MESURE DES FLUX TURBULENTS DE DEPOT DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES PAR EDDY ACCUMULATION : DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE PRELEVEMENT DE PARTICULES INNOVANT

E.K. Kouadio[1*], Y. Brunet[4], F. Gensdarmes[2], P. Roupsard[1], A. Kort[2], D. Hébert[1], M. Beguin Leprieur[3], B. Pouderoux[5], D. Maro[1], P. Laguionie[1]

[1]Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSE-ENV/SRTE/LRC, F-50130, Cherbourg-en-Cotentin, France
[2]Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES/SCA/LPMA, F-91400, Saclay, France
[3]Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSE-ENV/SIRSE/LSE, F-78110, Le Vésinet, France
[4]Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE), ISPA, F-33140, Villenave-d'Ornon, France
[5]Auto-Entrepreneur, développement de systèmes mécatroniques
*Courriel de l'orateur : kouakou-emmanuel.kouadio@irsn.fr

TITLE

Measurement of deposition fluxes of atmospheric particles by Eddy Accumulation: development of an innovative particle sampling system

RESUME
Dans ce travail, un dispositif innovant de mesure de flux de particules atmosphériques par Eddy Accumulation est proposé. La difficulté technique d'un prélèvement d'aérosols atmosphériques à haute fréquence avec un débit proportionnel aux changements de la vitesse verticale du vent n'avait pas encore été résolue. Un système de prélèvement à réponse rapide a été développé puis qualifié. Les résultats des temps de réponses obtenus sont en accord avec un prélèvement à 10 Hz et devraient permettre une mesure des flux de particules atmosphériques par la méthode d'Eddy Accumulation.

ABSTRACT
In this work, an innovative device for measuring atmospheric particle flux by Eddy Accumulation is proposed. The technical difficulty of high frequency atmospheric aerosols sampling with a flow rate proportional to changes in vertical wind speed had not yet been solved. A fast response sampling system was developed and qualified. The results obtained on the response time agree with a 10 Hz sampling and should allow a measurement of atmospheric particle flux by the Eddy Accumulation method.

MOTS-CLÉS : Eddy Accumulation, Particules atmosphériques, Flux turbulents, Temps de réponse / **KEYWORDS :** Eddy Accumulation, Atmospheric particles, Turbulent fluxes, Response time

1. INTRODUCTION

En milieu extérieur, les flux de dépôt des particules atmosphériques submicroniques sont gouvernés par la turbulence atmosphérique. Les flux turbulents de dépôt dépendent de la taille des particules, des conditions micro-météorologiques et de la nature du couvert sur la zone de « footprint »[1] (Burba *et al.*, 2013). La mesure des flux turbulents, à une hauteur donnée dans la couche de surface atmosphérique, peut être directe ou indirecte. La mesure directe des flux turbulents est réalisée par la méthode de l'Eddy Covariance (EC). La mesure indirecte des flux est jusqu'à présent réalisée par la méthode de la Relaxed Eddy Accumulation (REA), qui est un mode dégradé de la méthode de l'Eddy Accumulation (EA) décrite par Desjardins en 1977. Cette mesure indirecte est nécessaire pour la mesure des flux de radionucléides naturels et artificiels, étant donnés les faibles niveaux de concentrations dans l'atmosphère en fonctionnement normal des installations.

[1] Zone source des flux turbulents mesurés.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32904 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

La REA et l'EA reposent sur une séparation physique *in situ* des flux ascendants et descendants, en prélevant les particules sur des filtres distincts selon le signe de la vitesse verticale du vent w. Avec la REA, le débit de prélèvement Q est constant au cours du temps, tandis que la méthode de l'EA nécessite de prélever les particules avec un débit Q proportionnel à $|w|$, tel que l'impose la théorie. Pour que le flux soit représentatif de l'échelle spatiale des structures turbulentes, la mesure de w doit être réalisée à une fréquence minimum de 10 Hz.

A l'heure actuelle, en raison du défi technique que représente la mise au point d'un système de prélèvement de particules sur filtres avec un temps de réponse du débit de prélèvement aux variations de $|w|$ inférieur à 0,1 s, la méthode de l'EA reste inexploitée. Le présent article décrit un dispositif innovant de mesure de flux turbulent par EA. En particulier, les temps de réponse caractéristiques du système aux variations de $|w|$ y sont présentés.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 Présentation du dispositif de mesure par EA

Le calcul du flux mesuré par la méthode de EA développée dans cette étude est effectué par l'Equation 1, dérivée de la méthode de calcul des flux d'EA de Desjardins (1977) :

$$F_{EA} = \frac{1}{T}\frac{1}{\beta\alpha}\left(\underbrace{\sum_{i=0}^{T} Ci^{+}Q^{+}\,\Delta T^{+}}_{(\#\,m^{-3})(m^{3}s^{-1})(s)} - \underbrace{\sum_{i=0}^{T} Ci^{-}Q^{-}\,\Delta T^{-}}_{(\#\,m^{-3})(m^{3}s^{-1})(s)}\right)$$

Collecte sur le filtre (+) — Collecte sur le filtre (-)

Equation 1

où F_{EA} est le flux mesuré ($\#\ m^{-2}\ s^{-1}$), Q^{+}et Q^{-}sont les débits d'échantillonnage sur filtre respectivement pour les flux descendants et ascendants ($m^{3}\ s^{-1}$), Ci^{+}et Ci^{+} sont les concentrations de particules atmosphériques sur les filtres ($\#\,m^{-3}$), α est la section du filtre (m^{2}), β est un coefficient de proportionnalité qui permet d'augmenter les quantités prélevées sur les filtres ($\#$), et T est la durée du prélèvement ($T = \Sigma\Delta T^{+} + \Sigma\Delta T^{-}$).

Pour résoudre cette équation, le dispositif développé est constitué de quatre principales parties : 1) un anémomètre sonique, 2) un système de prélèvement, 3) un système de vide et 4) une centrale de pilotage et d'acquisition des données. L'anémomètre sonique (Young 81000) est monté à 10 m du sol sur un mât télescopique pour la mesure des composantes du vents et de la température de l'air ambiant. *In situ*, le système de prélèvement est disposé à 0,5 m en dessous de l'anémomètre afin de minimiser au maximum les pertes de flux (Kristensen *et al.*, 1997, Moore, 1986). L'originalité de ce système repose sur sa capacité à réaliser des prélèvements de particules atmosphériques sur filtres avec Q proportionnel à w, à haute fréquence. Le débit de prélèvement des particules sur filtre QMA de 47 mm de diamètre est régulé par un ensemble de deux modules d'électrovannes pneumatiques à débits variables (série MATRIX 860 PCM). Un module est composé de plusieurs électrovannes correspondant chacune à débit de prélèvement. La technologie de ces électrovannes repose sur le principe du col sonique et le contrôle du débit de manière numérique (technique PCM). Une différence minimale de pression de 0,3 bars entre le réservoir et l'air prélevé assure le fonctionnement nominal des électrovannes. Pour chacun des filtres, l'ensemble de modules associé est composé d'une configuration à 6-bits et d'une configuration à 8-bits avec 64 et 256 niveaux de réglage du débit, respectivement. Cette association de modules permet, par combinaisons d'électrovannes, de générer 16 383 valeurs différentes de débits de prélèvements par filtre. Les enclenchements et arrêts des électrovannes sont pilotés par une carte électronique associée au système de prélèvement.

De façon pratique, la carte électronique reçoit les données de w mesurées par l'anémomètre sonique. Sur la base de la valeur de $|w|$ transmise, un programme sélectionne, parmi l'ensemble des combinaisons, la configuration d'électrovanne(s) assurant un Q proportionnel ou quasi-proportionnel au $|w|$ transmis. La sélection de la combinaison adéquate par le programme est réalisée par la valeur la

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32904 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

plus proche ou égale à Q. Le programme prend en compte les variations de pression et de température à l'aide de sondes disposées de part et d'autre du système de prélèvement. Le temps d'exécution total du programme entre la réception de w par la carte électronique et le déclenchement d'un prélèvement est constant, avec une durée de 8 µs.

Le système de vide est composé d'un réservoir de vide de 60 L en aluminium et d'une pompe à vide. Enfin, l'ensemble des paramètres mesurés sont stockés au sein d'une centrale d'acquisition qui sert également de centre de pilotage du dispositif.

2.2 Qualification des temps de réponse caractéristiques

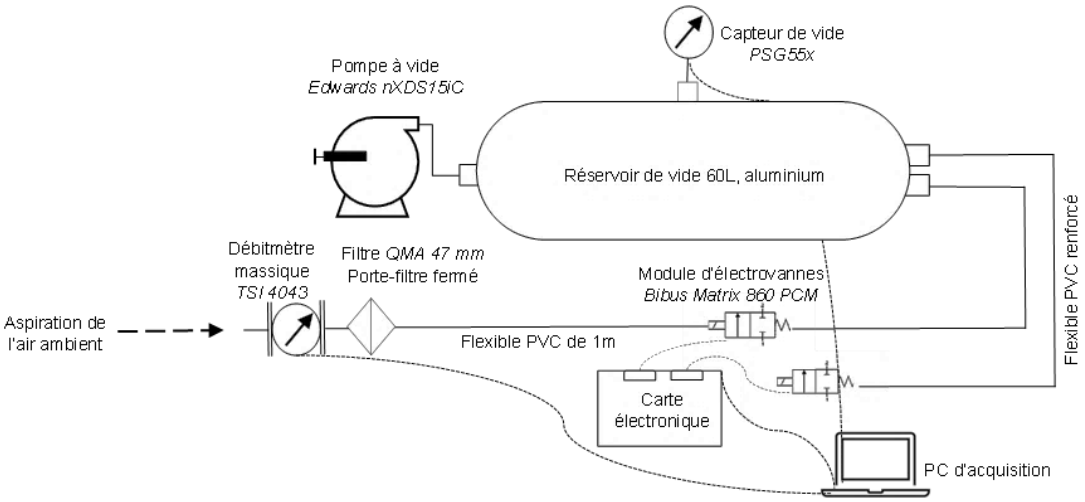

Figure 1. Schéma du banc d'essai de mesure des temps de réponses caractéristiques

Le temps de réponse de Q aux variations de $|w|$ à l'ouverture et à la fermeture de chaque module a été quantifié électrovanne par électrovanne et pour différentes combinaisons à l'aide du banc de test représenté sur la Figure 1. Ce banc de test est composé d'un débitmètre massique (4043 TSI), monté sur un porte-filtre fermé connecté au module par un tube flexible PVC de 1 m de long. A l'exception de ces éléments, l'ensemble du banc de test a été identique au dispositif de mesure par EA présenté dans la section précédente. L'ouverture et la fermeture des électrovannes s'est faite manuellement au moyen d'une carte électronique. Le banc a été adapté aux modules permettant ainsi d'atteindre, manuellement et automatiquement, les 64 et 256 niveaux de prélèvement autorisés par ceux-ci. L'air ambiant a été aspiré au travers du débitmètre et le débit de prélèvement, la température et la pression de l'air prélevé ont été mesurés en continu durant chaque essai. Le calcul du temps de réponse τ a été réalisé par ajustement d'une fonction exponentielle sur les données de débits mesurés (Figure 2) (Held & Klemm, 2006, Hering *et al.*, 2005). Le temps de réponse retenu a été déterminé pour 3τ qui correspond au temps de réponse caractéristique lorsque 95 % du débit nominal de l'électrovanne (ou combinaison d'électrovannes) est atteint.

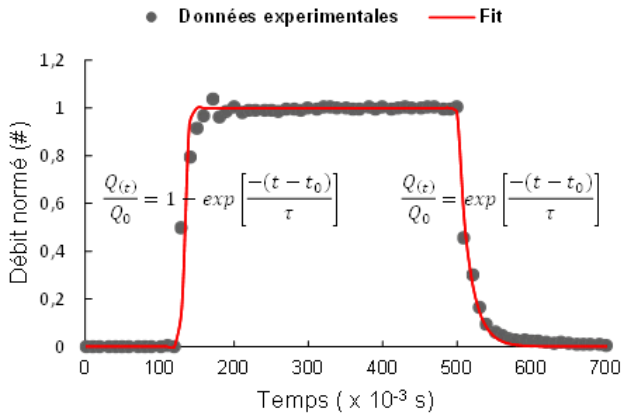

Figure 2. Exemple d'ajustement des données expérimentales de l'électrovanne E01 du module 6-bits. L'ouverture de l'électrovanne a été réalisée à 110 10^{-3} s et sa fermeture à 500 10^{-3} s.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32904
Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

3. RESULTATS

Le Tableau 1 synthétise les résultats de temps de réponse obtenus à l'ouverture et à la fermeture des différentes électrovannes des modules et pour différentes combinaisons d'électrovannes. A l'exception de l'ouverture l'électrovanne produisant le plus faible débit (E01 du module 8-bits), les temps de réponse aux changements de débits de prélèvements mesurés sont en accord avec l'objectif d'une valeur maximale de 0,1 s. Ils ont varié de 8,3 10^{-3} s à 155 10^{-3} s et de 12 10^{-3} s à 90 10^{-3} s à l'ouverture et à la fermeture, respectivement. Une exclusion de la E01 du module 8-bits des combinaisons permettrait de rester en accord avec une mesure à 10 Hz. Le nombre de combinaisons possibles d'électrovannes serait alors de 8191 pour un débit de prélèvement variant de 0,560 NL.min^{-1} à 178 NL.min^{-1}.

Tableau 1. Temps de réponses caractéristiques à 95 % mesurés (x 10^{-3} s)

Module d'électrovannes 8-bits				**Module d'électrovannes 6-bits**			
Electrovanne(s)	Q $(NL.min^{-1})$	***Ouverture*** $(\times 10^{-3}s)$	***Fermeture*** $(\times 10^{-3}s)$	Electrovanne(s)	Q $(NL.min^{-1})$	***Ouverture*** $(\times 10^{-3}s)$	***Fermeture*** $(\times 10^{-3}s)$
E01	*0,280*	155	67	E01	*1,690*	37	70
E02	*0,560*	84	61	E02	*3,390*	35	35
E03	*1,130*	43	54	E03	*6,770*	15	90
E04	*2,260*	38	38	E04	*13,55*	15	86
E05	*4,520*	32	31	E05	*27,10*	12	72
E06	*9,030*	29	12	E06	*54,20*	*ND	*ND
E07	*18,06*	30	27	E01 à E03	*11,85*	15	77
E08	*36,13*	26	15	E04 à E05	*40,65*	15	51
E01 à E03	*1,970*	38	46	E01 à E05	*52,50*	8,3	57
E05 à E07	*31,61*	26	33				
E01 à E07	*35,84*	29	29				

* Non Déterminé

4. CONCLUSION

Ces travaux ont permis de valider la capacité du système d'échantillonnage développé à réaliser des prélèvements de particules atmosphériques sur filtres à haute fréquence. Les temps de réponse observés à l'ouverture et à la fermeture des électrovannes lors de prélèvements d'air sont suffisamment courts pour un prélèvement représentatif des flux turbulents atmosphériques par Eddy Accumulation. Seule l'électrovanne délivrant le plus faible débit a présenté un temps de réponse non adapté aux objectifs de l'étude. Cette électrovanne ne sera donc pas utilisée au cours des campagnes de terrain. La prochaine étape de l'étude concernera la validation *in situ* du système d'EA développé. Elle sera réalisée par comparaison avec la méthode du gradient. Des radionucléides environnementaux tel que les descendants du radon (^{222}Rn) sont envisagés comme traceurs. Les flux de dépôt sec seront mesurés sur des périodes d'une demi-heure au-dessus d'une prairie d'herbe homogène.

Cette étude a été menée dans le cadre du projet de recherche exploratoire DREAM (2021-2023) financé et porté par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, en collaboration avec l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement.

Burba, G., Madsen, R. & Feese, K. (2013) Eddy covariance method for CO2 emission measurements in CCUS applications: Principles, instrumentation and software. *Energy Procedia* 40, 329–336.

Desjardins, R. L. (1977) Description and evaluation of a sensible heat flux detector. *Boundary-Layer Meteorol.* 11(2), 147–154.

Held, A. & Klemm, O. (2006) Direct measurement of turbulent particle exchange with a twin CPC eddy covariance system. *Atmos. Environ.* 40, 92–102.

Hering, S. V., Stolzenburg, M. R., Quant, F. R., O'Berreit, D. R. & Keady, P. B. (2005) A laminar-flow, water-based condensation particle counter (WCPC). *Aerosol Sci. Technol.* 39(7), 659–672.

Kristensen, L., Mann, J., Oncley, S. P. & Wyngaard, J. C. (1997) How close is close enough when measuring scalar fluxes With displaced sensors? *J. Atmos. Ocean. Technol.* 14(4), 814–821.

Moore, C. J. (1986) J K &) dn. *Boundary-Layer Meteorol.* 37, 17–35.