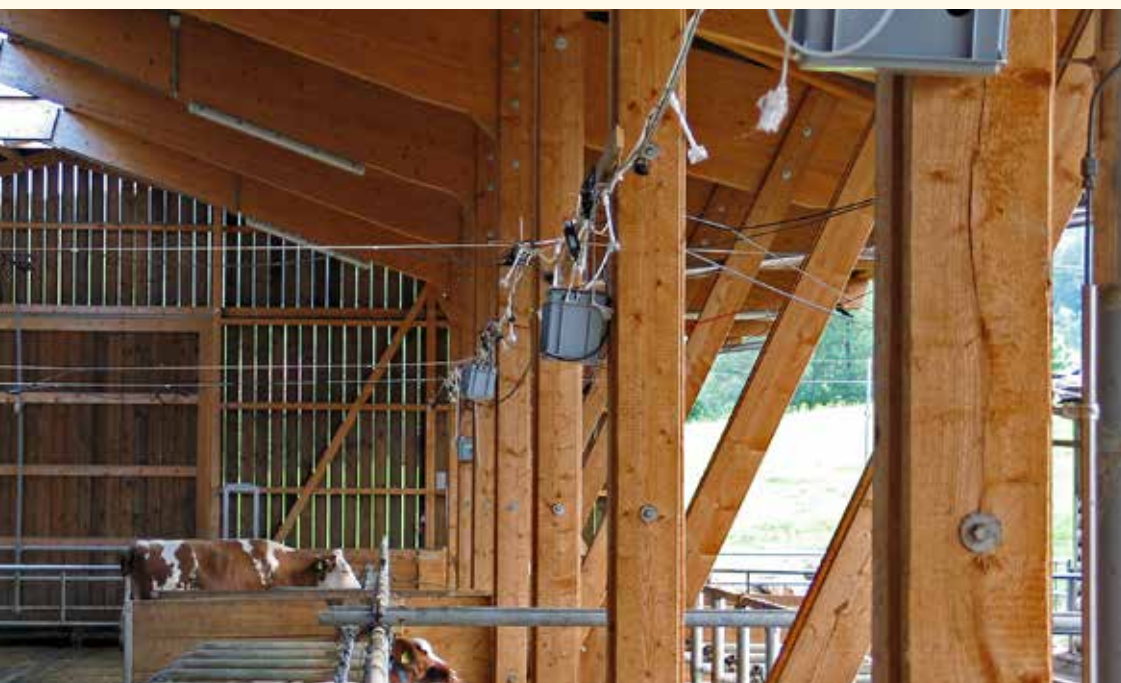


## Série Émissions provenant des animaux

## Émissions de poussières fines (PM10) dans les stabulations libres pour vaches laitières

Sabine Schrade<sup>1</sup>, Kerstin Zeyer<sup>2</sup>, Lukas Emmenegger<sup>2</sup> et Margret Keck<sup>1</sup><sup>1</sup>Agroscope, 8056 Ettenhausen, Suisse<sup>2</sup>Empa, 8600 Dübendorf, Suisse

Renseignements: Sabine Schrade, e-mail: sabine.schrade@agroscope.admin.ch



Pour la première fois, les émissions de PM10 ont été mesurées dans des stabulations de vaches laitières à aération naturelle avec aire d'exercice extérieure. (Photo: Sabine Schrade, Agroscope)

## Introduction

Selon les estimations de l'Office fédéral de l'environnement OFEV, les émissions totales de poussières fines appartenant à la fraction granulométrique des PM10 représentaient 20000 tonnes en 2010 en Suisse (OFEV 2013). Selon ces calculs, 27 % des émissions de PM10 peuvent être attribuées à l'agriculture et à la sylviculture, dont environ 34 % à l'élevage laitier. Pour l'année 2010, avec plus de 40 % des unités de gros bétail, l'élevage laitier représente la plus grande part du cheptel total d'animaux de rente en Suisse (Union suisse des paysans 2011).

Les données sur les émissions de PM10 dans l'élevage laitier de Takai *et al.* (1998) varient de 0,12 à 4,05 g par unité de gros bétail (UGB) et par jour (d). Ces données ont été uniquement déduites de mesures des PM2.5 et PM100 réalisées dans des stabulations libres pour vaches laitières aux Pays-Bas, au Royaume-Uni, en Allemagne et au Danemark. Jusqu'à présent, cette base de données constituait la base des facteurs d'émission de PM10 pour l'élevage bovin dans de nombreux inventaires (p.ex. Döhler *et al.* 2002; Agence européenne pour l'environnement 2013; Haenel *et al.* 2014).

Il n'existe pas encore de données d'émissions de PM10 pour les stabulations libres à logettes avec aire d'exercice extérieure, qui sont très répandues en Suisse pour les vaches laitières et qui ont par conséquent des aires d'activité plus vastes. Cette étude avait pour but de déterminer les émissions de PM10 pour le type de stabulation libre le plus courant en Suisse pour les vaches laitières, c'est-à-dire celui avec aération naturelle, logettes et aire d'exercice extérieure et d'en déduire un facteur d'émission de PM10 afin d'améliorer la fiabilité des inventaires d'émissions.

## Matériel et méthodes

Les mesures ont été réalisées dans six exploitations deux saisons sur trois (été, période de transition, hiver). Il s'agissait de stabulations libres composées d'un seul bâtiment avec aération naturelle, logettes, sans isolation thermique, avec des aires de circulation non perforées et une aire d'exercice placée le long de l'étable. Dans trois exploitations, l'aire d'exercice était séparée de l'étable et, dans trois autres exploitations, elle était conçue comme un couloir de repos combiné à une aire d'exercice. Les logettes étaient profondes avec de la paille longue, de la paille hachée ou une combinaison de paille et de sciure de bois. Les effectifs variaient entre 20 et 74 animaux. La production laitière moyenne pendant les périodes de mesure se situait entre 19 et 31 kg par vache et par jour. Dans les exploitations 1, 2 et 3, la ration se composait principalement d'ensilage, de foin et de concentrés. L'exploitation 4 n'utilisait pas d'ensilage. Les exploitations 5 et 6 distribuaient chacun une ration totale mélangée. Les exploitations sont décrites en détail dans Schrade *et al.* (2012).

Les particules de la fraction granulométrique PM10 ont été déterminées par gravimétrie avec des impacteurs (séparateurs de particules, marque: *Personal Environmental Monitor pour PM10*, MSP Corp., Shoreview, USA). La masse de PM10 a été enrichie sur un filtre préconditionné (filtre à membrane Whatman, revêtu de téflon, épaisseur 5,0 µm, diamètre 37 mm, GE Healthcare, Chicago, USA), puis déterminée par gravimétrie en laboratoire. Afin d'accumuler une masse de poussière suffisante, les filtres ont été chargés pendant 72 heures. Pour un relevé d'échantillons représentatif de la stabulation et de l'aire d'exercice, trois à cinq impacteurs ont été répartis uniformément dans chaque axe de mesure à une hauteur d'environ trois mètres et actionnés simultanément (fig. 1). Selon l'étable, les points de mesure étaient au nombre de 9 à 14. Deux impacteurs ont été placés à un endroit non impacté de l'étable pour déterminer la concentration en arrière-plan.

## Résumé

Les émissions de poussières fines (PM10) ont été déterminées dans le système de stabulation libre le plus répandu en Suisse, afin d'améliorer la base de données des inventaires d'émissions. Pour ce faire, des mesures d'émissions ont été effectuées dans six stabulations libres à logettes à aération naturelle pour vaches laitières équipées d'aires de circulation non perforées et d'une aire d'exercice extérieure. Les relevés ont été réalisés deux saisons sur trois (été, période de transition, hiver). La prise d'échantillons enrichis de PM10 a eu lieu sur une plage de 72 heures, avec des impacteurs (séparateurs de particules) sur un total de 9 à 14 positions dans l'étable et l'aire d'exercice ainsi qu'une position en arrière-plan. La méthode Tracer-Ratio avec deux gaz traceurs ( $SF_6$ ,  $SF_5CF_3$ ) a été utilisée pour déterminer les émissions. Les concentrations de PM10 dans l'aire des animaux étaient généralement légèrement supérieures ou égales à celles en arrière-plan. Dans toutes les exploitations, les émissions de PM10 ont varié entre 0,02 et 2,1 g par unité de gros bétail et par jour. Avec 0,64 g par vache et par jour, le facteur d'émission de PM10 qui en est déduit est nettement inférieur aux facteurs d'émission précédemment utilisés dans les inventaires.

La méthode Tracer-Ratio avec les deux gaz traceurs hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) et pentafluorure de trifluorométhyle sulfuré ( $SF_5CF_3$ ) a été utilisée pour déterminer les émissions avec ventilation naturelle (Schrade *et al.* 2012). Le calcul des émissions de PM10 était basé sur les concentrations de PM10 enregistrées sur une plage de mesure de trois jours. La médiane a été définie à partir des concentrations de PM10 aux différents points de mesure dans l'aire réservée aux animaux (aire de stabulation et aire d'exercice extérieure ou couloir de repos et aire d'exercice combinés). Les émissions ont été calculées en additionnant les moyennes de concentrations de gaz traceurs et de flux massiques sur trois jours.

Afin de caractériser chaque situation de mesure, de vérifier la plausibilité des données de mesure comme variables de référence et d'en déduire les principaux facteurs influençant les émissions, des données climatiques (par ex. température de l'air, direction et vitesse du vent, humidité relative de l'air, pression atmosphérique) ont

également été enregistrées dans l'étable, dans l'aire d'exercice extérieure et en arrière-plan, en plus des données d'exploitation au rôle descriptif (Schrade *et al.* 2012).

L'analyse statistique a été effectuée sur des plages de mesure de trois jours. Pour ce faire, des moyennes ont été calculées sur la période de mesure respective pour les données climatiques à haute résolution temporelle. Tout d'abord, une analyse de variance a été effectuée afin de déterminer comment les concentrations de PM10 des différents sites de mesure dans l'aire réservée aux animaux (aire de stabulation et aire d'exercice extérieure ou couloir de repos et aire d'exercice combinés) se différençaient des valeurs en arrière-plan. Un effet d'emboîtement hiérarchique a été pris en compte entre les mesures multiples  $b_{ijk}$ , la plage de mesure  $b_{ijk}$ , la période de mesure  $b_{ij}$  et l'exploitation  $b_i$ . La zone  $\beta_1 B$  (aire réservée aux animaux par opposition à l'arrière-plan) a été utilisée comme effet fixe. La variable cible, à savoir la concentration de PM10  $\varepsilon_{ijklm}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), a été exprimée sous forme de logarithme. De plus, le manque d'homogénéité de la variance a été corrigé:



**Figure 1** | La mesure de PM10 avec plusieurs impacteurs, répartis dans les vastes stabulations libres, a permis un relevé simultané d'échantillons à haute résolution spatiale. (Photo: Sabine Schrade, Agroscope)

$$c_{ijklm} = \mu + b_i + b_{ij} + b_{ijk} + b_{ijkl} + \beta_1 B + \varepsilon_{ijklm} \quad (1)$$

Enfin, un modèle linéaire à effets mixtes qui prend en compte l'exploitation comme effet supplémentaire a permis de vérifier l'influence de la saison  $\beta_1 JZ$ , de la température extérieure  $\beta_2 AT$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) et de l'humidité relative de l'air  $\beta_3 RF$  (%) sur les émissions de PM10  $E_{ij}$  (g par UGB et jour):

$$E_{ij} + \mu + b_i + \beta_1 JZ + \beta_2 AT + \beta_3 RF + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

La variable cible  $E_{ij}$  a été transformée de façon logarithmique. Une analyse graphique des résidus a permis de vérifier les hypothèses du modèle. Le niveau de signification a été fixé à 5%.

## Résultats et discussion

### Paramètres climatiques

Sur toutes les périodes de mesure, la plage de température se situait entre  $-8$  et  $37$   $^{\circ}\text{C}$ . Dans toutes les exploitations, la température moyenne de l'air en arrière-plan variait de  $14$  à  $19$   $^{\circ}\text{C}$  en été, de  $8$  à  $15$   $^{\circ}\text{C}$  pendant la période de transition et de  $1$  à  $5$   $^{\circ}\text{C}$  en hiver. Il n'y avait que de légères différences de température entre les différents lieux de mesure, l'arrière-plan, l'aire d'exercice extérieure, le couloir de repos/aire d'exercice et la stabulation. En hiver, la température moyenne de l'air dans la stabulation était parfois jusqu'à  $2$  K supérieure à la température en arrière-plan; en été, ces températures étaient presque identiques. Sur la plage de mesure de trois jours, l'humidité relative moyenne dans l'étable oscillait entre  $57$  et  $94$  %. Durant  $10$  des  $17$  plages de mesures de trois jours, l'humidité relative moyenne dans l'étable était de  $80$  % ou plus. Les différences entre les différentes zones, arrière-plan, aire d'exercice extérieure, couloir de repos/aire d'exercice et la stabulation étaient très faibles.

### Concentrations de PM10

La figure 2 présente les concentrations de PM10 d'un total de dix-sept plages de mesure de trois jours sur douze périodes de mesure réparties selon les différentes zones (stabulation, aire d'exercice extérieure ou couloir de repos et aire d'exercice combinés, arrière-plan). Quelles que soient les mesures, les zones ou les lieux de relevés, les concentrations de PM10 variaient entre  $< 10$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (limite de détection) et  $40$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en arrière-plan jusqu'à  $69$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans la zone réservée aux animaux (aire d'exercice extérieure, couloir de repos/aire d'exercice et stabulation). Pendant les mesures réalisées en été dans l'ex-

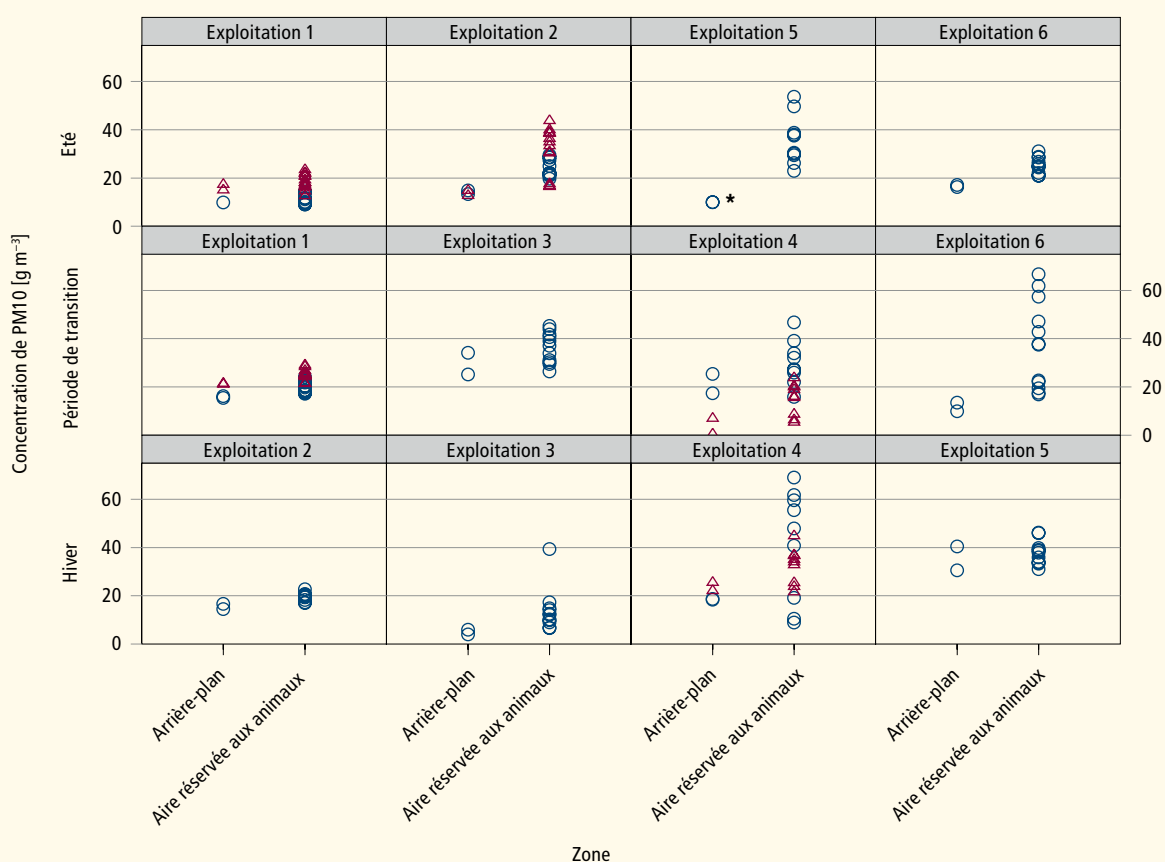
exploitation 5, la concentration en arrière-plan était nettement plus élevée que les valeurs dans l'aire réservée aux animaux. Cela pourrait venir de la récolte de céréales dans les parcelles voisines ou du dégagement accru de poussière dû à la présence d'un chemin en gravier situé à environ 20m. Par conséquent, pour cette période de mesure, une valeur moyenne calculée sur toute la période et basée sur les mesures d'immissions d'un site non influencé, celui de Winterthur Obertor (Ostluft 2008) a été prise comme valeur d'arrière-plan de référence. Dans l'exploitation 6, à la suite d'une panne d'électricité due à un orage, il n'a été possible que de réaliser une seule mesure sur 24 heures pendant la période de transition. L'importante dispersion des valeurs peut être attribuée à la courte durée d'exposition des filtres et à l'incertitude de mesure qui en résulte.

Dans la majorité des périodes de mesures, les concentrations de PM10 étaient légèrement plus élevées dans la stabulation que dans l'aire d'exercice extérieure ou le couloir de repos et aire d'exercice combinés. Une analyse de variance a montré qu'au cours de toutes les périodes

de mesure, la concentration de PM10 en arrière-plan différait significativement de la concentration dans l'aire réservée aux animaux (aire d'exercice extérieure, couloir de repos et aire d'exercice et stabulation combinés) ( $F_{1,17} = 14,62$ ;  $p = 0,001$ ). La concentration moyenne de PM10 en arrière-plan était de  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et de  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans l'aire réservée aux animaux. Les concentrations de PM10 d'une stabulation libre à logettes aux Pays-Bas se situaient dans une plage similaire de  $11\text{--}41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Mosquera *et al.* 2012). Dans les études de Henseler-Passmann (2010), les concentrations de PM10 dans les deux stabulations libres à logettes s'élevaient à  $4\text{--}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et étaient donc inférieures à nos valeurs, alors que les concentrations d'une étable sur litière profonde étaient beaucoup plus élevées avec  $170\text{--}206 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### Emissions de PM10

Toutes exploitations et toutes saisons confondues, les émissions de PM10 oscillaient entre 0,02 et 2,1 g par UGB et jour (fig. 3). Au sein des exploitations agricoles, on observe des différences de niveau d'émission entre

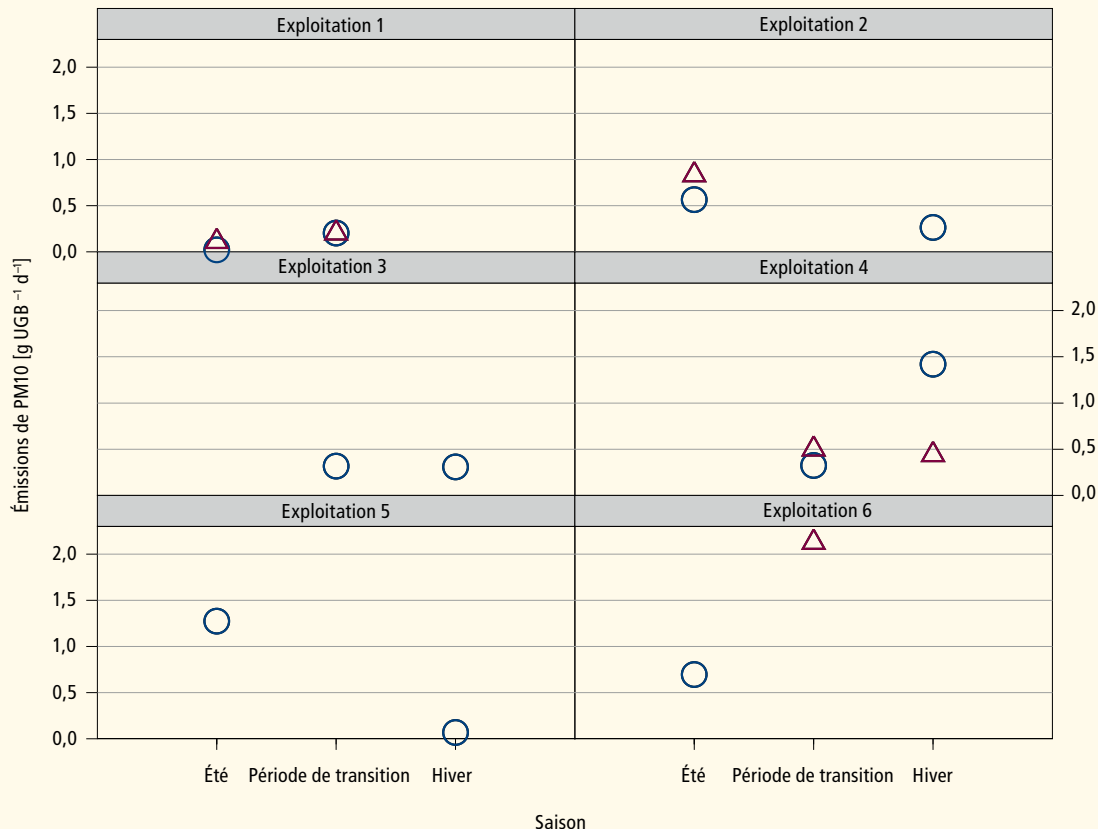


**Figure 2** | Concentrations de PM10 [ $\mu\text{g}$  par  $\text{m}^3$ ] dans l'aire réservée aux animaux et en arrière-plan, par exploitation et par saison, dans le cadre de la période de mesure représentées comme des plages de mesure de trois jours; \* désigne la valeur des mesures d'immissions sur le site Ostluft de Winterthur Obertor (Ostluft 2008); O = plage de mesure de trois jours 1;  $\Delta$  = plage de mesure de trois jours 2; (Schrade *et al.* 2017).

les saisons, les périodes de mesure et les plages de mesure de trois jours. Toutefois, l'effet saisonnier n'est pas systématique. Dans l'exploitation 5, par exemple, les émissions étaient sensiblement plus élevées en été avec 1,27 g par UGB et jour qu'en hiver avec 0,07 g par UGB et jour. Dans l'exploitation 4, par contre, la valeur d'émission d'une plage de mesure hivernale (1,42 g par UGB et jour) était nettement plus élevée que celles de la période de transition (0,32 g par UGB et jour; 0,52 g par UGB et jour). Dans les exploitations 1 et 3, les différences saisonnières dans les émissions de PM10 étaient moins marquées, voire négligeables. La valeur élevée pendant la période de transition de l'exploitation 6 s'explique peut-être par la grande dispersion des concentrations due à une plage de mesure plus courte, de 24 heures seulement, à cause d'une panne d'électricité due à un orage. Cette situation contrastée se reflète également dans l'analyse statistique des facteurs d'influence. Selon un modèle linéaire à effets mixtes, qui prend en compte l'exploitation comme un effet aléatoire, aucun des facteurs d'influence étudiés (saison, température

extérieure, humidité relative à l'intérieur de l'étable) ne semblait avoir une influence significative sur les émissions de PM10.

Les émissions de PM10 affichaient une haute dispersion entre les exploitations, les saisons et les plages de mesure de trois jours. Avec 0,03–2,8 g par animal et jour, les valeurs se situaient dans une fourchette similaire ou étaient légèrement supérieures aux valeurs des stabulations libres à logettes de Heidenreich *et al.* (2008) qui indiquaient 0,10–1,44 g par place animal et jour. Les valeurs d'émission de PM10 de Mosquera *et al.* (2012), relevées dans une stabulation libre à logettes aux Pays-Bas pendant six jours de mesure indépendants répartis sur l'année, variaient entre 0,08 et 0,41 g par place animal et jour. Les émissions de PM10 relevées dans une étable sur litière profonde en Allemagne étaient plus élevées, avec 2,06 à 2,78 g par UGB et jour (Henseler-Passmann 2010). Dans les mesures effectuées sur trois saisons par Heidenreich *et al.* (2008), Henseler-Passmann (2010) et Mosquera *et al.* (2012), aucun effet saisonnier systématique n'a pu être détecté, comme dans nos mesures.



**Figure 3** | Émissions de PM10 [ $\mu\text{g}$  par UGB et par d] par exploitation et par saison, indiquées par plage de mesure de trois jours, calculées sur la base de la médiane de la concentration de PM10 dans l'aire réservée aux animaux (aire de stabulation et aire d'exercice extérieure ou couloir de repos et aire d'exercice combinés) et des mesures de gaz traceurs; O = plage de mesure de trois jours 1;  $\Delta$  = plage de mesure de trois jours 2 (Schrade *et al.* 2017).

**Tableau 1 | Comparaison des facteurs d'émissions de PM10 pour la détention de vaches laitières, d'après la présente étude et synthèse de données bibliographiques (PAM = population animale moyenne; CEPMEIP = programme européen de recherche coordonné sur les inventaires d'émissions de matières particulaires; AEE = Agence européenne pour l'environnement; OFEV = Office fédéral de l'environnement; UGB = unité de gros bétail, 1 UGB = 500 kg de poids vif, d = jour).**

Informations sur le système de détention	Facteur d'émissions de PM10	Région	Base de données	Sources
Vaches laitières, fumier (à base de paille) Vaches laitières, lisier	1,18 g PAM <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 2,27 g PAM <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Europe	Basé sur les mesures de TSP de Takai <i>et al.</i> (1998)	AEE (2013)
Bovins (effectif)	1,09 g unité <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Europe	Non représenté	CEPMEIP (2014)
Vaches laitières (par rapport à 2012)	1,07 g animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Suisse	Non représenté	OFEV (2014)
Stabulation libre pour vaches laitières Aire de circulation non couverte pour vaches laitières	5,0 g UGB <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 11,3 g UGB <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Texas, USA	Mesures de concentrations et modèle de propagation, 1 exploitation	Goodrich <i>et al.</i> (2006)
Stabulation libre à logettes pour vaches laitières avec matelas de fumier-paille Stabulation libre à logettes pour vaches laitières avec tapis en caoutchouc	0,99 g place animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 0,58 g place animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Allemagne	Mesures d'émissions, 1 exploitation Mesures d'émissions, 2 exploitations	Heidenreich <i>et al.</i> (2008)
Stabulation libre sur litière profonde pour vaches laitières avec pâturage (de mai à octobre) Stabulation libre à logettes pour vaches laitières avec pâturage (de mai à octobre)	1,48 g UGB <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 0,16 g UGB <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Allemagne	Mesures d'émissions, 3 exploitations	Henseler-Passmann (2010)
Stabulation libre à logettes pour vaches laitières avec aires de circulation perforées (pâturage) Stabulation libre à logettes pour vaches laitières avec aires de circulation perforées (détention à l'étable durant toute l'année)	0,32 g place animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 0,40 g place animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Pays-Bas	Mesures d'émissions, 4 exploitations	Mosquera <i>et al.</i> (2011)
Stabulation libre à logettes pour vaches laitières avec aires de circulation non perforées et aire d'exercice extérieure	0,64 g animal <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> * ou 0,48 g UGB <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Suisse	Mesures d'émissions, 6 exploitations	Présente étude

\*Conversion avec le calculateur d'unités gros bétail du KTBL (2014).

### Facteur d'émission de PM10

Le facteur d'émission de PM10 a été calculé sous forme de moyenne arithmétique des émissions de PM10 de toutes les périodes de mesure et s'élève à 0,48 g par UGB et jour (0,18 kg par UGB et par an) ou à 0,64 g par animal et jour (0,23 kg par animal et par an). La conversion a été effectuée à l'aide du calculateur d'unités de gros bétail du KTBL (*Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft* 2014). La base de données qui a servi au calcul de ce nouveau facteur d'émission de PM10 repose sur un plus grand nombre d'exploitations que les facteurs d'émission de PM10 existants dans la littérature (tabl. 1). Les facteurs d'émission de PM10 cités par Goodrich *et al.* (2006) pour une stabulation de vaches laitières et une aire de circulation non couverte ont été calculés sur la base de mesures de concentrations et d'un modèle de propagation dans une seule exploitation. L'inventaire des émissions de l'Agence européenne pour l'environnement (EAA 2013) différencie les facteurs d'émission de PM10 en «vaches laitières, fumier solide» et «vaches laitières, lisier». Ces valeurs sont basées sur les études de Takai *et al.* (1998) citées plus haut, dans lesquelles les émissions de PM10 n'ont pas été mesurées, mais dérivées de la fraction de particules totales en suspension (TSP). Les facteurs

d'émission utilisés aux Pays-Bas pour les stabulations libres à logettes avec aires de circulation perforées avec ou sans pâturage sont basés sur des mesures réalisées dans quatre exploitations (Mosquera *et al.* 2011). Avec 0,64 g/animal et jour, le facteur d'émission de PM10 dérivé de nos propres mesures est nettement inférieur aux valeurs utilisées jusqu'ici dans les inventaires pour la Suisse et l'Europe avec 1,07 g par unité et jour (OFEV 2014) et 2,27 g par PAM et jour (PAM = population animale moyenne; Agence européenne pour l'environnement 2013). Les facteurs d'émission de PM10 dérivés de quatre stabulations libres à logettes avec revêtements perforés (Mosquera *et al.* 2011) sont, avec 0,40 g par animal et jour (détention à l'étable durant toute l'année) ou 0,32 g par animal et jour (avec pâturage), plus bas que le facteur d'émission basé sur nos propres mesures et sont donc aussi nettement plus bas que les valeurs utilisées dans les inventaires. L'émission moyenne de PM10 issue de mesures plus récentes aux Pays-Bas est également nettement plus basse ( $P < 0,05$ ) que le facteur d'émission mentionné par Mosquera *et al.* (2011) (Mosquera *et al.* 2012). Par conséquent, les facteurs d'émission utilisés jusqu'à présent dans les inventaires semblent être trop élevés.

## Conclusions

Les concentrations et les émissions de PM10 ont été quantifiées pour la première fois dans des exploitations de vaches laitières avec logettes, aération naturelle et aire d'exercice extérieure. Ces mesures systématiques des émissions dans six exploitations sur un total de douze périodes de mesure ont permis de décrire les effets de l'exploitation pour un système de détention et d'assurer des conditions de mesure usuelles en pratique. Les six exploitations se distinguaient en ce qui concerne l'affouragement, la gestion, le mode d'exploitation, la productivité de l'effectif, la taille ainsi que des détails de construction. Cette diversité a permis de couvrir un large éventail d'exemples de ce système de détention. Les mesures effectuées sur deux des trois saisons par exploitation ont permis d'appréhender deux situations climatiques différentes au sein des exploitations, couvrant ainsi le climat tout au long de l'année. Parallèlement, la mesure pondérale de PM10 à l'aide d'impacteurs a permis un échantillonnage à haute résolution spatiale dans les vastes stabulations et aires d'exercice.

Les concentrations de PM10 dans l'aire réservée aux animaux (aire d'exercice extérieure, couloir de repos et aire d'exercice et stabulation combinés) différaient de manière significative de la concentration en arrière-plan, mais elles étaient souvent à peine supérieures à celle-ci, voire du même ordre. Au sein des exploitations, des différences ont pu être observées dans les niveaux d'émission entre les saisons et entre les plages de mesure. Avec les données disponibles et en raison de la délimitation succincte par rapport à la concentration en arrière-plan, il n'a pas été possible d'identifier une corrélation avec les paramètres d'influence étudiés et de la prouver statistiquement. Le facteur d'émission de PM10 dérivé de nos propres mesures ainsi que d'autres facteurs d'émission provenant d'études récentes dans des stabulations libres à logettes indiquent que les facteurs d'émission utilisés jusqu'à présent dans les inventaires surévaluent les émissions de PM10 dans l'élevage de vaches laitières. ■

## Bibliographie

- CEPMEIP, 2014. Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories. Projections and Guidance (CEPMEIP) Database. Accès: <http://www.air.sk/tno/cepmeip> [16. 04.2014].
- Döhler H., Eurich-Menden B., Dämmgen U., Osterburg B., Lüttich M., Bergschmidt A., Berg W. & Brunsch R., 2002. BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der Deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahr 2010. *Umweltbundesamt Texte 05/02*, Umweltbundesamt: Berlin.
- EAA, 2013. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. European Environment Agency EAA, Copenhagen.
- Goodrich L. B., Parnell C.B., Mukhtar S. & Capareda S. C., 2006. A PM10 emission factor for free stall dairies. In: *Workshop on agricultural air quality*, 5.–8. Juni 2006, Washington D.C., 628–629.
- Haenel D., Rösemann C., Dämmgen U., Poddey E., Freibauer A., Wulf S., Eurich-Menden B., Döhler H., Schreiner C., Bauer B. & Osterburg B., 2014. Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990–2012. *Thünen Report 17*, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- Heidenreich T., Lippmann J., Höferth C., & Wanka U. 2008. Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung. *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 33*, Dresden.
- Henseler-Passmann J. 2010. Untersuchungen zur Emission und Transmission von Feinstäuben aus Rinderställen. Dissertation, Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2014. *Grossvieheinheitenrechner 2.1*. Accès: <http://www.ktbl.de> [08.08.2014].
- Mosquera J., Hol J. M. G., Winkel A., Huis in 't Veld J. W. H., Gerrits F. A., Ogink N. W. M. & Aarnink A. J. A., 2011. Fijnstofemissie uit stallen: melkvee. *Rapport 296*, Wageningen UR Livestock Research.
- Mosquera J., Hol J. M. G., Huis in't Veld J. W. H., Ploegaert J. P. M. & Ogink N. W. M., 2012. Emissies uit een ligboxenstal voor melkvee met het «Vrije keuze» systeem. - Meetprogramma Integraal Duurzame Stallen. *Rapport 614*, Wageningen UR Livestock Research.
- OFEV, 2013. PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland. Modelling results from 2005, 2010 and 2020. *Environmental studies*. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.
- OFEV, 2014. Switzerland's Informative Inventory Report 2014 (IIR). Inventory Report. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.
- Ostluft, 2008. OSTLUFT – die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. Accès: <http://www.ostluft.ch> [20.11.2008].
- Schrade S., Zeyer K., Gygax L., Emmenegger L., Hartung E. & Keck M., 2012. Ammonia emissions and emission factors of naturally ventilated dairy housing with solid floors and an outdoor exercise area in Switzerland. *Atmospheric Environment 47*, 183–194.
- Schrade S., Zeyer K., Emmenegger L. & Keck M., 2017. Konzentrationen und Emissionen von PM10 aus sechs freigelüfteten Milchviehställen mit Liegeboxen und Laufhof. *Landtechnik, 72* (2), 101–119.
- Takai H., Pedersen S., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H. & Wathes C.M., 1998. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research 70* (1), 59–77.
- Union suisse des paysans, 2011. Statistiques et évaluations concernant l'agriculture et l'alimentation 2010. USP, Brugg.

**Riassunto****Emissioni di polveri fini (PM10) di bestiame da latte nella stalla a stabulazione libera con box con recinto**

Al fine di migliorare la base di dati per l'inventario delle emissioni sono state determinate le emissioni di polveri fini (PM10) nel sistema di stabulazione libera, che è il più comune in Svizzera. A tale scopo sono state eseguite rilevazioni delle emissioni in sei stalle arieggiate a stabulazione libera con box per bestiame da latte, equipaggiate di superfici di camminamento e corti con rivestimento. Le rilevazioni sono state realizzate in due su tre stagioni (estate, periodo di transizione, inverno). Il campionamento di PM10, arricchito con impattori (separatori di particelle), è avvenuto nell'arco di 72 ore complessivamente in da 9 a 14 posizioni in stalla e corti nonché in una posizione in secondo piano. È stato utilizzato un metodo Tracer-Ratio con due gas traccianti ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{SF}_5\text{CF}_3$ ) per stabilire le emissioni. Le concentrazioni di PM10 nel settore degli animali sono state leggermente superiori oppure dello stesso ordine di quelle in secondo piano. In tutte le aziende, le emissioni di PM10 sono oscillate da 0,02 e 2,1 grammi per unità di bestiame grosso e giorno. Il fattore delle emissioni PM10 derivato, con 0,64 grammi per vacca e giorno, è nettamente inferiore rispetto ai fattori d'emissione precedentemente utilizzati negli inventari.

**Summary****Particulate matter (PM10) emissions from dairy loose housing with outdoor exercise area**

To improve the underlying data for emission inventories, particulate matter (PM10) emissions were determined for the most common loose-housing system in Switzerland. Emission measurements were conducted in two out of three seasons (summer, transition period, winter) per farm in six naturally ventilated dairy loose-housing systems comprising cubicles, solid floors and an outdoor exercise area. PM10 was collected cumulatively over 72 hours with impactors (particle separators) at a total of 9 to 14 measuring points in the housing and outdoor exercise area, as well as in the background. A tracer ratio method with two tracer gases ( $\text{SF}_6$  and  $\text{SF}_5\text{CF}_3$ ) was used to determine the emissions. PM10 concentrations in the animal area were usually just above or within the range of the background concentration. Across all farms, PM10 emissions varied between 0,02 and 2,1 g per livestock unit and day. At 0,64 g per cow and day, the derived PM10 emission factor is considerably lower than those used to date in the inventories.

**Key words:** PM10 emissions, PM10 concentrations, natural ventilation, dairy loose housing, outdoor exercise area, emission factor.