

Note technique

Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement

AMELIORATION DU SYSTEME DE DOPAGE PM EN MATRICE REELLE

Conception d'un système d'enrichissement
sélectif en fonction de la granulométrie
des particules

Brice Berthelot (Ineris), Laurent Spinnelle (Ineris)

Vérification : MARCHAND CAROLINE; QUERON JESSICA, le 18/07/2023

Document approuvé le 26/07/2023 par MORIN ANNE

SYNTHESE

Cette étude s'inscrit dans la suite des travaux portant sur l'amélioration du banc de dopage de matrice d'air ambiant, un montage expérimental utilisé par l'Ineris pour la réalisation de tests de performances d'instruments de mesures des particules (systèmes de mesures automatiques (AMS), aethalomètres...) et de comparaisons inter-laboratoires. Les premiers essais ont montré qu'il était possible de générer des particules présentant un diamètre aérodynamique allant de 0,5 μm à 20 μm mais qu'il reste difficile de contrôler la granulométrie du dopage particulaire avec les méthodes utilisées. En effet, malgré la présence de particules de gros diamètre, la répartition granulométrique reste centrée autour de 600 nm.

Afin de répondre à cette problématique, l'Ineris s'est proposé d'étudier le principe de fonctionnement d'un impacteur virtuel et d'en adapter le dispositif afin de réaliser des dopages ciblés de matrice d'air ambiant enrichie en particules présentant un diamètre aérodynamique supérieur à 2,5 μm .

Ainsi, cette note regroupe les principaux éléments permettant de comprendre le principe de fonctionnement de l'impaction inertielle et les méthodes existantes. Elle montre également que ces dispositifs peuvent être utilisés afin de séparer les particules en fonction de leur diamètre aérodynamique. De plus, lorsqu'associée à un système de collecte, le dispositif joue alors le rôle de concentrateur des particules présentant un diamètre supérieur au diamètre aérodynamique cible, appelé diamètre de coupure. Enfin, cette note présente les éléments retenus pour la conception d'un dispositif dimensionné pour le système de dopage de matrice d'air ambiant développé et exploité par Ineris.

Sur la base de ces éléments, un prototype a pu être mis au point. Des essais restent à conduire afin de valider son bon fonctionnement et d'évaluer ses performances au sein du système de dopage de matrice d'air ambiant.

A terme, cet impacteur pourrait être mis en œuvre lors de différents tests d'instrument de mesure des particules, comme par exemple les comparaisons inter-laboratoires dédiées aux systèmes de mesures automatiques ou encore les systèmes capteurs.

ABSTRACT

This study is the continuation of the work on the improvement of the enhanced ambient air matrix system, an experimental facility used by Ineris to carry out inter-laboratory comparisons of PM measurement instruments (automatic measurement systems (AMS), aethalometers, etc.). The first report showed that it was possible to generate particles having an aerodynamic diameter ranging from 0.5 μm to 20 μm , but that it was still difficult to control the particle size of the PM source with the methods currently used. Indeed, despite the presence of large diameter particles, the size distribution remains centered around 600 nm.

In order to answer this problem, Ineris proposed to study the operational principle of a virtual impactor and to adapt this type of devices in order to carry out targeted generation enriched in particles with an aerodynamic diameter greater than 2.5 μm .

Thus, this note gathers the main elements allowing to understand the operating principle of inertial impaction and the existing methods. It also shows that these devices can be used to separate particles according to their aerodynamic diameter. Furthermore, when combined with a collection system, the device acts as a concentrator of particles having a diameter greater than the target aerodynamic diameter, called cut-off diameter. Finally, this note presents the selected elements for the design of a device adapted to our enhanced ambient air matrix system.

On the basis of these elements, a prototype has been designed. Experiments remain to be carried out in order to validate its proper operation and to evaluate its performance within the enhanced ambient air matrix system.

In the long term, this virtual impactor could be used in various tests of PM measurement instruments, such as inter-laboratory comparisons dedicated to automatic measurement systems or sensor systems.

1. CONTEXTE

Cette étude s'inscrit dans la suite des travaux initiés en 2020 et portant sur l'amélioration du banc de dopage de matrice d'air ambiant (Spinelle, Bardou et al. 2022). Ce montage expérimental est notamment utilisé par l'Ineris pour la réalisation de comparaisons inter-laboratoires d'instruments de mesures des particules (systèmes de mesures automatiques (AMS), aethalomètres...). Comme décrit dans les rapports LCSQA publiés en 2012, DRC-12-126710-14189A (Aujay 2012) et en 2016, DRC-16-152318-06089A (Amodeo and Aujay 2016) ce système se compose d'une turbine qui canalise un débit constant et réglable d'air ambiant dans un répartiteur qui divise et redistribue l'air à l'intérieur de huit cloches de dopage dans lesquelles sont installés les différents appareils de mesure (Figure 1).



Figure 1: Système de dopage avec au centre le répartiteur relié à 8 cloches de dopage.

Le premier rapport (Spinelle, Bardou et al. 2022) a permis de mettre en avant qu'il était possible de générer des particules présentant un diamètre aérodynamique allant de $0,5 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$ au moyen de poudre d'Arizona ISO 12103 A1 ULTRAFINE. Cependant, les résultats montrent qu'il est difficile de contrôler la granulométrie du dopage particulaire avec les méthodes utilisées jusqu'alors, que ce soit ne changeant de nébuliseur ou en changeant la source de particules. En effet, malgré la présence de particules de gros diamètre, la répartition granulométrique reste centrée autour de 600 nm . Cette étude a pour objectif de présenter la technologie des impacteurs virtuels dans le but de réaliser un dispositif permettant d'augmenter la concentration des particules présentant un diamètre aérodynamique supérieur à $2,5 \mu\text{m}$ au sein du système de dopage. Ce diamètre sera par la suite appelé diamètre de coupure et sera noté d_c .

Cette note présente donc une partie bibliographique sur :

- (i) le principe de l'impaction inertielle et les types impacteurs existants ;
- (ii) l'utilisation des impacteurs inertiels pour favoriser l'enrichissement sélectif d'une matrice d'air ainsi que les phénomènes physiques qui peuvent limiter les performances ;
- (iii) puis une 3^{ème} partie décrivant la conception tridimensionnelle d'un prototype dimensionné pour le système de dopage de matrice d'air ambiant de l'Ineris.

2. GENERALITES SUR L'IMPACTION INERTIELLE ET LES IMPACTEURS

Afin d'extraire et collecter des particules d'un aérosol, une technique communément employée consiste à s'intéresser au comportement aérodynamique des particules notamment au travers des mécanismes d'impaction inertielle. Ce chapitre regroupe une description de ce mécanisme physique puis illustre son utilisation dans deux dispositifs utilisés en métrologie des aérosols.

2.1 L'impaction inertielle

Dans les classificateurs inertiels, la séparation des particules se fait selon leur diamètre aérodynamique équivalent, c'est-à-dire le diamètre d'une sphère de densité unitaire (1g.m^{-3}) possédant la même vitesse terminale de chute que la particule dans un fluide au repos (Kulkarni, Baron et al. 2011). Cette grandeur permet de considérer plus facilement le comportement dynamique des particules solides ou liquides dans un fluide gazeux. Pour un écoulement avec un changement brusque de direction, les particules de plus petit diamètre aérodynamique auront moins d'inertie et se faisant, auront tendance à rester dans l'écoulement gazeux. À contrario, les particules de plus grand diamètre aérodynamique ont une inertie plus grande et leur direction de déplacement aura tendance à ne pas être modifiée au moment d'arriver à la singularité de l'écoulement.

Reposant sur ce principe, la littérature rapporte quatre types de classificateurs inertiels représentés sur la Figure 2 (Kulkarni, Baron et al. 2011) : les corps, les impacteurs conventionnels à surface réelle, les impacteurs virtuels et les cyclones, respectivement (a), (b), (c) et (d). Dans le cadre de cette note, seuls les deux derniers seront considérés : l'impacteur classique à surface réelle et l'impacteur virtuel.

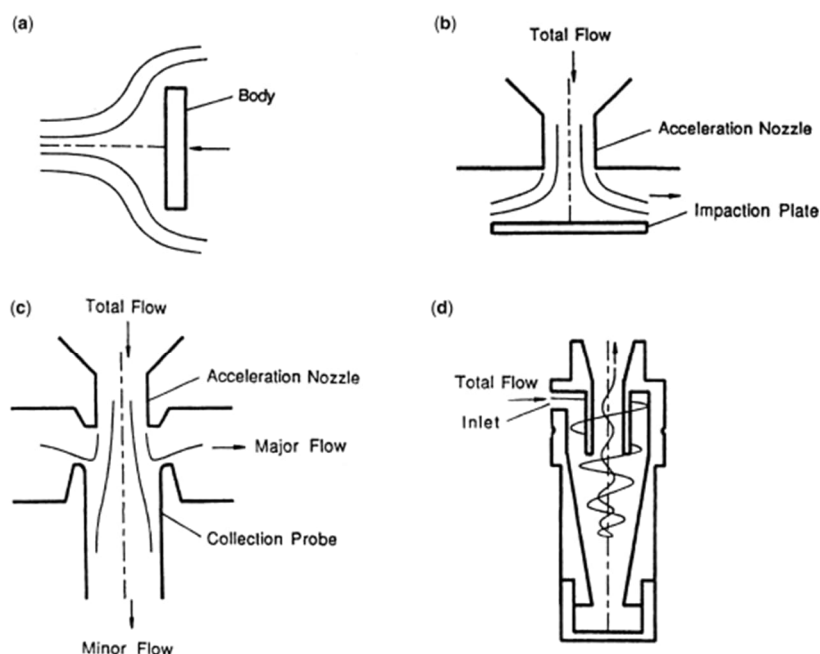


Figure 8-1 Four types of inertial classifiers: (a) body impactor, (b) conventional impactor, (c) virtual impactor, and (d) cyclone.

Figure 2: Quatre types de classificateurs inertiels : (a) les corps, (b) les impacteurs conventionnels à surface réelle, (c) les impacteurs virtuelles et enfin (d) les cyclones (Kulkarni, Baron et al. 2011).

2.2 L'impacteur conventionnel à surface réelle

La méthode de collecte de l'impacteur conventionnel à surface réelle consiste à accélérer et projeter les particules d'un aérosol donné sur un corps, et plus communément un substrat plan, comme l'illustre la Figure 2(a). Les particules de plus grande inertie sont collectées par le substrat plan alors que les particules de plus petite inertie sont emportées par l'écoulement. Différentes variantes de ce type d'impacteur comprennent l'utilisation de buses rondes ou rectangulaires, de buses uniques ou multiples, et de plaques d'impaction plates ou cylindriques.

La caractéristique la plus importante de ce type d'impacteur est la courbe d'efficacité de collecte. L'efficacité de la collecte est définie comme la fraction des particules passant par la buse qui est collectée sur la plaque d'impaction, cette fraction étant fonction de la taille des particules. L'impacteur idéal présente une courbe d'efficacité nette, comme le montre la Figure 3.

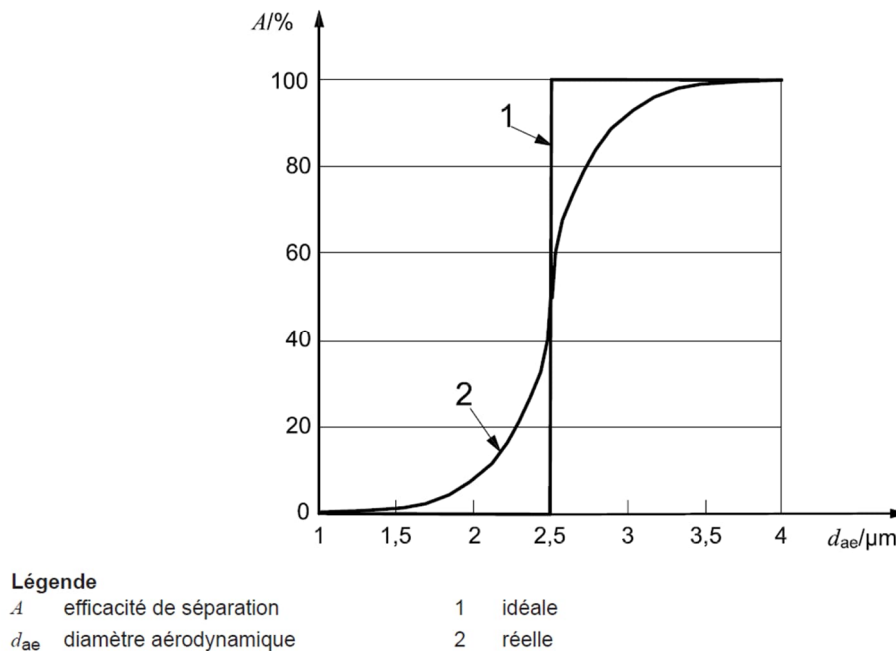


Figure 3. Efficacité de séparation A d'un impacteur en fonction du diamètre aérodynamique d_{ae} . Illustration tirée et adaptée des normes en vigueur (ISO_13271:2012, ISO_23210:2009)

Les particules de taille supérieure au diamètre de coupure (d_c) sont collectées, tandis que les particules plus petites suivent l'écoulement de la phase gazeuse hors de la zone d'impact (Hinds 1999).

Outre le cas idéal, la Figure 3 propose également à titre illustratif une courbe d'efficacité de séparation plus proche d'une situation réelle.

Si le point d'inflexion reste inchangé par rapport à la situation idéale, il est important de comprendre qu'en situation réelle, un phénomène de contamination apparaît autour du diamètre de coupure. En effet, en-dessous de ce dernier, l'efficacité non nulle indique que des particules de diamètre inférieur au diamètre de coupure se retrouve capturée par la surface.

A contrario, pour des diamètres supérieurs au diamètre de coupure nous pouvons constater une efficacité inférieure à 1, ce qui indique que des particules « grossières » (dont le diamètre aérodynamique est supérieur au diamètre de coupure) sont emportées par le fluide porteur sans être impactées et capturées par la surface.

2.3 L'impacteur virtuel

Dans un impacteur virtuel, la classification inertielle des particules, introduite pour la première fois par Conner en 1966 est en substance très similaire à l'impacteur inertiel conventionnel (Conner 1966). La principale différence tient au remplacement du substrat d'impaction par une sonde de collecte, comme présenté en Figure 2(c) et Figure 4. À l'aide d'une buse d'accélération conçue à cet effet, l'aérosol initial chargé de particules est accéléré puis projeté en direction d'une sonde de collecte opposée à la buse d'accélération. L'inertie acquise par les particules de plus grand diamètre aérodynamique permet à ces dernières de poursuivre leur trajectoire alors que les particules de plus faible inertie et une partie de la phase gazeuse sont prélevées dans un écoulement orthogonal à l'axe « buse d'accélération – sonde de collecte ». De manière pragmatique, un tel effet est obtenu en divisant un écoulement accéléré en deux écoulements distincts, avec un écoulement principal de plus grand débit transportant les particules inférieures au diamètre de coupure souhaité et un écoulement secondaire transportant toutes les particules grossières supérieures en taille à ce diamètre de coupure.

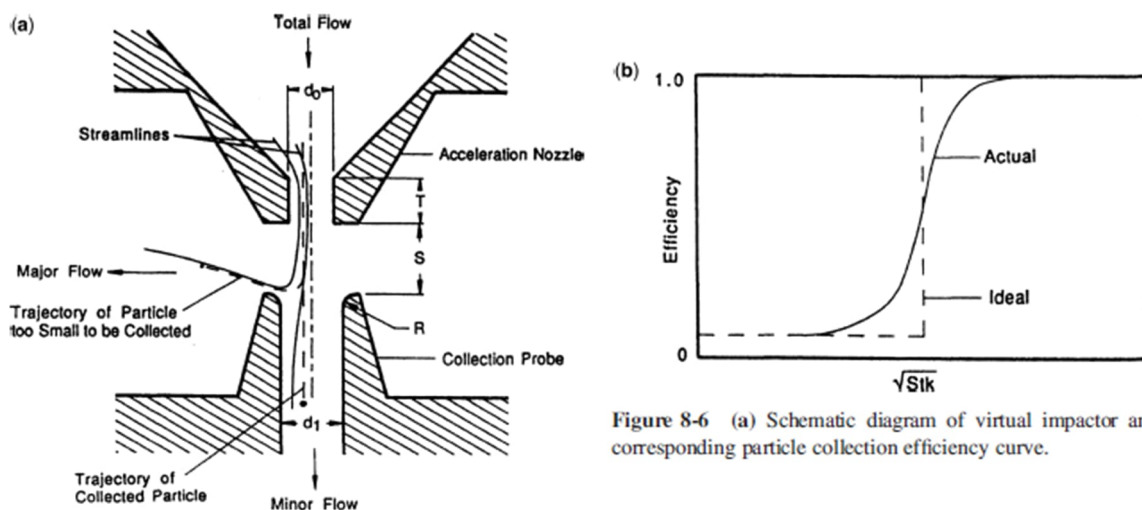


Figure 4: Schéma détaillé d'un impacteur virtuel (a) et courbe d'efficacité de prélèvement (b), extraite de 'étude théorique de (Marple and Chien 1980).

En termes de performance de classification des particules selon leur diamètre aérodynamique, l'impacteur virtuel présente les principaux avantages d'un impacteur inertiel conventionnel (séparation nette, simplicité et performances calculables analytiquement), tout en proposant une fonctionnalité inédite de « concentration des particules grossières ».

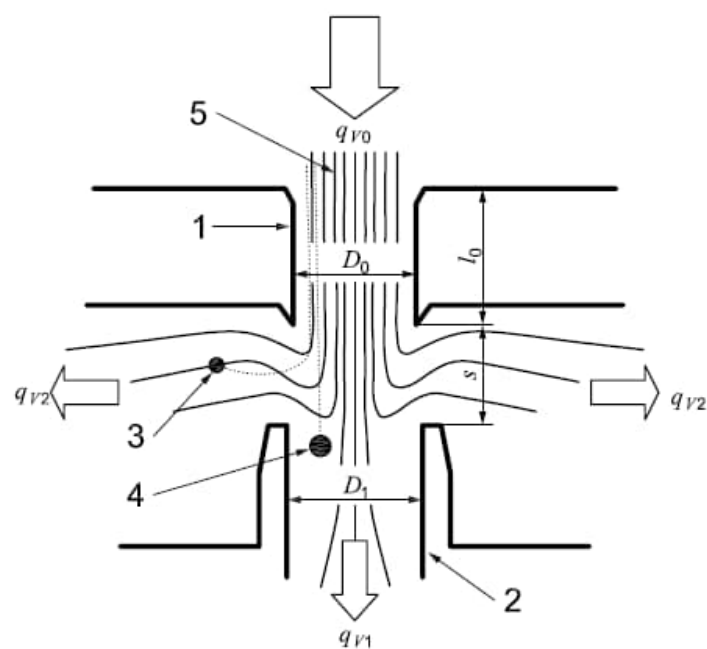
La section suivante aborde ce dernier aspect, fondamental par rapport à l'objectif des travaux, et aborde également les phénomènes qui limitent les performances des impacteurs virtuels.

3. UTILISATION ET LIMITES DES IMPACTEURS VIRTUELS

3.1 L'enrichissement granulométrique

Nonobstant des problématiques de contamination abordées par la suite, un impacteur virtuel se présente comme une alternative pertinente à l'impacteur classique puisqu'il permet de classer les particules selon leur diamètre aérodynamique tout en éliminant les problématiques de fragmentation, de rebond et de réentraînement des particules.

A des fins illustratives, la Figure 5 reprend le principe de fonctionnement de l'impacteur et introduit quelques grandeurs caractéristiques de ce type de dispositif. Ces éléments seront repris lors du dimensionnement proposé dans cette note.



Légende

- 1 buse d'accélération des particules
- 2 buse de collecte des particules
- 3 trajectoire des fines particules à mesurer
- 4 trajectoire des particules grossières
- 5 lignes de courant
- D_0 diamètre de la buse d'accélération des particules
- D_1 diamètre de la buse de collecte des particules
- l_0 longueur de buse de l'impacteur
- s distance entre l'extrémité de la buse d'accélération des particules et le sommet de la buse de collecte des particules
- q_{V0} débit total
- q_{V1} écoulement mineur
- q_{V2} écoulement majeur

Figure 5. Principe de fonctionnement de l'impacteur virtuel. Illustration tirée de la norme ISO 13271:2012.

Si cet atout est déjà indéniable, il faut noter que la séparation des fractions particulières est obtenue en gardant l'ensemble des particules en phase gazeuse. En sortie de dispositif, les particules d'un diamètre aérodynamique supérieur à une valeur fixée sont donc acheminées par un écoulement de débit moindre que celui de l'écoulement dont elles ont été extraites. De ce point de vue, un impacteur virtuel peut être perçu comme un moyen de concentrer les particules dont le diamètre aérodynamique est supérieur à une valeur imposée par le dimensionnement du dispositif, d'où la notion d'enrichissement granulométrique.

Cette fonction de l'impacteur est ainsi très utile lors de l'échantillonnage de particules à de faibles concentrations ou pour prélever des particules dans une instrumentation qui nécessite des concentrations supérieures à celles normalement présentes (Marple and Willeke 1976, Keskinen, Janka et al. 1987, Haglund and McFarland 2004, Bergman, Shinn et al. 2005).

Puisque les particules dont le diamètre aérodynamique est supérieur au diamètre de coupure d_c de l'impacteur sont concentrées dans le flux mineur, le facteur de concentration est égal au rapport entre le débit d'entrée total (q_{v0}) et le débit mineur (q_{v1}). Ainsi, si le flux mineur représente 5% du flux total, le facteur de concentration est égal à 20. Des études ont ainsi exploité ce principe pour concentrer les particules ambiantes pour évaluer l'exposition. Par exemple, à partir d'un débit d'entrée total de 5000 L/min, Sioutas, Koutrakis et al. (1997) ont obtenu un facteur de concentration d'environ 25 pour une gamme de taille de particules allant de 0,15 à 2,5 μm . De manière analogue, un tel dispositif peut être adapté pour doper sélectivement une matrice d'air donnée avec un aérosol enrichi en particules de plus gros diamètre aérodynamique.

3.2 La contamination

A l'instar des impacteurs conventionnels, l'efficacité de collecte des impacteurs virtuels est nette (Figure 4). La principale différence entre les courbes d'efficacité des impacteurs virtuels et conventionnels est qu'une partie des particules inférieures au diamètre de coupure d_c de l'impacteur virtuel restent dans le flux principal. La courbe d'efficacité des particules dans la sonde de collecte se rapproche asymptotiquement du pourcentage du flux total qui pénètre dans la sonde de collecte. Ainsi, si le flux mineur représente 10 % du flux total, 10 % des particules plus petites que la taille de coupe resteront dans le flux mineur, « contaminant » la fraction des grosses particules.

Pour éliminer ces problématiques de contamination, différentes améliorations peuvent être imaginées. La première consiste à introduire, dans la partie centrale de la sonde de collecte, de l'air filtré propre à contre-courant (Willeke and Pavlik 1978) pour limiter la pénétration des particules de plus faible inertie ou encore créer une enveloppe d'air propre autour de l'écoulement chargé en particules (Chen, Yeh et al. 1986). Ce type de solution se retrouve ainsi dans des dispositifs commerciaux tel le PCVI (Pumped Counterflow Virtual Impactor) proposé par Brechtel (Brechtel). Il en résulte néanmoins des complications au niveau de la conception de l'impacteur virtuel avec un encombrement qui augmente et une problématique d'apport d'un contre-écoulement d'air propre. Une seconde approche consiste à réduire le débit mineur à la valeur la plus faible possible. Xu (1991) sont ainsi allés jusqu'à réduire le flux mineur à une valeur de 0,1% du débit total. La difficulté dans la maîtrise des débits limite cependant le champ d'application de ce type d'approche.

3.3 Les pertes aux parois

Les études menées sur les problématiques de pertes d'efficacité des impacteurs virtuels tendent à montrer que ces dernières apparaissent pour des tailles de particules importantes ($\gg d_c$) et pour des tailles de particules proche du diamètre de coupure.

Pour la première catégorie, les pertes d'efficacité sont dues aux mécanismes de sédimentation gravitationnelle et d'impaction qui deviennent prépondérants. Elles peuvent être appréhendées facilement dans la mesure où les mécanismes sont connus et ce, notamment à l'aide d'outils comme ceux proposés par (von der Weiden, Drewnick et al. 2009, Kulkarni, Baron et al. 2011). Le travail accompli par ces auteurs étant très exhaustif, didactique et compréhensible, nous renvoyons à la lecture des références proposées.

Pour ce qui est des pertes au niveau de la coupure inertielle, ces dernières se produisent au niveau du bord supérieur de la sonde de collecte ou encore de la face arrière de la buse d'accélération. Elles sont par ailleurs maximales pour les diamètres aérodynamiques proches du diamètre de coupure de l'impacteur virtuel. Leur estimation théorique a mené à établir des modèles où les prédictions de pertes varient sur une plage allant de 10% dans les meilleurs des cas à 60% pour les cas où l'impacteur virtuel est mal conçu ou exploité de manière inadéquate (Marple and Chien 1980).

Dans le cas d'une conception et d'un usage corrects d'un impacteur virtuel, une réduction des pertes de particules au niveau de la coupure inertielle peut être envisagée. Elle consiste à placer en amont d'un impacteur virtuel, un système de lentille de focalisation aérodynamique qui facilite l'introduction des aérosols et ainsi limite les pertes aux parois. Les bénéfices ont notamment été mis en avant expérimentalement par Lee, Yi et al. (2003) qui, sur leur système d'impaction virtuelle, sont passés de pertes estimées de l'ordre de 10-20%, sur une gamme réduite de diamètres, à quelques pourcents avec l'utilisation d'une lentille de focalisation.

4. APPLICATION A L'ENRICHISSEMENT EN PARTICULES GROSSIERES

Etant donné la capacité de séparation et de concentration des particules de plus gros diamètre d'un impacteur virtuel, il a été imaginé d'utiliser ce type de dispositif, dans le système de dopage de matrices réelles d'air ambiant utilisé par l'Ineris, pour éliminer du flux de dopage, les particules contribuant majoritairement à la fraction $PM_{2,5}$ afin de ne conserver que celles impactant la fraction PM_{10} . L'un des principales contraintes est de pouvoir s'adapter aux forts débits utilisés au sein du système de dopage, allant de 200 à 400 $m^3 \cdot h^{-1}$.

4.1 Démarche du dimensionnement

Dans la littérature, les études théoriques portant sur les impacteurs virtuels sont similaires à celles menées pour les impacteurs classiques à surface réelle. Ainsi, l'approche habituelle est de modéliser la géométrie de l'impacteur et les conditions d'écoulement afin de résoudre par la méthode des éléments finis d'une part, les équations de Navier-Stokes et d'autre part, les équations du mouvement des particules dans le champ d'écoulement. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont ainsi pu montrer un bon accord entre les résultats de simulations et les observations expérimentales mettant en exergue une bonne compréhension générale des mécanismes physiques mis en jeu dans de telles technologies.

L'apparente simplicité de mise en œuvre d'une telle technologie et ce, jusqu'à des tailles compatibles avec l'industrie de la microélectronique, a alors contribué à ce que la question de dimensionnement des impacteurs (classiques ou virtuels) soit largement explorée. Se faisant, une pléthore de travaux s'intéressent à la grande variété des paramètres géométriques et de fonctionnement disponible pour ces dispositifs afin de déterminer empiriquement des relations entre eux et ainsi tendre vers un point de fonctionnement optimal (Jaenicke and Blifford 1974, McFarland, Ortiz et al. 1978, Loo 1980, Chen, Yeh et al. 1986, Loo and Cork 1987, Xu 1991). Ce retour d'expérience est de première importance puisque les pertes évoquées précédemment impactent rapidement et fortement les performances des impacteurs virtuels. À titre illustratif, ces pertes augmentent à un rythme de 1% par 50 μm de désalignement entre les axes de la buse d'accélération et de la sonde de collecte, rythme qui, d'après les auteurs, est largement sous-estimé pour les désalignements plus importants.

Autre point important, les études numériques de la littérature, qu'elles soient analytiques, pour des cas simples, ou numériques, mettent en exergue une méthodologie commune de dimensionnement reposant sur des estimations générales faites sur la base des travaux de (Marple and Willeke 1976), puis sur un affinement des valeurs sur la base des divers retours d'expérience déjà disponibles, puis sur une validation expérimentale ou numérique.

L'enjeu de cette note n'étant pas de proposer un guide méthodologique de dimensionnement des limiteurs virtuels couplés à des lentilles de focalisation, aucune revue exhaustive de la littérature des dits paramètres et de leur importance sur les performances de collecte ou d'enrichissement n'est proposée ici. À ce stade, et pour les besoins du document, il faut cependant noter qu'une liste de critères géométriques de dimensionnement est communément admise. Elle reprend par exemple le rapport entre le diamètre de la sonde de collecte avec celui de la buse, la forme de l'entrée de la sonde de collecte, l'alignement des axes de la buse et de la sonde de collecte, la forme de la buse dépassant de la plaque de la buse, le nombre de Reynolds du jet et le pourcentage de débit mineur. À titre illustratif, il est établi que :

- Le diamètre de la sonde de collecte soit de 30% à 40% plus grand que celui de la buse d'accélération ;
- La valeur hauteur de la sonde de collecte soit d'environ 2 à 3 fois celle de son diamètre ;
- Le débit de l'écoulement mineur corresponde de 5 à 15% du débit total ;
- Les configurations rectangulaires des buses d'accélération et des sondes de collecte sont tout aussi efficaces que les rondes, (Sioutas, Koutrakis et al. 1997, Ding and Koutrakis 2000, Ding, Ferguson et al. 2001, Hari, McFarland et al. 2007).

4.2 Présentation du système d'enrichissement sélectif mis au point

Le système d'enrichissement sélectif en particules grossières se compose de deux éléments : un dispositif de focalisation par lentille aérodynamique couplé à un impacteur virtuel. La Figure 6 présente une coupe tridimensionnelle du dispositif. Cette coupe tridimensionnelle montre le système final avec la combinaison de ces deux dispositifs inertiels : la lentille aérodynamique en violet et la sonde de collecte de l'impacteur virtuel en rouge.

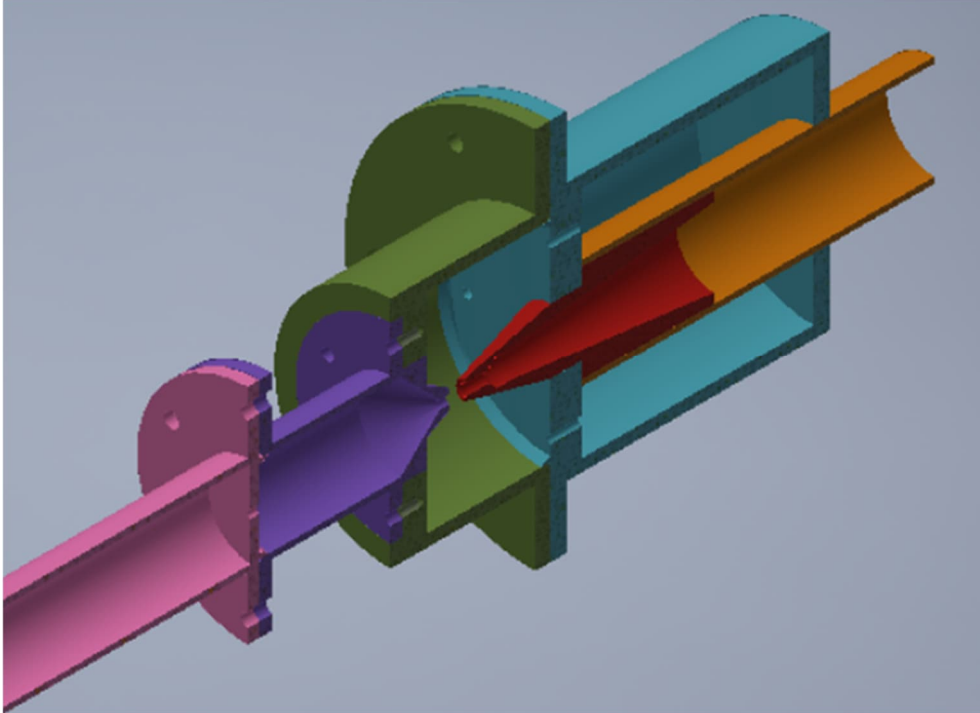


Figure 6. Coupe tridimensionnelle du système d'enrichissement sélectifs en particules larges.

La lentille de focalisation aérodynamique. Comme évoqué dans le paragraphe 3.3, les pertes aux parois inhérentes au fonctionnement des impacteurs peuvent être limitées en leur adjoignant un système de focalisation par lentille aérodynamique, option adoptée dans le cadre des développements de cette note technique.

Une lentille de focalisation repose sur la distribution radiale des lignes d'écoulement à l'approche d'un orifice à arêtes franches. Concrètement, une lentille aérodynamique consiste généralement en un trou au centre d'une plaque qui bloque l'écoulement. L'inertie des particules leur permet de traverser les lignes d'écoulement et se rapprocher ainsi de la ligne centrale (Liu, Ziemann et al. 1995, Liu, Ziemann et al. 1995, de Juan and Fernández de la Mora 1998, Wang, Gidwani et al. 2005, De La Mora and Riesco-Chueca 2006).

En sortie du dispositif, la trajectoire des particules se concentrent sur la ligne principale d'écoulement.

L'impacteur virtuel. Ce dispositif de classification inertielle des particules est employé afin de concentrer les particules les plus grossières et enrichir de cette manière la matrice réelle dans le système de dopage de l'Ineris. Afin de favoriser les particules ayant un effet sur la masse de la fraction PM₁₀, le diamètre de coupure a été fixé à 2,5 µm pour un point de fonctionnement en termes de débit d'entrée fixé à 1m³.h⁻¹. En cohérence avec les notations utilisées dans la Figure 5, les principales dimensions retenues pour cette étude sont :

- D0 = 0,305cm ;
- D1 = 0,422cm ;
- S = 0,480cm

5. CONCLUSION

Afin de répondre à la problématique de contrôle de la granulométrie lors des essais mettant en œuvre des dopages particulaires, l’Ineris s’est proposé d’étudier le principe de fonctionnement d’un impacteur virtuel et de l’adapter, afin de créer un dispositif permettant de réaliser des dopages ciblés de matrice d’air ambiant avec des particules ayant un diamètre aérodynamique supérieur à 2,5 μm .

Ainsi, cette note regroupe les principaux éléments permettant de comprendre le principe de fonctionnement de l’impaction inertielle et les méthodes existantes. Elle montre également que ces dispositifs peuvent être utilisés afin de séparer les particules en fonction de leur diamètre aérodynamique. De plus, lorsqu’associée à un système de collecte, le dispositif joue alors le rôle de concentrateur des particules présentant un diamètre supérieur au diamètre aérodynamique cible, appelé diamètre de coupure. Enfin, cette note présente les éléments retenus pour la conception d’un dispositif dimensionné pour le système de dopage de matrice d’air ambiant développé et exploité par Ineris.

Sur la base de ces éléments, un prototype a pu être mis au point. Des essais restent à conduire afin de valider son bon fonctionnement et d’évaluer ses performances au sein du système de dopage de matrice d’air ambiant.

A terme, cet impacteur pourrait être mis en œuvre lors des différents tests d’instrument de mesure des particules, comme les comparaisons inter-laboratoires dédiées aux systèmes de mesures automatiques ou encore les systèmes capteurs.

6. REFERENCES

- Amodeo, T. and R. Aujay (2016). Développement d'un système de dopage pm pour la réalisation de comparaisons interlaboratoires des analyseurs automatiques des PM, Ineris DRC-16-152318-06089A.
- Aujay, R. (2012). Système de génération des particules pour les comparaisons interlaboratoires PM, Ineris DRC-12-126710-14189A.
- Bergman, W., J. Shinn, R. Lochner, S. Sawyer, F. Milanovich and R. Mariella Jr (2005). "High air flow, low pressure drop, bio-aerosol collector using a multi-slit virtual impactor." Journal of aerosol science **36**(5-6): 619-638.
- Brechtel. from <https://www.brechtel.com/product/pumped-counterflow-virtual-impactor-pcvi/>.
- Chen, B., H. Yeh and Y. Cheng (1986). "Performance of a modified virtual impactor." Aerosol science and technology **5**(3): 369-376.
- Conner, W. D. (1966). "An inertial-type particle separator for collecting large samples." Journal of the Air Pollution Control Association **16**(1): 35-38.
- de Juan, L. and J. Fernández de la Mora (1998). "Sizing nanoparticles with a focusing impactor: effect of the collector size." Journal of Aerosol Science **29**(5): 589-599.
- De La Mora, J. F. and P. Riesco-Chueca (2006). "Aerodynamic focusing of particles in a carrier gas." Journal of Fluid Mechanics **195**: 1-21.
- Ding, Y., S. T. Ferguson, J. M. Wolfson and P. Koutrakis (2001). "Development of a High Volume Slit Nozzle Virtual Impactor to Concentrate Coarse Particles." Aerosol Science and Technology **34**(3): 274-283.
- Ding, Y. and P. Koutrakis (2000). "DEVELOPMENT OF A DICHOTOMOUS SLIT NOZZLE VIRTUAL IMPACTOR." Journal of Aerosol Science **31**(12): 1421-1431.
- Haglund, J. S. and A. R. McFarland (2004). "A circumferential slot virtual impactor." Aerosol science and technology **38**(7): 664-674.
- Hari, S., A. R. McFarland and Y. A. Hassan (2007). "CFD study on the effects of the large particle crossing trajectory phenomenon on virtual impactor performance." Aerosol science and technology **41**(11): 1040-1048.
- Hinds, W. C. (1999). Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, Wiley.
- ISO_13271:2012 Stationary source emissions — Determination of PM₁₀/PM_{2,5} mass concentration in flue gas — Measurement at higher concentrations by use of virtual impactors.
- ISO_23210:2009 Stationary source emissions — Determination of PM₁₀/PM_{2,5} mass concentration in flue gas — Measurement at low concentrations by use of impactors.
- Jaenicke, R. and I. Blifford (1974). "The influence of aerosol characteristics on the calibration of impactors." Journal of Aerosol Science **5**(5): 457-464.
- Keskinen, J., K. Janka and M. Lehtimäki (1987). "Virtual impactor as an accessory to optical particle counters." Aerosol science and technology **6**(1): 79-83.
- Kulkarni, P., P. A. Baron and K. Willeke (2011). Aerosol measurement: principles, techniques, and applications, John Wiley & Sons.

Lee, J.-W., M.-Y. Yi and S.-M. Lee (2003). "Inertial focusing of particles with an aerodynamic lens in the atmospheric pressure range." Journal of Aerosol Science **34**(2): 211-224.

Liu, P., P. J. Ziemann, D. B. Kittelson and P. H. McMurry (1995). "Generating particle beams of controlled dimensions and divergence: I. Theory of particle motion in aerodynamic lenses and nozzle expansions." Aerosol Science and Technology **22**(3): 293-313.

Liu, P., P. J. Ziemann, D. B. Kittelson and P. H. McMurry (1995). "Generating particle beams of controlled dimensions and divergence: II. Experimental evaluation of particle motion in aerodynamic lenses and nozzle expansions." Aerosol Science and Technology **22**(3): 314-324.

Loo, B. and C. Cork (1987). "The Development of High Efficiency Virtual Impactors."

Loo, B. W. (1980). "High efficiency virtual impactor."

Marple, V. A. and C. M. Chien (1980). "Virtual impactors: a theoretical study." Environmental science & technology **14**(8): 976-985.

Marple, V. A. and K. Willeke (1976). "Impactor design." Atmospheric Environment (1967) **10**(10): 891-896.

McFarland, A. R., C. A. Ortiz and R. W. Bertch Jr (1978). "Particle collection characteristics of a single-stage dichotomous sampler." Environmental Science & Technology **12**(6): 679-682.

Sioutas, C., P. Koutrakis, J. J. Godleski, S. T. Ferguson, C. S. Kim and R. M. Burton (1997). "Fine particle concentrators for inhalation exposures—effect of particle size and composition." Journal of aerosol science **28**(6): 1057-1071.

Spinelle, L., J. Bardou and N. Bocquet (2022). Amélioration du système de dopage en pm de matrices réelles air ambiant, Étude de l'impact de différentes sources de particules et de la variation de leur nature sur la mesure automatique des PM, Ineris-201695-2720052-v1.0.

von der Weiden, S. L., F. Drewnick and S. Borrmann (2009). "Particle Loss Calculator – a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems." Atmos. Meas. Tech. **2**(2): 479-494.

Wang, X., A. Gidwani, S. L. Girshick and P. H. McMurry (2005). "Aerodynamic focusing of nanoparticles: II. Numerical simulation of particle motion through aerodynamic lenses." Aerosol science and technology **39**(7): 624-636.

Willeke, K. and R. E. Pavlik (1978). "Size classification of fine particles by opposing jets." Environmental Science & Technology **12**(5): 563-566.

Xu, Z. (1991). A study of virtual impactor, University of Minnesota.