

**15<sup>ème</sup> CONGRÈS FRANÇAIS SUR LES AÉROSOLS****8 et 9 décembre 1999 – PARIS*****Modélisation des écoulements d'air dans différents filtres industriels plissés*****L. DEL FABBRO\*, P. BRUN\*, J.C. LABORDE\*\*, J. LACAN\*\*, A. RENOUX\*\*\*, L. RICCIARDI\*\*****\*FILTRAUTO**

5 avenue Newton

78053 SAINT-QUENTIN EN YVELINES Cedex, France

**\*\*Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire**

Département de Prévention et d'Etude des Accidents

Service d'Etudes et de Recherches en Aérocontamination et en Confinement

CEA/Saclay – Bâtiment 383 – 91191 GIF-SUR-YVETTE Cedex, France

**\*\*\*Laboratoire de Physique des Aérosols et de Transfert des Contaminations, Université Paris XII**

Av. du Général de Gaulle, 94010 CRETEIL Cedex, France

**RÉSUMÉ**

La communication proposée présente les résultats relatifs à une étude menée à l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN), en collaboration avec la société FILTRAUTO, afin de modéliser les écoulements d'air et le colmatage, par des aérosols solides, des filtres plissés de type nucléaire et automobile. Les expériences sont menées dans un premier temps sur des filtres vierges. Les résultats les plus significatifs obtenus concernent tout d'abord la mise en évidence d'une répartition de l'écoulement d'air plus homogène le long de la surface des plis du filtre à usage nucléaire ; de plus, on note une influence certaine des caractéristiques géométriques (distance entre deux crêtes de plis, hauteur des plis) des filtres à usage automobile sur leur perte de charge initiale. Ces expériences ont par ailleurs servi à qualifier un modèle numérique obtenu à l'aide d'un outil multi-dimensionnel (code CFX) ; ce modèle a permis de comprendre le rôle fondamental joué par la résistance aéraulique du médium filtrant.

**INTRODUCTION**

Les dispositifs de filtration des particules présentes dans l'air sont largement répandus dans différents secteurs industriels : nucléaire, automobile, agroalimentaire, ... Les deux grandeurs les plus importantes pour caractériser le comportement des filtres sont la perte de charge et l'efficacité de collecte des particules. Ces grandeurs sont fonction des caractéristiques du filtre, de l'aérosol et des conditions aérauliques. La plupart des recherches menées sur les filtres ont pour but d'apprécier ou encore d'optimiser la durée de vie du filtre, d'où, en particulier, le plissage du médium filtrant qui permet de diminuer sa perte de charge tout en traitant des débits d'air et des masses d'aérosols élevés.

De nombreux modèles ont été proposés pour calculer l'efficacité de collecte et la perte de charge des filtres en régime stationnaire. En revanche, peu d'études existent sur l'évolution de ces grandeurs en filtration dynamique ; dans ce cas, le colmatage du filtre par les aérosols induit de profondes modifications de la structure du filtre entraînant une variation de l'efficacité et de la perte de charge au cours du temps. Les modèles théoriques d'efficacité et de colmatage ont été développés uniquement pour des filtres plans, alors que les filtres industriels possèdent des médias filtrants plissés. L'objet de l'étude menée dans le cadre d'une collaboration entre la société FILTRAUTO et l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire est donc de pallier un manque évident de connaissances et de modèles phénoménologiques sur le colmatage des filtres plissés.

L'étude du colmatage des filtres à air plissés passe par la connaissance des écoulements d'air au sein même des plis du filtre. L'étape préliminaire à cette étude est l'élaboration d'un modèle d'écoulement d'air dans le filtre à air plissé vierge. Le modèle est établi à partir d'un code de

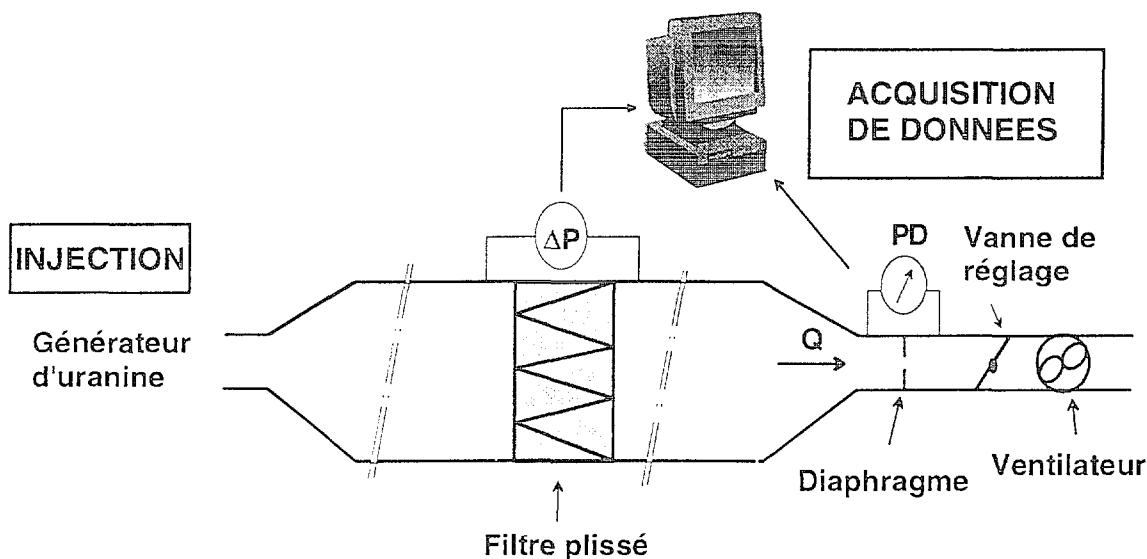
mécanique des fluides multi-dimensionnel (code CFX) et qualifié par des expérimentations basées sur l'utilisation d'un traceur fluorescent (fluorescéine sodée).

## 1. ETUDE EXPERIMENTALE RELATIVE AUX FILTRES PLISSES VIERGES

### 1.1. Contexte expérimental

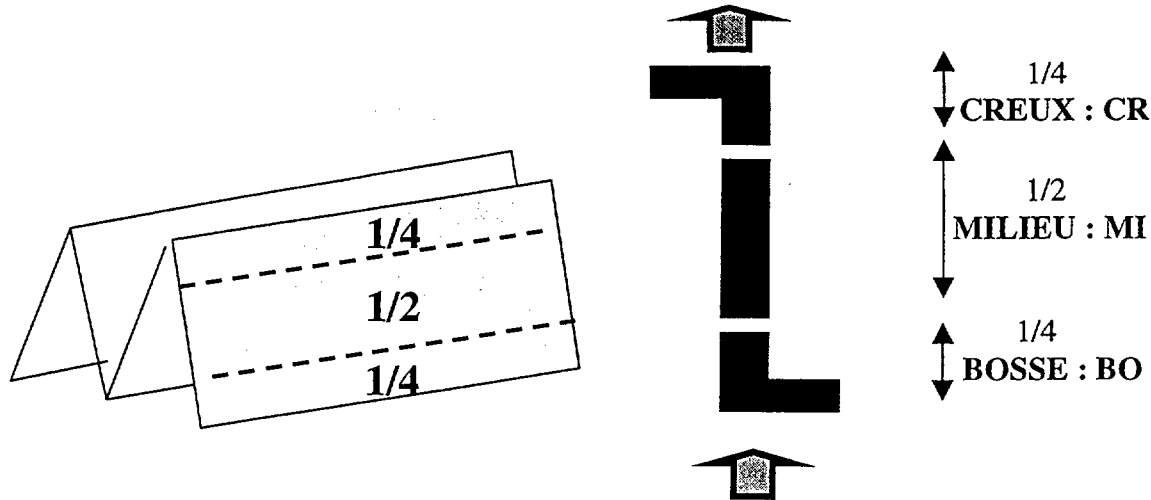
Afin de pouvoir acquérir des valeurs de la perte de charge entre l'amont et l'aval du filtre, ainsi que des données sur les écoulements d'air dans les filtres plissés vierges, un banc d'essais aéraulique est mis en œuvre. Il est constitué d'une veine aéraulique, d'un générateur de fluorescéine sodée (ou uranine) en amont du caisson de filtration et d'un système de mesure par fluorimétrie.

La veine aéraulique est constituée de différents conduits raccordés à un caisson de filtration contenant le filtre plissé testé. En amont de ce caisson, entre le système d'injection de particules et le caisson lui-même, une gaine de ventilation suffisamment longue assure une homogénéisation de la concentration des aérosols en amont du filtre et un écoulement d'air établi. La perte de charge est mesurée en temps réel à l'aide d'un capteur électronique de pression raccordé à un système d'acquisition de données. Le débit de filtration dans le conduit est assuré par un ventilateur placé en aval de la veine aéraulique. Une vanne de réglage permet d'ajuster ce débit, et la mesure de la pression différentielle aux bornes d'un diaphragme permet d'accéder à la valeur du débit d'air. Un schéma de principe du banc d'essais est donné figure 1.



**Figure 1** - Banc d'essais

Afin de caractériser la répartition de l'écoulement ( $Fr$ ) au sein du filtre, on émet sur le filtre un traceur fluorescent grâce au générateur d'uranine. L'aérosol traceur fluorescent est un aérosol de fluorescéine sodée dont le diamètre aérodynamique médian massique est de  $0,18 \mu\text{m}$ . La concentration d'uranine sur le filtre résulte de mesures fluorimétriques dans l'ultraviolet. Lorsque le filtre est chargé en aérosol fluorescent, un découpage des plis du filtre est réalisé afin d'obtenir les répartitions massiques de l'aérosol fluorescent le long de la surface de filtration. Les découpages réalisés sont présentés sur la figure 2 : un demi-pli est découpé horizontalement en trois bandelettes (appelées CREUX, MILIEU, BOSSE) dont la bandelette centrale est deux fois plus grande que les deux autres.



**Figure 2 – Découpages horizontaux d'un demi-pli**

Une analyse fluorimétrique est ensuite faite sur les bandelettes découpées. La répartition massique des particules suivant les lignes de courant est obtenue ( $m_{BO}$ ,  $m_{MI}$ ,  $m_{CR}$ ) ; cette répartition est divisée par la surface de chacune des bandelettes ( $S_{BO}$ ,  $S_{MI}$ ,  $S_{CR}$ ). Les fonctions de répartition pour chacune des parties considérées ( $Fr_i$ ) sont obtenues par la relation :

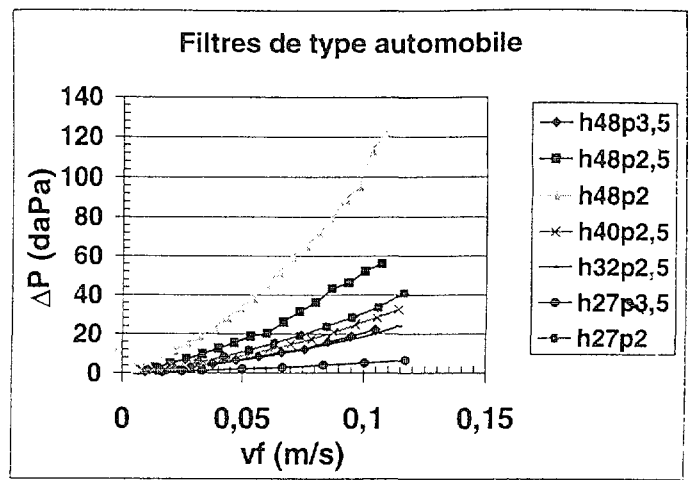
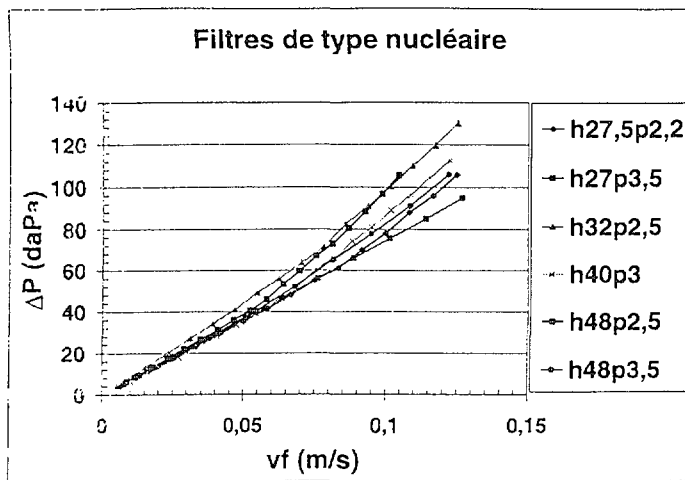
$$Fr_i (\%) = \frac{m_i/S_i}{\sum_{j=BO, MI, CR} m_j/S_j}$$

Les expériences ont été réalisées selon un plan factoriel d'expériences  $2^3$  pour chaque type de filtre testé. Les trois variables considérées sont la vitesse de filtration  $v_f$  (entre 1 et 10 cm/s), la hauteur des plis  $h$  (27, 32, 40 et 48 mm) et le pas des plis  $p$  (entre 2 et 3,5 mm). Pour caractériser le comportement des filtres vierges, deux grandeurs sont étudiées : la perte de charge  $\Delta P$  et la fonction de répartition  $Fr$ .

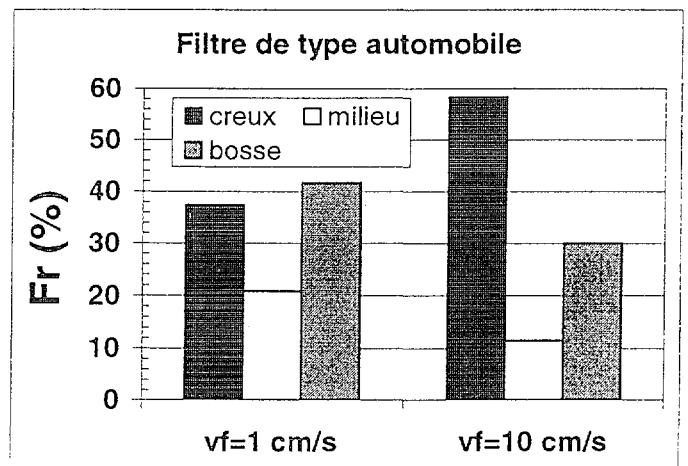
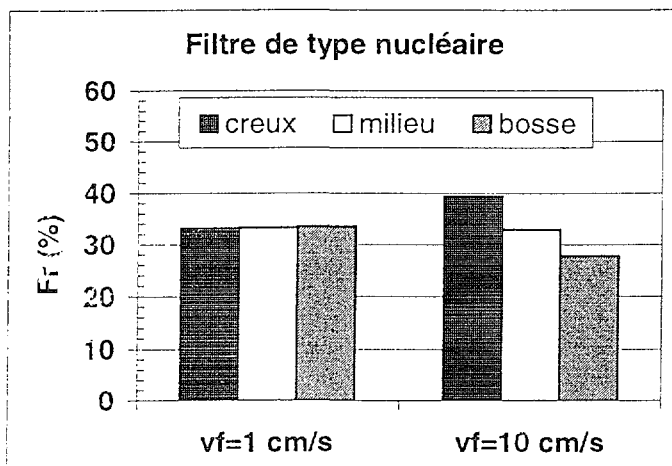
## **1.2. Enseignements apportés par les expériences**

Le premier enseignement issu des expériences concerne la perte de charge des différents filtres. L'ensemble des résultats montre une grande influence des paramètres géométriques des filtres plissés de type automobile sur l'évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration, cette influence étant moindre dans le cas du filtre THE (Très Haute Efficacité) de type nucléaire. Le filtre de type automobile ayant une perte de charge optimale possède une petite hauteur des plis ( $h=27$  mm) et un grand pas ( $p=3,5$  mm). La figure 3 illustre les évolutions de la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration pour chaque type de filtre.

L'étude des fonctions de répartition pour chacun des filtres montre une répartition homogène des écoulements dans un filtre THE, alors que la répartition est hétérogène dans le cas des filtres de type automobile. Cette hétérogénéité augmente avec la vitesse de filtration ; elle a également été observée lors d'études menées par Cai et Tebutt [1], [2]. La répartition préférentielle vers le creux du pli d'un filtre de type automobile démontre que la surface de filtration de ces filtres n'est pas utilisée de manière optimale. A titre d'exemple, la figure 4 propose les fonctions de répartition pour un filtre de type nucléaire  $h_{27,5}p_{2,2}$  (hauteur des plis 27,5 mm et pas des plis 2,2 mm) et pour un filtre de type automobile  $h_{27}p_2$ , à deux vitesses de filtration ( $v_f=1$  cm/s et  $v_f=10$  cm/s).



**Figure 3** - Evolution de la perte de charge d'un filtre de type nucléaire et d'un filtre de type automobile avec la vitesse de filtration



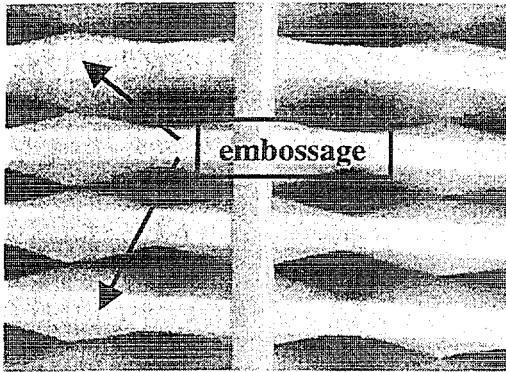
**Figure 4** - Fonction de répartition pour un filtre (h27p2) de type nucléaire et de type automobile, en fonction de la vitesse de filtration

## 2. ETUDE NUMERIQUE RELATIVE AUX FILTRES PLISSES VIÉRGES

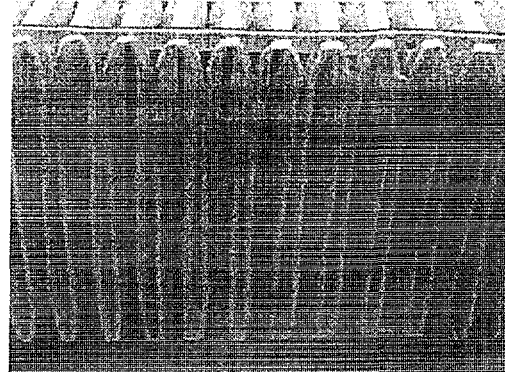
### 2.1. Contexte numérique

L'écoulement au voisinage du filtre est décrit par les équations de Navier-Stokes en régime permanent et isotherme. De plus, de par les faibles variations relatives de pression (y compris dans le filtre), l'écoulement est incompressible. Les pertes de charge à l'intérieur du filtre sont modélisées, dans le code CFX [3], par un terme puits dans l'équation de mouvement du fluide, selon la loi de Darcy :  $\nabla P = \underline{R} \cdot \underline{U}$ , où  $\underline{R}$  est un tenseur du second ordre représentant la résistance locale à l'écoulement du médium filtrant et  $\underline{U}$  la vitesse locale de l'écoulement dans le milieu poreux (discontinue à l'interface du filtre en raison de la porosité du filtre). L'écoulement est laminaire au voisinage du filtre et on fait l'hypothèse qu'il l'est également sur tout le domaine de calcul. Les paramètres introduits dans le fichier de données des calculs sont la vitesse d'entrée, la viscosité et la masse volumique de l'air (à 20 °C), la porosité et la résistance aéraulique du milieu poreux. Ces deux derniers paramètres proviennent directement de mesures effectuées sur un filtre plan dont le médium filtrant est identique à celui du filtre plissé.

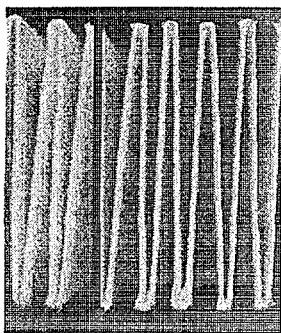
Les filtres modélisés ont les caractéristiques géométriques des filtres utilisés pour les plans d'expériences ; ces caractéristiques diffèrent pour un filtre nucléaire et un filtre automobile. Ainsi, pour les filtres de type automobile, les figures 5 et 6 montrent une caractéristique spécifique de ces filtres : l'embossage, « gaufrage » appliqué au médium filtrant qui rapproche les plis entre eux afin de les maintenir à distance constante ; cette structure implique une géométrie des plis plus complexe que pour les filtres de type nucléaire (figure 7).



**Figure 5** – Vue de dessus d'un filtre de type automobile

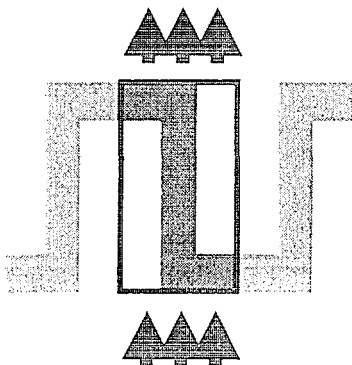


**Figure 6** – Vue latérale d'un filtre de type automobile

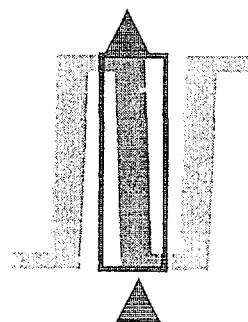


**Figure 7** – Vue transversale d'un filtre de type nucléaire

Ainsi, il a été créé dans un premier temps (figure 8), un modèle créneau bidimensionnel, puis, afin de réaliser une géométrie représentative de la réalité, une géométrie tridimensionnelle qui reproduit l'embossage du filtre automobile. Pour le filtre nucléaire, des modèles créneau (figure 8) et triangulaire (figure 9) bidimensionnels ont été créés.



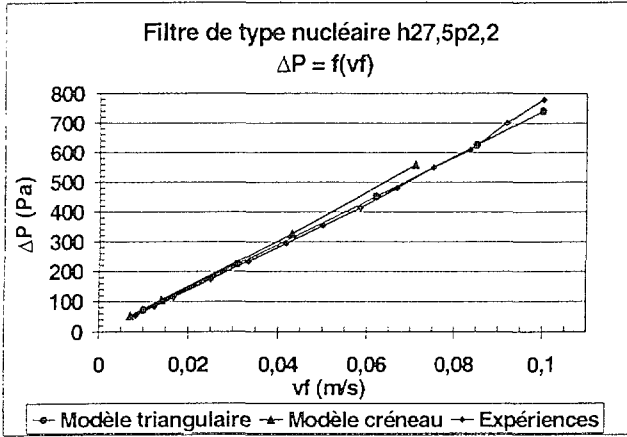
**Figure 8** – Modèle créneau appliqué aux deux types de filtre



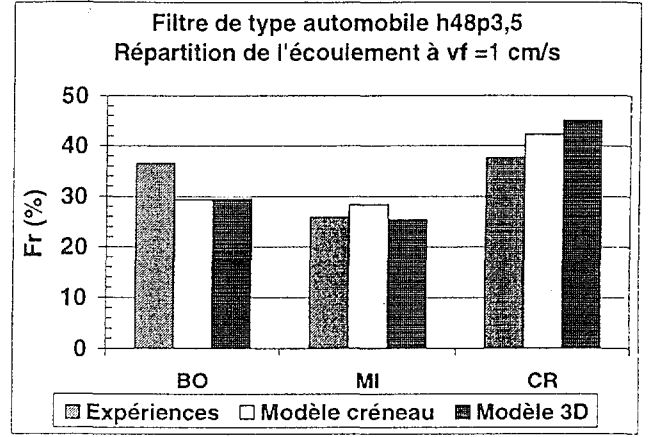
**Figure 9** – Modèle triangulaire appliqué au filtre nucléaire

## 2.2. Apports de la modélisation

Le modèle numérique élaboré permet, tout comme les expériences, d'obtenir l'évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration, ainsi que les fonctions de répartition. Les résultats obtenus témoignent d'un accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux, tant en termes de perte de charge qu'en termes de répartition de l'écoulement (figures 10 et 11, à titre d'exemple).



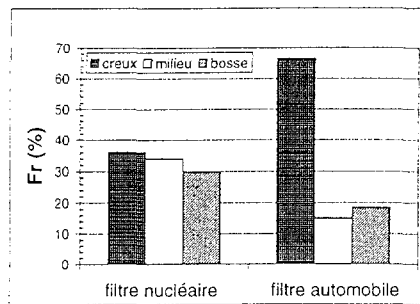
**Figure 10** – Comparaison des pertes de charge obtenues à partir des modèles numériques, avec les résultats expérimentaux



**Figure 11** - Comparaison des fonctions de répartition obtenues à partir des modèles numériques, avec les résultats expérimentaux

Les résultats présentés sur les figures 10 et 11 montrent que les modèles triangulaire dans le cas du filtre nucléaire et tridimensionnel dans le cas du filtre automobile n'apportent pas de résultats plus proches des valeurs expérimentales que le modèle créneau ; c'est pourquoi, le modèle créneau est retenu pour les deux types de filtres.

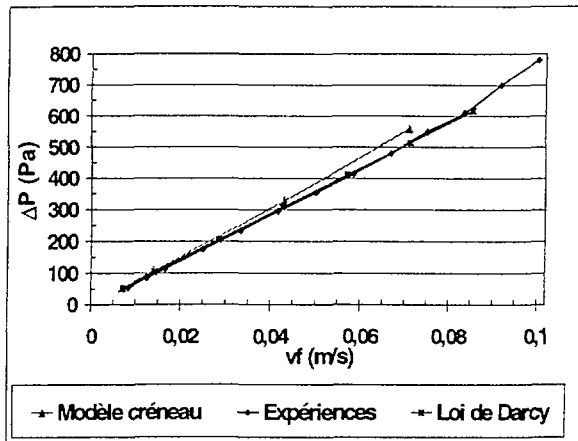
Ce modèle permet également de comprendre certains phénomènes physiques. Ainsi, afin d'analyser la différence de répartition entre les deux types de filtre, des calculs de la fonction de répartition ont été réalisés à partir d'une même géométrie, seule la résistance des médias à l'écoulement variant. Les résultats résumés figure 12 témoignent que la différence des répartitions de l'écoulement entre les deux filtres plissés est uniquement due à une caractéristique du médium filtrant, la résistance aéraulique R du médium utilisé.



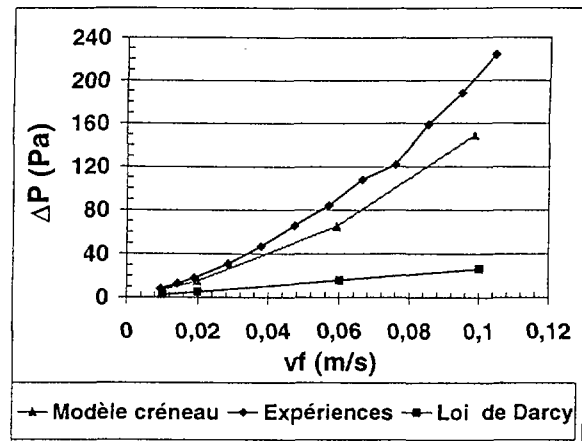
**Figure 12** – Comparaison de la répartition de l'écoulement ( $vf = 0,07 \text{ m/s}$ )

Par ailleurs, l'approche numérique permet de montrer que la loi de Darcy est valide, non seulement localement (hypothèse de base), mais aussi globalement (la loi de Darcy globale relie la perte de charge du filtre à la vitesse moyenne de filtration, rapport entre le débit d'air et la surface de filtration), pour les filtres THE. Cette particularité s'explique principalement par la grande résistance aéraulique du filtre de type nucléaire qui oblige l'écoulement à se répartir uniformément sur toute la surface de filtration. Le filtre plissé THE se comporte donc comme un filtre plan de surface de

filtration équivalente. Ceci n'est pas vérifié pour le filtre de type automobile, de résistance beaucoup plus faible (30 fois inférieure). Les figures 13 et 14 représentent les évolutions de la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration ; les valeurs de la perte de charge sont issues de mesures expérimentales, de simulations numériques 2D créneaux, ainsi que de la loi de Darcy utilisée de manière globale.



**Figure 13** – Comparaison des résultats pour un filtre de type nucléaire h27,5p2,2



**Figure 14** – Comparaison des résultats pour un filtre de type automobile h48p3,5

## CONCLUSION

Les travaux présentés permettent de caractériser la perte de charge et les écoulements d'air dans des filtres plissés vierges de type nucléaire ou automobile. Les études expérimentales, associées aux études numériques, ont montré une répartition homogène des écoulements d'air dans un filtre THE de type nucléaire, alors que la répartition est hétérogène dans le cas d'un filtre de type automobile ; cette hétérogénéité augmente avec la vitesse moyenne de filtration. Les résultats numériques ont permis de mettre en évidence que cette différence de répartition est principalement due à la résistance aéraulique du médium filtrant.

L'ensemble des résultats montre une grande influence des paramètres géométriques des filtres plissés de type automobile (hauteur des plis et distance entre chaque pli) sur l'évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration, cette influence étant moindre dans le cas d'un filtre THE.

## REFERENCES

- [1] Q. Cai. A study of air filter flow by computational fluid dynamics, 1993  
MS Thesis, School of mechanical and aerospace engineering – Oklahoma state university, Stillwater, OK
- [2] C. B. Tebbutt. Computational fluid dynamics model of flow through air filter pleats, 1995  
MS Thesis, School of mechanical and aerospace engineering – Oklahoma state university, Stillwater, OK
- [3] AEA Technology. CFX-4.2, Solver manual, 1997