

# Caractérisation et contrôle de la poussière de silice émise par des opérations de polissage à sec et humide lors de la transformation du granit (2010-0058)

Ali Bahloul, Abdelhakin Djebara, IRSST

Victor Songmene, Jules Kouam, Mohamed Nejib Saidi, ÉTS

Marcelo Reggio, Fernando Villalpando, École Polytechnique Montréal



Secteur de la fabrication de produits en granit et en matériaux composites contenant de la **silice cristalline**

Depuis 2002, de **25 à 30 cas par année** ont été acceptés par la CNESST, sauf pour l'année 2011 → **37 cas**, qui présente le nombre le plus élevé de cas depuis 1997

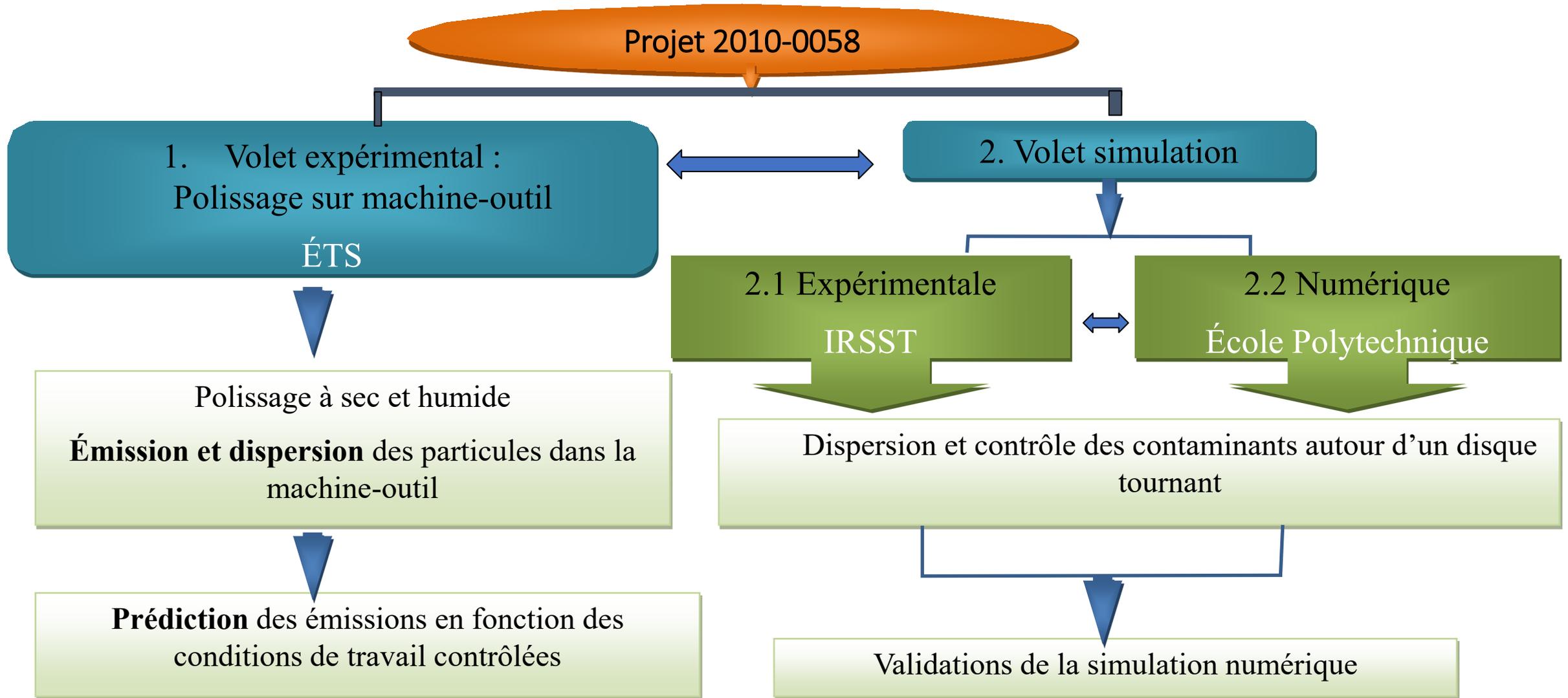
RSST : **VEMP = 0,1 mg/m<sup>3</sup>**; OSHA : **0,05 mg/m<sup>3</sup>** ACGIH : **0,025 mg/m<sup>3</sup>**

L'industrie du granit est essentiellement concentrée dans les régions de **l'Estrie et de Montréal**

En Estrie seulement, ce secteur compte environ une trentaine d'entreprises qui emploient près de **800 travailleurs**

Comprendre les mécanismes de génération et de dispersion des particules lors des opérations de polissage à sec ou par voie humide afin de mieux les contrôler :

- tant par le procédé industriel lui-même (vitesses du procédé à sec, quantité d'eau utilisée pour le procédé humide, etc.) (ÉTS)
- que par la ventilation (aspiration, soufflage, direction de l'écoulement, etc.) (IRSST ET POLY)



- **Procédé de polissage de granit manuel à sec**
- **Propriétés des granits à polir**
- **Dispositif expérimental de polissage à sec**

**Résultats :**

- ✓ **Émissions des PF et PUF**
- ✓ **Échantillonnage d'air (Laboratoire de l'IRSST – Méthode 206-02 )**
- ✓ **Optimisation des paramètres de polissage**
- ✓ **Caractérisation**
- ✓ **Dispersion des PF et PUF**
- ✓ **Taille du disque**

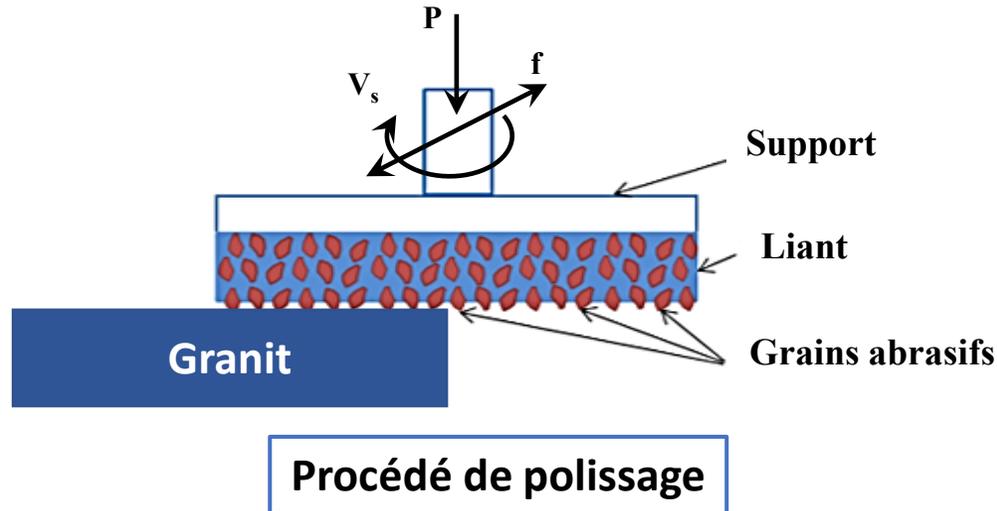
- **Dispositif expérimental de polissage avec lubrification**

**Résultats :** ✓ **Émissions des PF et PUF**

- **Récapitulation**

# Procédé de polissage de granit manuel à sec

**Objectif:** Surface de granit, lisse, brillante et réfléchissante



Polissage manuel

## Polissage manuel à sec

**P** : Pression (constante)

**$v_s$**  : Rotation (variable)

**f** : Avance (variable)

Grains abrasifs en **diamant**, oxyde d'aluminium ou carbure de silicium

**Granit** : peut contenir jusqu'à 60 % de quartz ( $\text{SiO}_2$ )

**Polissage manuel à sec :**

➔ **Problème d'exposition**

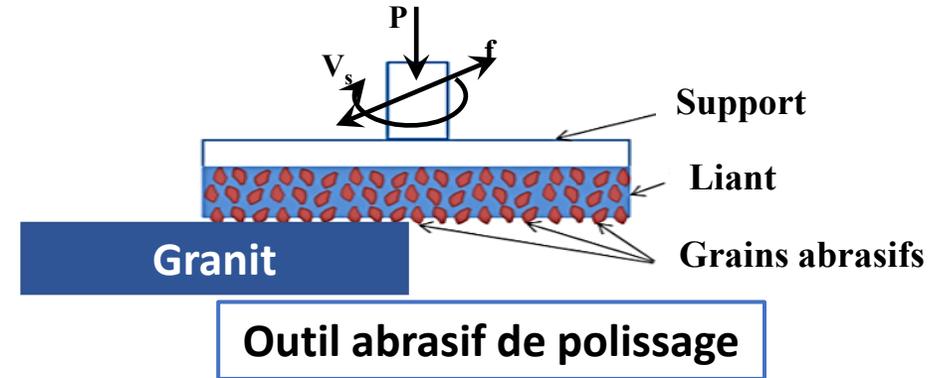
# Procédé de polissage de granit manuel à sec

## Processus de polissage : 7 étapes

Grade de grains abrasifs: #30 → #3000

Gros grain (2500 μm) → Grain fins (7 μm)

Ébauche → Finition

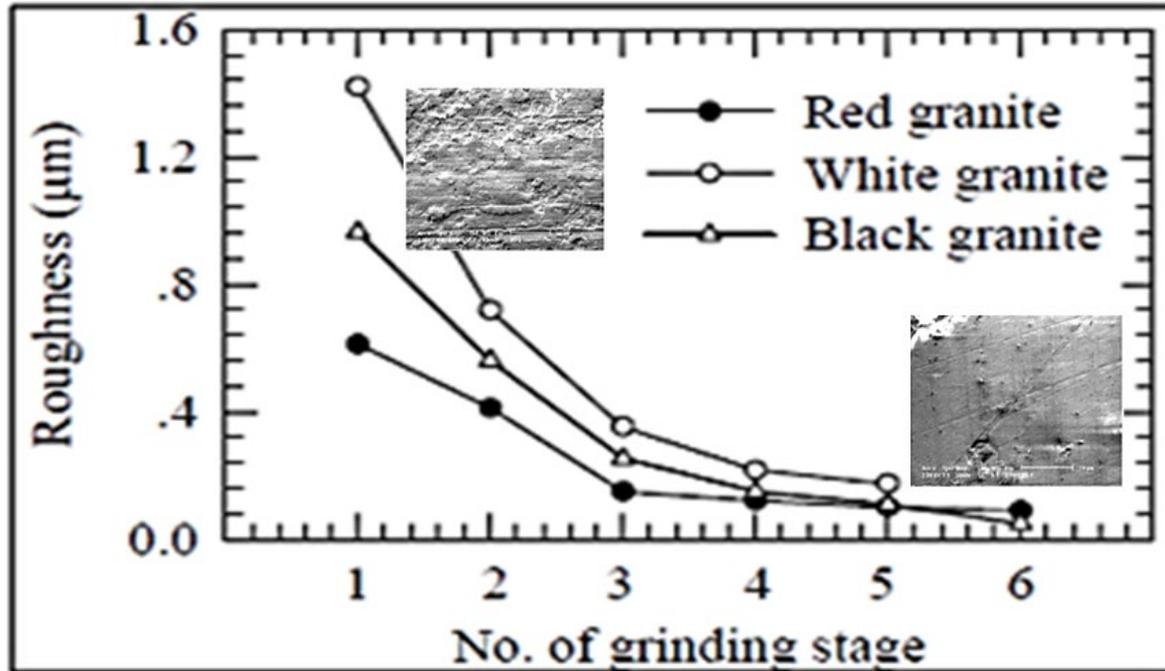


Gros grains	Grit Size	Description	2500 μm
Étapes de Polissage	36, 46, 50, 60	Plated Grit	7 μm
	80, 100, 120	Coarse Grit	
	150, 180, 220, 240	Medium Grit	
	320, 400, 500	Fine Grit	
Grains fins	600, 800, 1200, 1800, 2000	Micron Grit	

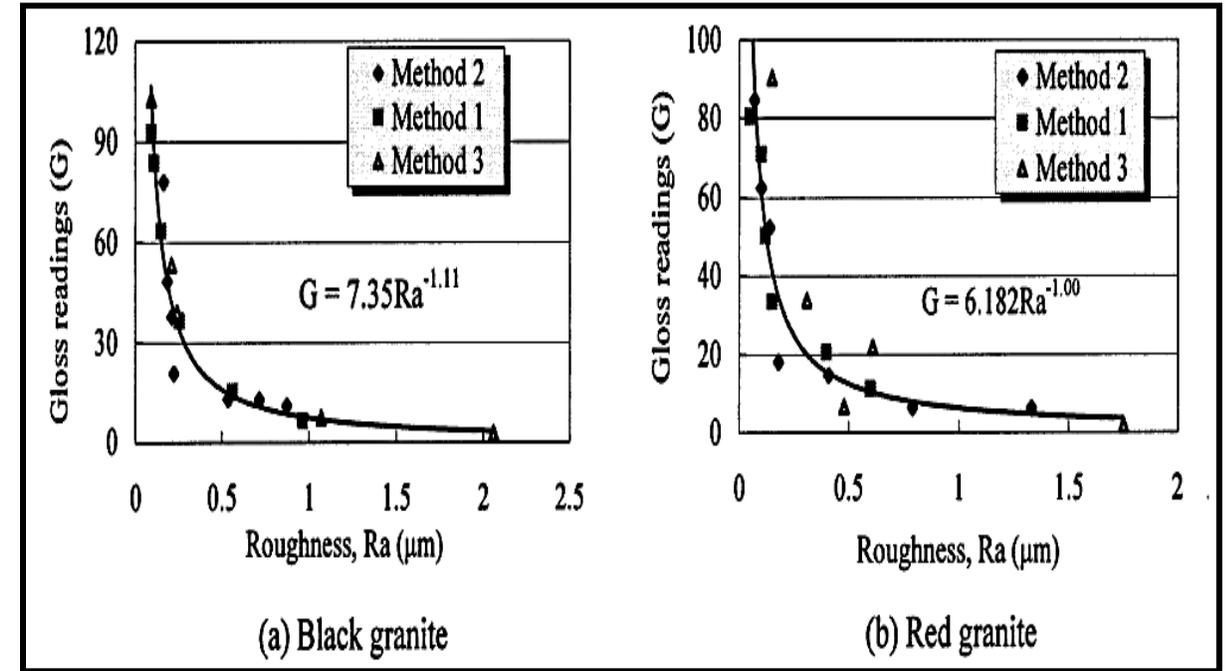
Classification des abrasifs selon le type de grain (UAMA, 2009)



Polissage manuel



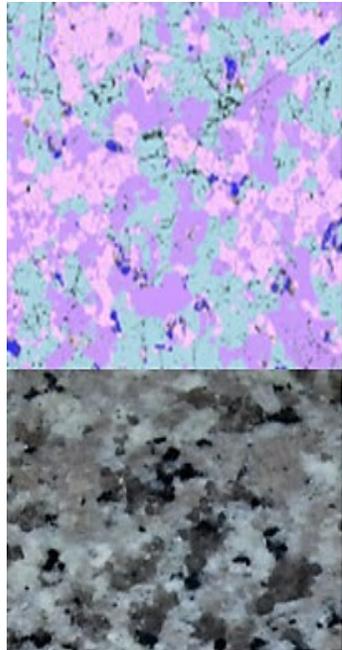
Variation de la rugosité lors du polissage  
(Xu *et al*, 2003)



Relation entre la rugosité et la brillance  
(Li *et al*, 2006)

## granit blanc

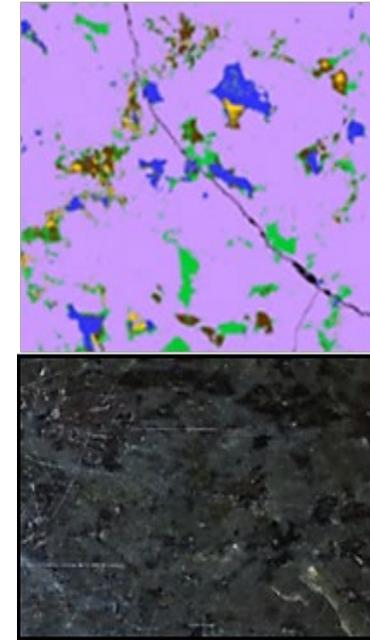
40 % SiO<sub>2</sub> et 50 % Si



Minéral	%	Taille	Texture
Quartz	40	1 à 5,5 mm	Agrégat granulaire, subautomorphe, fissuré
K-feldspath perthitique	38	0,5 à 7 mm	Subautomorphe, kaolinisé
Plagioclase	19	1 à 6 mm	Automorphe, zoné, ± saussurité
Albite	≤2	0,1 à 0,35 mm	Xénomorphe intergranulaire, en bordure du plagioclase
Biotite	2	0,4 à 2 mm	Paillettes intergranulaires
Chlorite	tr	0,5 mm	En altération de la biotite
Zircon	tr	≤0,12 mm	Automorphe
Apatite	tr	≤0,15 mm	Automorphe
Allante?	tr	0,02 à 0,4 mm	Prisme allongé orange, isotrope
Oxydes de fer ± titane	0,3	0,08 à 0,4 mm	Automorphe à xénomorphe
Sulfure	tr	0,2 mm	Xénomorphe interstitielle

## granit noir

0 % SiO<sub>2</sub> et 10 % Si



Minéraux	%	Taille	Texture
Plagioclase	67	0,2 à 17 mm	En lattes jointives, non orientées
Orthopyroxène 1 (Ferrosilite)	21	1 à 10 mm	Intergranulaire,
Biotite	<4	0,2 à 2 mm	Paillettes en bordure de l'orthopyroxène et des oxydes de fer
Olivine (fayalite)	1	0,6 à 4 mm	Xénomorphe
Chlorite	1		Amas feutrés après l'olivine
Orthopyroxène 2 (hypersthène)	tr	3 mm	En liséré entre l'olivine et le plagioclase
Clinopyroxène (diopside)	tr	35 µm	Inclusion dans le plagioclase
Amphibole (hornblende)	tr	0,1 mm	Xénomorphe
Apatite	1	1 à 3 mm	Granulaire
Oxydes de fer ± titane	4,5	0,8 à 4 mm	Xénomorphe granulaire
Sulfures	tr	<0,3 mm	En plage, associée à oxydes de fer et biotite

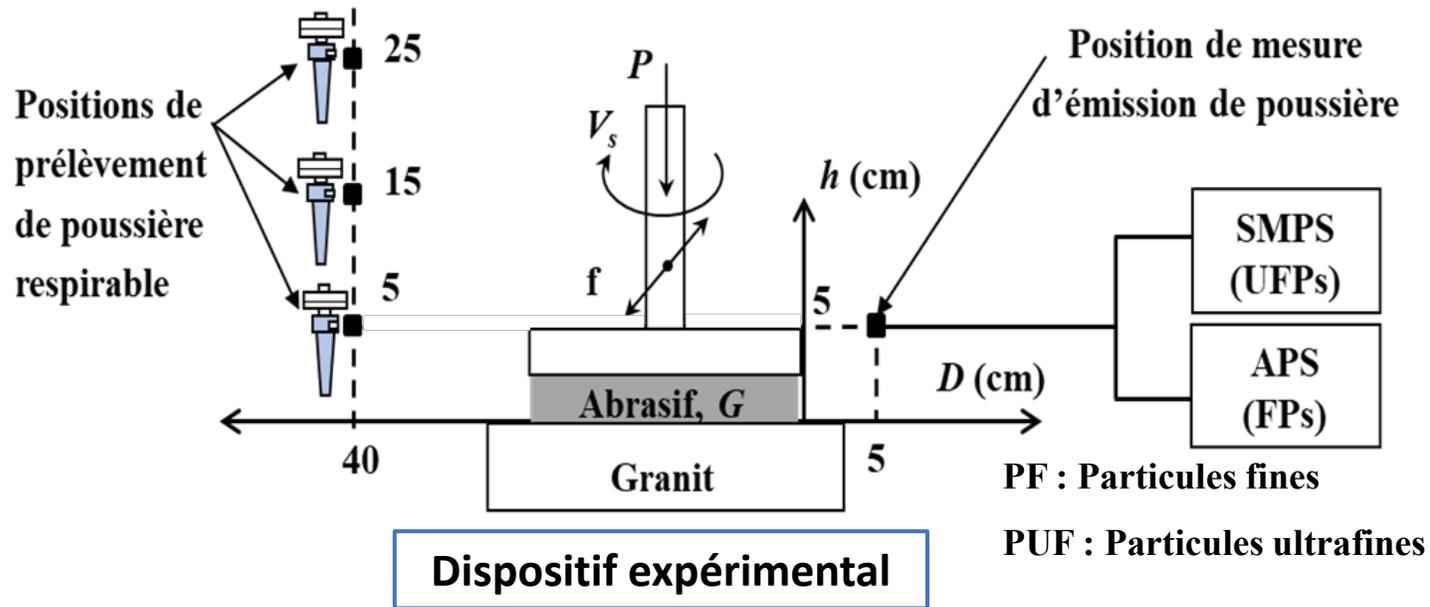
### Granit blanc :

- Grosseur de grain entre 0,02 mm et 7 mm
- Matériau dur

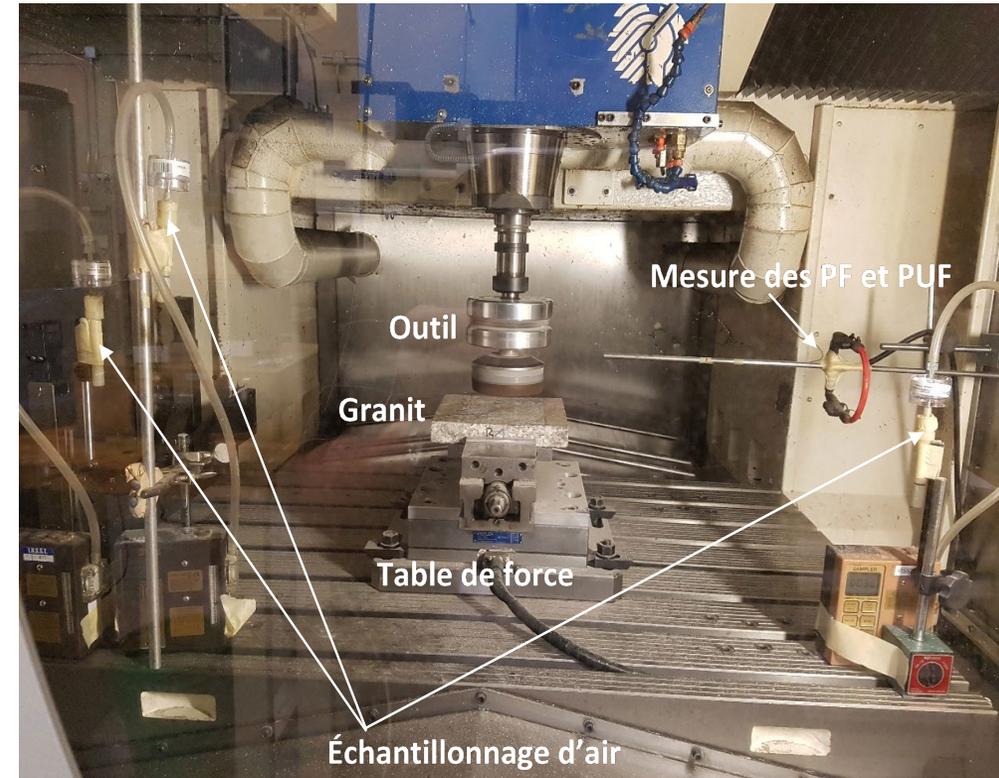
### Granit noir :

- Grosseur de grain entre 0,1 mm et 17 mm
- Matériau tendre

# Dispositif expérimental de polissage à sec



## Polissage sur machine outil (éviter l'exposition)



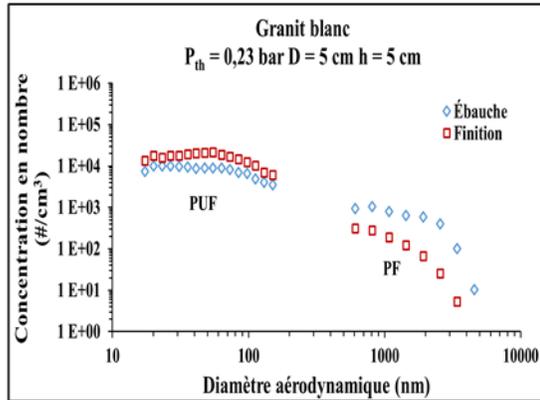
Ébauche G100 Finition G800

$P = 0,23$  bar (2/3 de l'effort vertical humain (290 N))

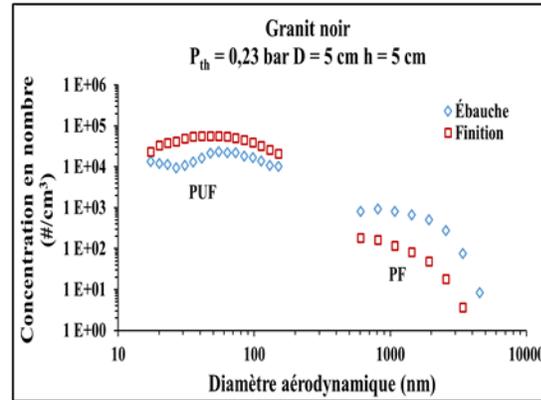
$V_s = 1000 - 1750 - 2500$  tr/min

$f = 8,5 - 17 - 25,5$  mm/s

## Émission PF et PUF



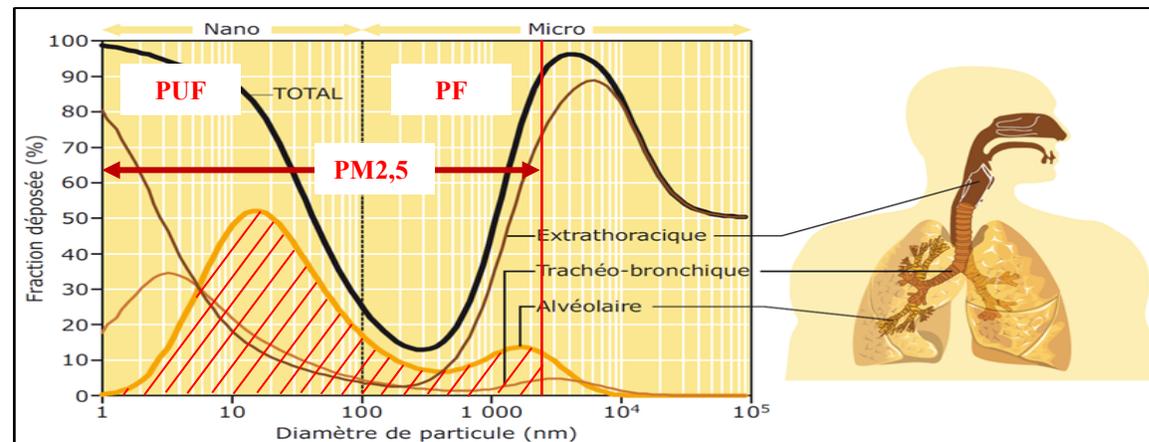
(a)



(b)

- Plus de poussière pour le granit noir
- PUF >>> PF
- Plus de PF à l'ébauche qu'à la finition
- Plus de PUF à la finition qu'à l'ébauche
- PUF et PF appartiennent au PM2,5

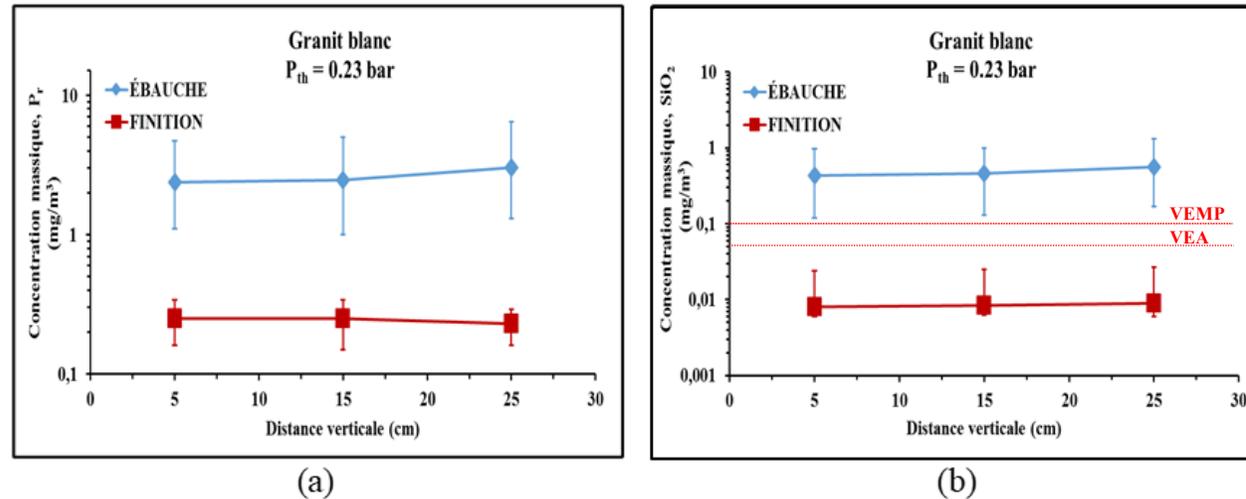
### Granulométrie à la source (a) Granit blanc (b) Granit noir



Dépôt théorique total et régional des particules inhalées (Ricaud et Witschger, 2012)

## Échantillonnage d'air (Laboratoire de l'IRSST – Méthode 206-02)

### Granit blanc (40% quartz)



(a) Poussière respirable (b) Concentration en masse du quartz

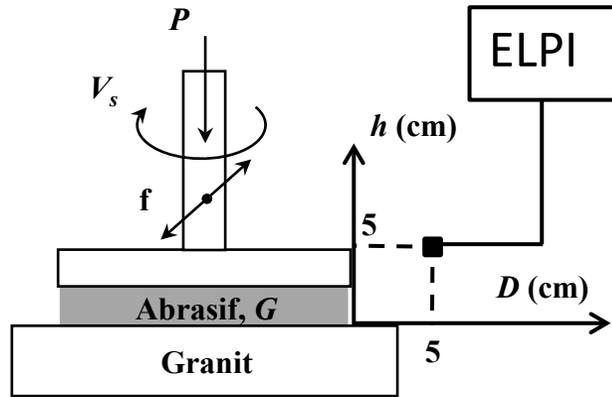
Exposition au quartz à l'ébauche :

Taux de quartz  $>$  VEMP =  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  (Québec, Canada)

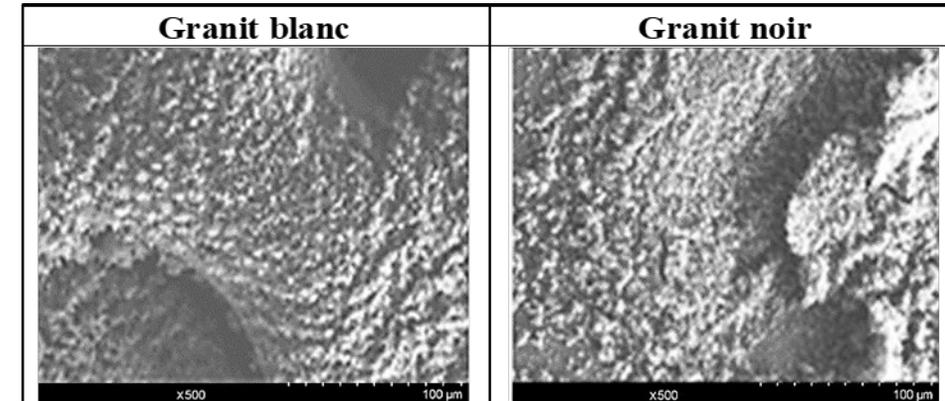
Taux de quartz  $>$  VEA =  $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$  (OSHA, États-Unis d'Amérique)

## Caractérisation

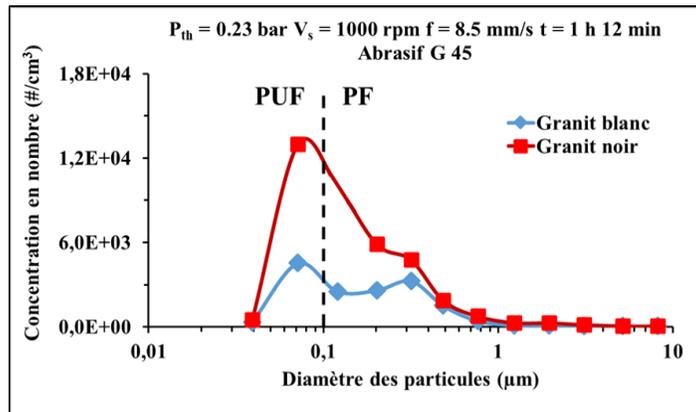
### Lors de la phase d'ébauche (exposition au quartz)



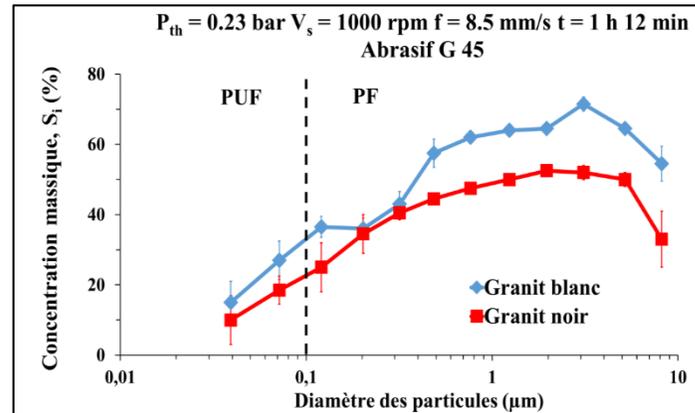
### Classification des particules avec le ELPI



### Morphologie de la poussière



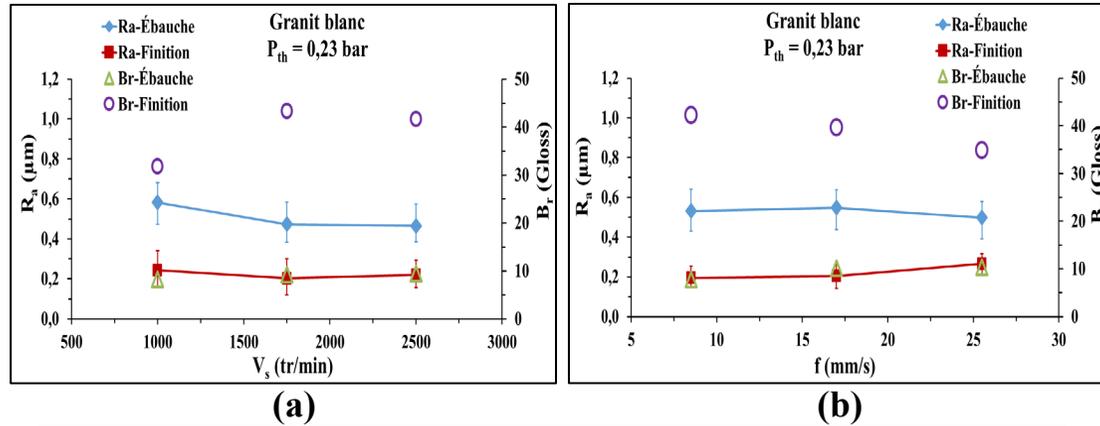
### Granulométrie à la source



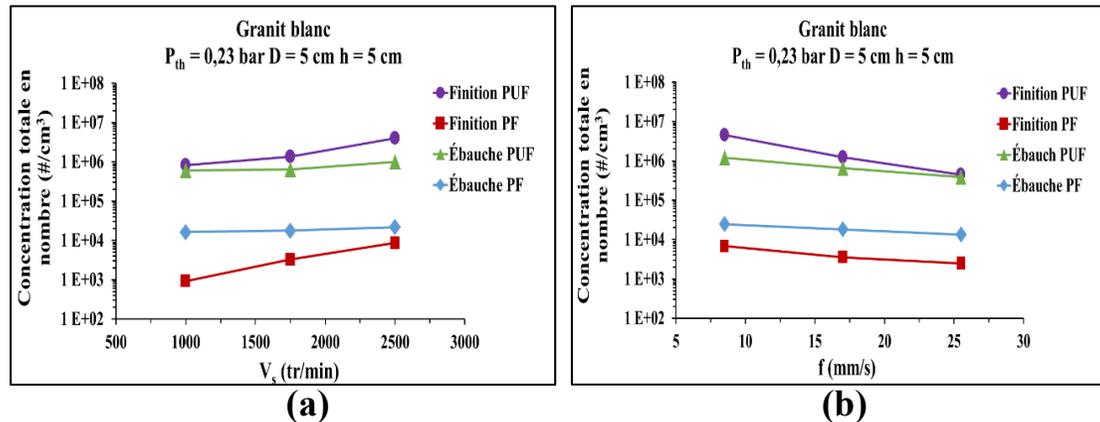
### Concentration en masse du silicium

# Résultats du polissage à sec

## Optimisation des paramètres de polissage



Rugosité et brillance en fonction de : (a) la vitesse de rotation (b) la vitesse d'avance



Émission en fonction de : (a) la vitesse de rotation (b) la vitesse d'avance

Mêmes résultats pour le granit blanc et le granit noir

### À l'ébauche :

- La vitesse de rotation: Rugosité  $\searrow\searrow\searrow$  Émission  $\nearrow\nearrow\nearrow$
- La vitesse d'avance: Rugosité  $\searrow\searrow\searrow$  Émission  $\searrow\searrow\searrow$

### À la finition :

- La vitesse de rotation: Rugosité  $\searrow\searrow\searrow$  Émission  $\nearrow\nearrow\nearrow$
- La vitesse d'avance: Rugosité  $\nearrow\nearrow\nearrow$  Émission  $\searrow\searrow\searrow$



$V_s = 1500$  tr/min  $f = 17$  mm/s

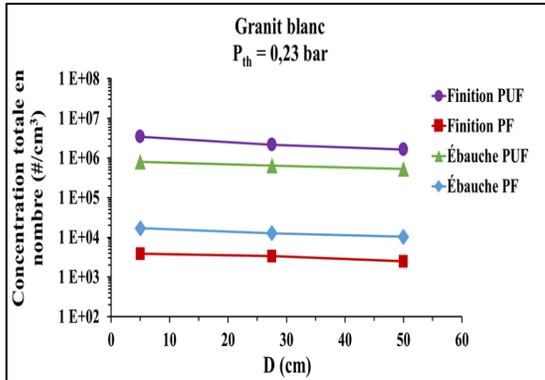
Réduire l'émission de poussière

+

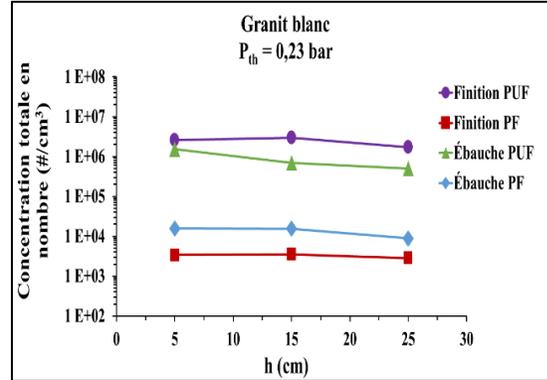
Réduire la rugosité

# Résultats du polissage à sec

## Dispersion des particules de poussière

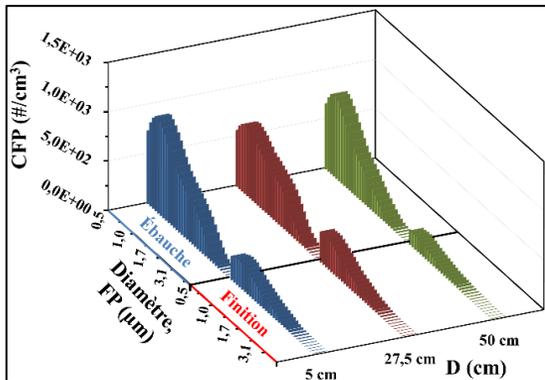


(a)

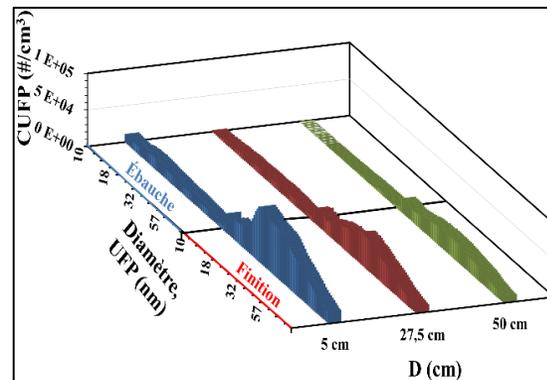


(b)

Dispersion des particules suivant les direction :  
(a) horizontale D (b) verticale h

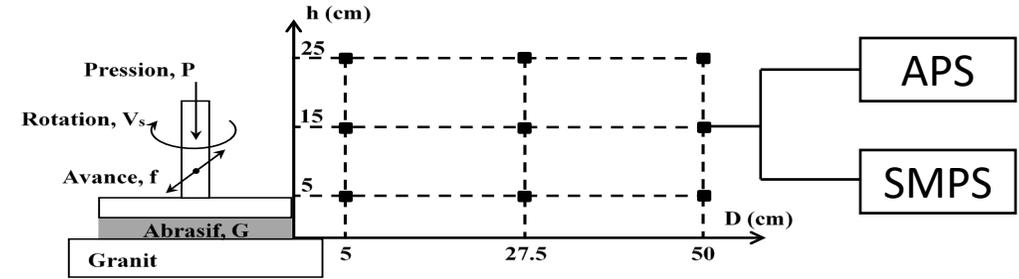


(a)



(b)

Granulométrie suivant la direction horizontale D :  
(a) particules fines (b) particules ultrafines



Mêmes résultats pour le granit blanc et le granit noir

### À l'ébauche et à la finition :

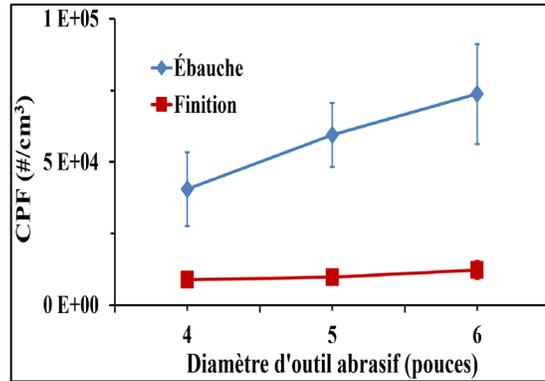
- Concentration PF  $\searrow \searrow$  suivant la direction horizontale D
- Concentration PUF  $\searrow \searrow$  suivant la direction verticale h
- L'allure de la granulométrie ne change pas suivant D



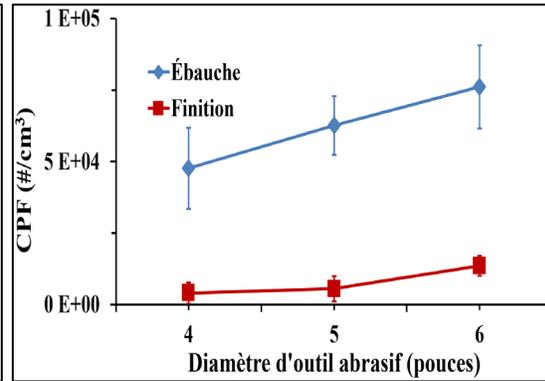
- La concentration de poussière est très grande, proche de l'outil abrasif
- La poussière contamine le lieu de travail de la même façon, proche ou loin de l'outil abrasif

# Résultats du polissage à sec

## Changement de diamètre

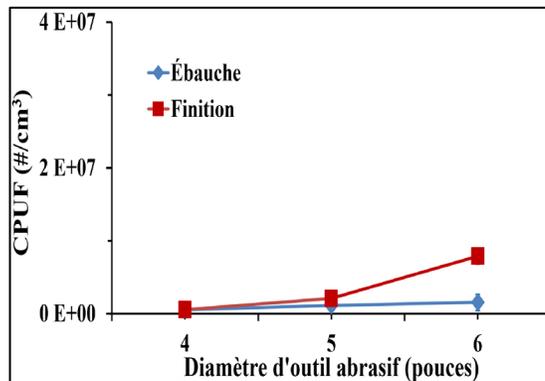


(a)

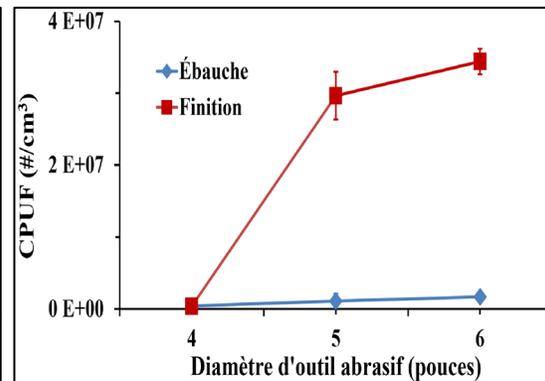


(b)

Concentration des PF en fonction du diamètre de l'outil  
(a) Granit blanc (b) Granit noir

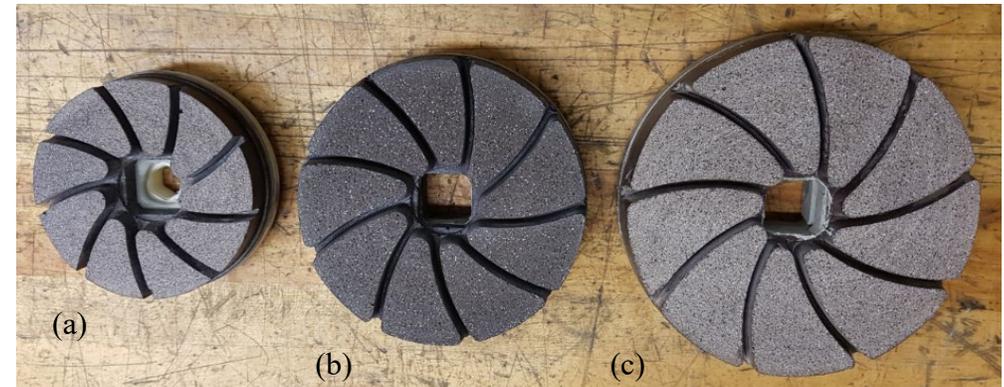


(a)



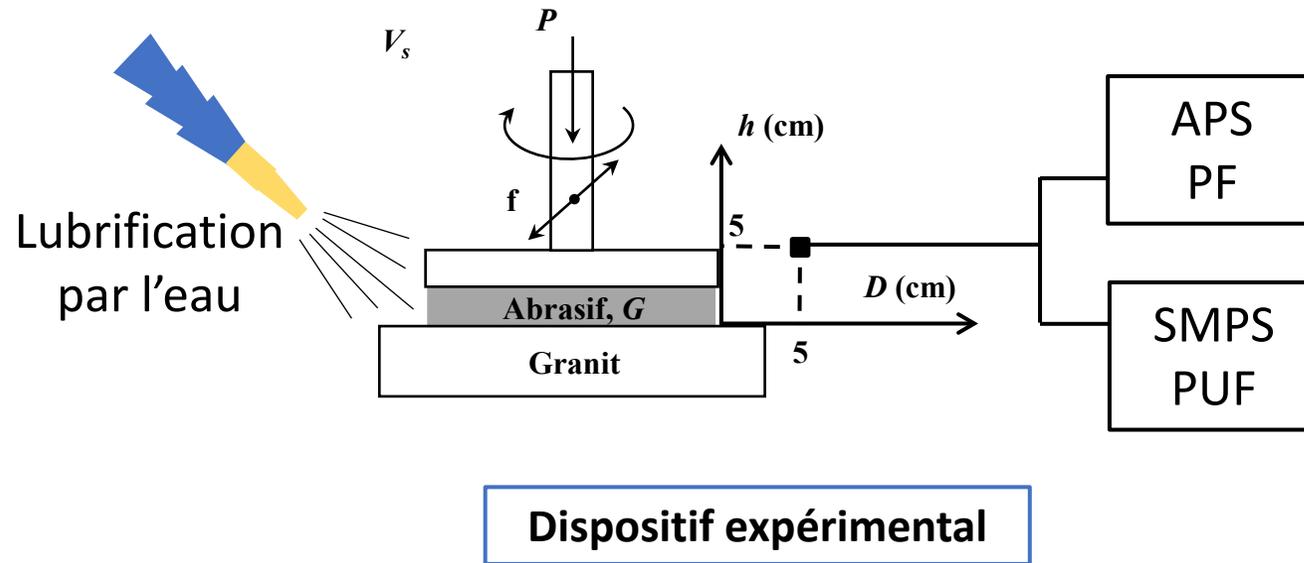
(b)

Concentration des PUF en fonction du diamètre de l'outil  
(a) Granit blanc (b) Granit noir



Outil abrasif de diamètre : (a) 4'' (b) 5'' (c) 6''

# Dispositif expérimental de polissage avec lubrification



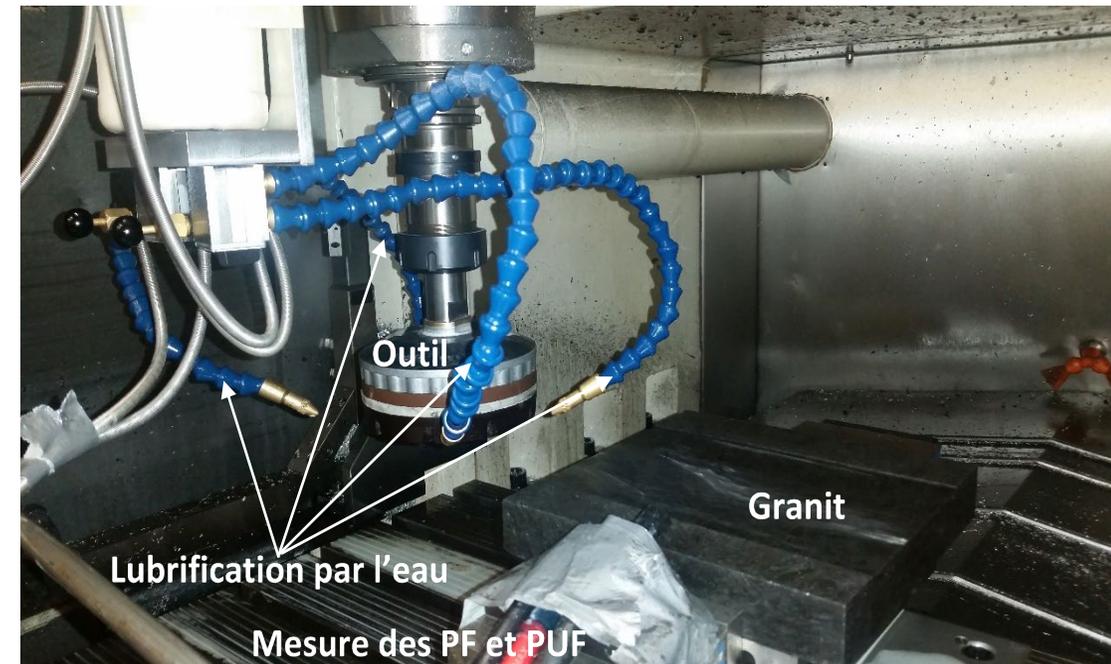
Ébauche G60

$P = 0,23$  bar

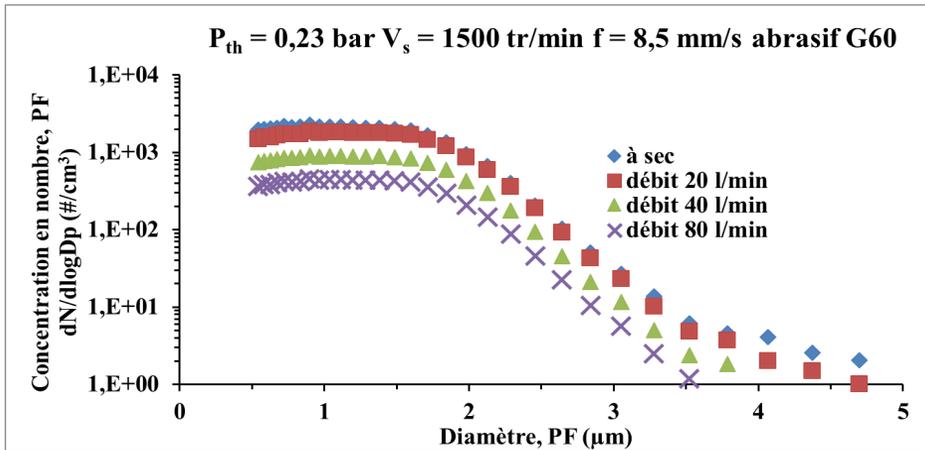
$V_s = 1500 - 2500$  tr/min

$f = 8,5$  mm/s

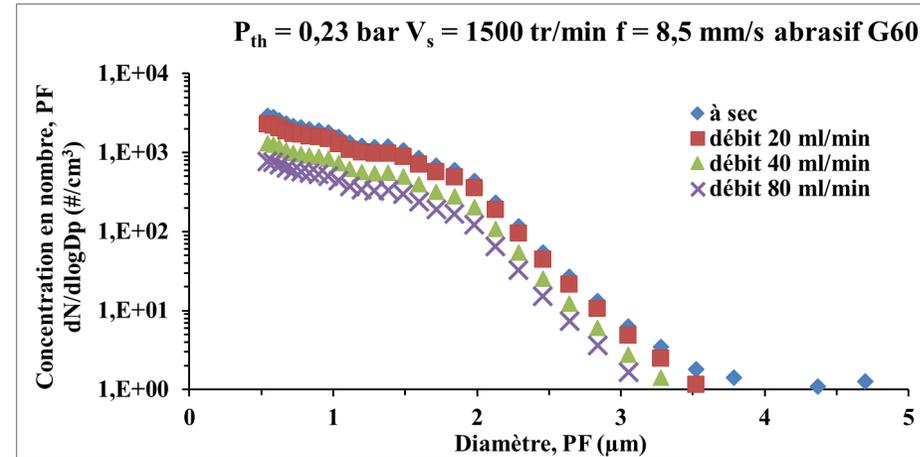
Débit de lubrification = 20 – 40 – 80 ml/min



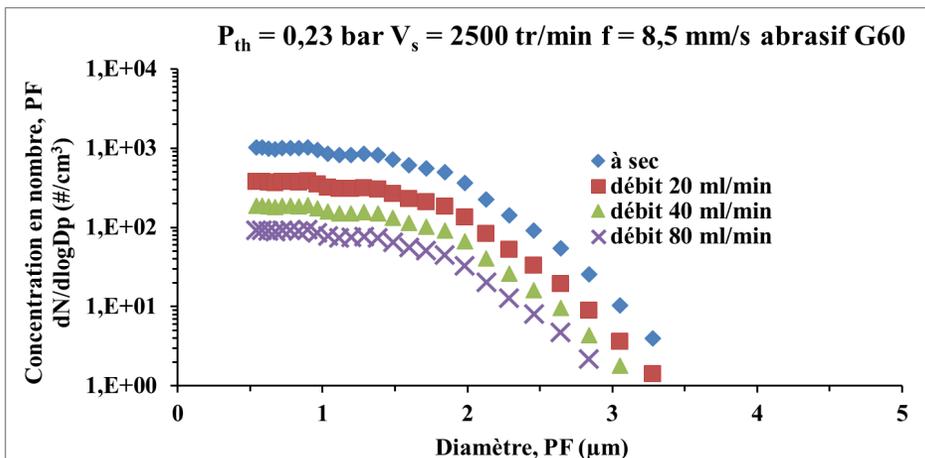
# Résultats du polissage avec lubrification



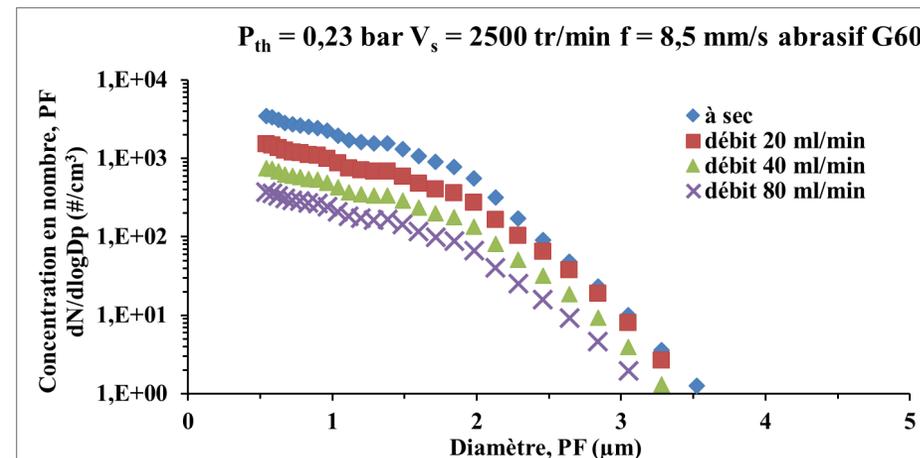
**Granulométrie des PF (granit blanc)  
1500 tr/min**



**Granulométrie des PF (granit noir)  
1500 tr/min**



**Granulométrie des PF (granit blanc)  
2500 tr/min**



**Granulométrie des PF (granit noir)  
2500 tr/min**

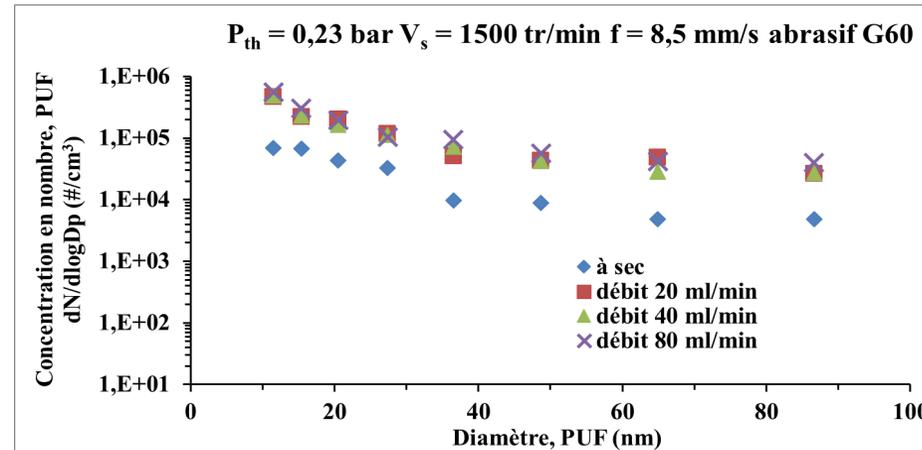
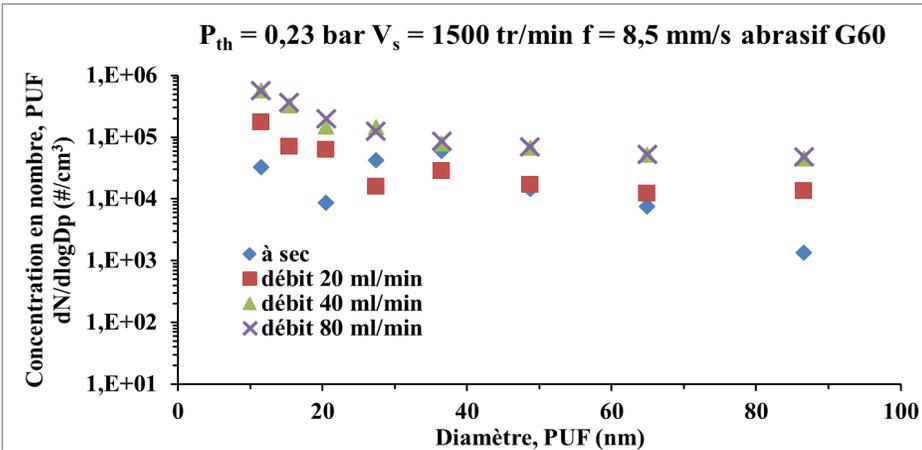
**Émission PF**

**Procédé humide réduit  
la poussière fine  
(environ 50 %)**

# Résultats du polissage avec lubrification

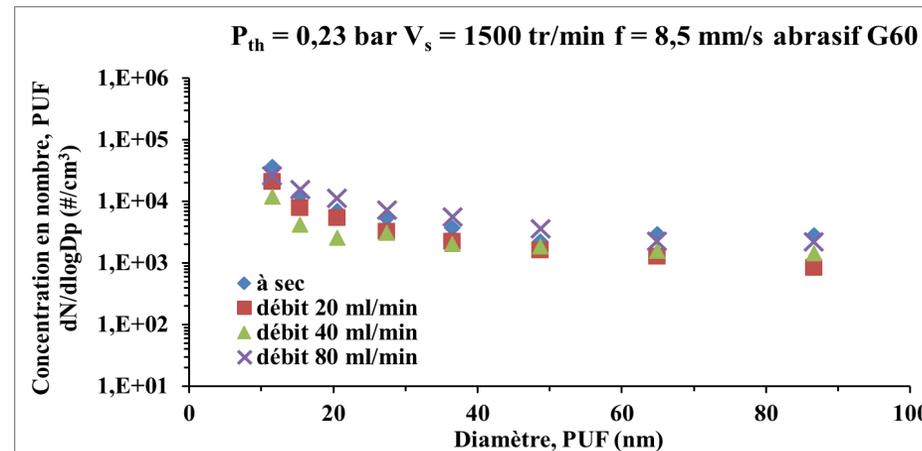
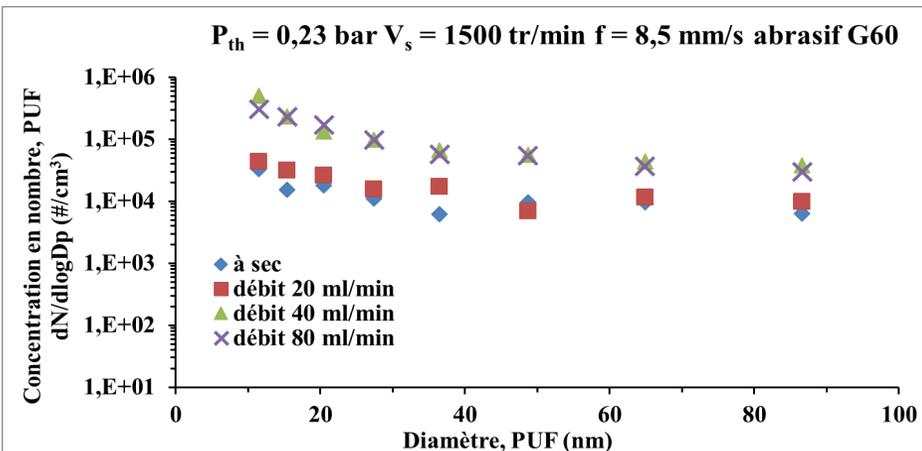
## Émission PUF

**Procédé humide a peu  
d'effet sur la poussière  
ultrafine**



**Granulométrie des PUF (granit blanc)  
1500 tr/min**

**Granulométrie des PUF (granit noir)  
1500 tr/min**



**Granulométrie des PUF (granit blanc)  
2500 tr/min**

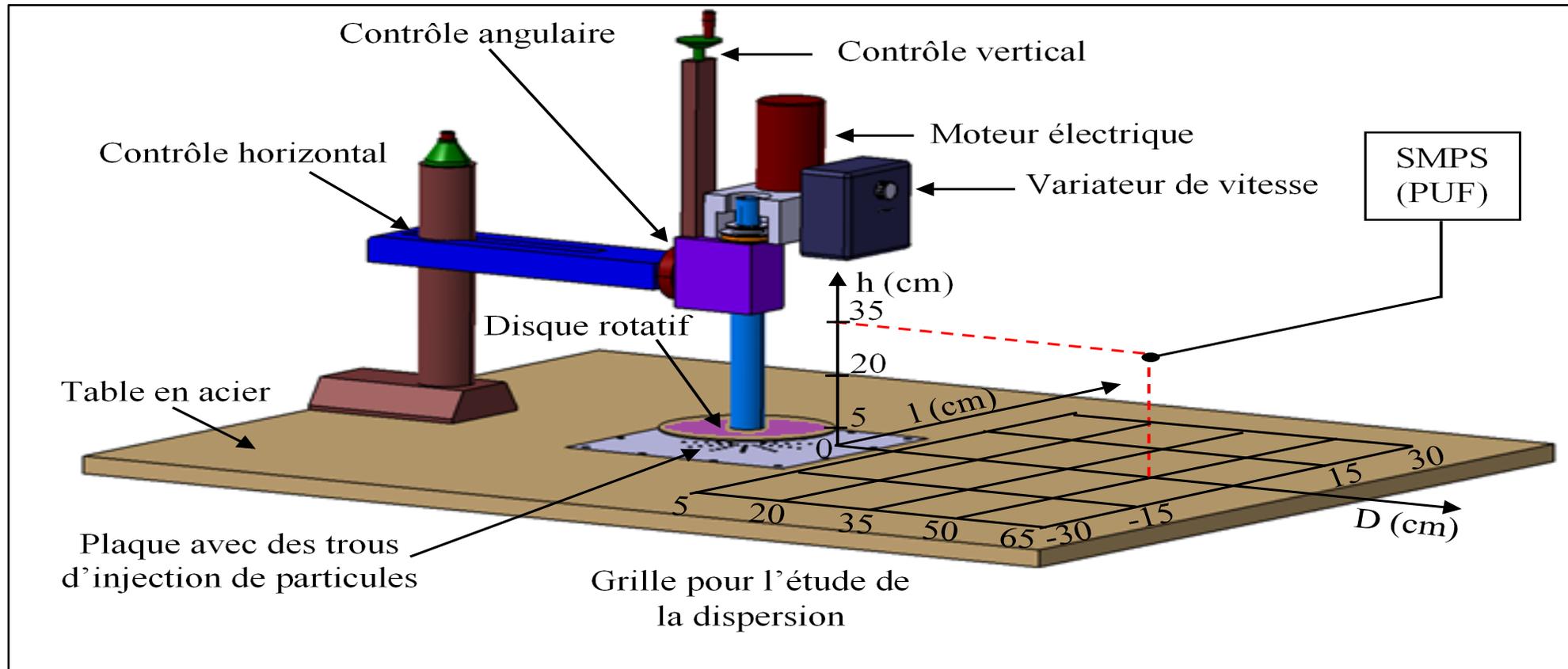
**Granulométrie des PUF (granit noir)  
2500 tr/min**

# Récapitulation

- Les deux phases ébauche et finition sont essentielles au processus de polissage de granit
- Plus de PF que de PUF dans la phase d'ébauche et inversement dans la phase de finition
- Les granits sans quartz génère plus de poussière que celui avec quartz mais aide à éviter l'exposition
- La poussière générée appartient à PM<sub>2,5</sub>
- La poussière générée est de forme sphérique
- Le taux de quartz dépasse les normes nord-américaine d'exposition à la phase d'ébauche
- La poussière (PF et PUF) occupe de façon uniforme le milieu de travail
- L'augmentation du diamètre de l'outil abrasif augmente la quantité de poussière émise
- La lubrification par l'eau diminue uniquement les PF
- Il est recommandé d'utiliser  $V_s=1500$  tr/min et  $f=17,5$  mm/s → (PF et PUF) 

- **Banc d'essais de simulation de polissage**
- **Résultats :**
  - ✓ Granulométrie
  - ✓ Dispersions
  - ✓ Gaz traceur vs particules
  - ✓ CFD vs simulation expérimentale
  - ✓ Réduction à la source: 3 concepts
- **Récapitulation**
- **Recommandations**

# Banc d'essais de simulation de polissage



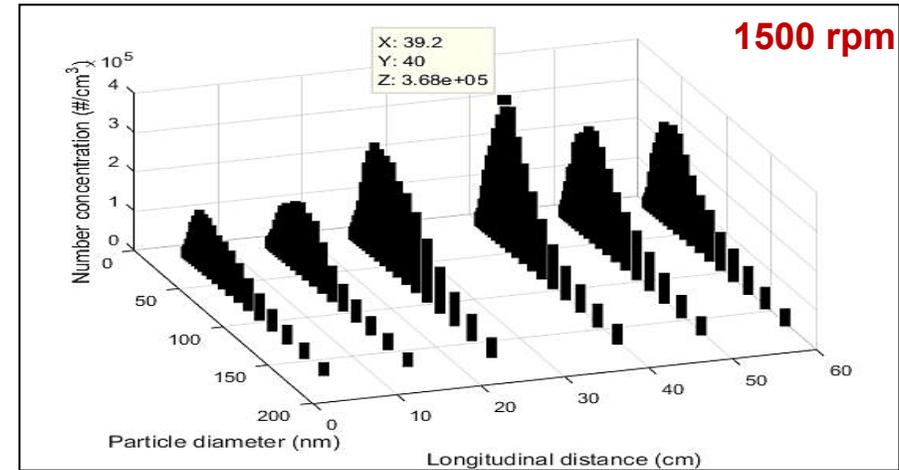
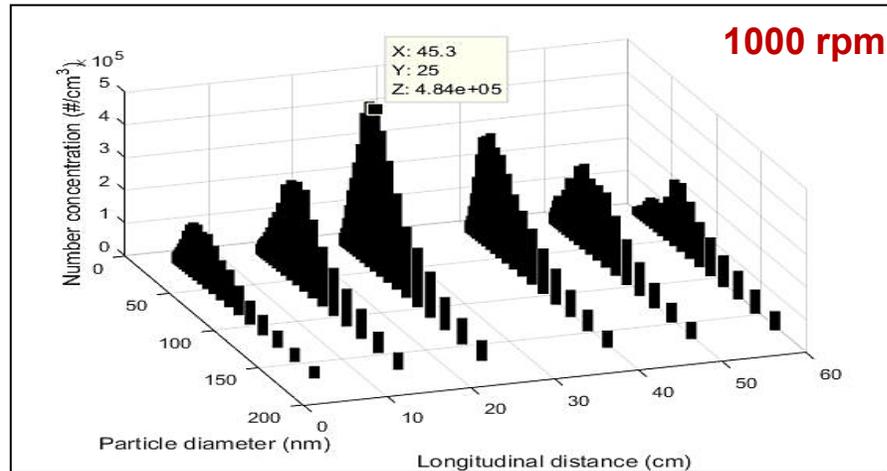
- Dispersions : gaz vs particules ; CFD vs expérience
- 3 concepts de réduction



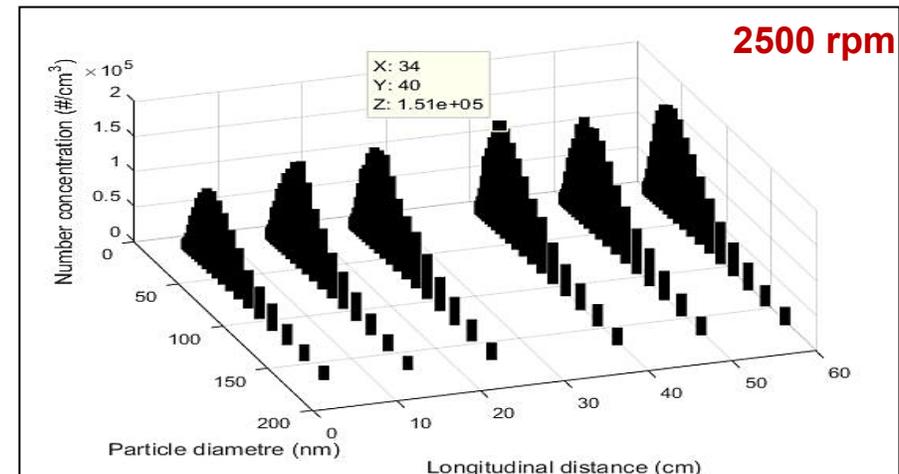
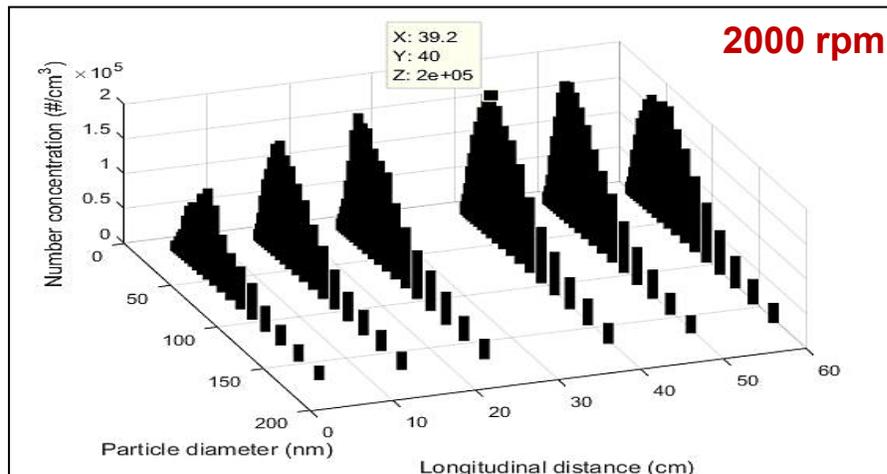
- ✓ PUF
- ✓ Effet de la rotation      dispersion
- réduction à la source

Scénarios de dispersion des particules lors du polissage

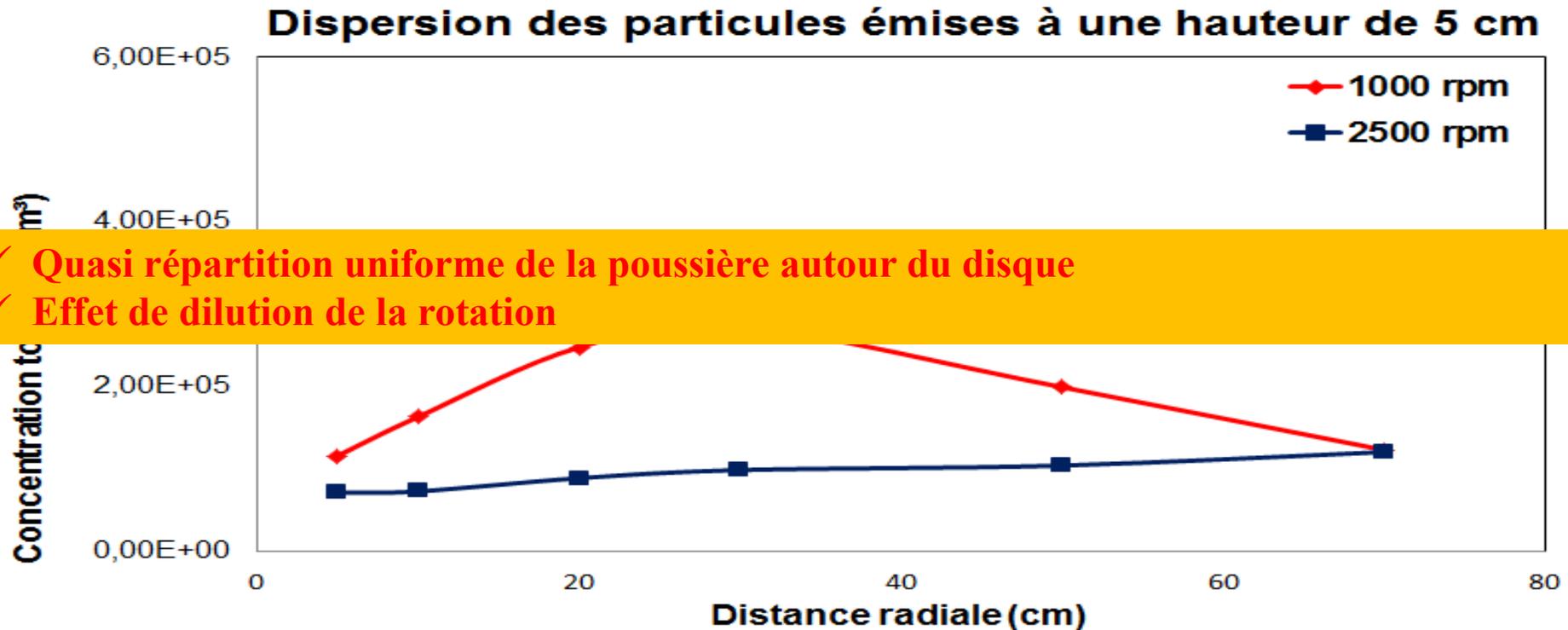
## Granulométrie



✓ Dispersion ne dépend pas de la granulométrie



## Dispersion

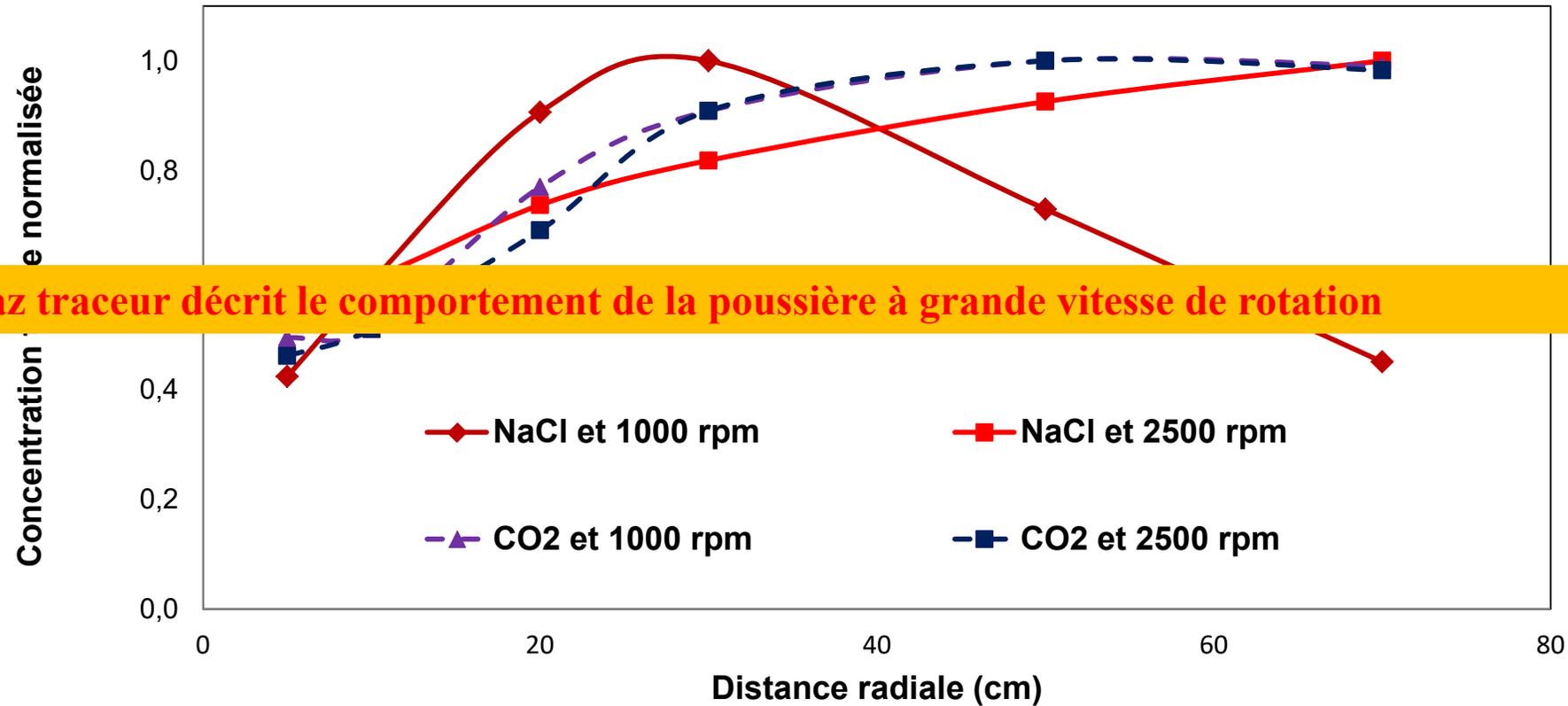


- ✓ Quasi répartition uniforme de la poussière autour du disque
- ✓ Effet de dilution de la rotation

Dispersion de la poussière autour du disque rotatif

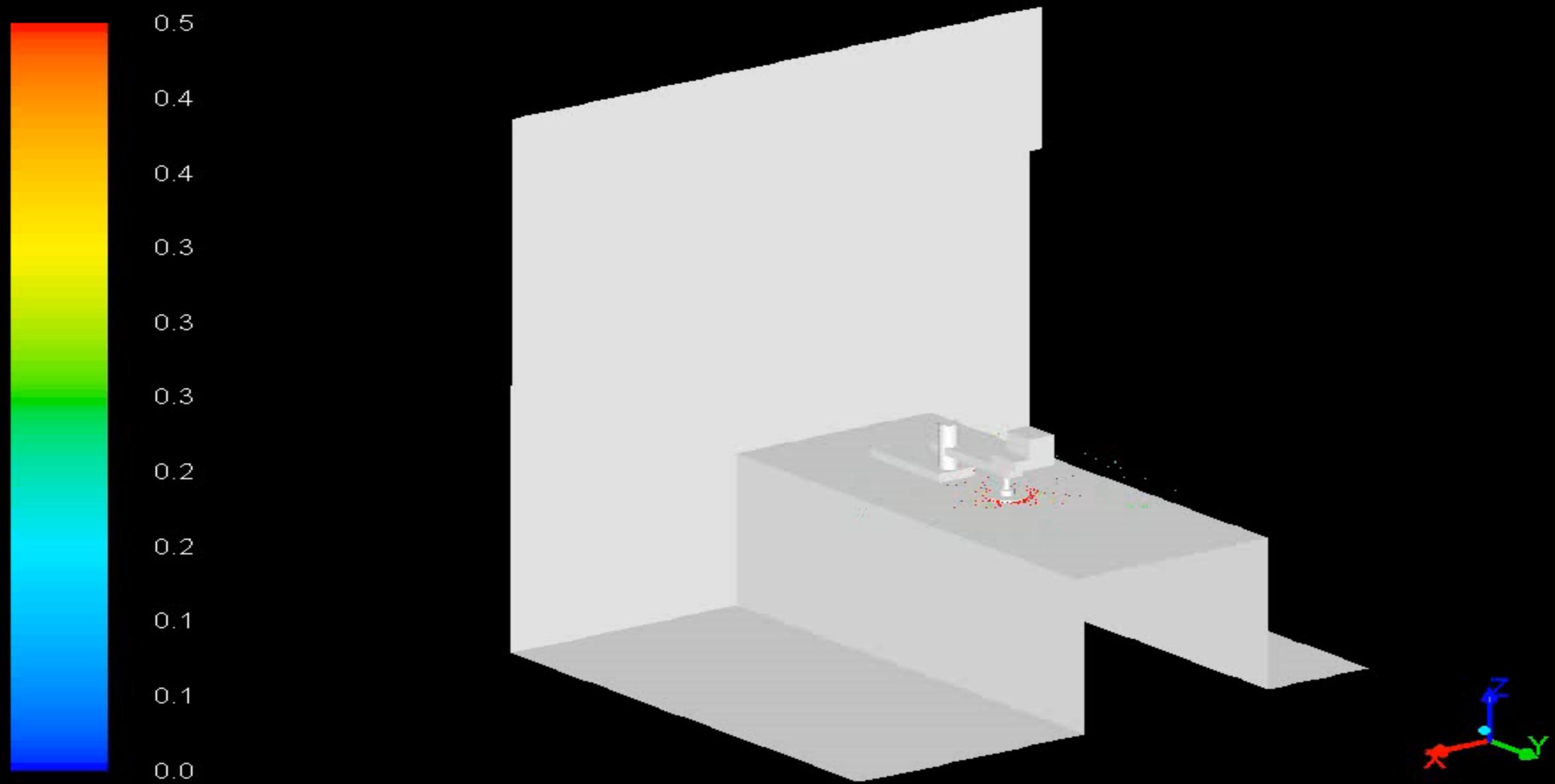
## Gaz traceur vs particules

### Dispersion de NaCl et CO<sub>2</sub> à une hauteur de 5 cm



✓ Gaz traceur décrit le comportement de la poussière à grande vitesse de rotation

Dispersion de la poussière et du CO<sub>2</sub> autour du disque rotatif

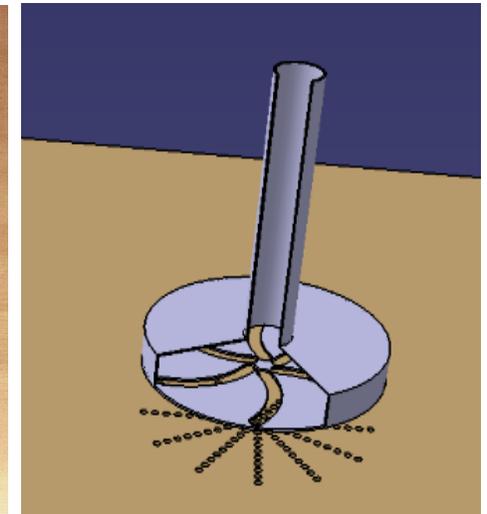
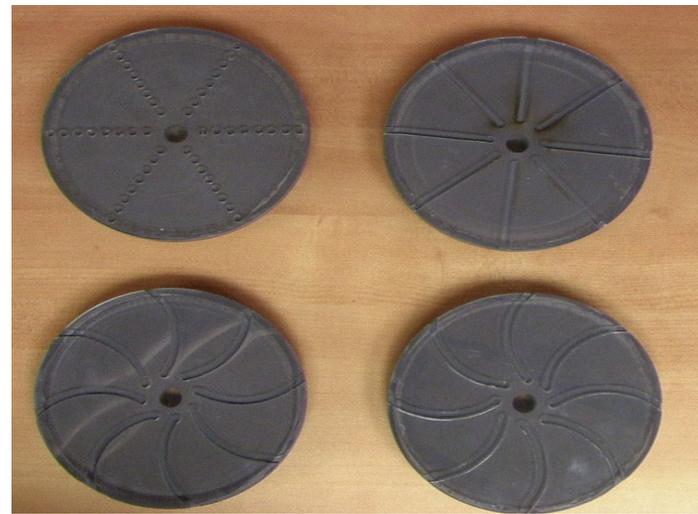
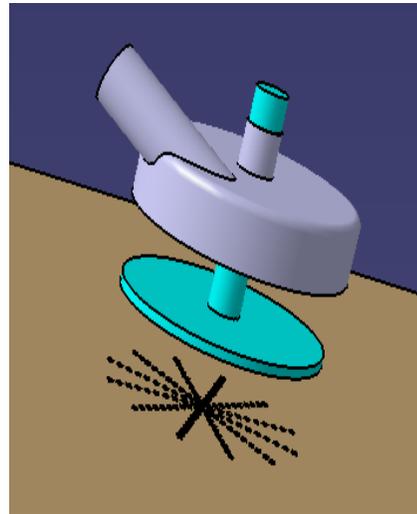
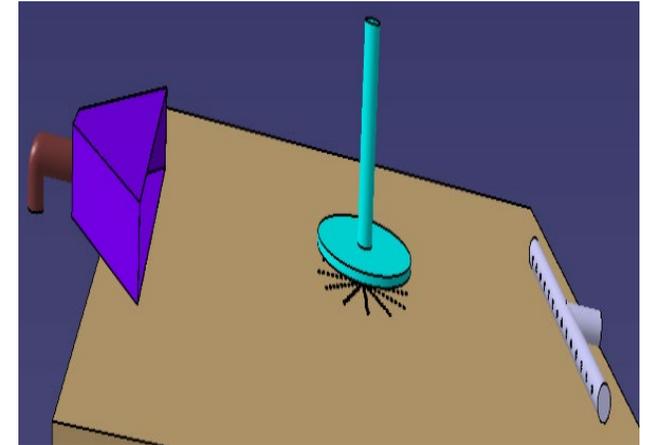
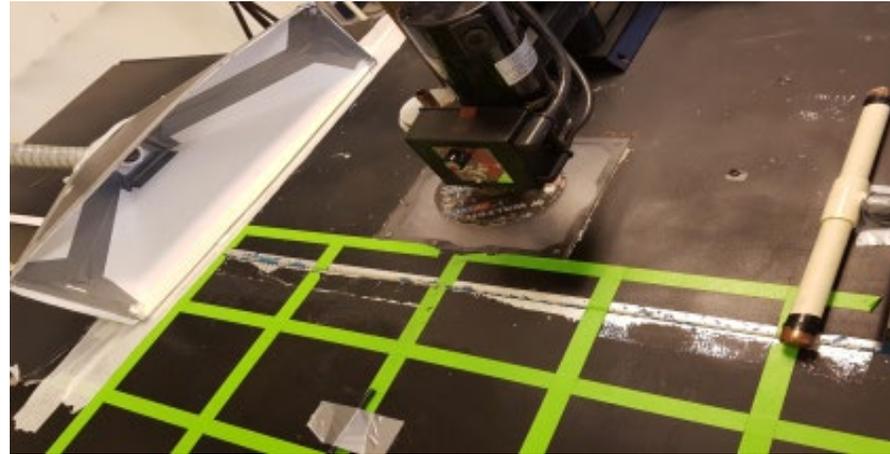


Particle Traces Colored by velocity-magnitude (m/s) (Time=6.3420e+02)

Dec 01, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, RSM, transient)

## Réduction à la source

### 1. Aspiration-soufflage

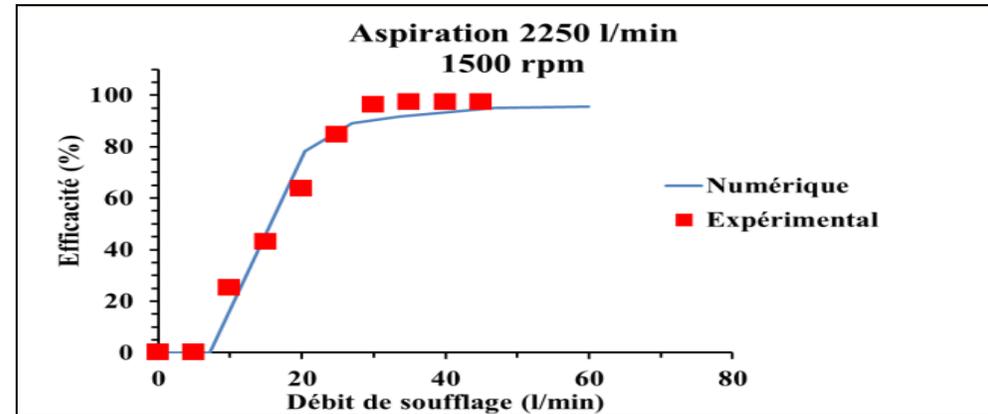
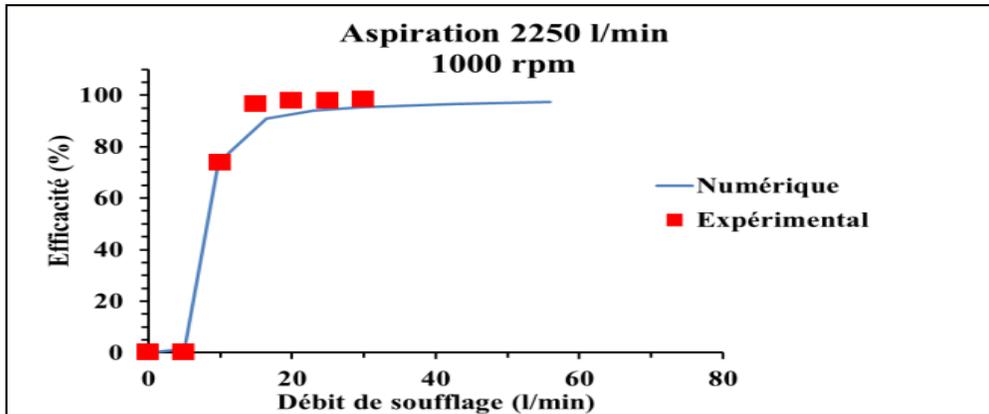
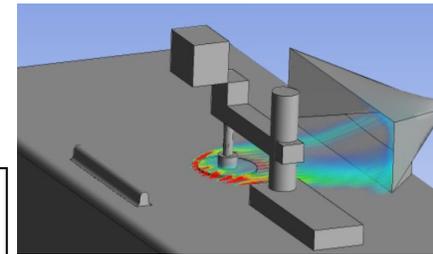


### 2. Aspiration-casquette

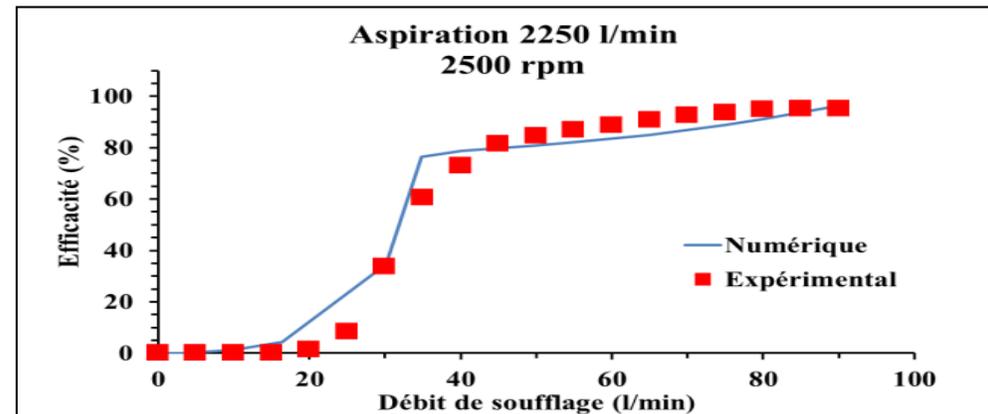
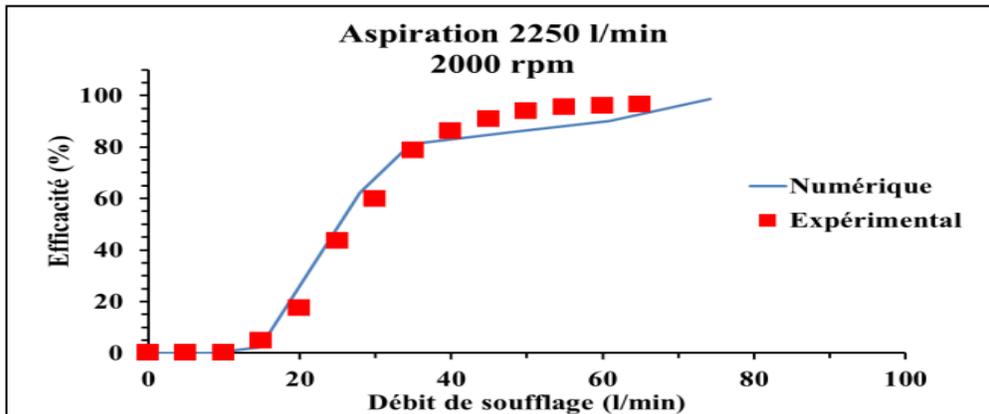
### 3. Aspiration par le disque

Trois concepts de captation analysés

## Réduction à la source 1. Aspiration-soufflage



✓ CFD donne des résultats comparables aux données expérimentales

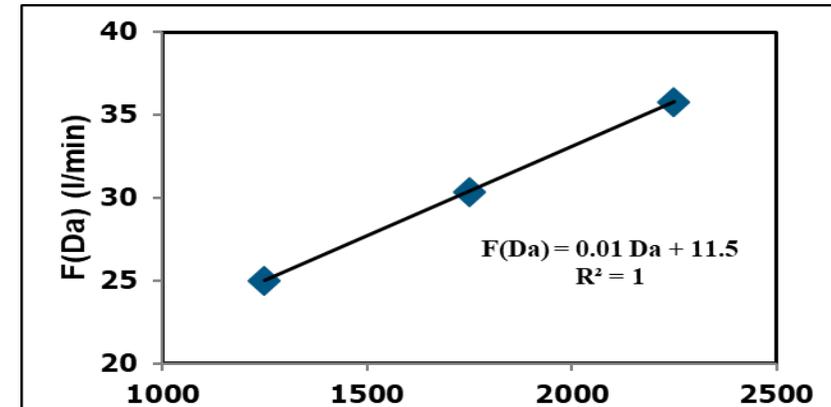
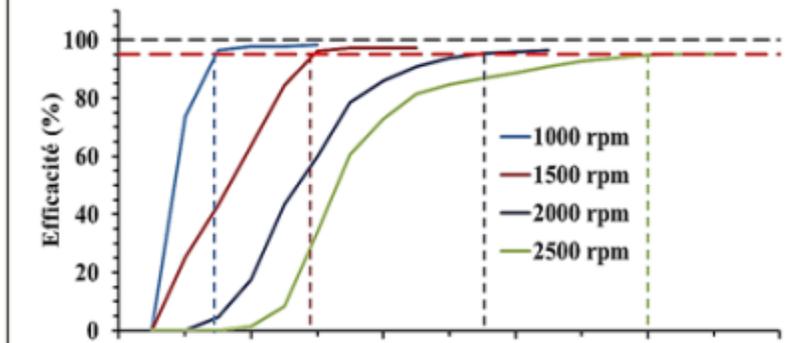


Efficacité du concept aspiration-soufflage : numérique vs expérimentale

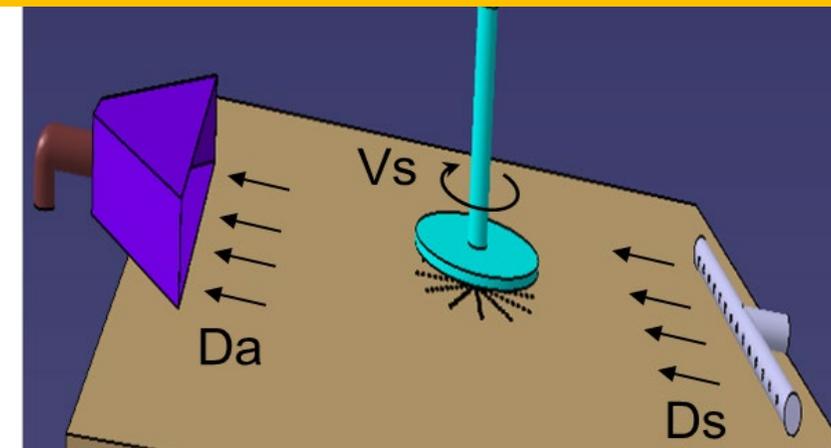
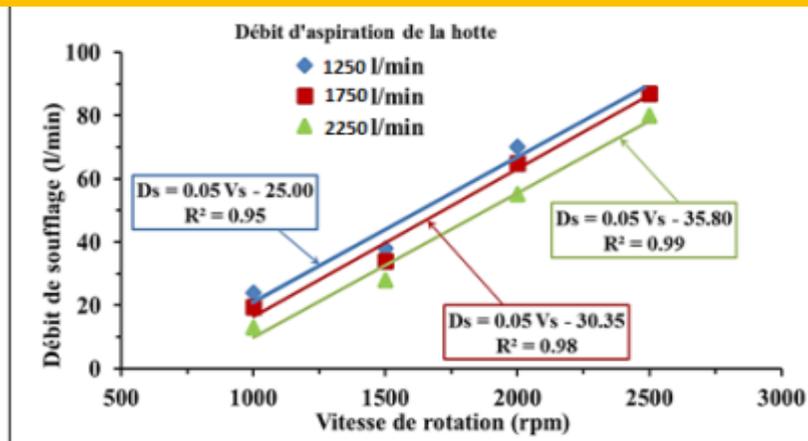


## Réduction à la source 1. Aspiration-soufflage

Débit d'aspiration de la haute de 2250 l/min

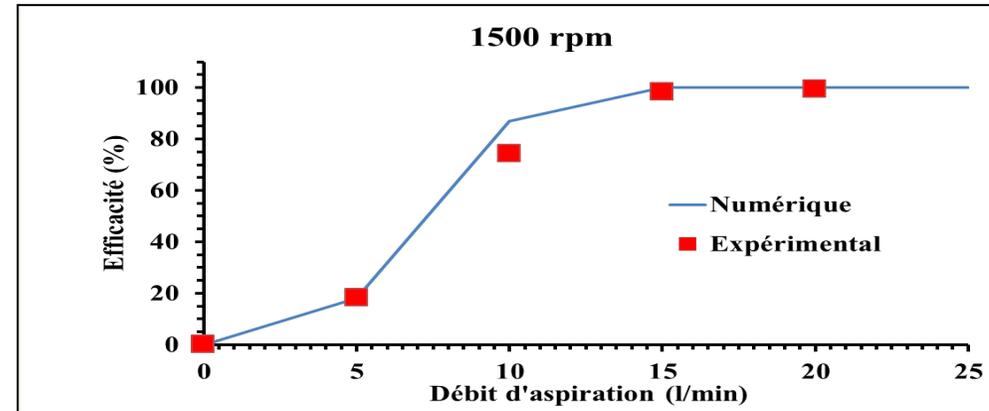
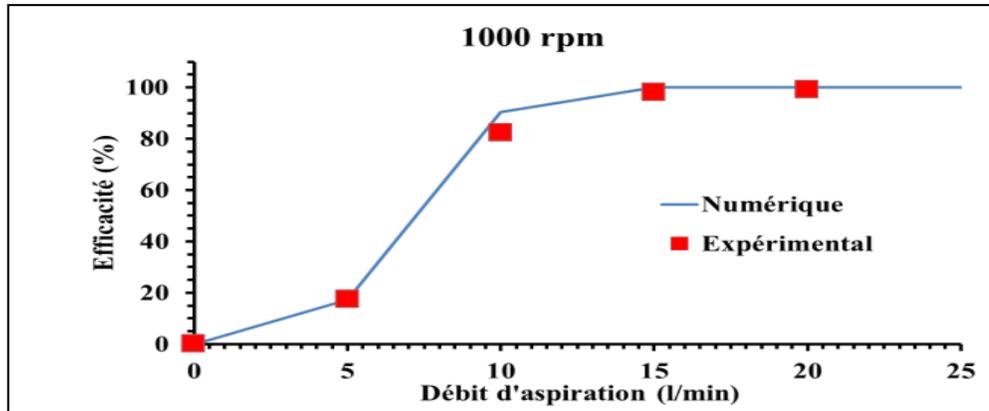
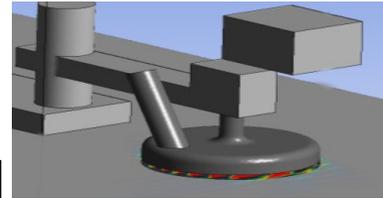


- ✓ Aspiration efficace s'elle est combinée avec un soufflage
- ✓ Modélisation des paramètres aspiration-soufflage

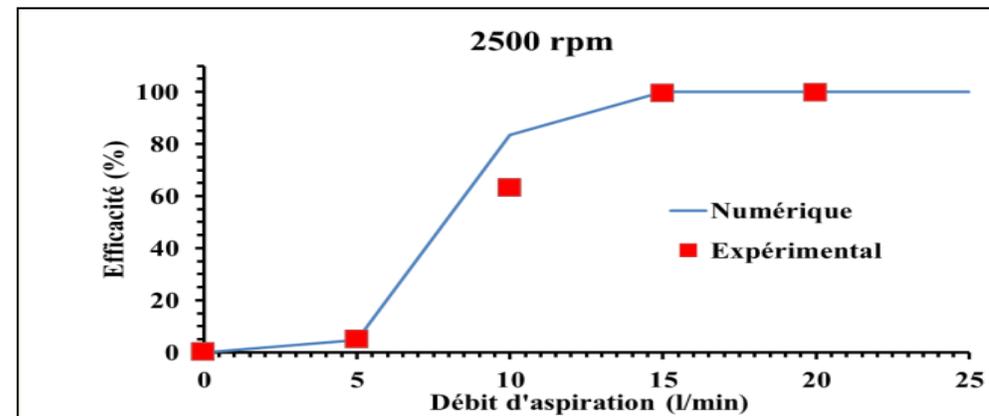
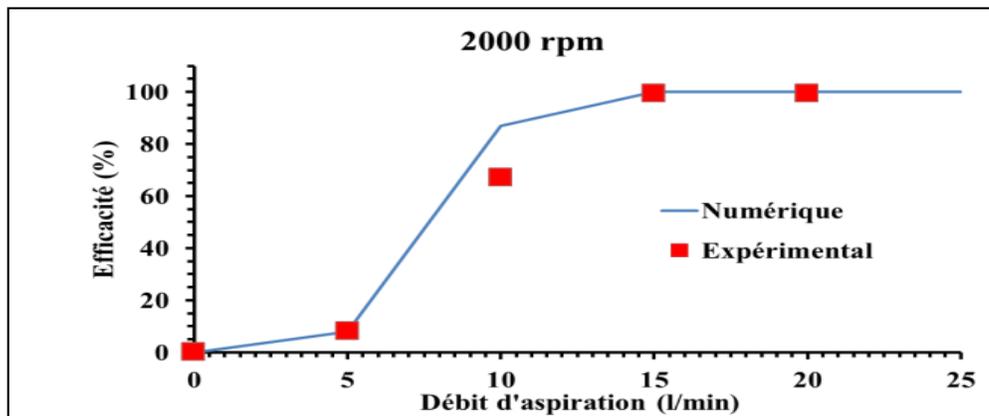


$$D_s + D_a/100 = 0,05 V_s - 11,5$$

## Réduction à la source 2. Aspiration-casquette

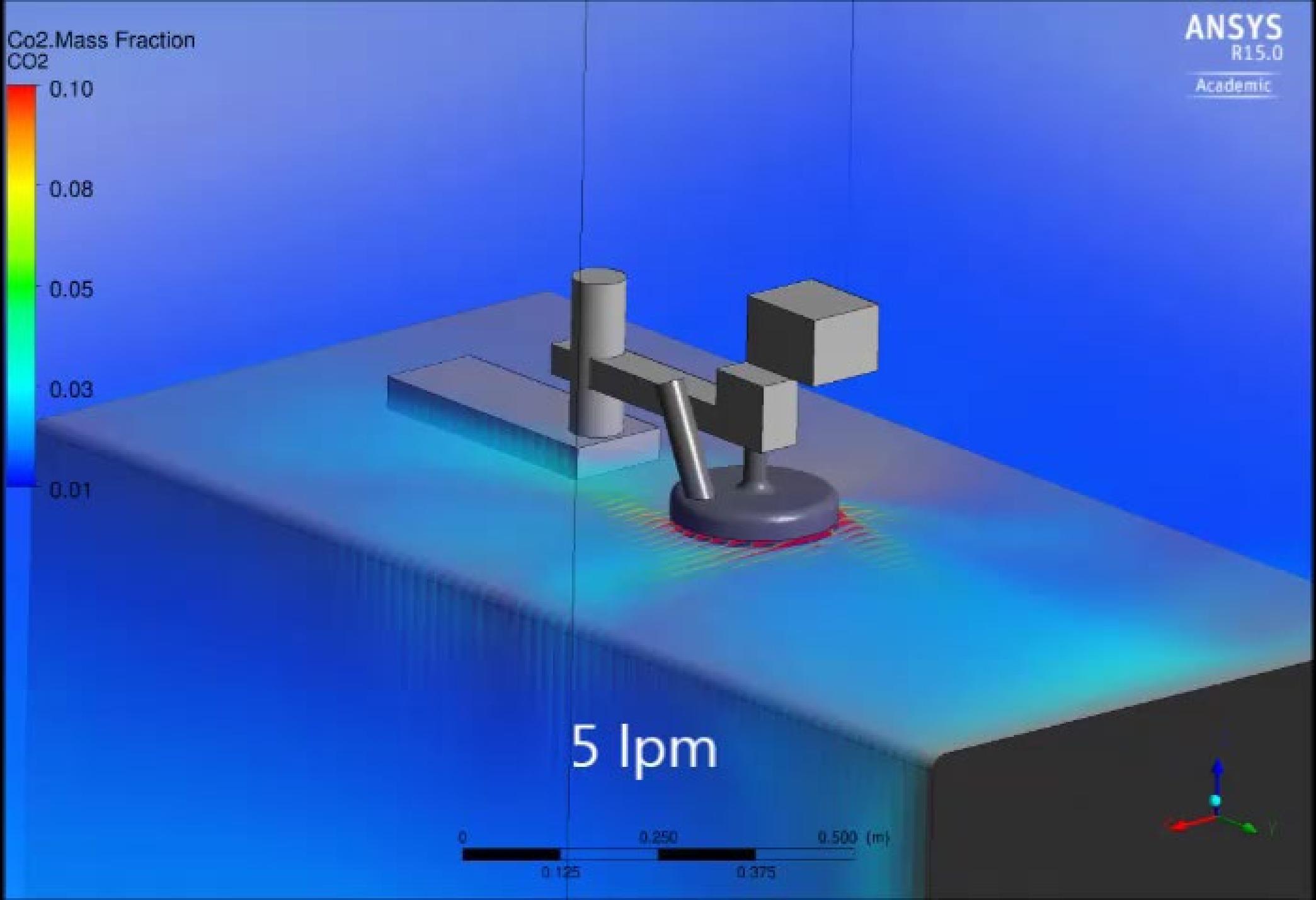


- ✓ CFD donne des résultats comparables aux données expérimentales
- ✓ Aspiration-casquette efficace

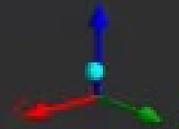


Efficacité du concept aspiration-casquette: numérique vs expérimentale

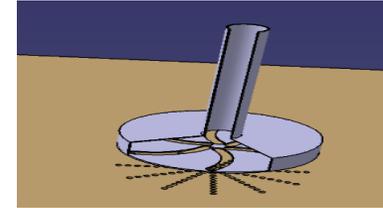
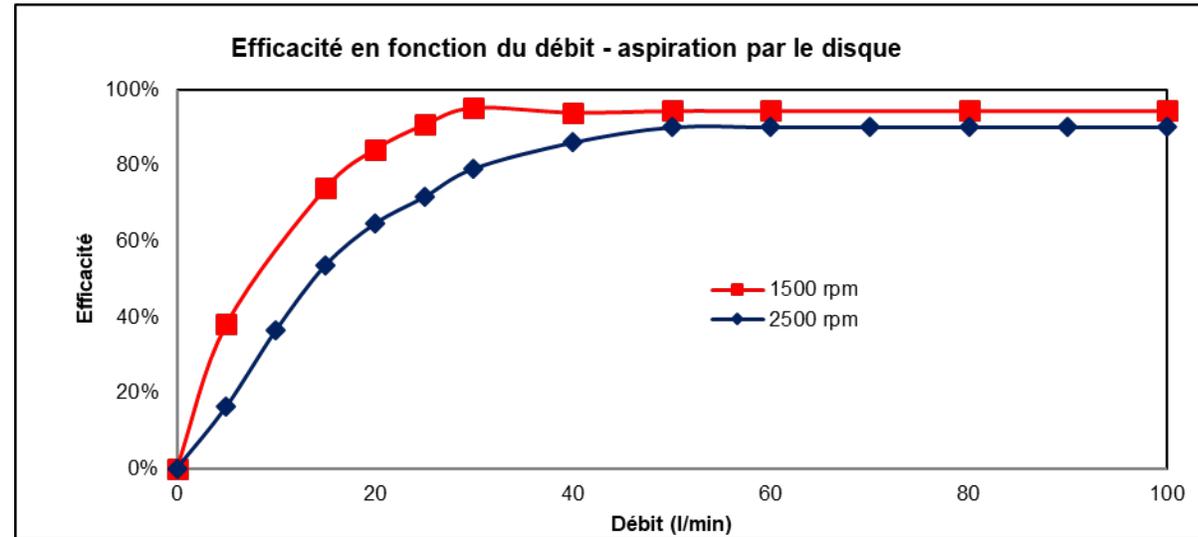
Co2.Mass Fraction  
CO2



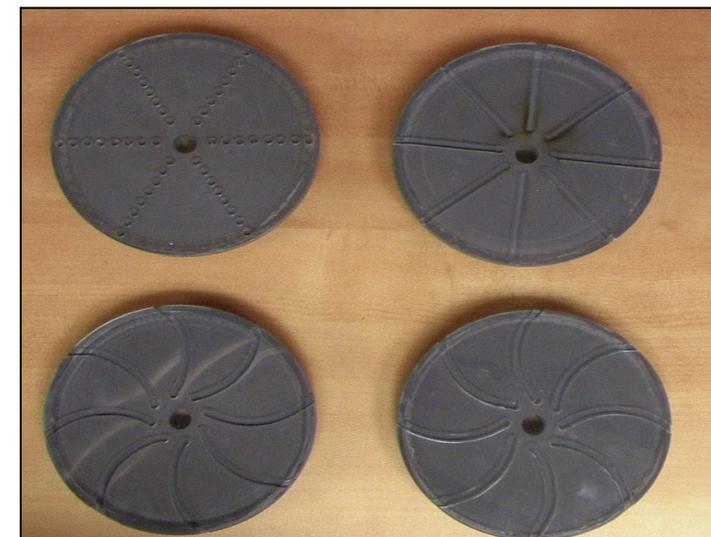
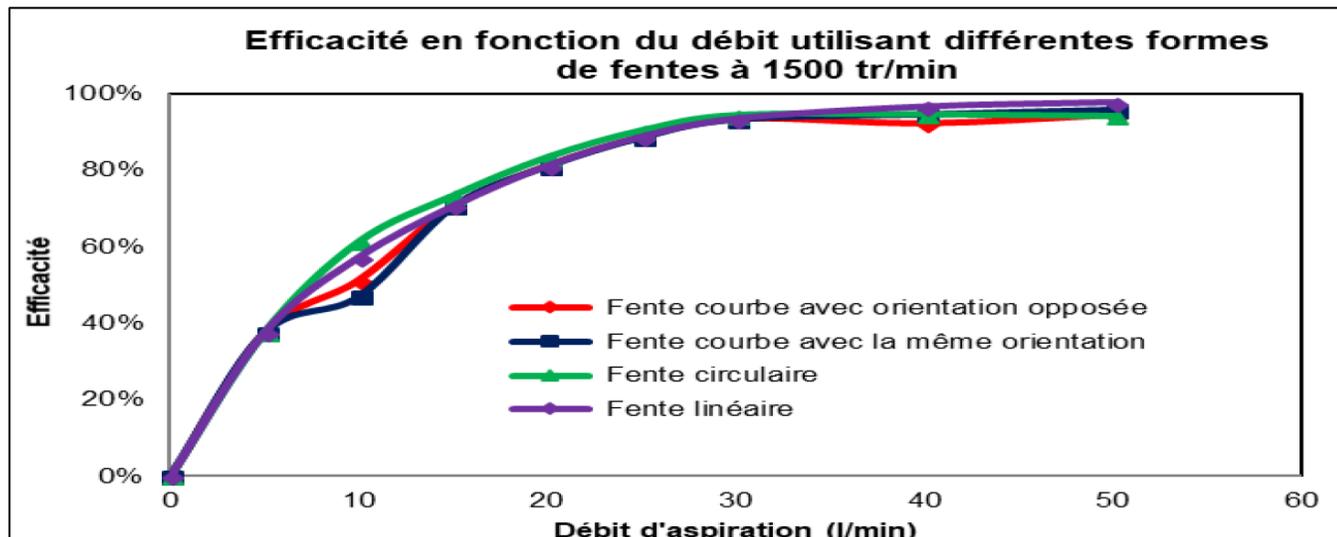
5 lpm



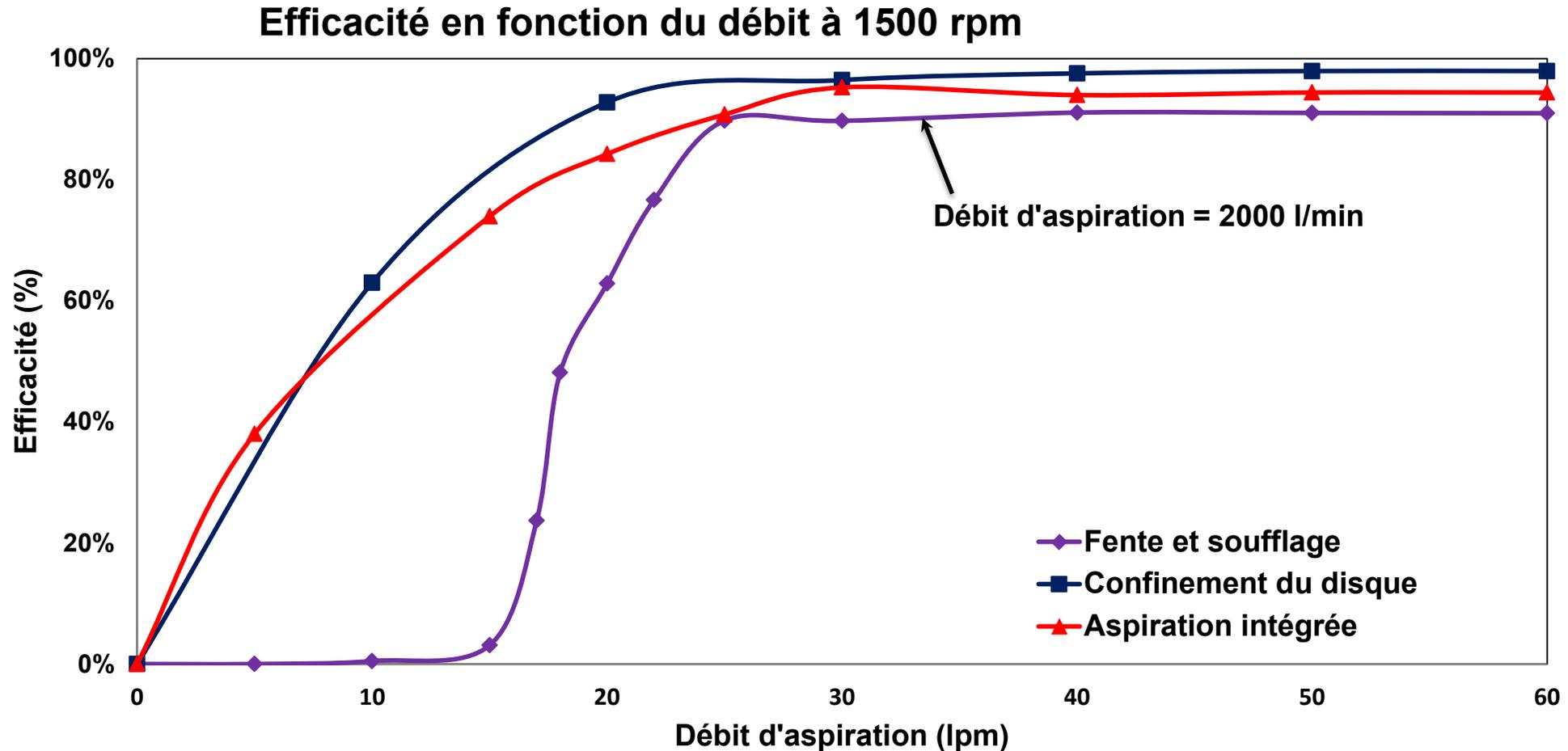
## Réduction à la source 3. Aspiration par le disque



- ✓ Aspiration par le disque efficace
- ✓ Gaz traceur évalue correctement le système de réduction à la source



## Réduction à la source



Comparaison des trois concepts à 1500 rpm

- La vitesse de rotation influence la dispersion
- La taille des particules n'influence pas la dispersion
- Toute la zone de travail est entièrement contaminée
- Le gaz traceur décrit la dispersion à grande vitesse de rotation
- Validation CFD vs expérimentation
- Confinement du disque ou aspiration intégrée au disque réduit efficacement la poussière lors du polissage en surface plane
- Un système d'aspiration accompagné d'un soufflage laminaire permet de réduire la poussière en zone de travail

## Recommandations 'préliminaires'

- Privilégier des matériaux à faible teneur en quartz
- Privilégier l'abrasif sans silice
- Petite taille du disque abrasif
- Vitesse de rotation moyenne favorise la captation à la source et la qualité de surface
- Petite vitesse d'avance aidera la captation à la source
- Travail humide réduit les émissions des particules de grosse taille mais ne réduit pas les PUF
- Aspiration intégrée au disque : par le disque ou par confinement du disque réduit les émissions de poussière pour un polissage de surface plane
- Un système combinant une aspiration à proximité de la source et un soufflage laminaire faible permet de réduire les émissions pour un polissage de surface plane et sa périphérie

**Formations** : 2 postdoctoraux, 1 doctorats, 5 maîtrises

## **Rapport scientifique** :

- ✓ Bahloul, A., Vanterpool, R. F. J., Djebara, A., Songmene, V., Saidi, M. N., Kouam, J., Reggio, M., Villalpando, F. (2019). *Transformation du granit : Caractérisation et contrôle de la poussière de la silice émise par le polissage* (Rapport n° R-1054). Montréal, QC: IRSST.

## **6 articles de revus internationaux** :

- ✓ Saidi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., Bahloul, A. (2015). Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2109-2121.
- ✓ Saidi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., Bahloul, A. (2018). Rotational and translation-free polishing of granite: surface quality and dust particles emission and dispersion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1), 289-303.
- ✓ Songmene, V., Kouam, J., Bahloul, A. (2018). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite. *Measurement*, 114, 398-408.
- ✓ Bahloul, A., Djebara, A., Saidi, M. N., Songmene, V., Villalpando, F., Reggio, M. (2019). Computational and experimental analysis of ultrafine particle dispersion during granite polishing. *Aerosol Science and Engineering*, 3, 21-31.
- ✓ Saidi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., Bahloul, A. (2019). Study of surface quality and dust particles emission and dispersion during dry polishing of granite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-11), 4675-4684.
- ✓ Saidi, M. N., Djebara, A., Songmene, V., Bahloul, A. (2019). Experimental evaluation of three local exhaust ventilation systems designed to reduce ultrafine dust emission during a polishing process. *Aerosol Science and Engineering*, 1-9.

**5 Conférences** : 3 conférences internationales, 2 conférences à Québec

# Questions

