



Journée I-Site CAP 20-25  
Challenge 2  
Thème AgroTechnologies

## ➤ TASK FORCE SEMIS

Performances du transport pneumatique de particules

**F. Gillon** (Thèse UCA 2018 - 2020) et encadrants F. Bouchon et L. Chupin

**A. Mohamed Ali** (CDD Ingénieur d'Etude UCA) et encadrant N. Bouton

**T.T. Le**, Ingénieur de Recherche INRAE et encadrants D. Miclet, J. Clément, E. Piron,  
sous l'œil vigilant de M. Berducat



# ➤ Performances du transport pneumatique au semis

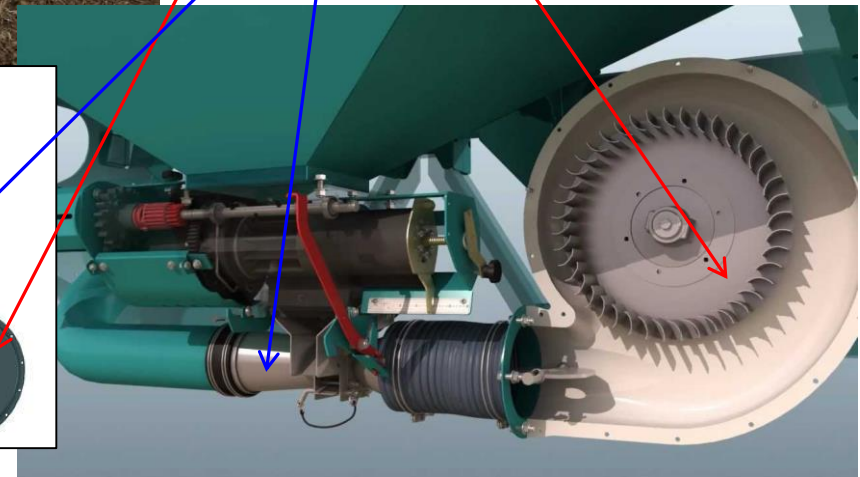
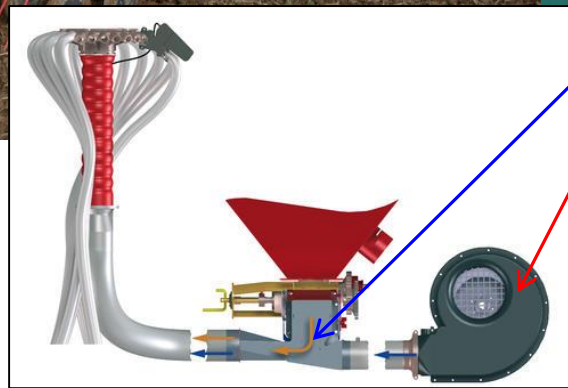
CAP  
20-25

## Problématique générale

Pour ce type de machine ...



- Avec des problématiques « énergétiques » :
  - Dimensions et RPM ventilateur en fonction du débit et type de graine, de la taille du semoir, ... ?
  - Caractéristiques du venturi, des organes de transport (en taille, positionnement, orientations, ...) ?

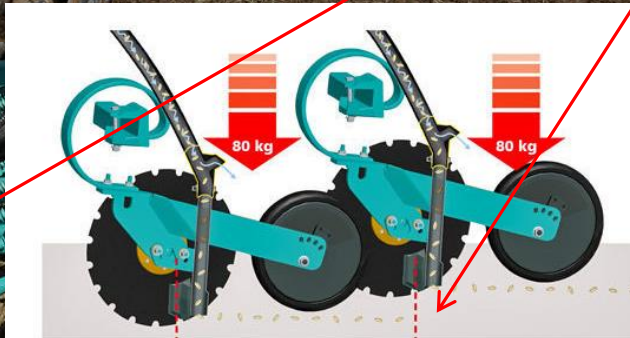


# ➤ Performances du transport pneumatique au semis

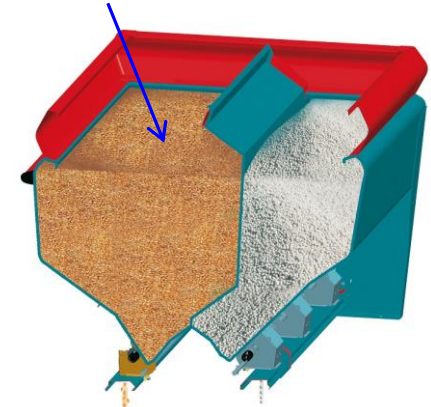
CAP  
20-25

## Problématique générale

Pour ce type de machine ...



- Avec des problématiques « énergétiques » ...
- ... et des problématiques « performances agronomiques » :
  - Quelle régularité « transversale », « longitudinale », de profondeur d'enterrage, ... ?
  - Quelle capacité à distribuer des particules de caractéristiques différentes (transport dans les mêmes tubes) ?



INRAE

TASK FORCE SEMIS – Performances du transport pneumatique de particules solides

13 fev 2020 / CAP20-25 - Challenge 2

UCA  
UNIVERSITÉ  
Clermont  
Auvergne

Im  
bp

INSTITUT  
PASCAL  
sciences de l'ingénierie et des systèmes

p. 3



# ➤ Performances du transport pneumatique au semis

Travaux mis en œuvre

## 1 – Investigation côté « performances » :

- Capteurs utilisables / contraintes
  - Pour réaliser un banc « essais » / « validation » ;
  - Pour réaliser un banc « recherche » / « compréhension » ;
  - Pour valider des modélisations
- Type de banc envisageable

## 2 – Modélisation / simulation du transport pneumatique :

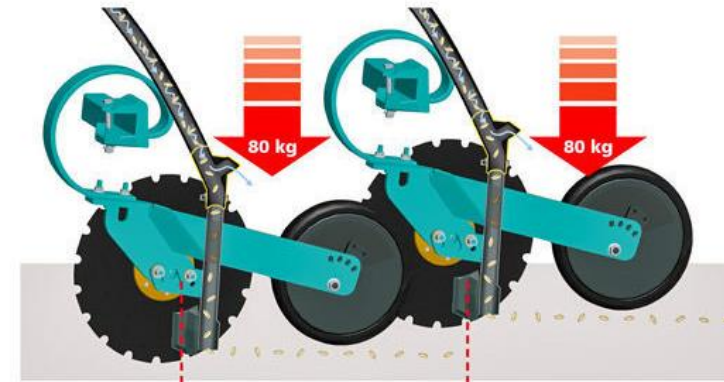
- Thèse UCA « Mathématique » concernant le transport pneumatique
- Utilisation de logiciel « boîte noire » de CFD, couplage DEM

# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

## Capteurs utilisables – contraintes / Cadre « Evaluation »

- 1 « descente » tous les 10 à 15cm
- de 3m, ... jusqu'à 12m de large !
- de 40 à 140 gr / sec !
- Objectif de servir de « référence » (« certification »)

*Capteurs avec ou sans contact ont été évalués :*



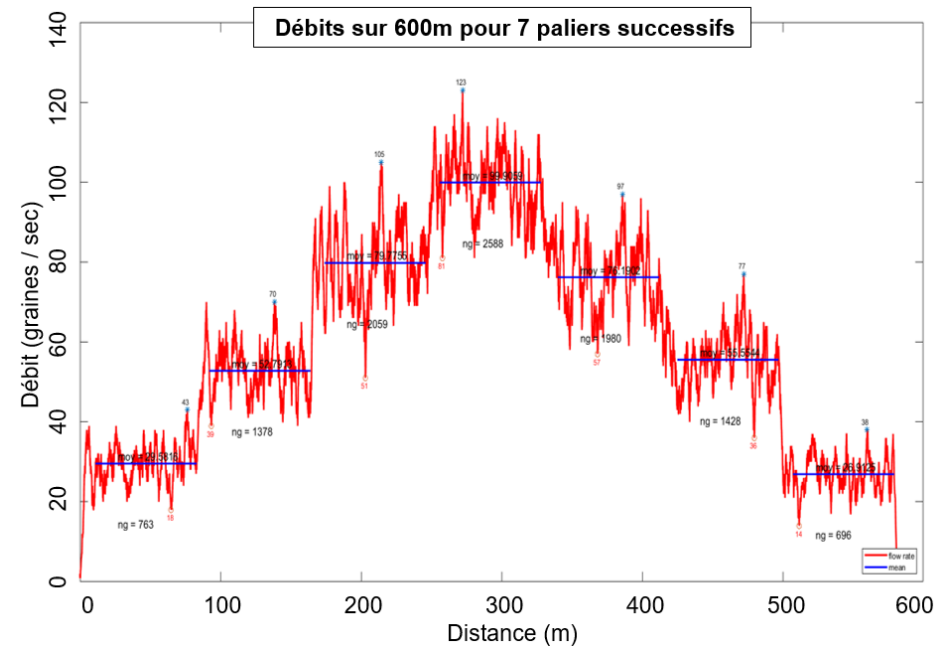
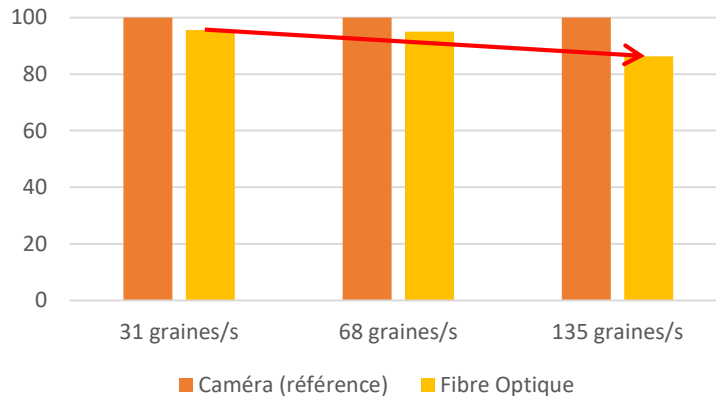
# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

## Capteurs utilisables – contraintes / Cadre « Evaluation »

Ensemble des capteurs hors caméra testés « décevants » :

- Baisse des performances avec le débit ;
- Beaucoup de « doubles »  $\Rightarrow$  fréquence à atteindre  $\ggg 1 / (\text{nbre gr} / \text{sec})$
- Très haute dispersion dans la régularité de débit (... et variable selon la position dans la ligne de transport !)

Caractérisation de la fibre (en %)



## ➤ 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

### Mode opératoire



- Sur la ligne pneumatique d'une des sorties de tête de distribution
- À travers un tube transparent rectiligne
- En 2D, ou en 3D
- Transversalement au tube
- Technique de prise d'images par ombroscopie
- Cadence à 250 ips
- Transport de graines de blé

# > 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

## Mode opératoire

### ✓ En 2D :

- ✓ Traitement d'images (acquises à 250 ips)
- ✓ Suivi des particules
- ✓ Entrainement réseau de neurones pour identification des « doubles »
- ✓ Extraction vitesses, intervalles entre particules, débits

### ✓ En 3D :

- ✓ Traitement d'images de chaque caméra et correspondance des particules en se basant sur le temps de passage et la vitesse des particules (moins de problèmes de « doubles »)
- ✓ Reconstitution 3D des trajectoires des particules
- ✓ Extraction vitesses, intervalles entre particules, débits
- ✓ Distribution des positions et des vitesses de passage des graines dans la section du tube

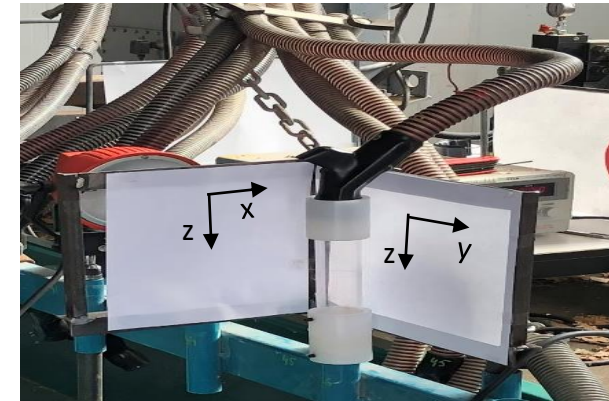
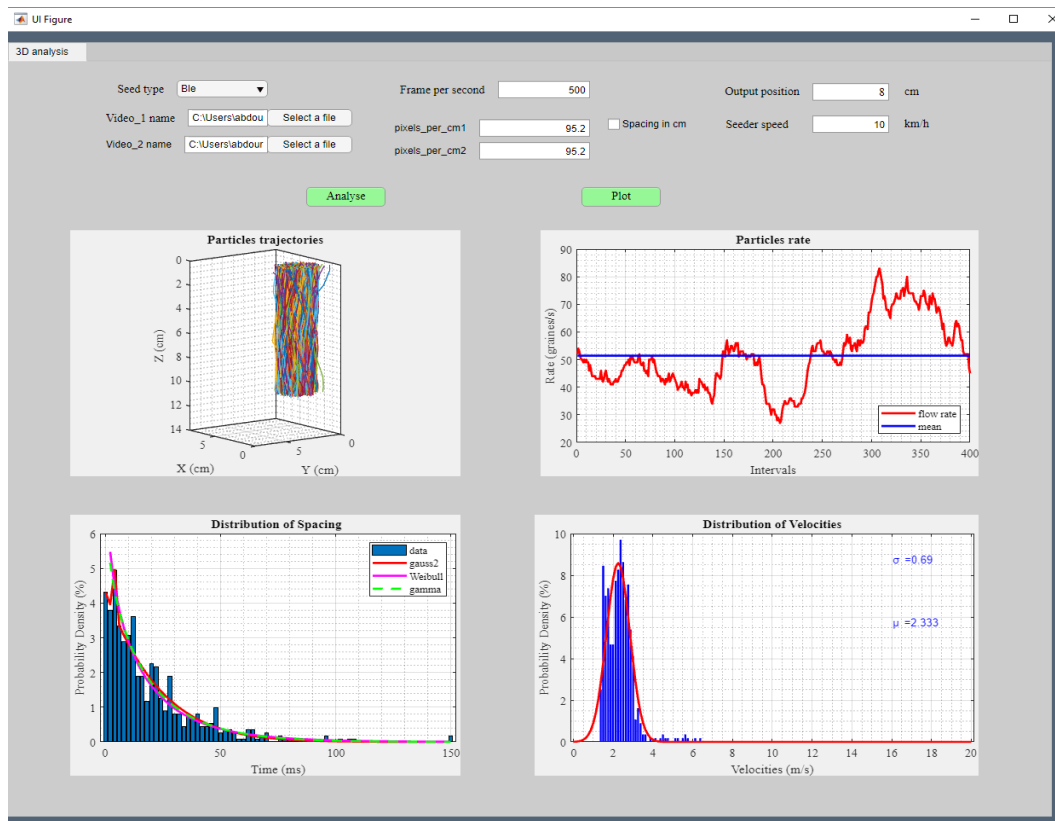


# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

Obtention de distributions statistiques des différentes grandeurs

**Création logiciel de traitement (exemple sur quelques secondes) :**



## Utilisable :

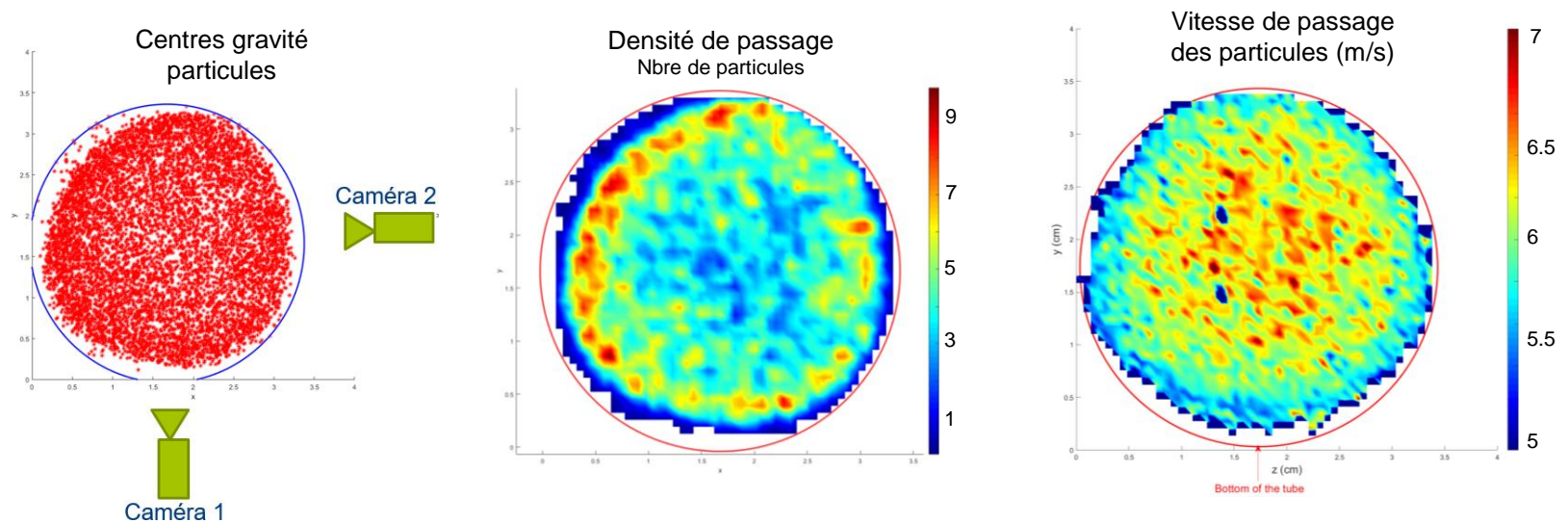
- En fin de ligne de transport
- Ou à un endroit quelconque en amont (sous réserve d'accessibilité)

# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

Obtention de distributions spatiales des différentes grandeurs

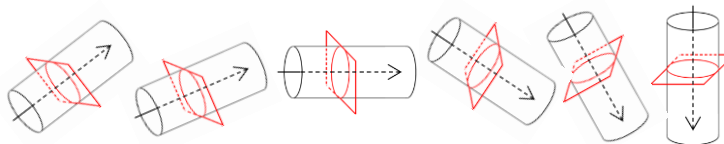
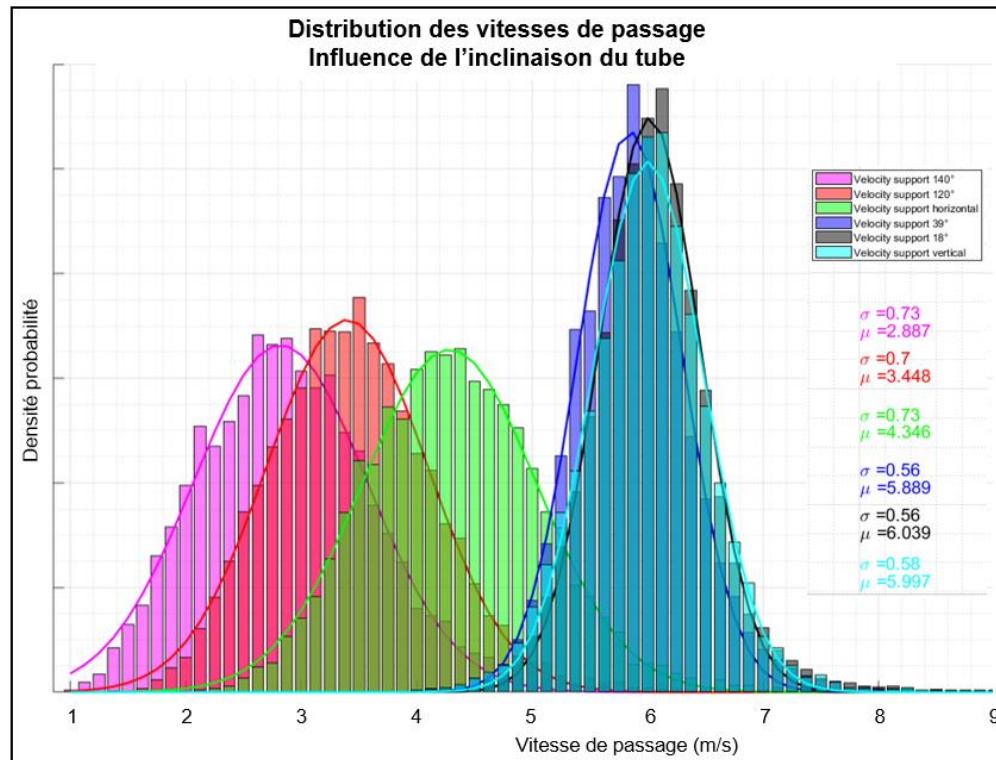
- Mesure pendant environ 20 secondes ;
- Identification des centres de gravité particules ;
- Calcul des densités par  $\text{mm}^2$  et filtre moyenneur diam 3mm ;
- Calcul des vitesses et représentation spatiale moyennée ;



# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

Mise en œuvre dans différentes configurations et résultats

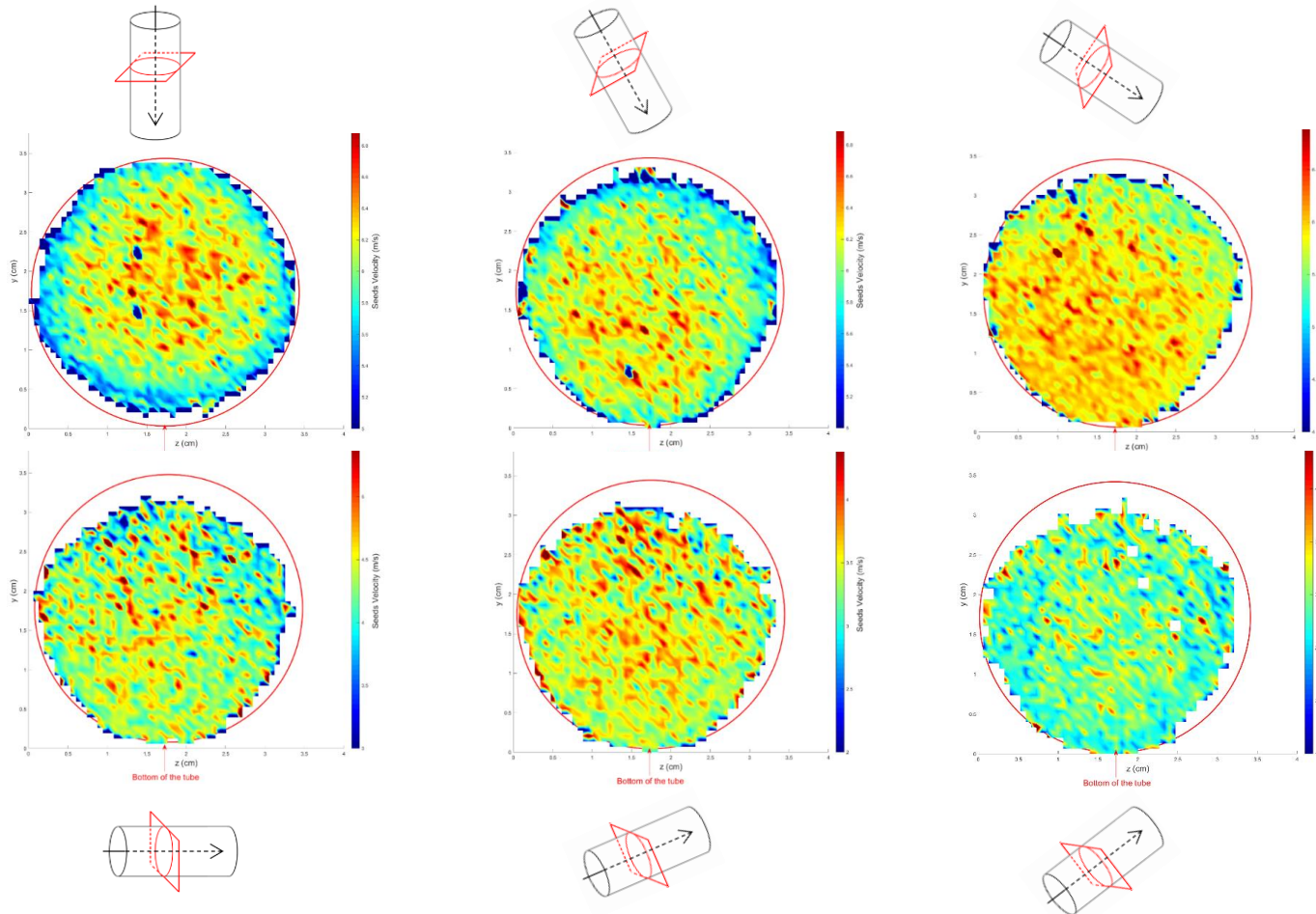


- Vitesse moyenne influencée par la pente du tube (surtout à partir de 90° et au-delà) ;
- Dispersion des vitesses également influencée dans sens opposé (effet « pulsatile »).

# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

Mise en œuvre dans différentes configurations et résultats



## Représentation spatiale des vitesses :

Tendances :

- Vitesses fortes au centre du tube
- Vitesses plus faibles sur la couronne périphérique

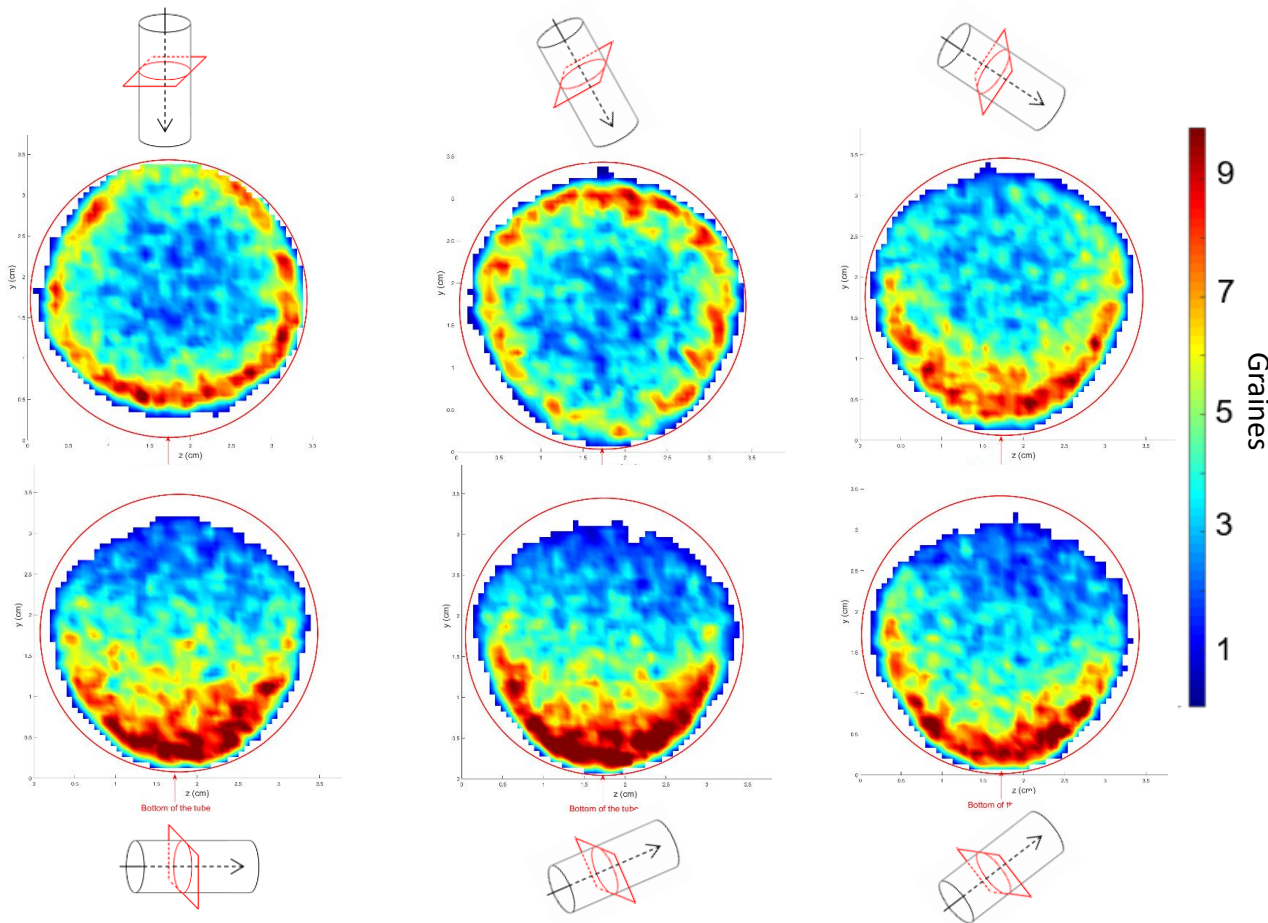
*Rq : échelles auto.*



# ➤ 1 – Investigation côté « performances »

Vidéo rapide / Cadre « Recherche », « Compréhension phénomènes »

Mise en œuvre dans différentes configurations et résultats



## Représentation spatiale des densités de passage :

Tendances :

- Particules passent sur la couronne extérieure (OdG de 1 à 9) ;
- La gravité influence à partir de quelques degrés d'inclinaison du tube seulement

*Rq : Mêmes échelles sur les 6 graphiques*

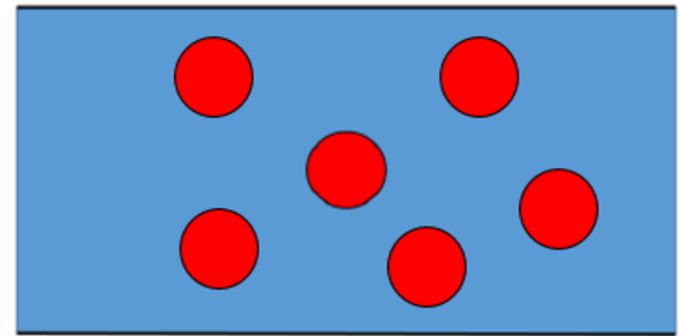
Thèse : « Transport de particules dans un fluide faiblement visqueux »

## Modélisation du problème

On décrit le problème physique à l'aide du système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_f (\partial_t u + u \cdot \nabla u) - \nu_f \Delta u + \nabla p = -\rho_f g e_2 \\ \operatorname{div}(u) = 0 \\ u|_{S_t^{(i)}} = V^{(i)} + \omega^{(i)} e_3 \wedge r^{(i)} \\ m_i \dot{V}^{(i)} = - \int_{S_t^{(i)}} \sigma \cdot n_i - m_i g e_2 \\ \frac{m_i R_i^2}{2} \dot{\omega}^{(i)} = - \int_{S_t^{(i)}} r^{(i)} \wedge \sigma \cdot n_i \\ \sigma = 2\nu_f D(u) - p I_d \end{array} \right.$$

Les inconnues du système sont  $u$  (vitesse du fluide),  $p$  (la pression du fluide),  $V^{(i)}$  (les vitesses de translation des particules) et  $\omega^{(i)}$  (les vitesses angulaires des particules).



$\rho_f$  : densité du fluide

$\nu_f$  : viscosité du fluide

$\sigma$  : tenseur des contraintes hydrodynamiques

$S_t^{(i)}$  : bord du solide  $i$  de normale  $n_i$

$r^{(i)}$  : vecteur position d'un point du solide  $i$

$m_i$  : masse du solide  $i$

$R_i$  : rayon du solide  $i$

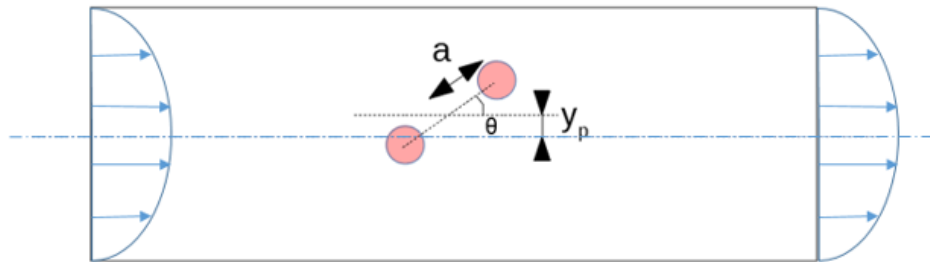
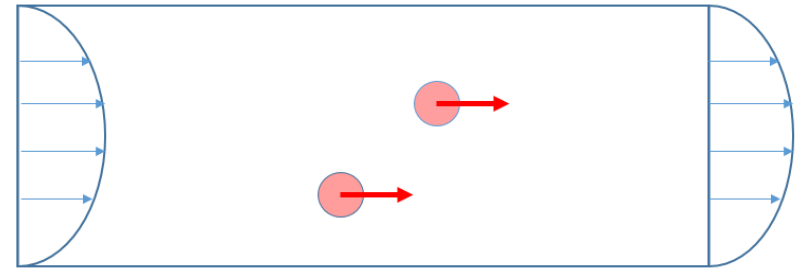
## ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

CAP  
20-25

Thèse : « Transport de particules dans un fluide faiblement visqueux »

### Recherche de positions d'équilibre

Le problème : peut-on trouver des positions de deux particules telles que l'écoulement associé soit "stationnaire" au sens où les deux particules avanceront horizontalement à même vitesse ?



Modélisation : une position de deux particules est décrite avec les paramètres  $(a, \theta, y_p)$  (voir figure). La question est donc de savoir pour quel(s) jeu(x) de paramètres  $(a, \theta, y_p)$  l'écoulement est "stationnaire".

Résolution théorique : On peut montrer que, à forte viscosité, le problème est équivalent à résoudre pour chaque jeu de paramètres  $(a, \theta, y_p)$  un système linéaire de la forme :

$$Av = b$$

Il faut ensuite déterminer des conditions sur  $(a, \theta, y_p)$  pour que la solution soit "stationnaire".

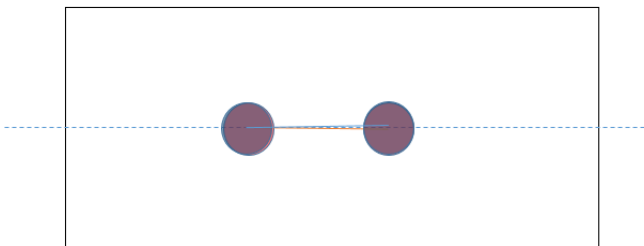
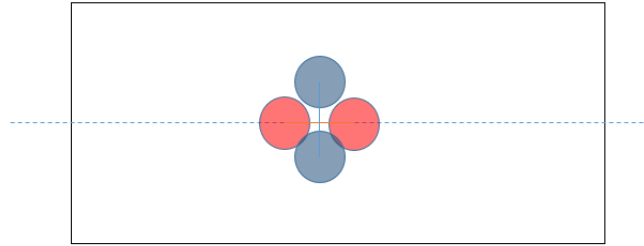
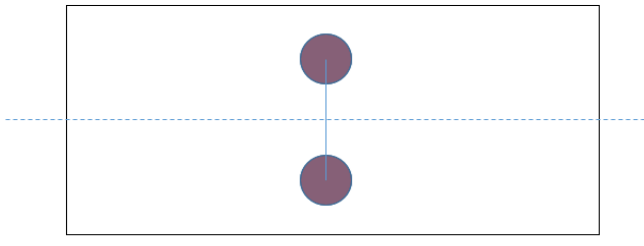
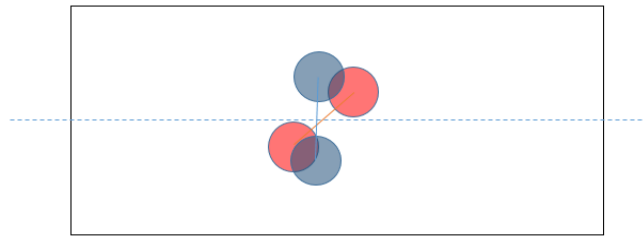
## ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

CAP  
20-25

Thèse : « Transport de particules dans un fluide faiblement visqueux »

Résolution numérique (à l'aide de FreeFem++) : étant donnée une position initiale  $(a^0, \theta^0, y_p^0)$  des deux particules, on calcule l'écoulement fluide (en résolvant  $Av = b$ ), puis on déplace les particules à l'aide du champ des vitesses obtenu pour obtenir une nouvelle position  $(a^1, \theta^1, y_p^1)$  des deux particules. On itère le processus pour obtenir une position stable.

Position initiale, position finale.

 <p>Particules initialement alignées horizontalement et séparées d'une certaine distance</p>	 <p>Particules initialement proches et alignées horizontalement</p>
 <p>Particules initialement alignées verticalement et séparées d'une certaine distance</p>	 <p>Particules initialement proches et décalées par rapport à l'horizontal</p>



## ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

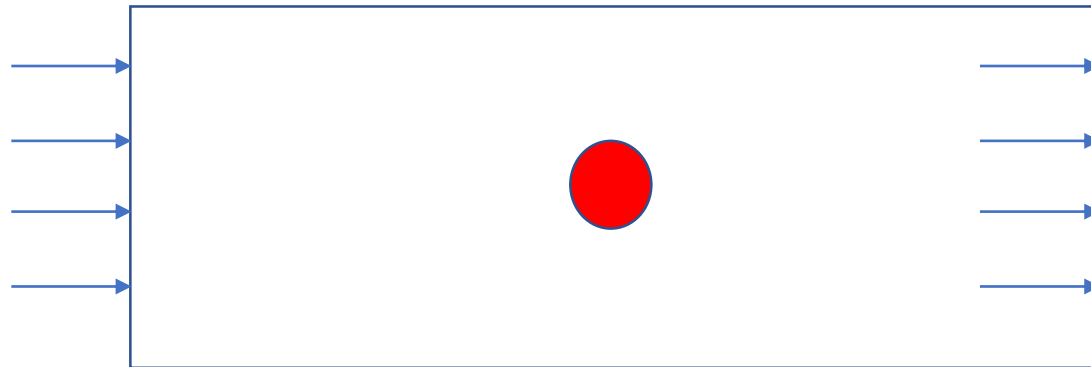
CAP  
20-25

Thèse : « Transport de particules dans un fluide faiblement visqueux »

### Condition limite de contrainte

Le problème : Ecoulement avec force imposée en entrée.

Objectif : déterminer l'influence de la taille de la particule sur le débit du fluide.



$$(\sigma \cdot n)_{\text{entrée}} = (P_{\text{atm}} + F_s, \quad 0)$$

$$(\sigma \cdot n)_{\text{sortie}} = (P_{\text{atm}}, \quad 0)$$

## ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

CAP  
20-25

Thèse : « Transport de particules dans un fluide faiblement visqueux »

### Influence de la taille de la particule sur le débit

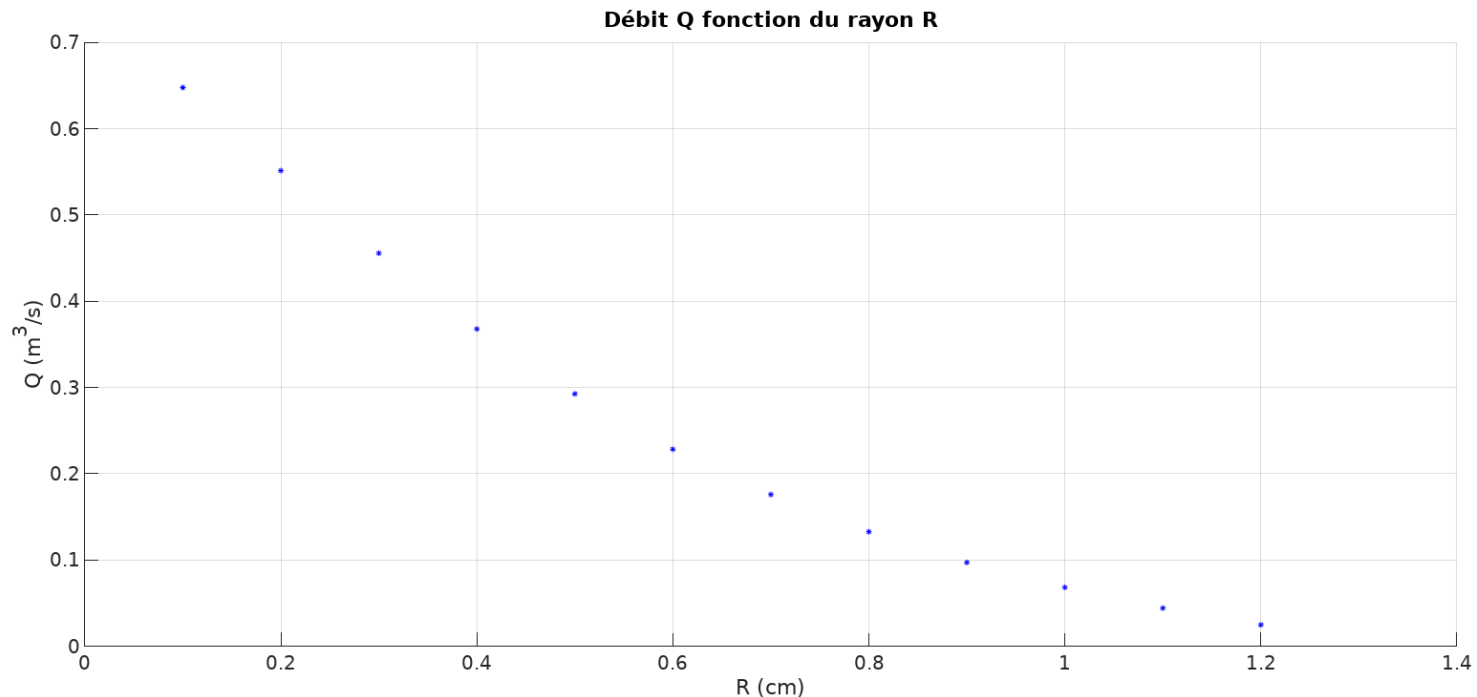
Résolution numérique (FreeFem++) :

diamètre du tube =  $3\text{ cm}$ ,

densité du fluide =  $1\text{ kg/m}^3$ ,

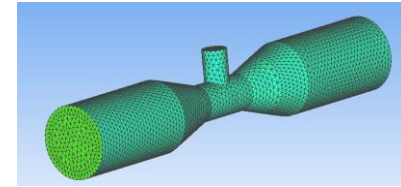
viscosité du fluide =  $10^{-5}\text{ Pa.s}$ ,

force surfacique en entrée de  $10^5\text{ Pa}$ ,

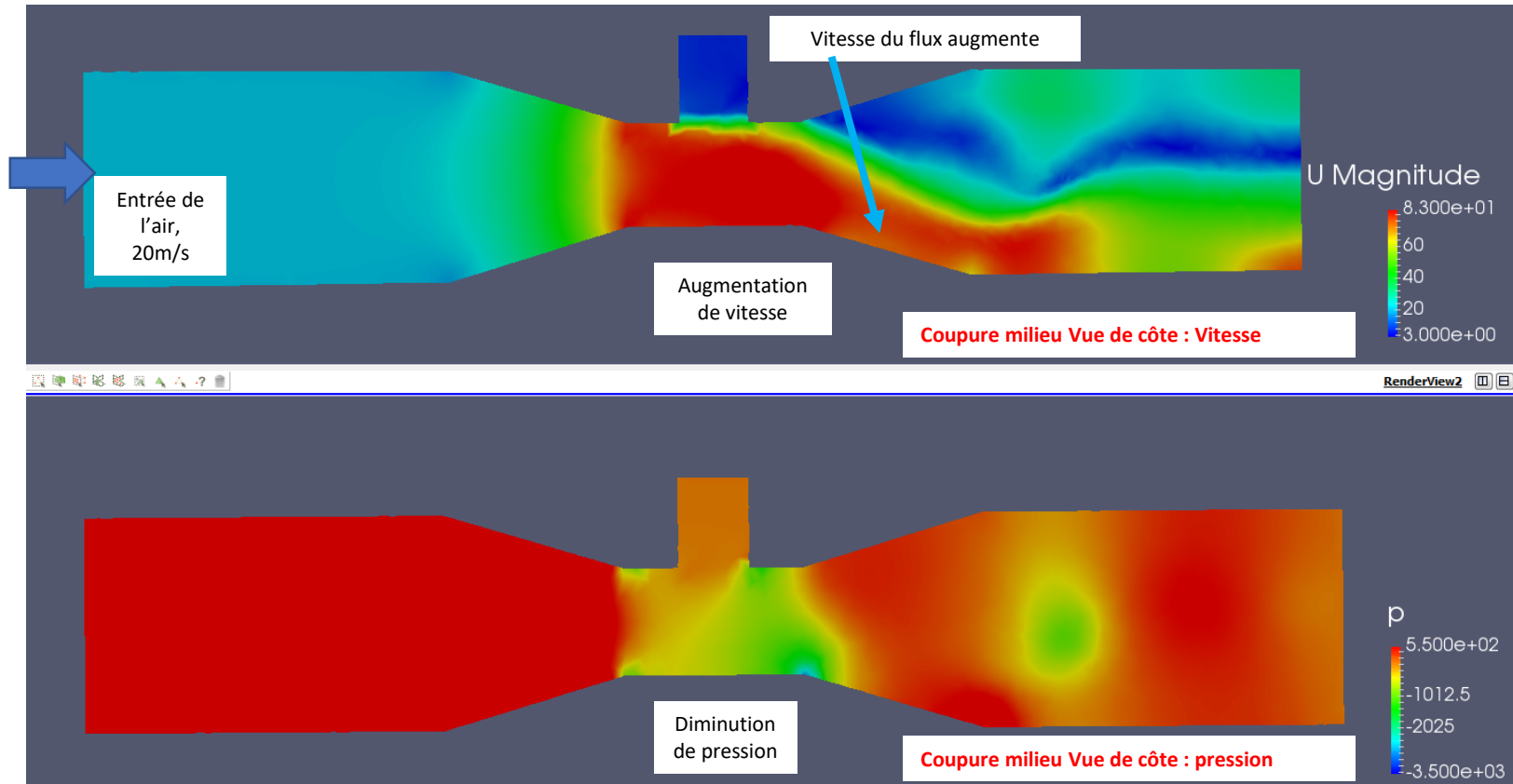


## ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

Utilisation logiciel « Boîte noire » de CFD  
(dimensionnement, ...)



Exemple de l'effet Venturi :

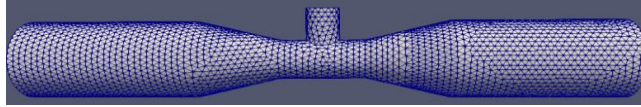


# ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

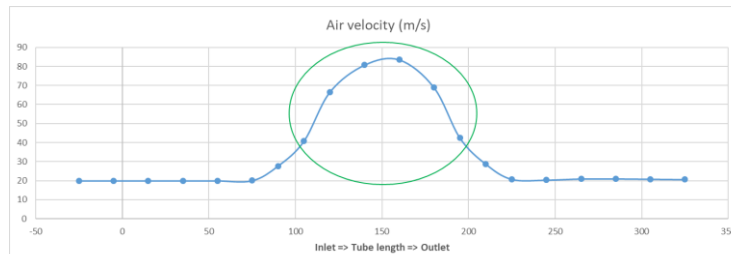
CAP  
20-25

Utilisation logiciel « Boîte noire » de CFD  
(dimensionnement, ...)

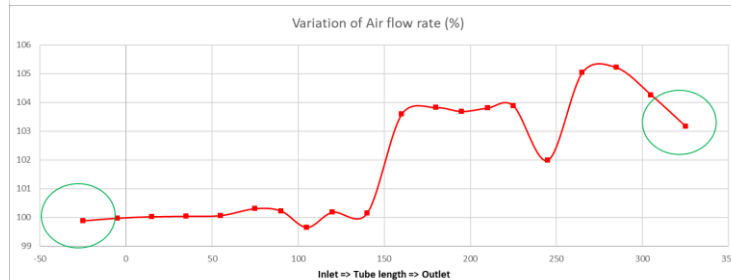
Extraction de sections :



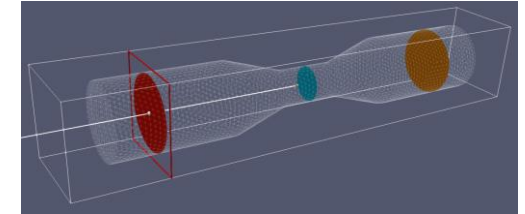
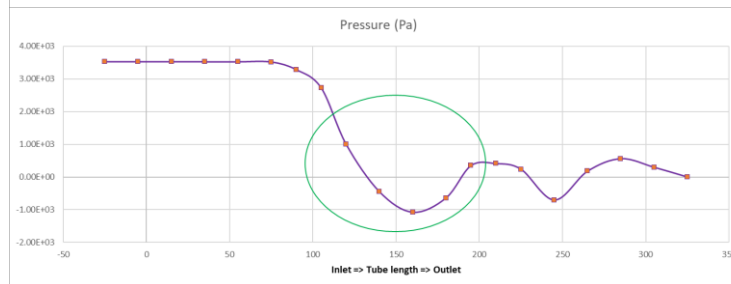
Vitesse variable



Entrée de matière



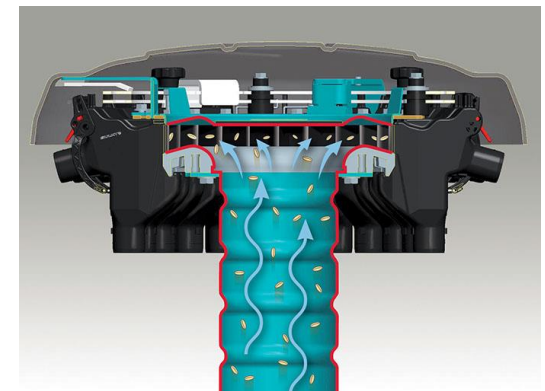
Perte de charge plus importante (fuite)



1 – Bernoulli « vérifié » sur les sections successives

2 – Avantage de la méthode numérique : donne accès aux valeurs locales

*A utiliser pour dimensionner tube annelé, capacité ventilateur, circuit, ...*



INRAE

TASK FORCE SEMIS – Performances du transport pneumatique de particules solides

13 fev 2020 / CAP20-25 - Challenge 2

UCA  
UNIVERSITÉ  
Clermont  
Auvergne

Im  
bp

INSTITUT  
PASCAL  
sciences de l'ingénierie et des systèmes

p. 20

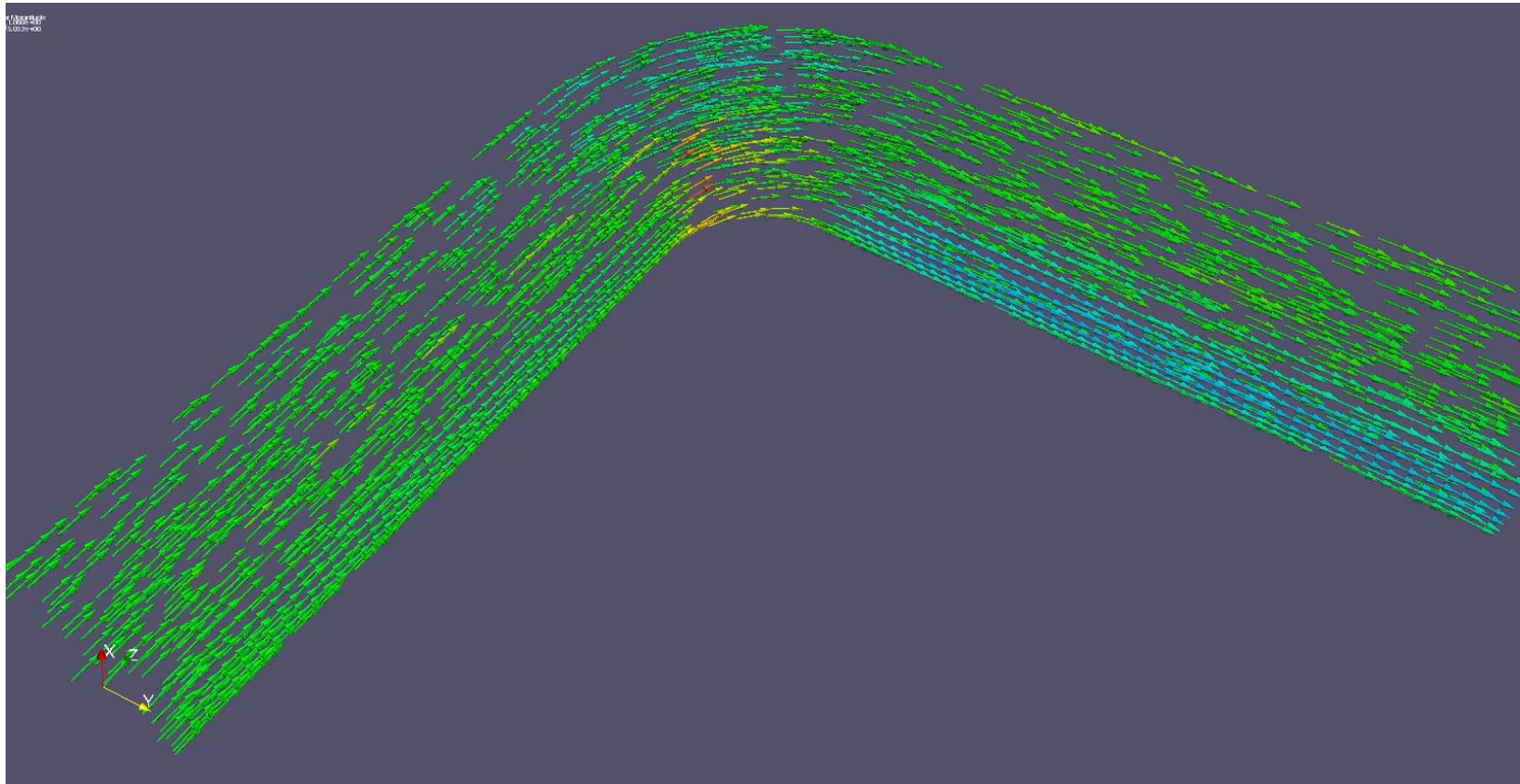


## ➤ 2 – Modélisation / simulation transport pneumatique

CAP  
20-25

Couplage CFD / DEM pour transport de grains

Première tentative, à valider (à « caler » !) grâce aux moyens métrologiques développés



## Côté « mesure de performances » et « banc de mesure » :

- Moyens de mesure moyennement satisfaisants
- Impliquant d'envisager le développement d'un banc « par objectifs » :
  - Transversal d'une part ;
  - Longitudinal sur certaines lignes d'autre part.Impossibilité a priori d'obtenir un banc donnant accès à la distribution spatiale
- Multi-espèces ou variétés reste à développer (caméra rapide couleur par ex.)

## Côté « modélisation / simulation » :

- Thèse en phase de finalisation
- Logiciels « boîte noire » à mettre en œuvre avec industriels (2 sont identifiés) :
  - Meilleur dimensionnement des organes de transport
  - Re-conception organes enterrage (couplage CFD / DEM et interaction avec le sol)

**Merci de votre écoute !**