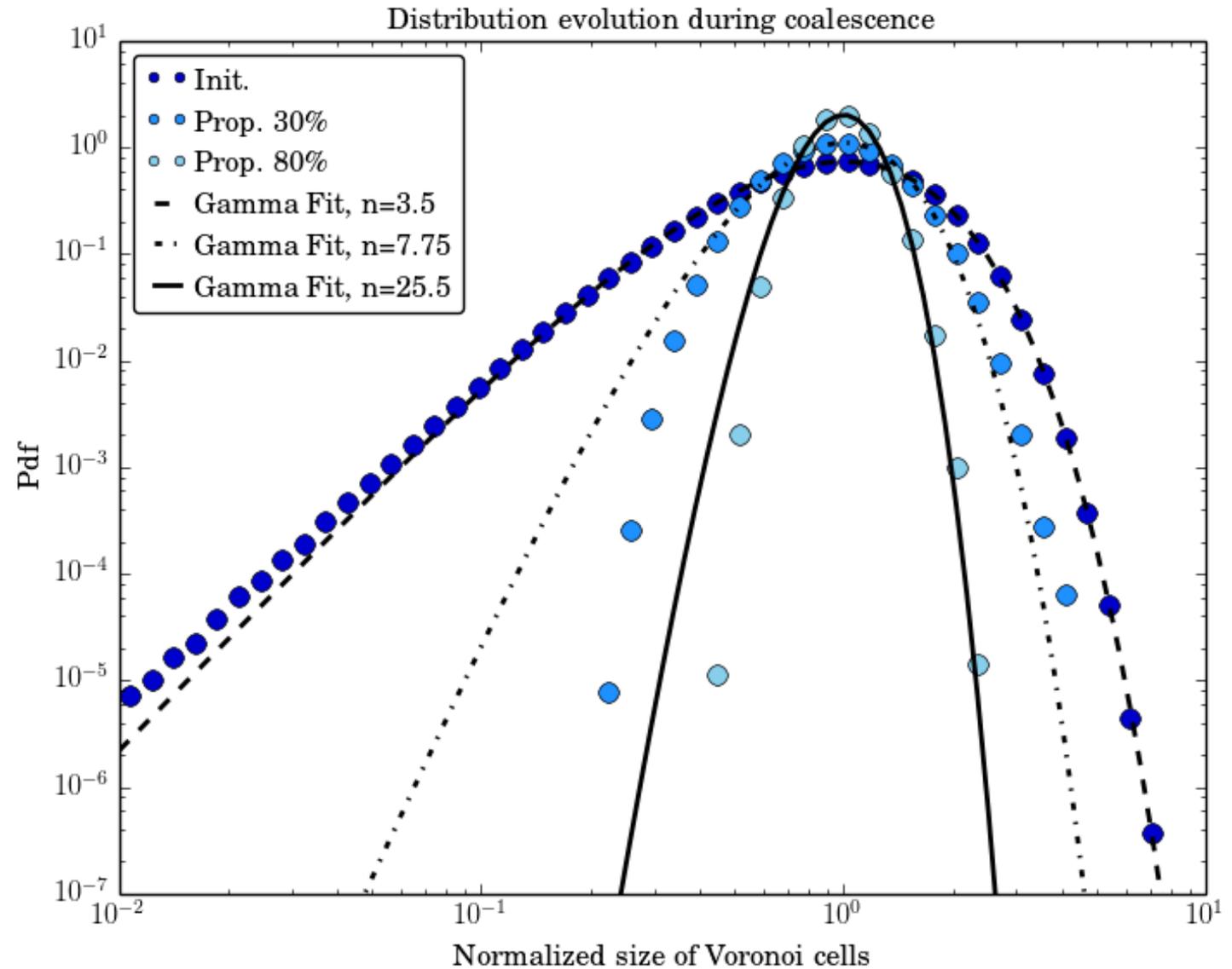
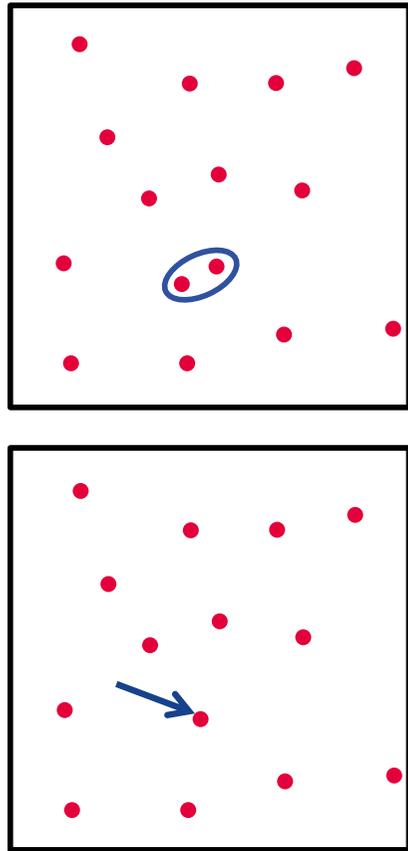
COMPARAISON DES DISTRIBUTIONS THÉORIQUE ET MESURÉE



1 mm



Sur la face Sn, la distribution des tailles normalisées des cellules de Voronoï est piquée autour de la moyenne.



Au cours du processus de coalescence, la distribution de tailles des cellules est resserrée autour de la moyenne.

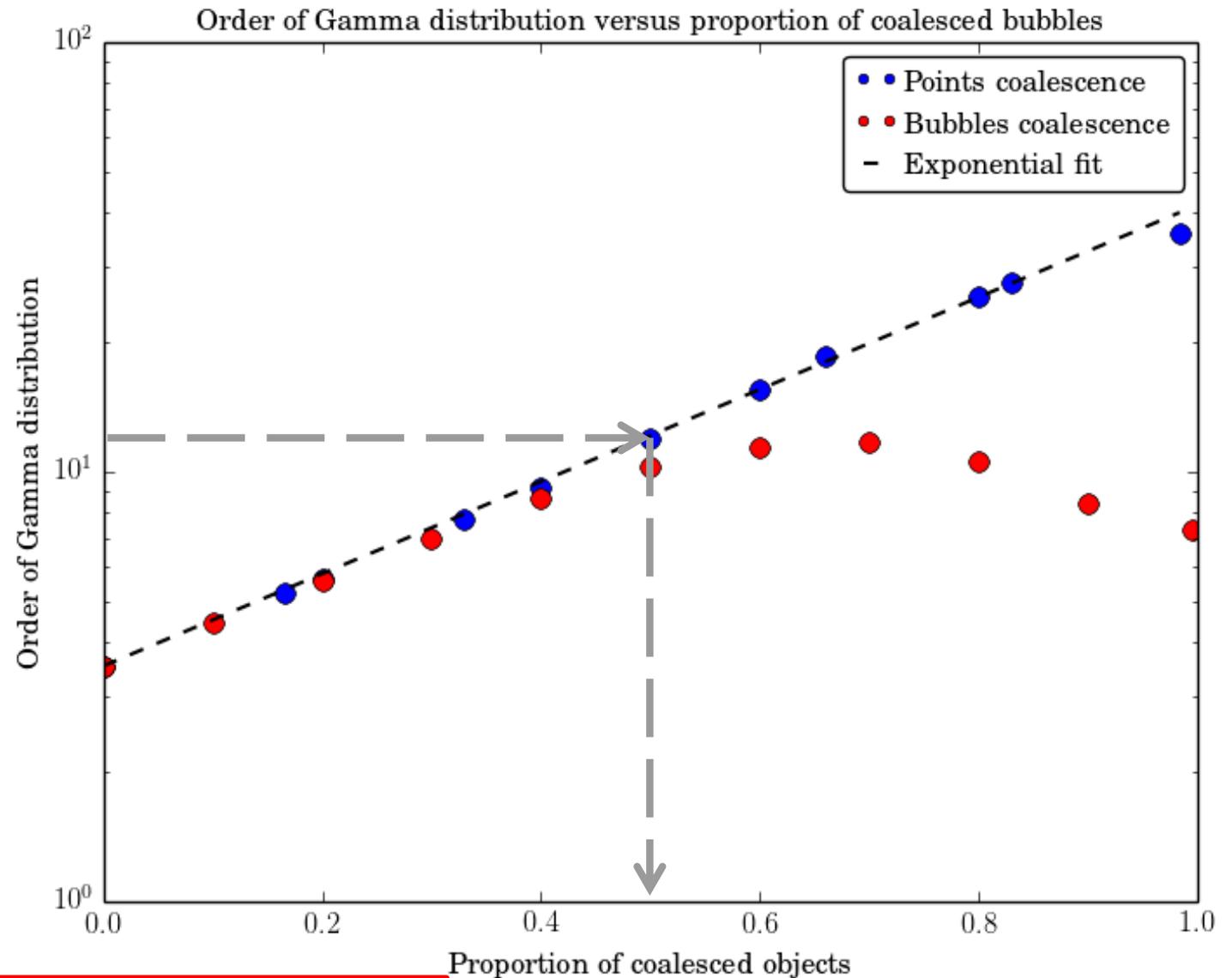
ÉVOLUTION DU PARAMÈTRE D'ORDRE DE LA DISTRIBUTION GAMMA

Evolution exponentielle du paramètre de la fonction gamma (n) en fonction de la proportion d'objets ayant coalescé :

$$n = n_0 \exp(\alpha \cdot x)$$

Paramètre d'ordre sur la face Sn : 12,2 .

Ceci correspond à une situation où la moitié des bulles aurait coalescé.

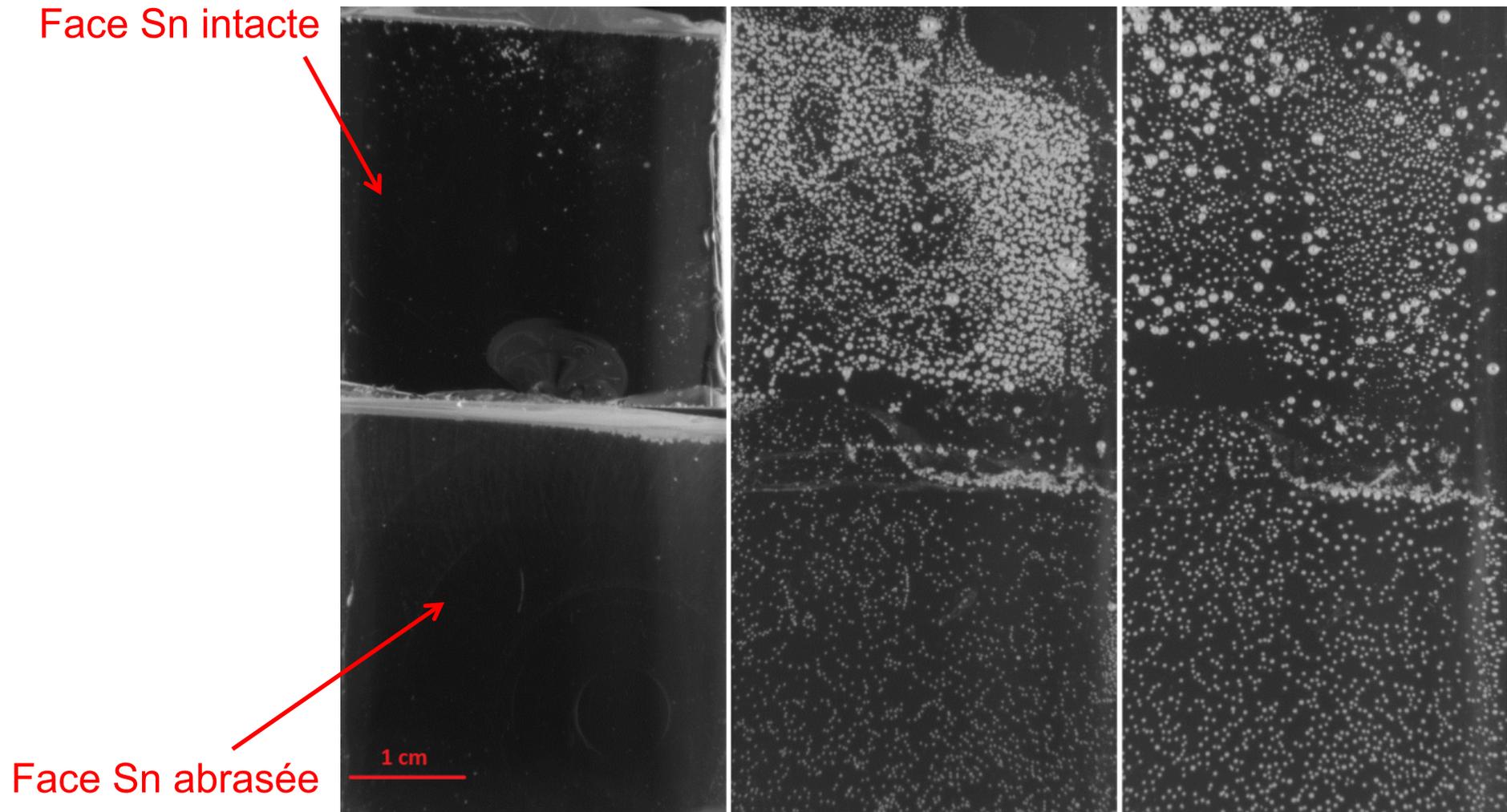


Densités initiales de nuclei :

Sur la face atmosphère : 40 nuclei/cm²

Sur la face Sn : 8000 nuclei/cm²

INFLUENCE DE LA FACE ÉTAIN DU VERRE À VITRE



- Les densités de bulles mesurées sur la face Sn et sur la face atmosphère sont très différentes : 2 ordres de grandeur entre les deux faces.
- Au premier ordre, la répartition des bulles sur la face atmosphère est aléatoire.
- Il est possible de relier la répartition spatiale et la proportion de bulles déjà coalescées.
- La répartition des bulles sur la face Sn correspond à une répartition aléatoire dont la moitié des bulles auraient coalescé.

- Relier les densités mesurées à une sursaturation en surface :

$$J_{nucl.} = K \exp\left\{-\frac{1}{kT} \left(U_{diff} + \frac{16\pi\sigma^3}{3p^2} \cdot \frac{(1 - \ln(c/c_0))^2}{\ln(c/c_0)^2} \right)\right\}$$

- Comprendre l'effet de l'introduction de Sn sur la nucléation :
 - Changement de solubilité des gaz dû à l'introduction de Sn dans le réseau silicaté
 - Présence d'espèces réduites (S^{2-} , Fe^{2+} , Sn^{2+}) qui auraient une influence sur la production de gaz

Merci de votre attention !

