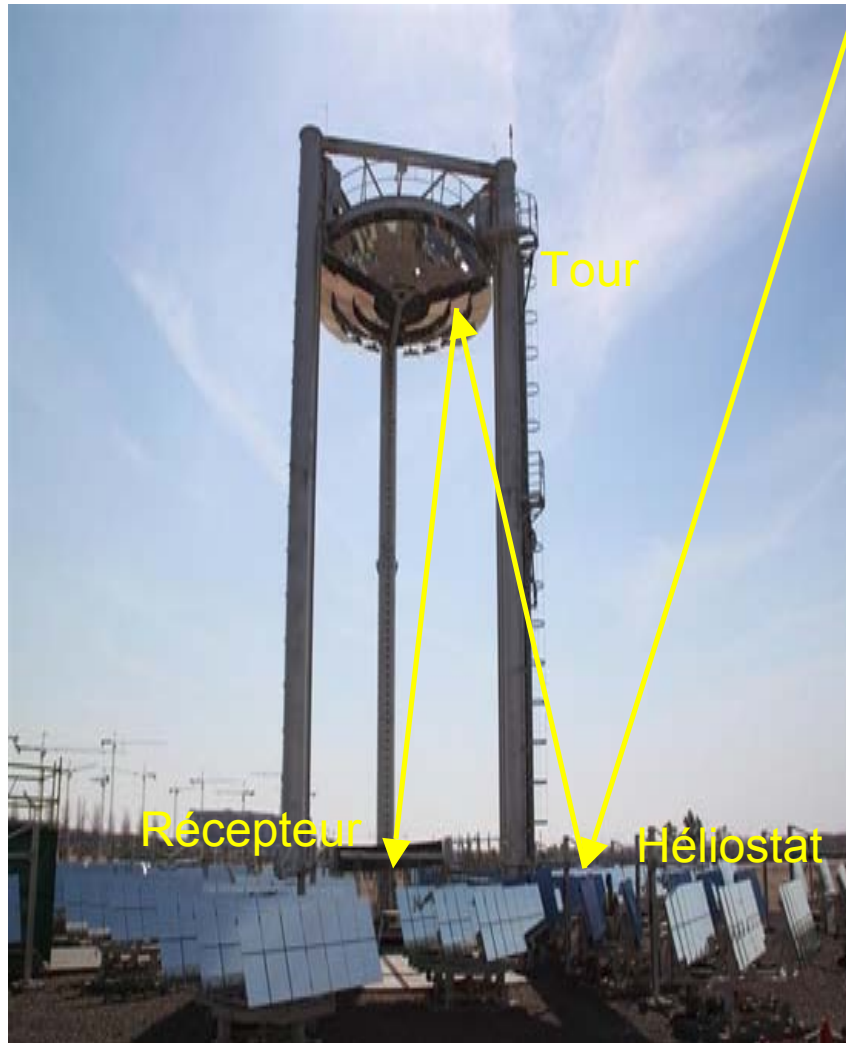

Etude théorique et expérimentale d'un récepteur d'énergie solaire concentrée à lit fluidisé

Présenté par Germain BAUD

Directeurs de thèse :
- Jean-Jacques BEZIAN
- Gabriel OLALDE



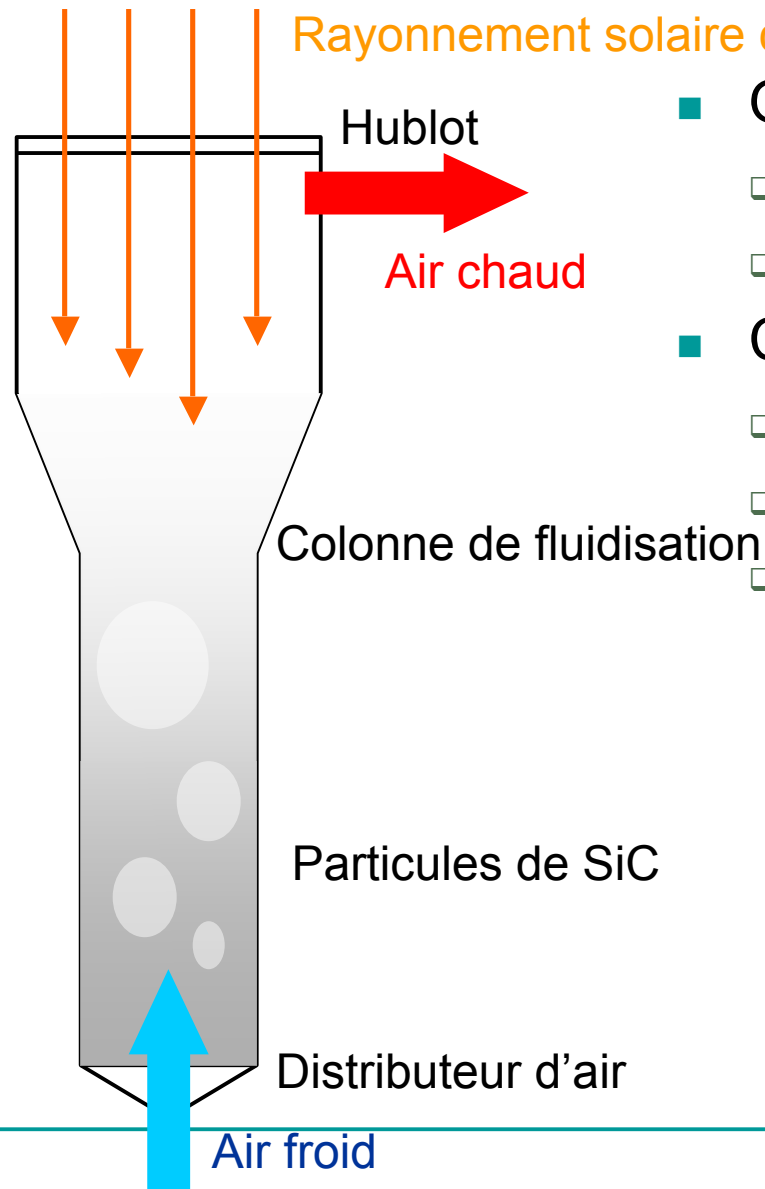
Les centrales solaires thermodynamiques de type beam-down



- Caractéristiques :
 - Haute température
 - Haut rendement (>30%)
 - Grande puissance
 - Possibilité de stockage
 - Récepteur au sol



Le récepteur solaire à lit fluidisé



- Objectifs :

- Air chaud à 1100°C
- Rendement max.

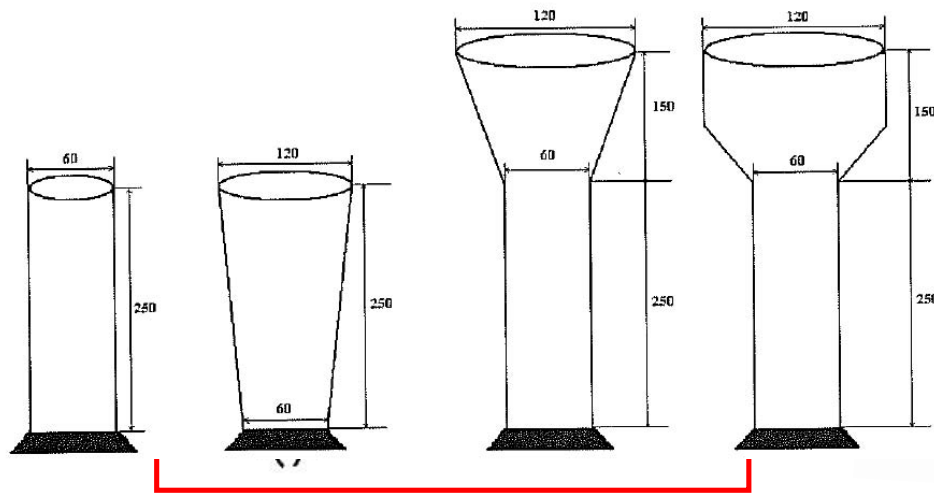
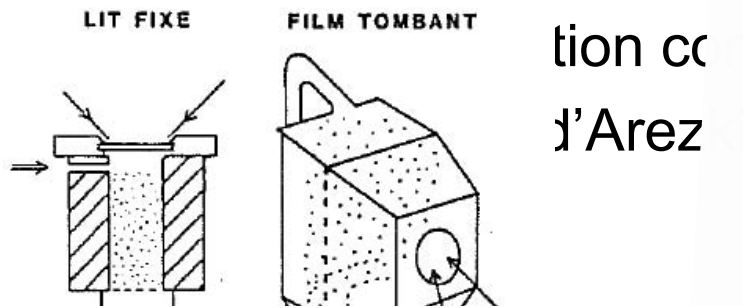
- Contraintes :

- Bonne fluidisation
- Pas d'entraînement de particule
- Respect des températures max. des matériaux

Etat de l'art du récepteur solaire à lit fluidisé (récepteur thermique et réacteur chimique)

- De nombreux designs de récepteurs solaires à particules (années 80)
- Un bon potentiel pour les récepteurs à lit fluidisé bouillonnant

- P_{a}
- L_{a}



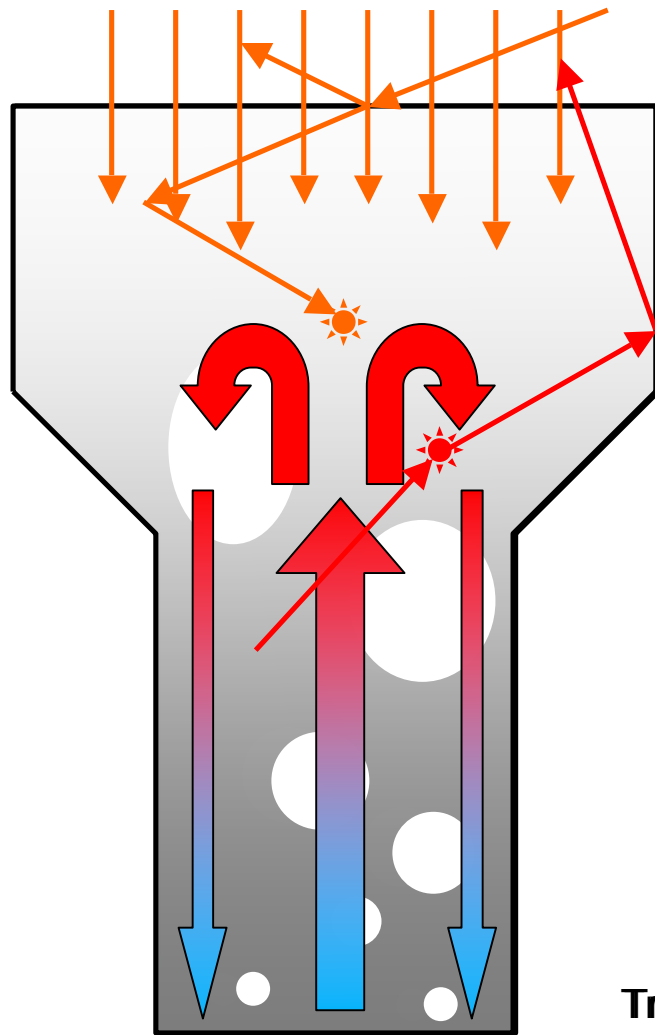
- Choix de la géométrie évasée
- $\eta = 70\%$ pour $T = 930\text{K}$
- Points chauds limitants
- Protection du hublot
- Pertes radiatives prépondérantes (>25%)

The diagrams show: 'Odeillo' (a conical receiver with a red box around it), 'GTRI (Westinghouse)' (a cylindrical receiver with a tapered top), and 'DLR lab-scale receivers' (a complex receiver with a conical section and a vertical section).

Plan de la présentation

- Transferts thermiques dans le récepteur à lit fluidisé
- Modélisation des transferts radiatifs :
 - Propriétés optiques des particules
 - Simulation 1D - Karine
 - Simulation 3D - EDStaR
- Validation expérimentale
- Conclusion et perspectives

Phénomènes radiatifs et thermiques dans le récepteur à lit fluidisé

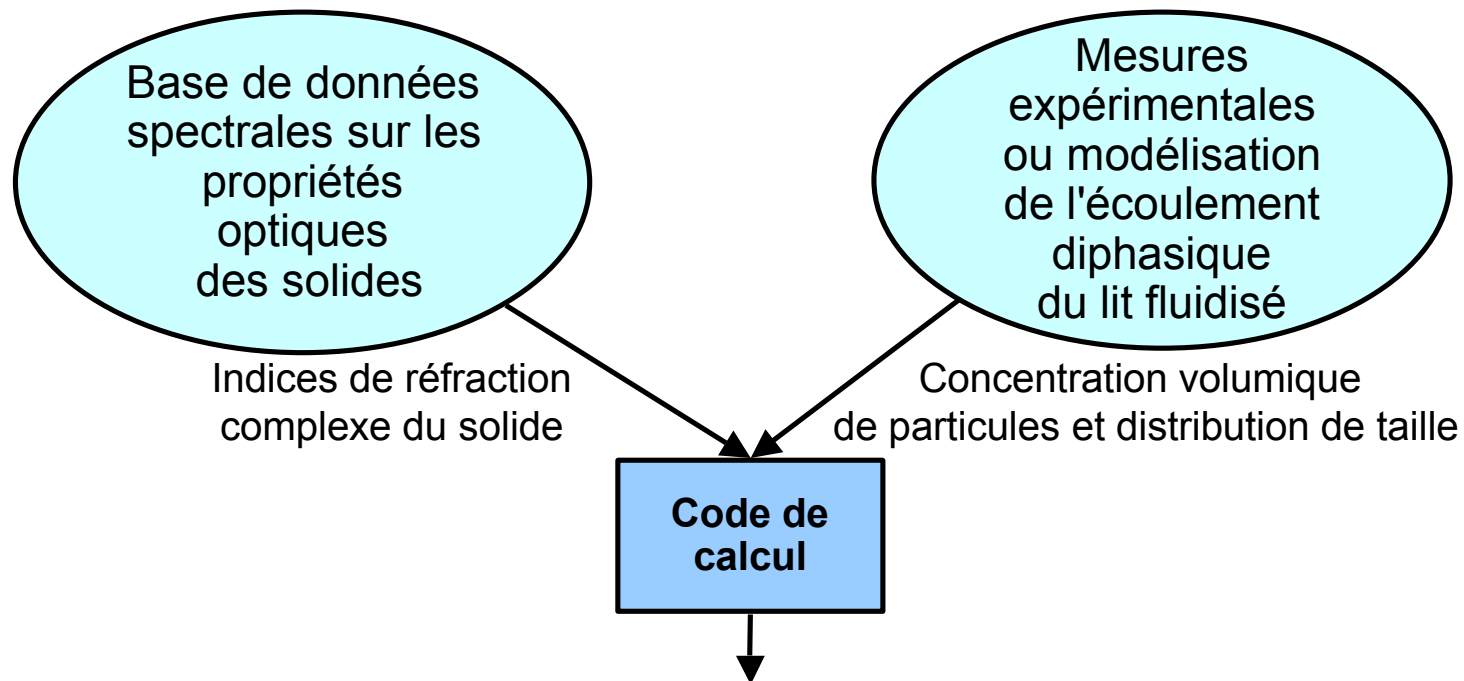


- Choix de modélisation :
 - Des transferts radiatifs
 - Source d'énergie externe
 - Rôle important dans les transferts
 - Les pertes thermiques sont radiatives
 - Cause possible des points chauds
 - De la dynamique des particules
 - Brassage optimal
 - Propriétés optiques du milieu
 - De la thermique du lit
 - Bilan thermique
 - Pertes

Transferts thermiques dans le lit fluidisé

Calcul des propriétés radiatives des particules

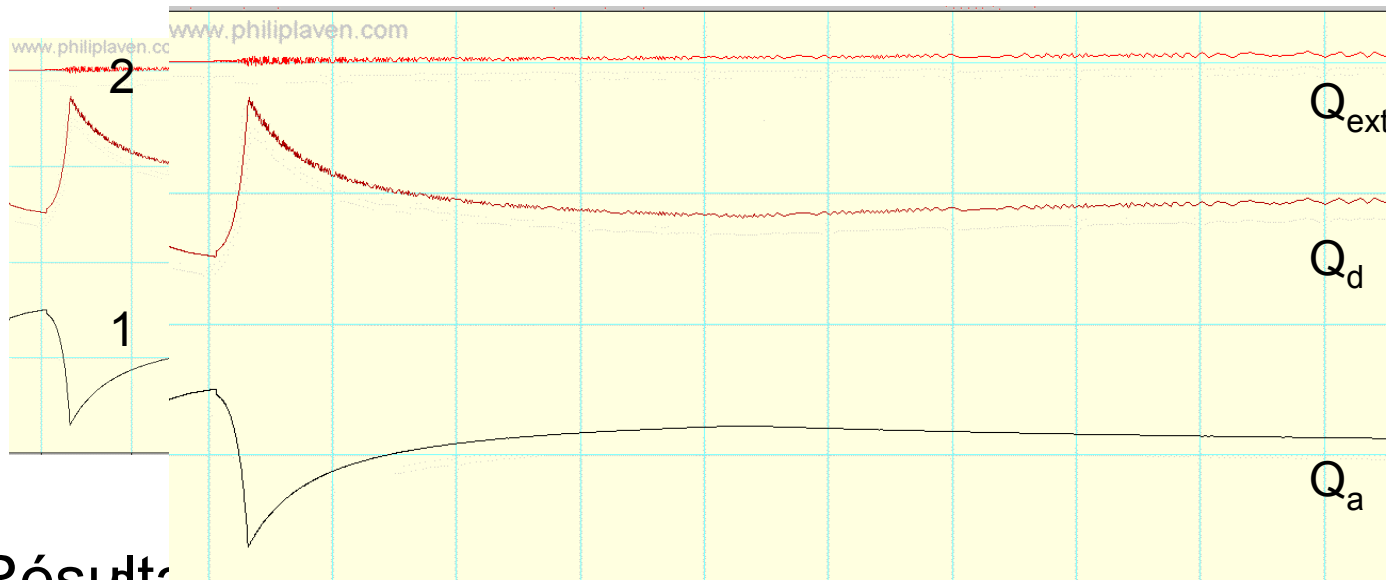
- Hypothèses :
 - Le gaz est transparent
 - Les particules sont sphériques, leur propriétés optiques sont calculés par la théorie de Mie
- Calcul des propriétés optiques du milieu équivalent :



Propriétés optiques du milieu (k_a , k_d , g)

Résultat : Propriétés radiatives de particules de 280 μm de SiC sur le spectre solaire

■ Surfaces efficaces :



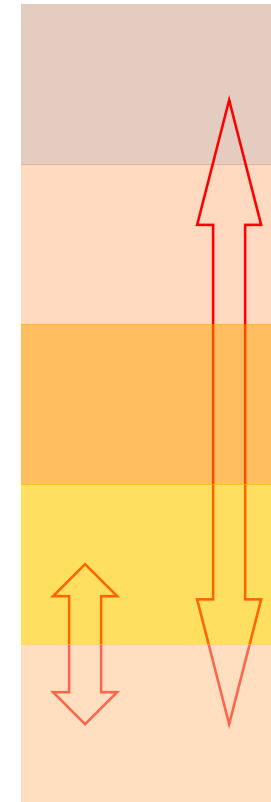
■ Résultats :

- Calcul gris équivalent au calcul spectrale
- La distribution gaussienne de diamètre de particules expérimentale est modélisée par une distribution mono dispersée
- Mélanges de particules de différents matériaux

Karine : Code de calcul radiatif 1D

(développé par V.Eymet)

- **Caractéristiques du code :**
 - Code de transfert radiatifs 1D atmosphérique :
 - Discrétisation en couches horizontales isothermes...
 - ... Et homogènes
 - Analogie entre lit fluidisé et nuage de particules
 - Formulation intégrale de l'ETR résolue par MMC :
 - Diffusions multiples
 - Fortes et faibles épaisseurs optiques
 - Formulation en puissances nettes échangées :
 - Principe de réciprocité des chemins lumineux
 - Faibles gradients de température
 - Milieu optiquement épais



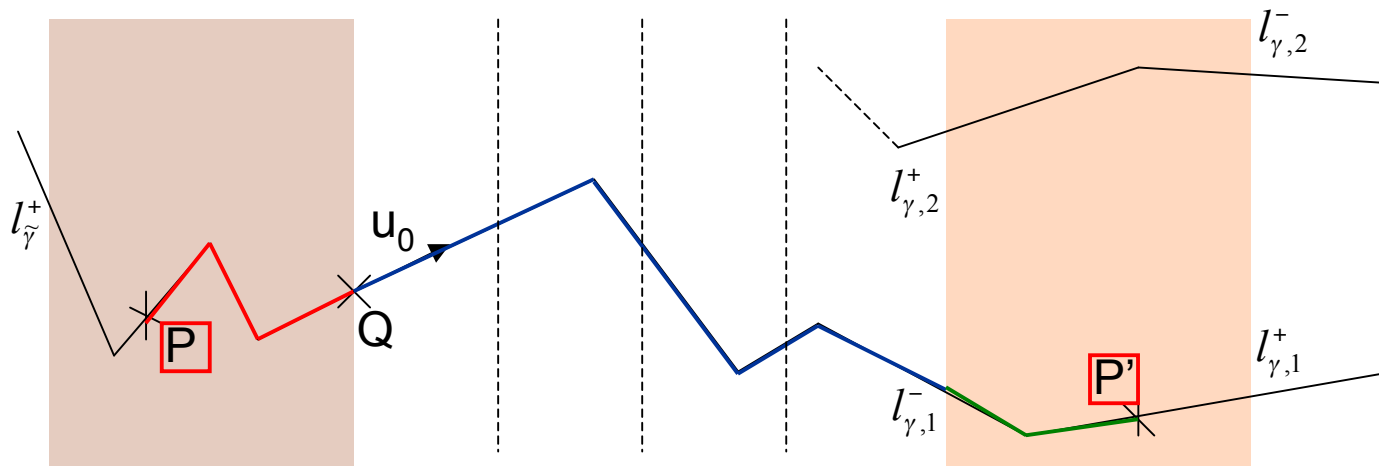
La formulation en Puissances Nettes Echangées basée sur les frontières

- Flux échangé entre le volume i et le volume j :

$$\psi(i, j) = \int_{S_i} dS_i(Q) \int_{2\pi} d\omega(u_0) u_0 \cdot n L_i(Q, u_0) \int_{\Gamma(Q, u_0)} p(\gamma; Q, u_0) d\gamma$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} T_{\gamma, n} \int_{l_{\gamma, n}^-}^{l_{\gamma, n}^+} d\sigma_n(P'_n) k_a(P) k_a(P'_n) [B(P) - B(P')] \exp\left(-\int_{l_{\gamma, n}^-}^{\sigma_n} d\sigma' k_a(\theta')\right)$$

, avec : $L_i(Q, u_0) = \int_{\Gamma(Q, -u_0)} p(\tilde{\gamma}; Q, -u_0) d\tilde{\gamma} \int_0^{l_{\tilde{\gamma}}^{\pm}} d\tilde{\sigma}(P) \exp\left(-\int_0^{\tilde{\sigma}} d\tilde{\sigma}' k_a(\tilde{\theta}')\right)$



La Méthode de Monte Carlo

- Pour calculer l'intégrale : $I = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx$

- On introduit la densité de probabilité $p(x)$ afin d'obtenir :

$$I = \int_{\alpha}^{\beta} \omega(x) p(x) dx \quad \omega = f / p$$

- Pour un nombre de tirages de N tendant vers l'infini, l'intégrale devient :

$$I = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(x_i)$$

- On peut maintenant calculer un estimateur de l'intégrale :

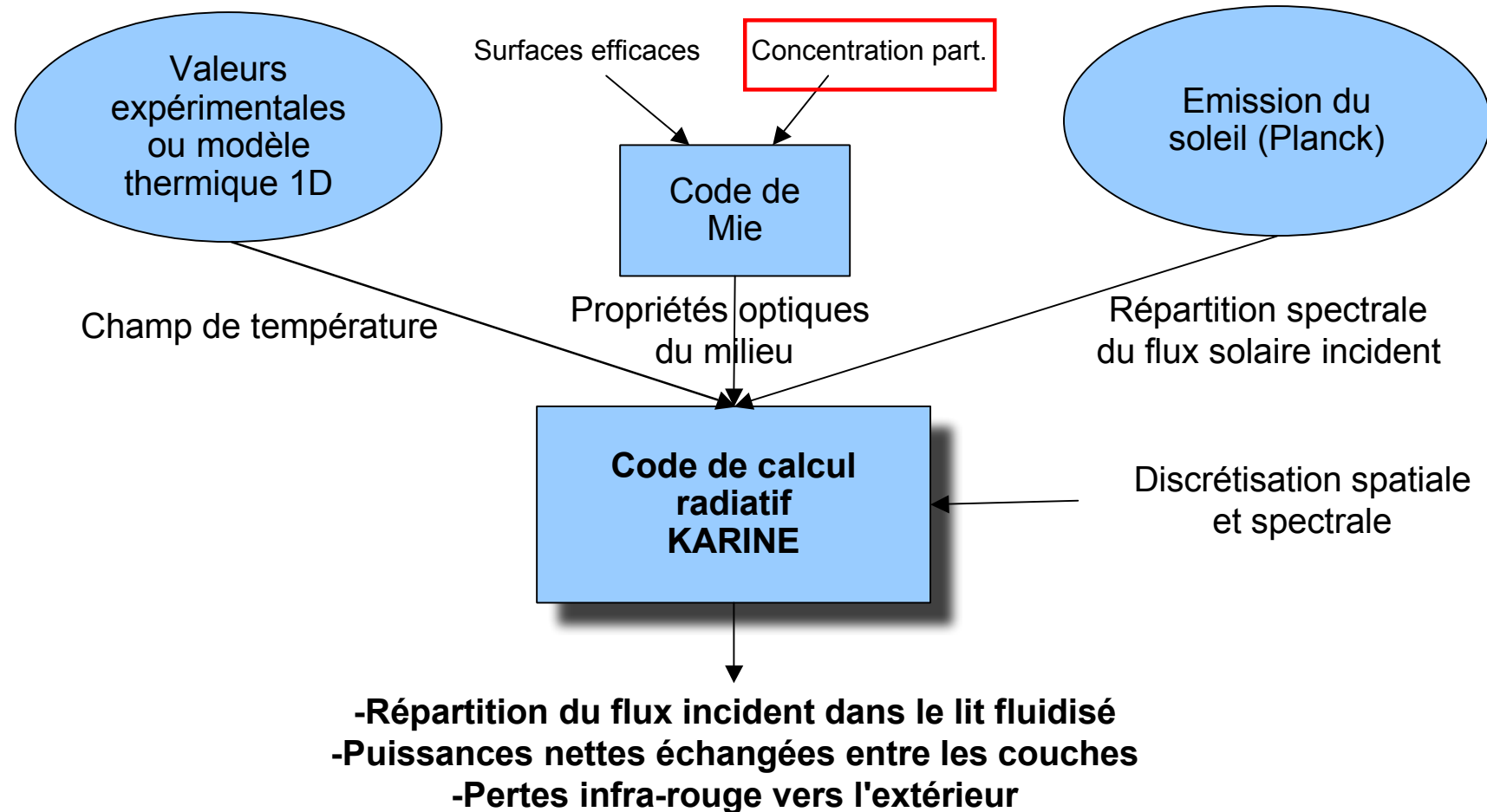
$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(x_i)$$

- Ainsi qu'un estimateur de la variance :

$$\sigma^2(\langle I \rangle) = \frac{1}{N} \sigma^2(\omega(x)) \approx \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N [\omega(x_i) - \langle I \rangle]^2 \approx \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N [\omega(x_i)^2 - \langle I \rangle^2]$$

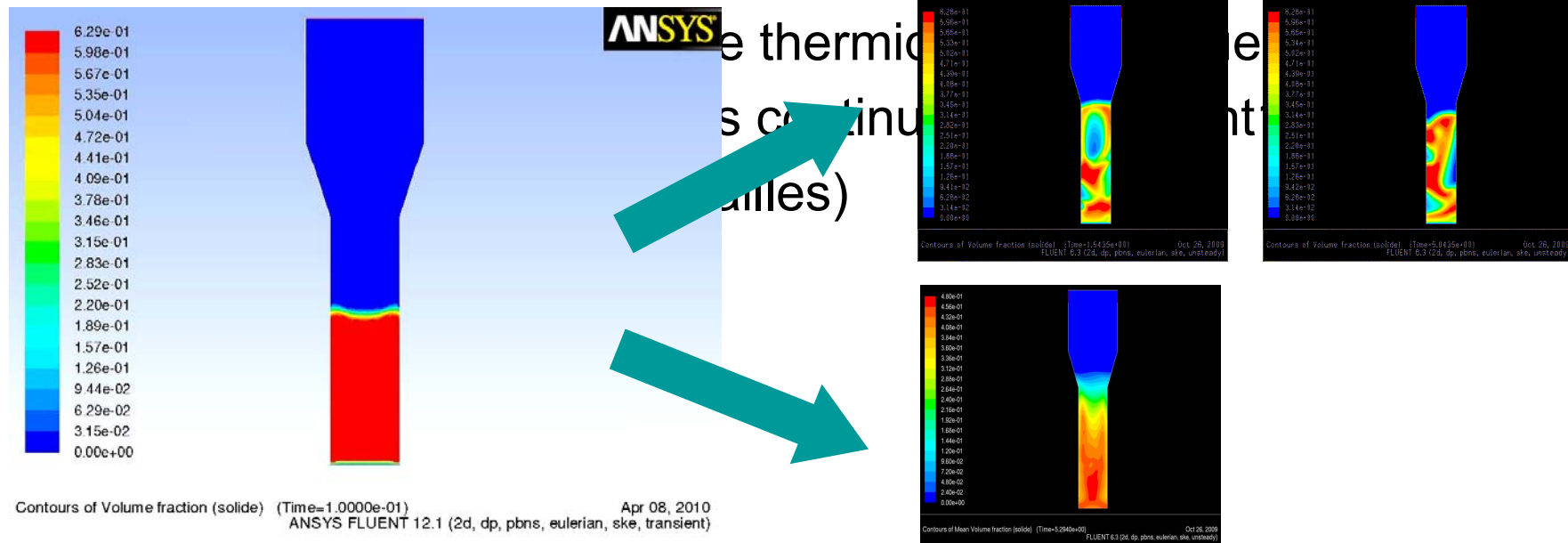
Mise en œuvre du code de calcul radiatif atmosphérique karine

■ Entrées et sorties du code :

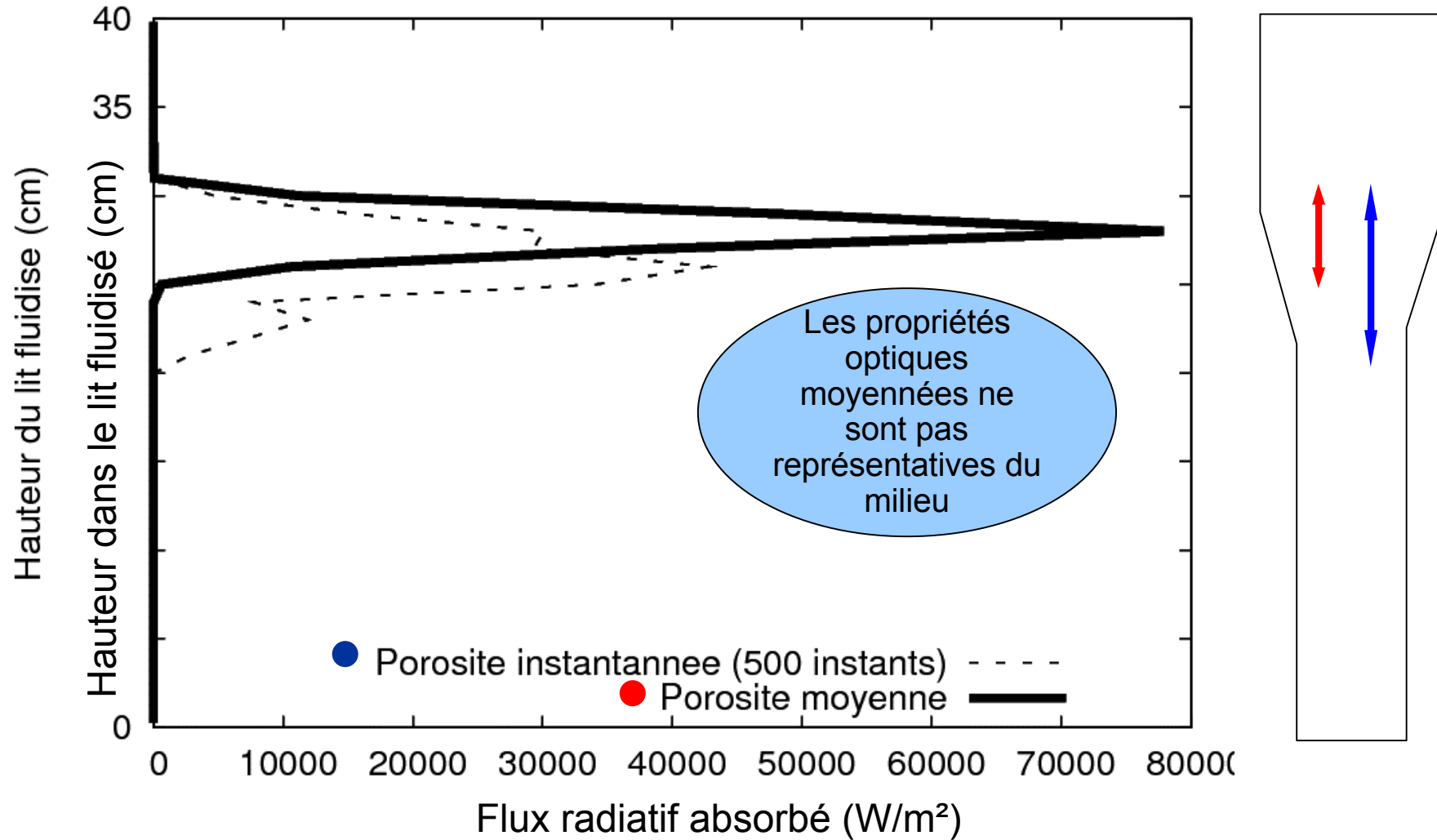


Champ de concentration des particules

- Champ de concentration expérimental :
 - Multiples prises de pression le long de la colonne
 - ->Perte de charge
 - ->Valeur moyennée de la porosité
- Champ de concentration issu de la numérique :

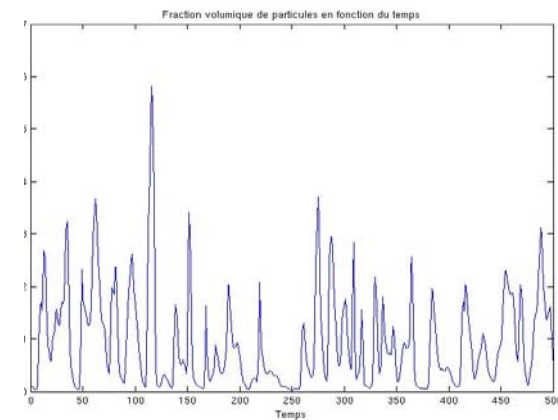
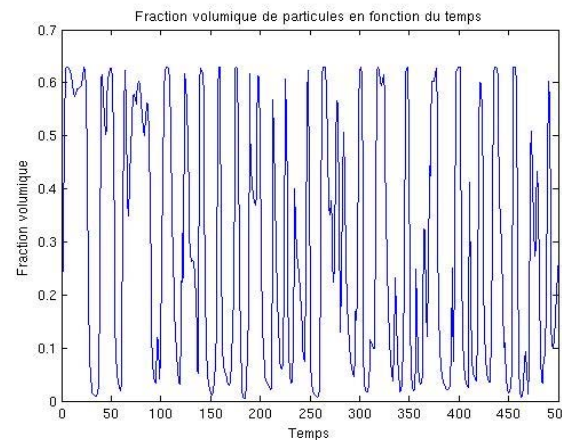
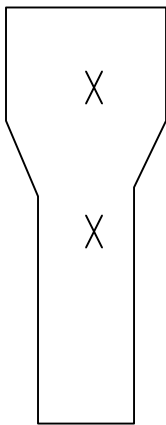


Résultat: Extinction d'un flux solaire incident dans la profondeur d'un lit fluidisé (couches de 1cm)



Conclusion intermédiaire (calcul des propriétés optiques et calcul radiatif 1D)

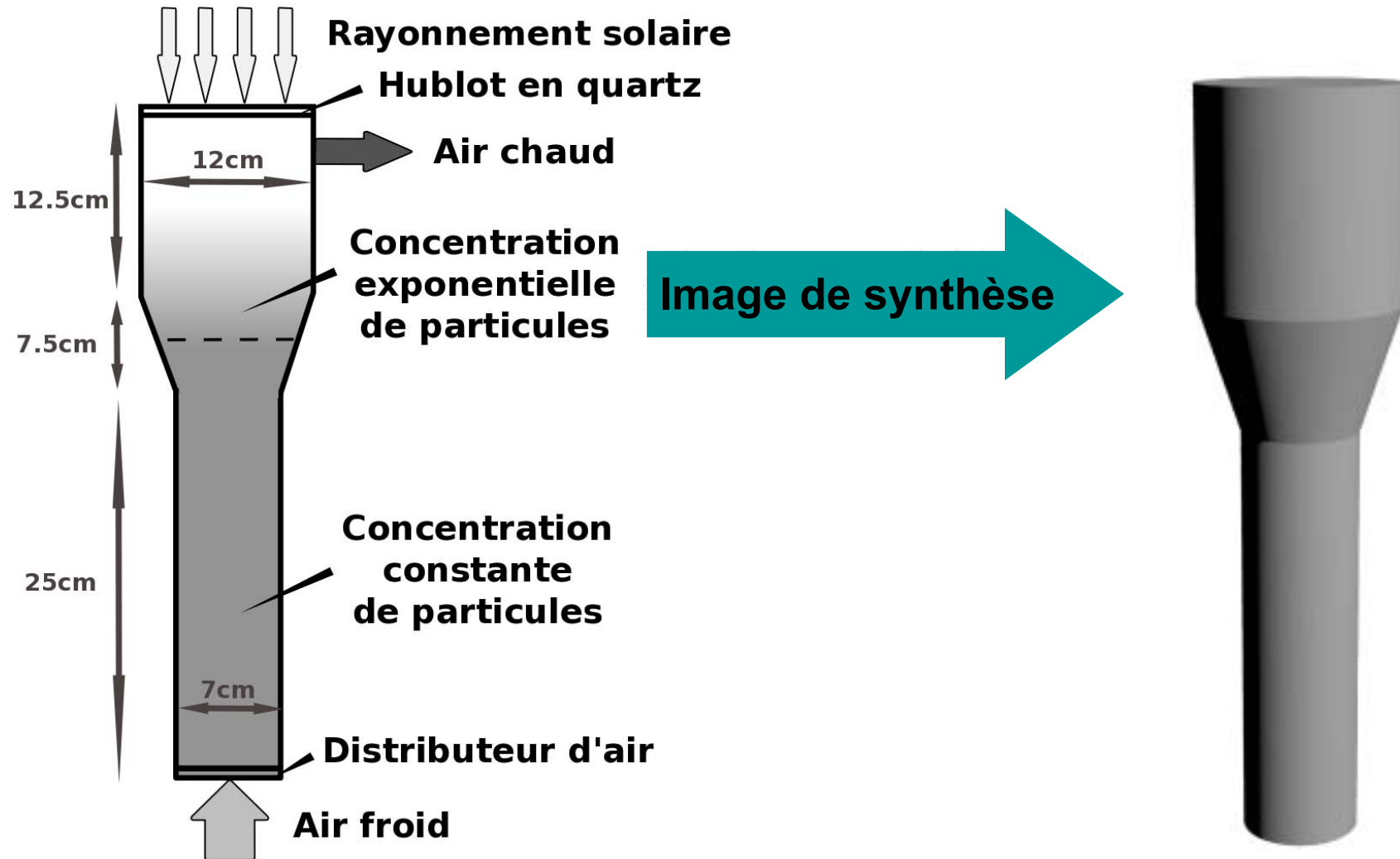
- En terme d'hypothèses :
 - Calcul gris
 - Distribution de tailles particule mono disperse
 - ~~Moyenner les propriétés optiques du milieu~~
- Problème posé par le champ de concentration :
 - Impossible de faire un calcul 3D pour chaque instant
 - Traitement statistique ? (=un spectre de gaz)



Calcul radiatif 3D dans l'environnement de développement EDStaR

- EDStaR (Environnement de Développement de Statistique Radiative) :
 - Projet multidisciplinaire en développement
 - Basé sur PBRT, librairie de synthèse d'image permettant l'optimisation de lancé de rayons en géométrie complexe
 - Code parallèle
 - Calcul de grandeurs et sensibilités par MMC
 - Générateur pseudo aléatoire validé
- Grandeurs calculées :
 - Fraction non absorbée d'un rayonnement solaire incident
 - Répartition d'un flux solaire dans le récepteur
 - Pertes par émission infra rouge
 - Prise en compte du couplage du récepteur avec un dispositif de concentration imparfait

Exemple : Calcul de la fraction perdue d'un rayonnement solaire collimaté et calcul de sa sensibilité à la concentration de particules



Formulation intégrale et algorithme : Calcul de la fraction perdue d'un rayonnement solaire collimaté

- Fraction perdue :

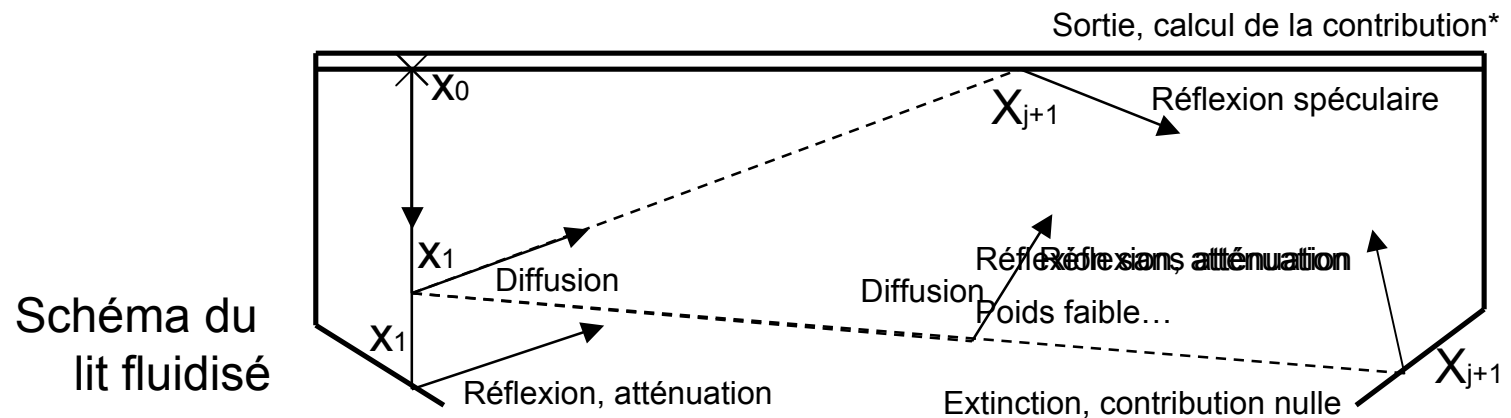
$$E = \int_{\mathcal{G}} p_{X_0}(\mathbf{x}_0) d\mathbf{x}_0 \int_0^\infty p_{\kappa_0}(\kappa_0) d\kappa_0 \left\{ \begin{array}{l} H(\mathbf{x}_1 \in \mathcal{R}) \int_{2\pi} p_{\Omega_1}^{\mathcal{R}}(\omega_1) d\omega_1 \int_0^\infty p_{\kappa_1}(\kappa_1) d\kappa_1 \mathcal{I}_1 \\ + H(\mathbf{x}_1 \in \mathcal{V}) \int_{4\pi} p_{\Omega_1}^{\mathcal{V}}(\omega_1|\omega_0) d\omega_1 \int_0^\infty p_{\kappa_1}(\kappa_1) d\kappa_1 \mathcal{I}_1 \end{array} \right\}$$

, terme récursif :

$$\mathcal{I}_j = H(\mathbf{x}_{j+1} \in \mathcal{G}) \int_0^1 p_{R_{j+1}^{\mathcal{G}}}(r_{j+1}^{\mathcal{G}}) dr_{j+1}^{\mathcal{G}} \left\{ \begin{array}{l} H(r_{j+1}^{\mathcal{G}} > \rho^{\mathcal{G}}) \hat{\omega}_{j+1} \\ + H(r_{j+1}^{\mathcal{G}} \leq \rho^{\mathcal{G}}) \int_{2\pi} p_{\Omega_{j+1}^{\mathcal{G}}}(\omega_{j+1}|\omega_j) d\omega_{j+1} \int_0^\infty p_{\kappa_{j+1}}(\kappa_{j+1}) d\kappa_{j+1} \mathcal{I}_{j+1} \end{array} \right\}$$

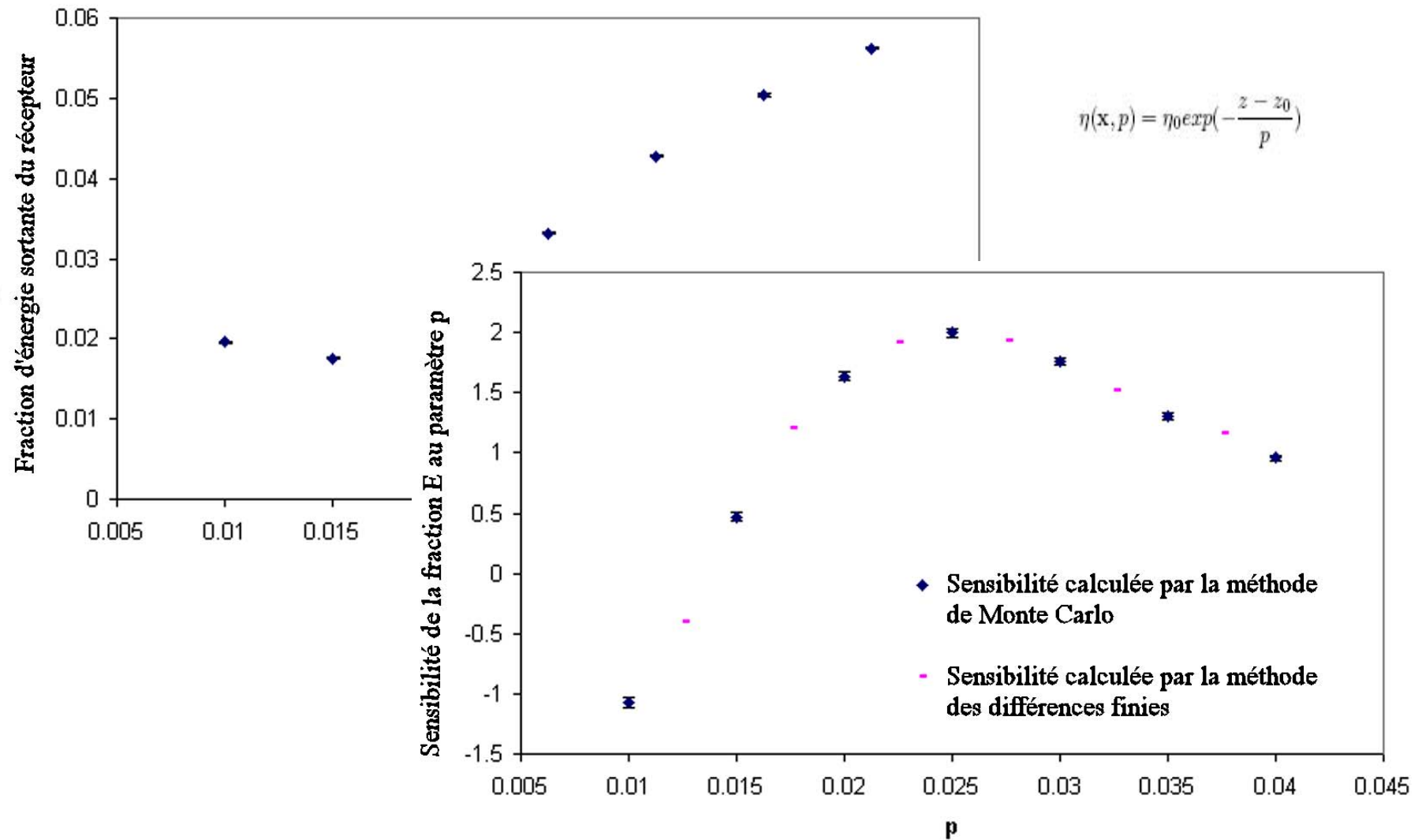
$$+ H(\mathbf{x}_{j+1} \in \mathcal{R}) \left\{ \begin{array}{l} H(\hat{\omega}_j \leq \epsilon) \int_0^1 p_{R_{j+1}^{\mathcal{R}}}(r_{j+1}^{\mathcal{R}}) dr_{j+1}^{\mathcal{R}} \times \dots \\ \left\{ \begin{array}{l} H(r_{j+1}^{\mathcal{R}} > \rho^{\mathcal{R}}) \times 0 \\ + H(r_{j+1}^{\mathcal{R}} \leq \rho^{\mathcal{R}}) \int_{2\pi} p_{\Omega_{j+1}^{\mathcal{R}}}(\omega_{j+1}) d\omega_{j+1} \int_0^\infty p_{\kappa_{j+1}}(\kappa_{j+1}) d\kappa_{j+1} \mathcal{I}_{j+1} \end{array} \right\} \\ + H(\hat{\omega}_j > \epsilon) \int_{2\pi} p_{\Omega_{j+1}^{\mathcal{R}}}(\omega_{j+1}) d\omega_{j+1} \int_0^\infty p_{\kappa_{j+1}}(\kappa_{j+1}) d\kappa_{j+1} \mathcal{I}_{j+1} \end{array} \right\}$$

$$+ H(\mathbf{x}_{j+1} \in \mathcal{V}) \int_{4\pi} p_{\Omega_{j+1}^{\mathcal{V}}}(\omega_{j+1}|\omega_j) d\omega_{j+1} \int_0^\infty p_{\kappa_{j+1}}(\kappa_{j+1}) d\kappa_{j+1} \mathcal{I}_{j+1}$$

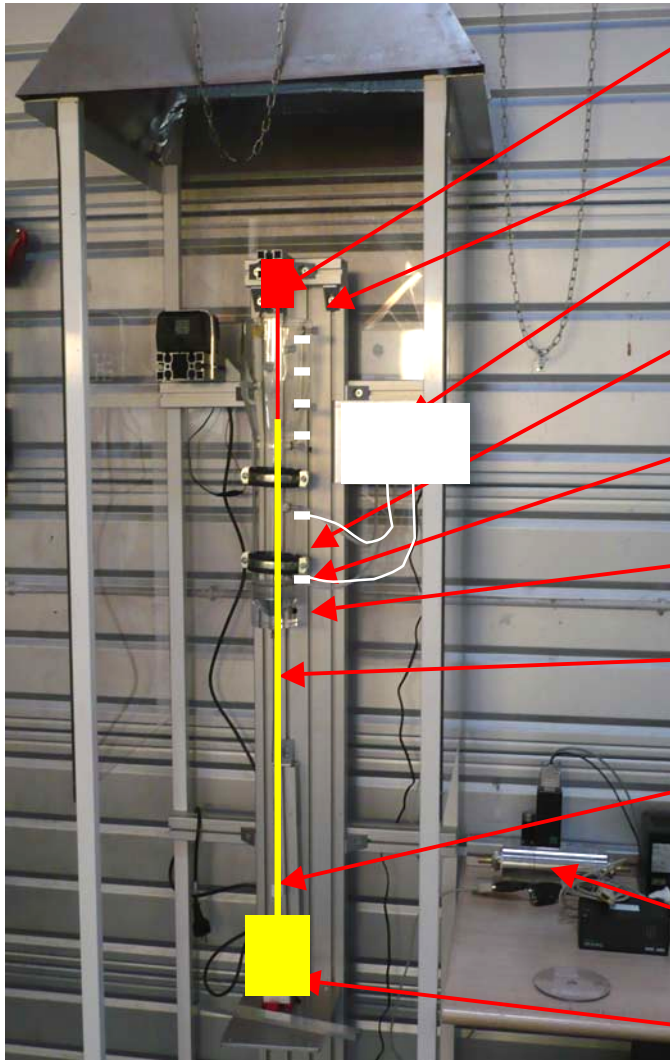


*Contribution ou poids=(atténuation par le milieu+atténuation par les parois) 18

Résultat : Calcul de la fraction perdue d'un rayonnement solaire collimaté et calcul de sa sensibilité à la concentration de particules



Montage expérimental : validation de l'extinction d'un flux radiatif incident dans la profondeur du récepteur



Laser vertical

■ **Grandeurs mesurées :**

Sortie d'air

□ **Flux radiatif laser transmis dans le récepteur**

Micromanomètre

Colonne de fluides à changement de section

□ **Perte de charge sur la hauteur du lit \rightarrow porosité**

Fritté

■ **Validation :**

Entrée d'air

□ **Code de calcul radiatif**

Guide pour fibre optique à translation verticale

□ **Champ de porosité Fluent**

Fibre optique multimode

Débitmètre massique

Capteur de puissance

Conclusion et perspectives

- Conclusion :
 - Présentation d'un code de calcul de transferts radiatifs atmosphériques adapté au cas des lits fluidisés
 - Développement de codes de calcul MMC en géométrie 3D avec EDStaR
 - Présentation d'une expérience de validation
- Perspectives :
 - Application d'un modèle statistique de porosité au calcul 3D
 - Etude paramétrique des caractéristiques du récepteur pour son optimisation
 - Validation des calculs numériques de l'atténuation d'un flux radiatif dans un lit fluidisé par l'expérience

Merci de votre attention



Maintenant place aux questions....

Germain BAUD
Centre RAPSODEE
Ecole des Mines d'Albi-Carmaux
germain.baud@enstimac.fr