

CONTRIBUTION DE LA MESURE EN TEMPS REEL ET DE LA SIMULATION NUMERIQUE A L'ETUDE DES EMISSIONS PARTICULAIRES ET GAZEUSES DANS UNE CAVE D'AFFINAGE DE FROMAGES

S. Lechêne^{1*}, P. Battais² et P. Duquenne²

¹INRS – Laboratoire d'Ingénierie Aéroulque, 54500 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

²INRS – Laboratoire d'Analyse Spatio-Temporelle des Expositions Chimiques, 54500 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

*Courriel de l'orateur : sullivan.lechene@inrs.fr

TITLE

Contribution of real time measurement and numerical simulation to the study of particulate and gaseous emissions in a cheese ripening rooms

RESUME

Une campagne de mesures effectuées dans les caves d'affinage d'une entreprise a permis d'identifier les événements régissant l'évolution des concentrations ambiantes en particules et en CO₂ dans le temps et ce, pour plusieurs zones de l'entreprise. Elle confirme que le brossage manuel des fromages est à l'origine d'émissions massives de particules dans l'air des caves. L'air de ces caves peut également être caractérisé par des niveaux élevés de concentrations en CO₂. Les mesures suggèrent que les particules et gaz émis dans les caves sont transférées dans la couloir, ce que confirme l'étude aéroulque. L'augmentation du débit d'air neuf dans la cave est un des paramètres clés pour réduire la concentration moyenne au sein des caves, mais a un impact très limité sur l'exposition aux moisissures du fait de la proximité des salariés avec la source d'émission lors du brossage.

ABSTRACT

A measurement campaign carried out in the cheese ripening rooms of a company made it possible to identify the events governing the evolution of ambient concentrations of particles and CO₂ over time for several zones. It confirms that the manual brushing of cheeses is at the origin of massive emissions of particles into the air of the ripening rooms. The air in these cellars can also be characterised by high levels of CO₂ concentrations. The measurements suggest that the particles and gases emitted in the cellars are transferred to the corridor, which is confirmed by the ventilation study. Increasing the flow of fresh air into the cellar is one of the key parameters to reduce the average concentration within the cellars, but has a very limited impact on mould exposure due to the proximity of the employees to the source of emission during brushing.

MOTS-CLES : affinage des fromages, mesure en temps réel, simulation numérique, ventilation / **KEYWORDS:** Cheese ripening, real time measurement, numerical simulation, ventilation

1. INTRODUCTION

En France, le secteur fromager représente emploie près de 22 000 salariés. Bien qu'une grande diversité de fromages soient fabriqués (près de 1200 variétés), les étapes de fabrication restent similaires : collecte de lait, processus de caillage et travail du caillé suivant le type de fromage, moulage et égouttage dans la forme souhaitée, salage, affinage et conditionnement. Les résultats présentés concernent la phase d'affinage. Au cours de cette étape, des moisissures vont se développer à la surface des fromages et peuvent être remises en suspension dans l'air sous forme de bioaérosols. Par ailleurs, des agents chimiques (CO₂, O₂ et NH₃) sont nécessaires pour garantir le bon développement du fromage (suivant le type de fromage, teneurs en CO₂, O₂ et NH₃ influant respectivement sur la fermentation, la diminution de l'acidité de surface et le développement de bactéries). Certains de ces agents chimiques ou biologiques peuvent être dangereux pour la santé des salariés du secteur fromager. Les niveaux d'exposition et les moyens de prévention mis en œuvre sont aujourd'hui mal documentés et nécessitent d'être investigués.

Une campagne de mesures dans l'air de cave d'affinage a été menée dans une fromagerie, en combinant des mesures en temps réel de polluants particulaires et gazeux et une caractérisation aéroulque des locaux. Les objectifs étaient d'identifier les événements à l'origine des variations des concentrations en polluants dans l'air des locaux, de mieux comprendre les phénomènes de transferts entre les différentes zones de travail et donner des orientations en matière de ventilation. Cette campagne s'inscrit dans une étude plus large débutée à l'INRS dont les objectifs principaux sont d'étudier les expositions biologiques et chimiques potentielles des salariés de ce secteur, de caractériser les allergènes présents et d'étudier les moyens de prévention disponibles en vue d'améliorer et de réduire l'exposition des salariés.

2. MATERIEL ET METHODES

Les mesures ont été effectuées pendant trois jours (notés J1, J2 et J3 dans la suite) dans les caves d'affinage d'une entreprise fromagère. Cette entreprise dispose d'une série de caves d'affinage de fromages à croute fleurie, toutes communiquant avec un couloir central. Dans le cadre de la campagne de mesures faisant l'objet

de cet article, les zones de travail investiguées correspondent à deux caves (zone « Cave A » et zone cave B »), ainsi que le couloir central (zone « Couloir »). Dans les caves, les fromages sont disposés sur des plateaux ajourés (une quarantaine par plateau), eux-mêmes empilés par vingtaine sur un charriot à roulettes. A différents stades d'affinage, les opérateurs effectuent un brossage, soit par le biais d'une brosse automatisée et mécanique (brossage mécanique), soit par le biais d'une brosse à la main (brossage manuel).

L'étude a porté sur la mesure des particules et du CO₂ par le biais d'instruments de mesure en temps réel. En parallèle, une étude aéraulique des locaux s'est appuyée sur des mesures en entreprise complétées par des simulations numériques des écoulements.

2.1. Mesure en temps réel des particules et du CO₂

Les mesures en temps ont été effectuées à point fixe en positionnant les dispositifs de mesure à hauteur des voies respiratoires à environ 1,7 m du sol (à 1,5 m des travailleurs) de manière à enregistrer l'évolution des concentrations ambiantes pendant la journée de travail et la nuit précédente. Le CO₂ a été mesuré à l'aide de détecteurs portables ToxiRAE Pro CO₂ (RAE Systems France, France) fonctionnant avec un capteur infrarouge non dispersif. Les particules en suspension dans l'air ont été mesurées via un compteur granulomètre optique FIDAS® Frog (PALAS®, Allemagne) qui permet le suivi en temps réel des particules (nombre et distribution en taille) dans différentes classes granulométriques. Le débit de prélèvement est de 1,4 L.min⁻¹ et une intégration était effectuée toutes les 10 secondes.

2.2. Caractérisation aéraulique

Les débits mis en jeu dans les caves et le couloir attenant ont été mesurés indirectement par exploration du champ vitesse en bout de réseau via un anémomètre multifonction TESTO 440 (TESTO SE & Co, UE) et, dans le cas de bouches de ventilation par une mesure directe avec un balomètre TESTO 420 et un balomètre à compensation FlowFinder MK2 (TESTOON, UE). Ces mesures de débit ont ensuite permis d'évaluer le taux de renouvellement d'air qui permet d'estimer le temps nécessaire pour que la ventilation remplace l'air d'un local (les débits d'air recyclés ne sont donc pas pris en compte).

Des simulations numériques des écoulements au sein des caves ont été réalisées avec le code de calcul Fluent v19 (ANSYS, Inc., USA) avec le modèle de turbulence RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) k-ε Realizable. La géométrie des locaux, la position des éléments de ventilation, les débits d'air soufflés et extraits, la position des sources de pollution et les débits d'émission de ces sources constituent les données d'entrée principales du problème. Dans notre cas, en l'absence de connaissance sur les débits d'émission, ils ont été fixés arbitrairement et conservés dans les configurations simulées, permettant ainsi une comparaison qualitative. Par ailleurs, les polluants sont simulés par des gaz traceurs de l'écoulement en résolvant une équation de transport d'un traceur passif. Les débits de ventilation fixés dans les simulations sont ceux mesurés pendant les campagnes de mesures.

3. RESULTATS

3.1. Ventilation d'une cave d'affinage

Les fromages à affiner sont entreposés dans une cave étanche dans des conditions (durée, température, humidité relative de l'air) spécifique à chaque type de fromage. Une centrale de traitement d'air installée dans la cave permet de réguler la température et l'hygrométrie du local (humidité : 92%, température : 14°C, dans le cas présent). Ce système fonctionne en recyclage en aspirant l'air ambiant du local en partie basse (débit mesuré de 18900 m³.h⁻¹ environ) et en le rejetant via des gaines diffusantes suspendues sous le plafond qui permettent une diffusion homogène de l'air à basse vitesse. Une arrivée d'air neuf mécanique filtré pris directement en extérieur est soufflé dans la cave (débit mesuré de 80 m³.h⁻¹), ce qui crée une légère surpression du local empêchant ainsi une éventuelle pollution venant de l'extérieur. Ces débits de ventilation entraînent un taux de renouvellement d'air très faible de 0,15 volume par heure. L'air est extrait naturellement vers le couloir attenant. Ce couloir dispose d'une extraction mécanique à une extrémité et d'une amenée d'air naturelle à l'autre extrémité. Le faible apport d'air neuf dans la cave ne favorise pas la dilution et l'extraction des polluants potentiellement émis. Par ailleurs, le transfert entre la cave et le couloir attenant va participer à également polluer cette zone en cas d'émission potentielle.

3.2. Evolution des concentrations ambiantes en CO₂

Le jour J3, les mesures n'ont pu être effectuées que pendant la journée dans les zones « Cave A » et « Couloir ». L'air dans la zone « Cave A » est caractérisé par une concentration ambiante en dioxyde de carbone mesurée entre 5000 et 6000 ppm_v, avec des variations dans le temps qui n'ont pas pu être attribuées à un évènement en particulier et qui restent plutôt limitées (Figure 1A). Dans le même temps, la concentration

ambiante en CO₂ dans la zone « Couloir », a été mesurée dans entre 1200 et 3400 ppm_v. La présence de CO₂ dans la cave est essentiellement imputable à l'activité métabolique des communautés microbiennes constituant les fromages et les niveaux de concentration ambiante mesurés sont très probablement corrélés à la quantité de fromages présents dans la cave et à leur stade d'affinage. La présence de CO₂ aux concentrations mesurées dans la zone « Couloir » peut s'expliquer par le transfert entre les caves d'affinage et le couloir.

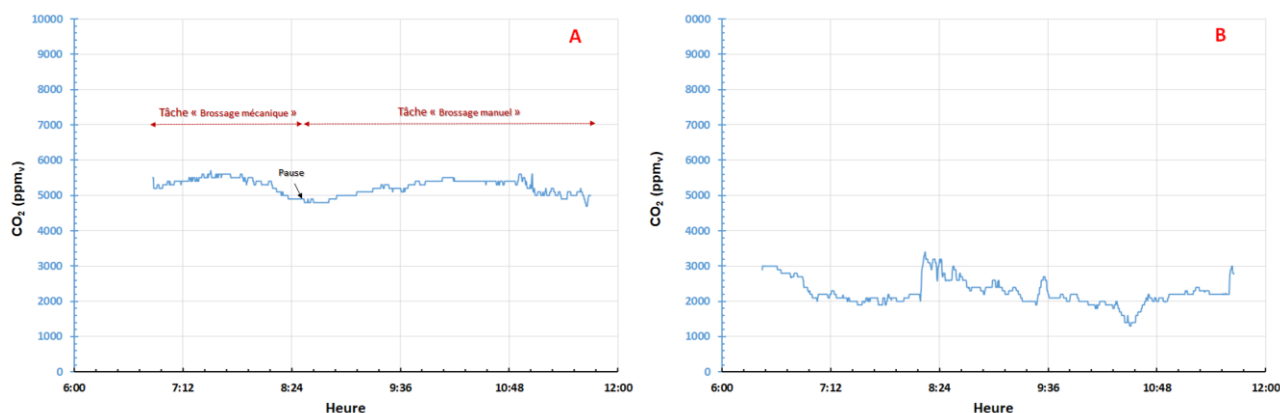


Figure 1 : Evolution de la concentration en CO₂ au cours du temps ; le jour J3 et dans différentes zones de travail. **A** : mesures effectuées dans la zone « Cave A » ; **B** : mesures effectuées dans la zone « Couloir ». Les mesures ont été effectuées à point fixe à l'aide du détecteur ToxiRAE Pro CO₂.

3.3. Evolution des concentrations ambiantes particules

Dans la zone « Cave B », les mesures effectuées dans la nuit précédant le poste de travail indiquent une diminution progressive des concentrations mesurées entre 19h00 et 21h00 et un bruit de fond relativement stable est observé au cours du temps avec des oscillations régulières jusqu'au démarrage du poste vers 7h30 (Figure 2A). La concentration en particules augmente pour toutes les classes de particules au démarrage du broissage manuel des fromages.

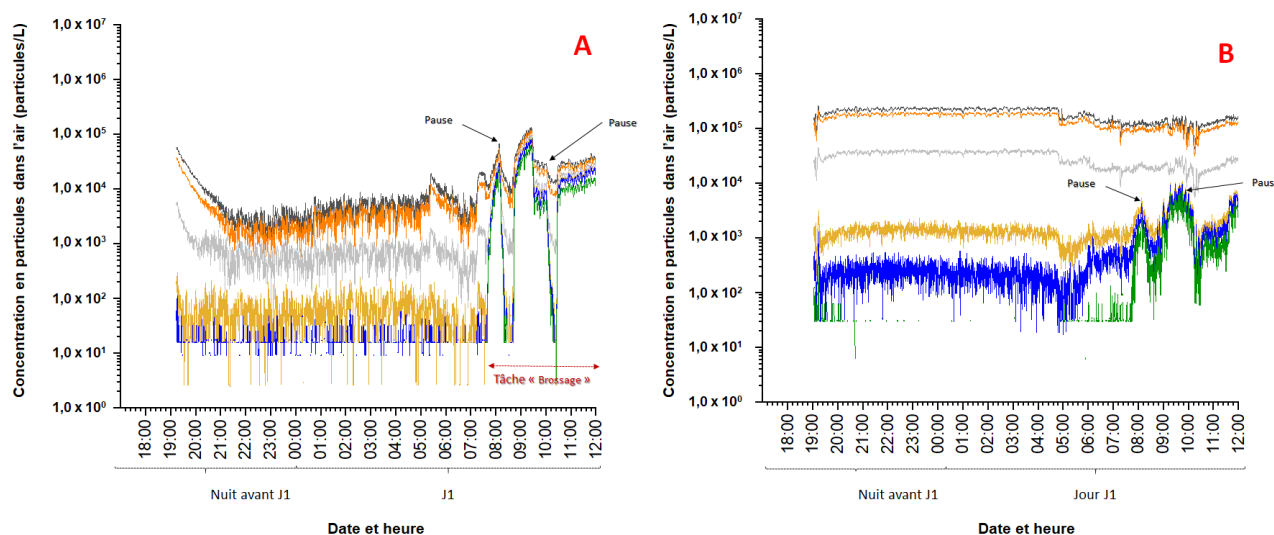


Figure 2 : Evolution de la concentration en particules dans l'air au cours du temps pendant le poste de travail et la nuit précédente (jour J1). **A** : mesures effectuées dans la zone « Cave B » ; **B** : mesures effectuées dans la zone « Couloir ». Les mesures ont été effectuées à point fixe à l'aide du compteur de particules FIDAS® Frog.

En particulier, la concentration en particules de diamètre optique supérieur à 1,0 µm et à 3,0 µm enregistre une augmentation supérieure à 3 log (concentration maximale de $2,3 \times 10^4$ part/L pour les particules de diamètre optique supérieur à 3 µm). La concentration en particules dans l'air chute brutalement au moment de la pause. A la reprise du poste vers 8h30, la concentration en particules enregistre une hausse progressive

pour atteindre une valeur maximale de $8,5 \times 10^4$ part/L pour les particules de diamètre optique supérieur à $3 \mu\text{m}$ vers 7h30 (Figure 2A). A partir de 9h24, la concentration diminue, d'environ 1,5 log pour les particules de diamètre optique supérieur à $3 \mu\text{m}$, pour se stabiliser ensuite à $5,6 \times 10^3$ part/L jusqu'à la pause qui intervient vers 10h00. La concentration en particules diminue dans la cave pendant la pause pour ré-augmenter à la reprise de l'activité à 10h20, à un niveau légèrement supérieur à celui mesuré avant la pause. Pour les particules de diamètre optique supérieur à $3 \mu\text{m}$, la concentration enregistre une augmentation progressive mais légère pour atteindre de $2,5 \times 10^4$ part/L à la fin de poste à 12h00 (Figure 2A).

Dans la zone « Couloir », la concentration en particules mesurée dans l'air la nuit précédant le poste de travail est relativement stable et apparaît plus élevée que celle mesurée dans la cave dans le même temps, notamment pour les particules de diamètre optique supérieur à $0,2 \mu\text{m}$, à $0,3 \mu\text{m}$, et à $0,7 \mu\text{m}$ 7h30 (Figure 2B). Pendant le poste de travail, les particules de taille plus importante apparaissent dans l'air du couloir peu de temps après que le brossage ait débuté dans la cave avec une diminution des concentrations au moment des pauses. Ce résultat suggère un transfert de la pollution particulaire de la cave au couloir.

3.4. Impact de l'augmentation du débit d'air neuf

Un moyen pour réduire efficacement l'exposition des travailleurs consiste à ventiler efficacement les locaux. Dans le cas de la cave, une solution techniquement réalisable est l'augmentation du débit d'air neuf. Des simulations numériques des écoulements dans le hâloir ont été réalisées avec des débits d'air neuf différents (Figure 3A : débit = $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, Figure 3B : débit = $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) pour évaluer l'impact de cette modification. L'augmentation du débit d'air neuf entraîne une baisse de la concentration en gaz traceur au sein de la cave d'un facteur 5 environ, correspondant aux rapports entre les débits. Toutefois, à proximité de la source d'émission où se situent les travailleurs effectuant le brossage manuel, les concentrations restent très élevées dans les deux configurations. L'augmentation du débit d'air neuf, bien qu'efficace pour la réduction moyenne au sein de la cave, n'est pas suffisante pour réduire l'exposition des travailleurs à proximité des travailleurs en charge du brossage manuel.

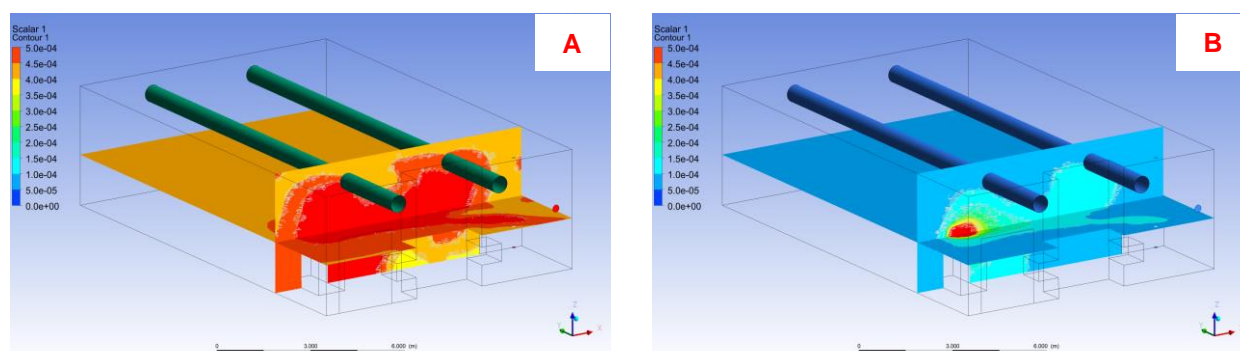


Figure 3 : Evolution des concentrations en gaz traceur sur un plan à 1,7 m de hauteur et un plan passant par la source d'émission. **A** : débit = $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. **B** : débit = $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les mesures effectuées ont permis d'identifier les événements régissant l'évolution des concentrations ambiantes en particules et en CO_2 dans le temps et ce, pour plusieurs zones de l'entreprises. Elles confirment que le brossage manuel des fromages est à l'origine d'émissions massives de particules dans l'air des caves. L'air de ces caves peut également être caractérisé par des niveaux élevés de concentrations en CO_2 . Les mesures suggèrent que les particules et gaz émis dans les caves sont transférés dans la couloir.

Les simulations aérodynamiques montrent que l'air pollué de la cave est extrait vers le couloir par une grille d'extraction prévue à cet effet. Il est donc cohérent de retrouver dans le couloir les particules et les composés gazeux émis dans les caves. La configuration est la même pour tous les hâloirs ; un système de ventilation extrait les composés présents vers le couloir. L'étude complémentaire sur la ventilation a également permis de mettre en évidence des débits d'air, certes suffisant pour un bon affinage des fromages, mais clairement insuffisant pour garantir l'assainissement des locaux. Le débit d'air neuf, bien qu'efficace dans la réduction moyenne des niveaux de concentration, n'est pas suffisant pour réduire l'exposition proche de la source d'émission où un captage localisé serait mieux adapté mais complexe à mettre en œuvre. La suite des travaux va s'attacher à évaluer dans d'autres entreprises les expositions potentielles pour obtenir un panel représentatif et à déterminer les débits sources des émissions. Au final, il s'agira de proposer des moyens de prévention adaptés.