RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

QUALITE DE L'AIR INTERIEUR DES SALLES DE SPORT



QAI SPORT (APR AQACIA) :
Caractérisation de l'exposition aux COV et COSV émergents et aux microorganismes

RAPPORT

Mai 2025

EXPERTISES

IMT Mines Alès
École Mines-Télécom

EHESP

REMERCIEMENTS

- Souad Bouallala-Selmi (ADEME) ;
- Nathalie Costarramone (IMT Mines Alès, Pau) ;
- Valérie Desauziers (IMT Mines Alès, Pau) ;
- Barbara Le Bot (EHESP) ;
- Pierre Le Cann (EHESP) ;
- Hervé Plaisance (IMT Mines Alès, Pau) ;
- Gaëlle Raffy (EHESP) ;
- Emilie Surget (EHESP).

CITATION DE CE RAPPORT

DESAUZIERS V., LE BOT B., LE CANN P., PLAISANCE H., COSTARRAMONE N., RAFFY G., SURGET E. 2025. Qualité de l'air intérieur des salles de sport - QAI SPORT (APR AQACIA) : Caractérisation de l'exposition aux COV et COSV émergents et aux microorganismes. Rapport, 90 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne https://librairie.ademe.fr/

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME a été réalisé à l'initiative de son/ses auteur(s) ; il a reçu un soutien financier de l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'il contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteurs et ne représente pas la position de l'ADEME.

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2162D0018

Étude réalisée par DESAUZIERS Valérie (IMT Mines Alès), LE BOT Barbara (EHESP), LE CANN Pierre (EHESP), PLAISANCE Hervé (IMT Mines Alès), COSTARRAMONE Nathalie (IMI Mines Alès), RAFFY Gaëlle (EHESP), SURGET Emilie (EHESP) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Valérie DESAUZIERS (IMT Mines Alès)
Appel à projet de recherche : APR AQACIA (Amélioration de la Qualité de l'Air Comprendre Innover Agir)

Coordination technique - ADEME **:** BOUALLALA-SELMI Souad
Direction/Service : Villes et Territoires Durables (DVTD) / Service Qualité de l'Air (SEQA)

Résumé

La qualité de l'air intérieur (QAI) des salles de sport est encore peu connue et peu étudiée. Pourtant, l'activité intense liée à la pratique sportive peut conduire à l'augmentation de l'exposition. L'objectif du projet QAI-Sport était donc de caractériser l'exposition aux polluants organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) et aux contaminants microbiologiques (moisissures, virus et bactéries) dans 10 salles de sport de 3 typologies différentes : dojos, salles de fitness/musculation, salles de motricité pour jeunes enfants, auxquelles ont été ajoutés une salle de dance/gym douce et un gymnase de lycée.

Des analyses ciblées et non ciblées ont permis d'identifier et de quantifier plus d'une centaine de COV et de COSV ainsi que plusieurs contaminants microbiologiques. La pollution par les COV est globalement similaire à celle des autres environnements intérieurs, avec une prédominance des composés carbonylés. Certains composés spécifiques et émergents ont également été mis en évidence ainsi que des composés traceurs de l'occupation humaine. Les COSV rencontrés dans l'air et les poussières sont principalement des phtalates, des retardateurs de flamme organophosphorés et des HAP. La présence d'ammoniums quaternaires, utilisés comme biocides, a également été documentée pour la première fois en France dans des poussières d'intérieurs. La contamination microbiologique est similaire aux contaminations résidentielles et le SARS-Cov-2 n'a pas été détecté.

Une étude approfondie a été menée sur une sélection de trois salles (1 dojo, 1 salle de motricité, 1 salle de musculation). Les matériaux sources de COV et de COSV ont été identifiés et la migration dans la sueur et la salive synthétiques de phtalates et de retardateurs de flamme présents à la surface de matériaux en contact avec la peau a été mise en évidence.

Ce projet QAI-Sport a permis d'acquérir un grand nombre de données originales sur la nature et les concentrations de contaminants de différentes salles de sport et a notamment mis en évidence des concentrations élevées de COSV dans les poussières de certaines salles (plusieurs mg/g de phtalates) et d'ammoniums quaternaires notamment dans l'une des salles de musculation (près de 3 mg/g). Les analyses non ciblées ont aussi permis d'identifier de nombreux composés émergents, utilisés comme substituts à des substances sujettes à restriction ou interdiction comme certains plastifiants (DEHP par exemple) et dont on ne connaît pas les effets sur la santé.

Les résultats permettent aussi de proposer des solutions d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. En effet, les salles de sport récentes ou récemment rénovées, montrent qu'il est possible, par un cahier des charges strict sur l'achat des matériaux et des produits d'usage, de diminuer les concentrations en phtalates, retardateurs de flamme, HAP ou encore biocides. L'impact positif de la ventilation sur les concentrations dans l'air de COV et de COSV a également été mis en évidence, confirmant le rôle clé du taux de renouvellement de l'air dans les bâtiments pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Des stratégies appropriées, telles que l'augmentation du taux de ventilation, le contrôle du taux d'occupation ou l'élimination des sources de contaminants, pourraient être envisagées.

Il apparaît aussi essentiel de poursuivre ces travaux par une évaluation des expositions aux contaminants dans ces environnements particuliers en établissant, lorsqu'elles n'existent pas, des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) et en travaillant sur des scenarii d'exposition afin de déterminer l'impact sanitaire de ces salles de sport.

Abstract

Indoor air quality (IAQ) in sports halls is still little known and little studied. However, the intense activity associated with sport can lead to an increase in exposure. The aim of the QAI-SPORT project was therefore to characterise exposure to volatile organic pollutants (VOCs) and semi-volatile organic pollutants (SVOCs) and microbiological contaminants (moulds, viruses and bacteria) in 10 sports facilities of 3 different types: dojos, fitness/musculation rooms, motor skills rooms for young children, to which were added a dance/gym room and a high school gymnasium.

Targeted and non-targeted analyses led to identify and quantify more than a hundred VOCs and SVOCs, as well as several microbiological contaminants. VOC pollution was broadly similar to that found in other indoor environments, with a predominance of carbonyl compounds. A number of specific and emerging compounds were also identified, as well as compounds that reflect human occupation. The SVOCs found in the air and dust were mainly phthalates, organophosphate flame retardants and PAHs. The presence of quaternary ammoniums, used as biocides, has also been documented for the first time in France in indoor dust. Microbiological contamination was similar to residential contamination, and SARS-Cov-2 was not detected.

An in-depth study was carried out on a selection of three rooms (1 dojo, 1 motricity room, 1 weight room). The materials source of VOCs and SVOCs were identified, and the migration in synthetic sweat and saliva of phthalates and flame retardants present on the surface of materials able to be in contact with the skin was highlighted.

This QAI-Sport project has made it possible to acquire a large amount of original data on the nature and concentrations of contaminants in various sports facilities, and in particular to identify high concentrations of SVOCs in the dust of certain halls (several mg/g of phthalates) and quaternary ammoniums, particularly in one of the weight rooms (nearly 3 mg/g). Non-targeted analyses have also identified numerous emerging compounds, used as substitutes for substances subject to restriction or ban, such as certain plasticisers (DEHP, for example), the health effects of which are unknown.

The results also make it possible to propose solutions for improving indoor air quality. The new or recently renovated sports halls show that it is possible to reduce concentrations of phthalates, flame retardants, PAHs and biocides by applying strict specifications for the purchase of materials and products. The positive impact of ventilation on gaseous concentrations of VOCs and SVOCs has also been demonstrated, confirming the key role of the air renewal rate in buildings in improving and managing indoor air quality. Appropriate strategies, such as increasing ventilation rates, controlling occupancy rates or eliminating contaminant sources, could be considered.

It also seems essential to continue this work by assessing exposure to contaminants in these particular environments by establishing Toxicological Reference Values where they do not exist, and by working on exposure scenarios in order to determine the health impact of these sports facilities.

SOMMAIRE

1. Contexte du projet 7

1.1. Problématique 7

1.2. Objectifs généraux 8

1.3. Résultats attendus 8

2. Méthodologie – Structuration du projet 10

2.1. Lot 2 : cahier des charges 10

2.2. Lot 3 : Caractérisation de la QAI des salles de sport 10

2.3. Lot 4 : Sources et transfert des polluants dans l'environnement intérieur et voies d'exposition . 11

2.4. Suivi du projet (verrous, difficultés, objectifs non atteints) 11

3. Résultats du lot 2 : cahier des charges 13

3.1. Méthodologie de sélection des salles 13

3.2. Eléments de bibliographie et de réglementation pour la sélection des salles 13

3.3. Salles sélectionnées 17

4. Résultats du lot 3 : Caractérisation de la qualité de l'air intérieur des salles de sport 18

4.1. Méthodologies d'échantillonnage et d'analyse 18

4.2. Caractérisation de la contamination 20

4.2.1. COV dans l'air 20

4.2.2. COSV dans l'air et les poussières 23

4.2.3. Toxicité des COSV 30

4.2.4. Ammoniums quaternaires dans les poussières 30

4.2.5. Micro-organismes dans l'air 31

4.3. Effet de l'occupation humaine sur la contamination des salles 32

4.4. Effet du taux de renouvellement de l'air sur les concentrations en COV et en COSV 35

4.5. Sélection de 3 salles pour l'étude approfondie (lot 4) 36

4.5.1. Critères de sélection des salles 36

4.5.2. Salles sélectionnées 37

5. Résultats du lot 4 : Sources et transfert des polluants dans les environnements intérieurs et voies d'exposition 38

5.1. Composés organiques volatils dans les 3 salles et pour les deux campagnes 38

5.1.1. COV dans l'air 38

5.1.2. Identification des matériaux sources de COV dans l'air 40

5.1.3. Relation entre les émissions des matériaux sources et les concentrations de COV dans l'air 45

5.2. Composés organiques semi-volatils et non volatils dans les 3 salles et pour les deux campagnes 49

5.2.1. COSV dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) puis, COSV et ammoniums quaternaires dans les poussières 49

5.2.2. Phtalates dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières 50
5.2.3. HAP dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières 51
5.2.4. OPFR dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières ... 52
5.2.5. Biocides semi-volatils dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières 54
5.2.6. Biocides non-volatils (ammoniums quaternaires) dans les poussières 55
5.2.7. Coefficients de partage 55
5.2.8. Identification des matériaux sources de COSV dans l'air des trois salles 58
5.3. Migration de COV et de COSV dans la sueur et la salive synthétiques 59
5.3.1. Matériaux caractérisés et polluants recherchés 60
5.3.2. Résultats 61
5.4. Contaminants microbiologiques dans les 3 salles 63
5.4.1. Méthodes d'analyse des bactéries et moisissures 63
5.4.2. Résultats globaux 64
5.4.3. Bactéries dans l'air 66
5.4.4. Bactéries dans les poussières 67
5.4.5. Moisissures dans l'air 69
5.4.6. Moisissures dans les poussières 70
5.4.7. Conclusion 70
5.5. Perspectives sur l'évaluation de l'exposition dans les salles de sport 70
6. Recommandations 73
6.1. Choix des matériaux 73
6.2. Renouvellement de l'air, taux d'occupation et entretien des salles 73
6.3. Composés émergents et risque d'exposition 74
7. Conclusion / Perspectives 75
Références bibliographiques 77
Annexe 1 81
Annexe 2 83
Index des tableaux et figures 86

1. Contexte du projet

1.1. Problématique

L'activité physique est une des fonctions basiques de l'être humain et contribue à sa santé et à son bien-être. Ainsi, l'OMS recommande à ce qu'un adulte pratique au moins 2h30 d'une activité sportive modérément intense par semaine (WHO, 2016). Avec le nombre croissant de sportifs, le nombre d'infrastructures permettant la pratique de sports « indoor » est également en forte augmentation depuis quelques dizaines d'années. En plus de niveaux de pollution qui peuvent être plus importants à l'intérieur des locaux qu'à l'extérieur, l'activité physique intense menée dans les salles de sport peut contribuer à augmenter le risque d'exposition. En effet, le volume d'air inhalé s'accroît et l'air pénètre essentiellement par la bouche, évitant la filtration nasale des grosses particules (Ramos et al., 2015). De plus, la sueur peut favoriser la migration des polluants à travers la peau.

Malgré ce contexte qui augmente les risques d'exposition, la qualité de l'air intérieur des salles de sport est peu étudiée et ne fait pour l'instant l'objet d'aucune réglementation française contrairement à d'autres ERP. En France, seulement deux études concernant des gymnases (AASQA Air Normand, 1999 et LHVP, 2002-2003) ont été répertoriées (Mandin, 2011). Ces travaux étaient principalement axés sur le transfert de polluants (NO_2, CO, BTEX, particules) de l'extérieur vers l'intérieur, mais ils ont aussi mis en évidence des sources intérieures d'aldéhydes. Dans d'autres pays, les études ont essentiellement montré des concentrations en particules élevées (supérieures à 1000 $\mu g/m^3$) dans des environnements spécifiques tels que par exemple, des salles d'escalade (utilisation de magnésie) et des centres équestres (Salonen et al., 2020).

D'autres facteurs de dégradation de la qualité de l'air intérieur des salles de sport sont liés à la combinaison de mauvaises conditions de ventilation avec un taux d'occupation élevé, rencontrée en particulier dans les centres de fitness (Ramos et al., 2014). Une problématique encore peu étudiée dans ces environnements est l'impact de matériaux spécifiques et techniques comme des revêtements de sols ou des éléments de mobiliers sportifs (tapis, matelas de réception, revêtements d'appareils de musculation, etc.). Certains revêtements synthétiques fabriqués à partir de granulats élastomères ou de pneus recyclés peuvent potentiellement émettre des HAP, des phtalates, des benzothiazoles et des amines aromatiques (Mandin, 2011). Ces substances, peu attendues et non réglementées dans ces environnements constituent des polluants émergents (Salthammer, 2020). Ce sont pour la plupart des composés organiques semi-volatils (COSV), difficiles à caractériser du fait de leur répartition entre phases gazeuse et particulaire de l'air, poussières sédimentées et surfaces.

Les salles de sport, lieux souvent humides et très fréquentés peuvent aussi être sujets à une contamination microbiologique (moisissures, bactéries, virus) clairement impliquée dans la survenue de pathologies respiratoires observées dans la population (asthme, broncho-pneumonies chroniques obstructives). De nombreuses études ont montré que les moisissures sont très présentes dans les environnements intérieurs en raison d'un excès d'humidité et d'un taux de renouvellement d'air insuffisant. Elles sont responsables d'infections comme les aspergilloses invasives ; de maladies immuno-allergiques de type rhinite, bronchite allergique, asthme allergique, dermatite ; de toxi-infections avec leurs mycotoxines, et d'effets irritatifs comme la toux. Plus récemment, la communauté internationale s'est intéressée aux bactéries ambiantes. Il a notamment été démontré que les endotoxines bactériennes, présentes en grande quantité, sont à l'origine de problèmes respiratoires. Même si le rôle des bactéries elles-mêmes dans le

développement ou l'aggravation de pathologies respiratoires reste encore très flou, une étude montre un lien statistiquement significatif entre l'apparition de troubles respiratoires tous confondus et la charge bactérienne de l'air intérieur (Flores et al., 2009).

Cette contamination microbiologique est difficile à caractériser en raison de la multiplicité et de la variabilité des méthodes de prélèvement et de mesure et fait donc l'objet de peu d'études en comparaison de la pollution chimique de l'air intérieur.

En 2020 et 2021, le pays a dû faire face à une pandémie due à un virus respiratoire : le coronavirus de type SARS CoV2. Ce virus se transmet principalement par les gouttelettes respiratoires mais peut aussi être transmis par les surfaces et les aérosols. Les salles de sport sont considérées comme à risque de transmission élevée (HCSP, 2020) en raison de l'exacerbation de la fonction respiratoire, mais aussi de la promiscuité.

En lien avec la pandémie et les moyens de lutte appliqués, des biocides contenus dans les désinfectants comme les ammoniums quaternaires sont ou peuvent être utilisés dans les salles de sport pour désinfecter les zones ayant accueilli du public (Zheng et al., 2020). Ces biocides, lors de l'application, peuvent se retrouver dans les poussières et sur les matériaux équipant les salles de sport et qui présentent, ou peuvent être suspectés d'avoir un impact sur la santé (Johnson, 2018).

1.2. Objectifs généraux

L'objectif principal du projet est de caractériser l'exposition humaine aux contaminants chimiques et microbiologiques dans les salles de sport en fonction du type d'activité pratiquée.

Dans un premier temps, la qualité de l'air intérieur (QAI) d'une sélection de 10 salles de sport de typologies différentes a été évaluée. Cette évaluation a été réalisée en condition de non-occupation des salles mais aussi en occupation. Des analyses ciblées et non ciblées ont été effectuées pour identifier et quantifier les polluants connus et réglementés (principalement des COV) mais aussi les polluants émergents (les COSV, des COV non réglementés et des microorganismes) dans les environnements intérieurs de ces salles par des analyses d'air incluant la recherche du Sars-CoV-2 et des COSV dans les poussières.

Dans un deuxième temps, le projet visait à identifier les sources d'une dizaine de contaminants (COV, COSV et microorganismes) sélectionnés à partir des analyses de screening précédentes et à mieux comprendre leur répartition en environnement intérieur. Pour trois salles identifiées comme les plus polluées, la répartition des agents microbiologiques (dont le SARS COV-2) a été étudiée entre l'air, les poussières et les surfaces. La répartition des COSV a été étudiée entre phase gazeuse, particules en suspension, poussières sédimentées et surfaces et celle des COV entre l'air et les surfaces. Les émissions de COV et de COSV des matériaux ont été évaluées par des mesures *in situ*.

La caractérisation de l'exposition était aussi un objectif important de ce projet. Une étude en laboratoire de la migration dans la sueur et la salive synthétiques de polluants sélectionnés a été réalisée afin de renseigner les voies d'exposition par contact dermique, en complément de l'inhalation et ingestion de poussières, évaluée à partir des résultats des études in situ.

1.3. Résultats attendus

QAI-SPORT est un projet de recherche en connaissances nouvelles sur des polluants et pollutions d'intérêt émergent et leurs impacts. Il concerne particulièrement les questions à la recherche sur les polluants émergents de l'air intérieur, dont les COSV et les microorganismes, et se focalise sur des lieux de vie peu étudiés comme les salles de sport.

Les principaux résultats attendus sont donc :

- De nouvelles connaissances sur la QAI des salles de sport, sur les polluants organiques émergents, sur la pollution microbiologique et la présence ou non de Sars-CoV-2 ;
- De nouvelles données sur le partage gaz/particules et gaz/surface de COSV ;
- Des données sur les émissions de matériaux qui peuvent servir de données d'entrée à un modèle prédictif, permettant de proposer des préconisations pour le choix de matériaux peu émetteurs et la gestion de la QAI ;
- La caractérisation chimique et microbiologique (mélanges) de l'exposition selon les voies d'exposition dans les salles de sport.

2.Méthodologie – Structuration du projet

Le projet QAI-SPORT, d'une durée de 36 mois, comporte trois tâches opérationnelles (Lots 2 à 4).

Leur articulation est présentée sur la Figure 1.

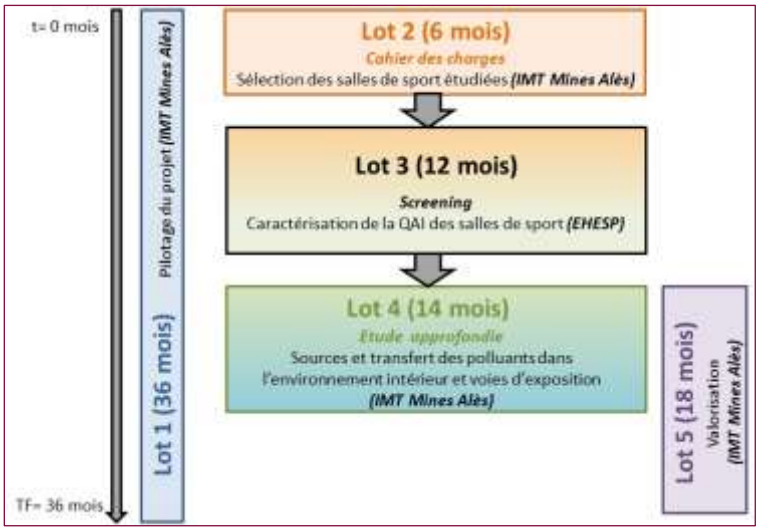

Figure 1 : Tâches du projet QAI-Sport et leur articulation

Les principaux objectifs des tâches opérationnelles et leur articulation sont décrits dans les paragraphes suivants.

2.1. Lot 2 : cahier des charges

Le lot 2 avait pour objectif de sélectionner les 10 sites qui ont fait l'objet de campagnes de mesures pour évaluer la qualité de l'air intérieur de salles de sport de trois typologies différentes qui se distinguent des gymnases publics déjà étudiés dans le projet Qualité de l'air intérieur des salles omnisport (PAIRS'O) cofinancé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projet AACT'AIR. Des salles de musculation ou fitness, des dojos et des salles de motricité pour jeunes enfants dans des écoles maternelles ont donc été sélectionnées. Cette tâche d'une durée de 6 mois a été pilotée par IMT Mines Alès en étroite collaboration avec l'EHESP, la localisation des sites d'étude près de Rennes ayant été privilégiée pour la proximité du laboratoire réalisant les analyses microbiologiques (LERES).

2.2. Lot 3 : Caractérisation de la QAI des salles de sport

Le lot 3 a été conduit par le LERES (EHESP). Il a consisté à réaliser des campagnes de mesures dans les 10 salles sélectionnées au lot 2. Un screening le plus large possible de COV, COSV et de contaminants microbiologiques a été effectué pour une caractérisation détaillée de la qualité de l'air intérieur de ces environnements peu étudiés. Des approches analytiques ciblées et non ciblées ont permis de mettre l'accent sur l'identification et la quantification de COV et de COSV émergents, l'identification de leurs sources potentielles (notamment les matériaux), la caractérisation de la diversité microbienne et la recherche de présence du Coronavirus SARS CoV2. Les mesures ont été faites dans les salles non occupées et occupées, soit deux campagnes (chacune sur 10 salles), afin d'évaluer l'impact de l'activité sportive sur la QAI.

2.3. Lot 4 : Sources et transfert des polluants dans l'environnement intérieur et voies d'exposition

Le lot 4 a été coordonné par IMT Mines Alès. A partir des résultats du lot 3, trois salles de typologies d'activité différentes et présentant des caractéristiques de contamination chimique ou microbiologique contrastées ont été sélectionnées pour une étude quantitative d'une dizaine de polluants émergents (COV et COSV) sélectionnés à partir des résultats du lot 3 et de leurs sources.

Deux campagnes de mesures, chacune réalisée à une saison différente (soit deux campagnes sur trois salles) ont été effectuées. L'étude de la répartition des polluants ciblés dans les différents milieux intérieurs (particules en suspension, phase gazeuse de l'air, poussières ou surface) a été réalisée afin de mieux caractériser l'exposition.

Les données d'émission des matériaux pour certains COV d'intérêt, ont été utilisées comme terme source dans un modèle prédictif de la QAI.

Pour compléter ces résultats qui concernent principalement le risque d'exposition par inhalation, une étude de la migration des polluants chimiques ciblés dans la sueur et la salive a été menée pour renseigner également les voies d'exposition par contact cutané et ingestion.

2.4. Suivi du projet (verrous, difficultés, objectifs non atteints)

Malgré les difficultés décrites ci-dessous et qui ont impacté quelques résultats, le projet s'est globalement bien déroulé, sans retard majeur. Les principaux objectifs ont été atteints.

2.4.1. Prospection des salles de sport et disponibilités des données de gestion des salles

La première difficulté rencontrée dans la réalisation du projet a été la prospection des salles et notamment des salles de fitness ou de musculation (lot 2). Sur les 51 enseignes privées sollicitées, aucune n'a répondu favorablement. D'après les quelques retours obtenus, la pandémie de COVID et ses contraintes ont constitué un frein à la participation au projet plutôt que de jouer un rôle incitatif pour l'amélioration de la QAI. Cette difficulté a pu être résolue grâce à l'implication d'acteurs publics, dont la Ville de Rennes, qui se sont montrés intéressés par le projet et favorables pour qu'il puisse être réalisé dans les salles de sport dont ils ont la gestion.

La collecte d'informations sur la gestion des salles étudiées, comme la fréquence et la nature des opérations de nettoyage, leur occupation, a aussi été une difficulté et toutes les données n'ont pas pu être réunies pour une exploitation et interprétation précises de l'impact du ménage et de l'occupation des salles. Ce manque d'information, indépendant de la volonté des gestionnaires est lié au fonctionnement des salles (plusieurs associations et plusieurs intervenants). La mesure en continu de CO_2 a cependant permis de tracer les périodes d'occupation des salles.

2.4.2. Retard et données de mesure manquantes liés à des difficultés pratiques, techniques ou méthodologiques

Dans le cadre du lot 3, un prélèvement des bactéries, moisissures et virus par collection cyclonique avait été envisagé et les premières mesures ont été effectuées par cette technique. Cependant, après la constatation de résultats anormalement bas pour les bactéries et moisissures et des questionnements sur l'efficacité du prélèvement par impaction liquide (Coriolis), deux types de prélèvement ont été mis en place : 1 par impaction sur boîte de pétri (bactéries + moisissures) et un par collection cyclonique (seul

valable pour les virus). À la suite de l'ajout de la méthode par impaction pour compléter les prélèvements, des prélèvements ont été refaits en période occupée dans les salles qui le nécessitait.

Dans le cadre du lot 4, des prélèvements de particules en suspension dans l'air étaient prévus afin d'étudier le partage des COSV entre phases gazeuse et particulaire de l'air. Des filtres spécifiques permettant la pesée précise des particules ont donc été commandés mais livrés avec beaucoup de retard. Cela a impacté le démarrage du lot 4, contraignant à rapprocher les deux campagnes initialement prévues en été et en hiver et qui ont finalement été menées en automne et au printemps, dans des conditions moins contrastées de température. De plus, certains prélèvements effectués à l'aide de ces filtres n'ont pas pu être exploités du fait de leur détérioration durant le prélèvement.

Dans ce même lot 4, des mesures d'émission in situ de COV et de COSV devaient être effectuées pour une sélection de matériaux. Pour les COSV, des difficultés expérimentales liées notamment à la très faible volatilité des composés, n'ont pas permis de quantifier avec fiabilité leur concentration à l'interface matériau/air, ce qui a impacté l'étude de leur partition dans l'environnement intérieur des salles et l'application d'un modèle prédictif de la QAI pour ces composés.

2.4.3. Manque de données sur les scénarios d'exposition des sportifs

Un des objectifs de ce projet était d'estimer l'exposition des sportifs aux différents polluants chimiques et contaminants microbiologiques identifiés dans les salles investiguées. Cependant, ces lieux de vie étant peu étudiés, aucune donnée n'est disponible dans la littérature pour construire des scénarios d'exposition réalistes en termes de fréquence de présence dans les salles de sport et de comportements des sportifs dans ces environnements spécifiques. Sans ces données, il n'a pas été possible de réaliser des calculs d'exposition.

3. Résultats du lot 2 : cahier des charges

L'objectif était de sélectionner un maximum de 10 salles de sport de trois typologies différentes (par exemple : fitness, salles de musculation, salles multisports, salle de gym pour jeunes enfants, arts martiaux…) dont la QAI a été étudiée au lot 3.

3.1. Méthodologie de sélection des salles

La sélection a été effectuée à partir de la littérature et de la réglementation des salles de sport. Le choix des typologies des salles s'est basé sur leur occurrence en France, la présence de matériaux, spécifiques ou non de l'activité pratiquée, et pouvant être émetteurs de COV et de COSV émergents ou pouvant favoriser le développement de biocontaminants : sols plastiques, tapis de fitness et de dojos, les plastiques des matériels de musculation, …. Les salles dédiées à des sports collectifs comportant des terrains synthétiques, les centres de fitness, les dojos, ont été particulièrement visés.

Les gymnases, étudiés dans le projet précédemment cité, n'ont pas été considérés.

La configuration de la salle au regard de la QAI (volume de la pièce, nature des matériaux, type d'aération, occupation) a aussi été intégrée dans les critères de sélection de même que la localisation géographique : la proximité avec le LERES (EHESP) a été recherchée car il a en charge les prélèvements chimiques et microbiologiques dans les salles.

3.2. Eléments de bibliographie et de réglementation pour la sélection des salles

Afin d'étayer et justifier la sélection des typologies d'activités des salles et les principaux polluants visés, des données sur la pratique sportive, sur les publications scientifiques parues sur le sujet ainsi que des éléments sur l'évolution de la réglementation sur la surveillance de la QAI en France ont été recherchés et sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.2.1. Pratique sportive

Selon un rapport de l'INJEP (Institut National de la Jeunesse et de l'Education Populaire) (INJEP, 2023), en 2022 en France, 72 % des individus âgés de 15 ans et plus ont pratiqué un sport au moins une fois dans l'année et 60 % ont déclaré une activité sportive au moins une fois par semaine. Les activités les plus pratiquées sont la course et la marche (47 %), les activités de la forme et de la gymnastique (27 %), le vélo (21 %) et la natation (19 %). Plus de la moitié des pratiquants de fitness font au moins deux séances par semaine.

Une large partie de ces activités sont encadrées et en 2023, 16,5 millions de licences ont été délivrées. La répartition des fédérations ayant délivré au moins 100 000 licences est donnée sur la Figure 2.

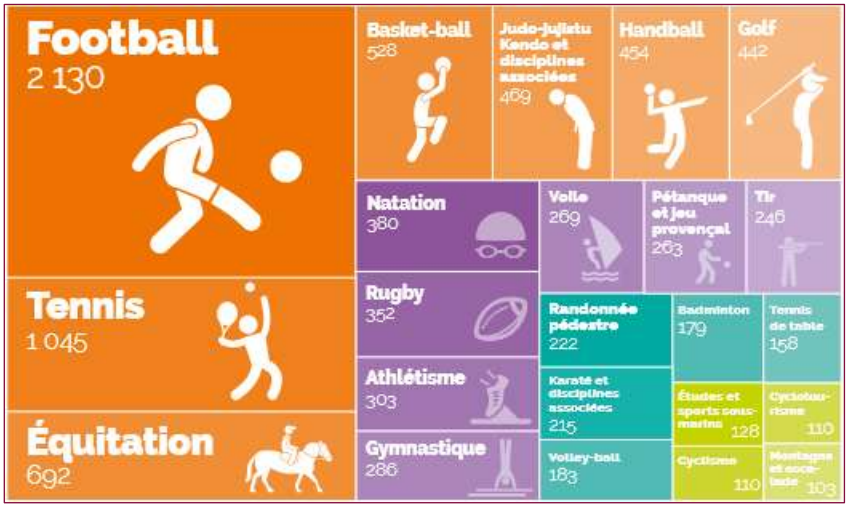

Figure 2 : Licences délivrées en 2022 (en milliers) (recensement auprès des fédérations sportives) (INJEP, 2023)

Le judo, ses disciplines associées, le karaté et autres arts martiaux rassemblent 684 000 licenciés ce qui place l'ensemble des arts martiaux au 4ème rang des sports ayant le plus de licenciés en France. En février 2025, le nombre de dojos s'élevait en France à 6358 (ville-data.com, 2025) avec une augmentation prévue de 1000 dojos supplémentaires d'ici 2026 (www.ffjudo.com, 2025).

D'après la Figure 2, la gymnastique rassemble 286 000 licenciés mais ces données n'incluent pas les salles de fitness pour lesquelles une licence n'est pas requise.

Une étude menée en 2019 sur le marché européen de la santé et du fitness (Deloitte, 2019) montre la forte croissance de ces salles de sport avec une augmentation de 23 % du nombre de salles en Europe entre 2017 et 2019. En 2022, le nombre de pratiquants s'élevait à 63 millions pour 63800 clubs (Deloitte, 2023). La France arrive juste derrière le Royaume Uni, l'Allemagne et l'Espagne avec 4,7 millions de membres.

Impact de la crise sanitaire du COVID-19

Une étude menée par le CERES (Centre d'Etude et de Recherche sur le Sport) en 2021 sur les centres de fitness a montré une perte de 2,5 millions d'abonnés sur les 6,5 millions de pratiquants réguliers en 2019 avec une perte de chiffre d'affaires de plus d'un milliard d'euros en 2020 (Enquête CERES pour Active-FNEAPL, 2021).

Compte tenu de ces données, il apparaît que le fitness, en pleine expansion et rassemblant un nombre très important d'adeptes ainsi que les arts martiaux, 3ème groupe de sports présentant le plus grand nombre de licenciés sont représentatifs des pratiques sportives en France. Cela justifie donc de sélectionner les centres de fitness et les dojos pour cette étude.

3.2.2. Eléments de bibliométrie sur la qualité de l'air intérieur des salles de sport

Une recherche a été effectuée sur la base documentaire SCOPUS avec des mots clés qui sont précisés dans le paragraphe suivant afin d'évaluer la production scientifique dans le domaine et identifier les éventuels manques qu'il serait pertinent de traiter dans ce projet.

3.2.2.1. Typologies des salles de sport étudiées dans la littérature

La littérature internationale a produit peu de connaissances sur ce sujet. Un seul article de revue datant de 2018 a été identifié sur la qualité de l'air intérieur des salles de sport (Andrade et Dominski, 2018). Une étude bibliométrique réalisée par les mêmes auteurs en 2017 mentionnait un total de 1281 articles scientifiques sur le sujet dont 34 seulement contenaient les termes suivants : « air pollution » ou « air pollutants » ou « air quality » et « physical exercice » ou « physical activity » ou « sport ». La production scientifique sur ce thème a commencé en 1975 et, bien qu'ayant significativement augmenté depuis une vingtaine d'années (Andrade et Dominski, 2017), reste relativement peu importante pour ce type d'environnements.

La Figure 3 suivante (Andrade et Dominski, 2018) montre que l'étude des centres de fitness est relativement récente et que le nombre de ces études augmente rapidement à partir des années 2000, conjointement au développement croissant de ce type de salles de sport.

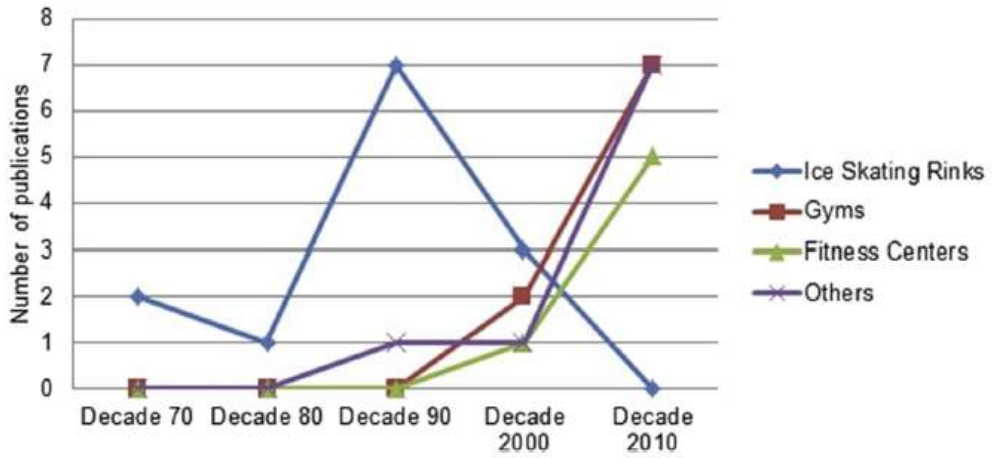

Figure 3 : Evolution du nombre de publications scientifiques sur la qualité de l'air intérieur des salles de sport (Andrade et Dominski, 2018).

Afin d'actualiser les données de cet article de synthèse datant de 2018 (Andrade et Dominski, 2018), une recherche bibliographique a été effectuée sur la base SCOPUS avec les mots clés suivants : « indoor AND air AND (fitness OR gym OR sport) » : 37 articles comportant ces mots clés dans le titre ont été recensés sur la période 1970-2024 avec 65% des articles publiés entre 2019 et 2024, montrant l'intérêt récent pour cette problématique. La majorité de ces articles traitent de la qualité de l'air intérieur de gymnases et seulement 8 d'entre eux concernent les salles de fitness (soit 21 %), confirmant que ces lieux sont encore peu étudiés malgré leur développement. Il en est de même pour les dojos, les mots clés « indoor AND air AND (dojo OR judo OR tatami) » n'ayant conduit à aucun résultat pertinent.
Le manque de connaissance sur la QAI de ces typologies de lieux (salles de fitness et dojos) vient donc conforter la sélection proposée précédemment à partir des données sur la pratique sportive en France.

3.2.2.2. Polluants étudiés dans la littérature

Dans les publications traitant de la qualité de l'air intérieur des salles de sport recensées dans l'article de synthèse d'Andrade et Dominski (2018), les polluants étudiés sont en majorité le CO, le CO_2 et les particules. En revanche, les COV (dont les BTEX) et les microorganismes (bactéries et moisissures) ne font l'objet que de 14 % et 12 % respectivement des articles sur la période observée (1975 – 2017).

Composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) :

Une recherche complémentaire dans la base SCOPUS avec les mots clés « indoor AND air AND (fitness OR gym OR sport) AND (VOC OR volatile AND organic AND compounds OR BTEX) » conduit à une dizaine

d'articles parus entre 2011 et 2024 dont quatre traitent de COV émis par les humains lors de la pratique de l'activité sportive ou dans les vestiaires.

Bien que concernant majoritairement des équipements sportifs extérieurs, de plus en plus d'études portent sur les gazons synthétiques ou des aires de jeux à base de caoutchouc recyclés. Sur la période de 2008 (date de la 1ère publication recensée dans ce domaine) à 2022, une trentaine d'articles ont été identifiés sur SCOPUS avec les mots clés : « turf AND (artificial OR synthetic) AND (toxic* OR hazard* OR risk*) AND (chemical* OR organic) ». Seulement sept de ces articles mentionnent des applications dans des environnements intérieurs. Les polluants identifiés sont des COV toxiques comme le benzothiazole et des composés organiques semi-volatils (COSV) tels que des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), des phtalates, Ces publications sont les seules, selon les mots clés choisis, à traiter de COSV dans le domaine des environnements sportifs.

Sars-Cov-2 :

Depuis le début de la pandémie de COVID-19 en 2020, de nombreuses publications sont parues sur le sujet en relation avec les environnements intérieurs et en particulier les salles de sport. Une quinzaine d'articles parus entre 2020 et 2024 ont en effet été recensés sur SCOPUS avec les termes : « indoor AND air AND (fitness OR gym OR sport) AND (Covid OR sars-cov-2) » et traitant pour tout ou partie de salles de sport.

L'influence de la température et de l'humidité sur la qualité de l'air des salles de sport font partie des facteurs les plus étudiés avec la ventilation. Quelques études sur l'impact de l'occupation des locaux ou le type d'activité sur la QAI des salles de sport ont aussi été identifiées.

Ces données bibliométriques confortent la sélection des polluants qui seront mesurés dans ce projet QAI-Sport : COV et COSV en phase gazeuse et particulaire et microorganismes (moisissures, bactéries et virus dont le Sars-Cov-2) ainsi que les éléments de méthodologie envisagés : étude de l'influence de l'occupation des locaux, effet de la saison et de la ventilation.

3.2.3. Réglementation des ERP

Les salles de sport sont des établissements recevant du public (ERP) et certaines d'entre elles font l'objet de la réglementation de la surveillance de la qualité de l'air intérieur décrite dans le décret n° 2022-1689 du 27/12/2022.

Le dispositif de surveillance de la QAI s'articule autour des points suivants (Ministère de la transition écologique) :

- Une évaluation annuelle des moyens d'aération qui intègre désormais la mesure à lecture directe du taux de CO_2 ;
- Un autodiagnostic de la QAI au moins tous les 4 ans ;
- Une campagne de mesures en continu de polluants à certaines « étapes clés de la vie du bâtiment » ;
- Un plan d'actions.

Ces dispositions sont entrées en vigueur le 1er janvier 2023 pour les ERP déjà soumis à l'obligation de surveillance (crèches, accueils de loisirs, écoles, collèges/lycées). Les établissements d'activités physiques et sportives couverts sont concernés sauf ceux dans lesquels sont pratiquées des activités aquatiques, de baignade ou de natation. Les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans sont concernés. Parmi ces établissements se trouvent des écoles maternelles dont certaines sont équipées de parcours de motricité (Ministère de l'Éducation nationale, 2023). Ces derniers sont constitués de nombreux objets, souvent en plastique ou en mousse, pouvant être sources de substances toxiques (COV, COSV) ou pouvant servir de support à des microorganismes. Le principe même de ces parcours, destinés

à développer les capacités motrices des plus petits, favorise également le risque d'exposition par voies multiples (inhalation, ingestion par contact main-bouche).

Il apparaît donc particulièrement pertinent de s'intéresser à ces « salles de sport à la maternelle », en raison de la sensibilité des jeunes enfants à la qualité de l'air intérieur et dans le contexte du projet de renforcement de la surveillance réglementaire de la QAI.

3.3. Salles sélectionnées

Les données sur la pratique sportive, l'analyse bibliométrique des publications concernant la qualité de l'air intérieur (QAI) des salles de sport ainsi que la réglementation de la surveillance de la QAI en France ont permis d'orienter la sélection vers trois typologies de salles de sport : les centres de fitness et les dojos, en raison du grand nombre de pratiquants et du peu d'études publiées sur la QAI dans ces lieux, et les salles de motricité pour jeunes enfants, dont la surveillance réglementaire a été renforcée. Dix salles de sport ont ainsi été sélectionnées sur Rennes Métropole :

- Deux salles de fitness/musculation (notées MUS1 et MUS2) ;
- Deux dojos pour arts martiaux (notés DOJ1 et DOJ2) ;
- Trois salles de gym (motricité) pour enfants (notées MOT1, MOT2, MOT3) ;
- Deux salles multisport de type studio de danse (notée APS1) et de type gymnase (notée APS2).

Le Tableau 1 suivant présente les caractéristiques des salles. Les volumes n'ont été mesurés que pour les trois salles retenues pour l'étude approfondie du lot 4.

	DOJOS		Fitness/musculation			Salles de motricité			Multisports	
	DOJ1	DOJ2	MUS1	MUS2	MUS3	MOT1	MOT2	MOT3	APS1 (danse)	APS2 (gymnase)
Date de Construction	2016	1965-1968	1970 Renové en 2021	1950	2020	1960-1970	1950-1960	2022	2016	inconnue
Ventilation	VMC double flux	VMC double flux	VMC double flux	VMC simple flux	VMC double flux	Naturelle	Naturelle	VMC double flux	VMC double flux	Naturelle
Renouvellement de l'air (h^{-1})	1,04	0,69	0,22	0,44	0,60	0,82	0,39	0,68	1,01	0,26
Volume (m^3)	nd	731	1350	nd	nd	nd	242	nd	nd	nd

Tableau 1 : Caractéristiques des 10 salles sélectionnées – nd : non déterminé

4. Résultats du lot 3 : Caractérisation de la qualité de l'air intérieur des salles de sport

La campagne de prélèvement dans le cadre du lot 3, conduit par le LERES (EHESP), s'est étendue de novembre 2022 à avril 2023 dans les 10 salles sélectionnées au lot 2. Un screening le plus large possible de COV, COSV et de contaminants microbiologiques a été effectué pour une caractérisation détaillée de la qualité de l'air intérieur de ces environnements peu étudiés.

4.1. Méthodologies d'échantillonnage et d'analyse

Plusieurs méthodes de prélèvement ont été mises en œuvre pour couvrir l'ensemble des paramètres recherchés. Le déploiement de ces méthodes de prélèvement a été organisé sur 4,5 jours (du lundi matin au vendredi soir) en veillant à éviter les éventuelles interactions entre les différentes méthodes.

La Figure 4 décrit l'organisation type des prélèvements et des mesures au cours des 4,5 jours d'une série de mesures (du lundi matin au vendredi soir).



Figure 4 : Déploiement des prélèvements au cours d'une série de mesures

Des approches analytiques ciblées et non ciblées ont permis l'identification et la quantification de COV et de COSV émergents, l'identification de leurs sources potentielles (notamment les matériaux), la caractérisation de la diversité microbienne et la recherche de présence du Coronavirus SARS CoV2. Des mesures dans l'air et les poussières ont été réalisées dans les salles non occupées et occupées, soit 2 campagnes (chacune sur les 10 salles), afin d'évaluer l'impact de l'activité sportive sur la QAI.

Les méthodologies de mesures, prélèvements et analyses sont synthétisées dans le Tableau 2.

Paramètres	Support de prélèvement	Méthode de prélèvement	Conditions de conservation des échantillons avant analyse	Techniques analytiques
Air Intérieur Température, CO_2, humidité, pression,	/	Mesure en continu toutes les 10 minutes	/	
Air Intérieur COSV	Système URG filtre en fibres de quartz avec impacteur PM10 mousse de polyuréthane (PUF)	Prélèvement de 4,5 jours (du lundi matin au vendredi ap-midi) à 2 l/min	En chambre froide à 3+/-2°C puis congélation (à-25°C) sous 24h de la mousse et du filtre	Extraction liquide sous pression et analyse GC-MS/MS
Air intérieur COV	Carbograph4	Prélèvement de 3 heures à 100 ml/min	En enceinte réfrigérée à 3+/-2°C, Puis acheminement en colis réfrigéré vers le laboratoire de l'IMT	ATD-GC-MS/FID
Air intérieur Aldéhydes	Cartouche BPE-DNPH	Prélèvement de 3 heures à 500 ml/min		HPLC-UV
Air intérieur Acides carboxyliques (AcC)	Eau ultra-pure	Prélèvement de 3 heures à 500 ml/min		Chromatographie ionique et détection par conductimétrie
Poussières COSV	Cartouche de cellulose	Aspiration d'une surface de sol définie à l'aide d'un aspirateur ménager	Congélation à -25+/-5°C	Extraction liquide sous pression (sauf pour les biocides : extraction par agitation/incubation et analyse GC-MS/MS
Poussières Biocides non volatiles (Ammonium quaternaires)				Extraction par agitation/incubation et analyse par UHPLC-MS/MS
Air intérieur Microorganismes : virus (MB)	Tampon PBS	Prélèvement de 10 min à 200 l/min	En chambre froide à 5+/-3°C	Extraction ARN et détection par RT-Qpcr
Air intérieur Microorganismes : bactéries, moisissures (BIOI)	Milieu TSA, DG18, MEA	TSA : 2 boîtes de 50 l MEA et DG18 : 2 boites de 50 l et 2 boites de 100 l		Dénombrement des UFC après culture puis identification par microscopie optique (moisissures) ou PCR (bactéries)

Tableau 2 : Méthodologies de prélèvements et d'analyses

Les résultats du lot 3 sont présentés dans les paragraphes suivants.

4.2. Caractérisation de la contamination

4.2.1. COV dans l'air

La Figure 5 présente la somme des COV par famille pour les prélèvements réalisés dans les 10 salles en période occupée (occ) et non occupée (vac).

Les limites de quantification des COV analysés dans les prélèvements d'air sont reportées dans le Tableau 3.

Composés	Méthodes analytiques	LQ dans l'air (µg/m³)
COV (>C3)	ATD-GC-MS-FID	0,05 – 1,5
Aldéhydes/cétones (C1-C3)	HPLC-UV	0,3 – 1,9
Acides carboxyliques (C1-C3)	CI-Conductivité	1,5

Tableau 3: Limites de quantification (LQ) dans l'air pour les COV étudiés

Au total, 53 COV ont été quantifiés. De faibles concentrations ont été mesurées dans l'air avec une concentration minimum de 15 µg/m³ (DOJ1) et une concentration maximum de 270 µg/m³ (MUS1) (Figure 5). A noter que les composés carbonylés (en bleu) sont majoritairement présents dans toutes les salles, suivis par les hydrocarbures (en orange). Dans les deux salles de sport les plus récentes DOJ1 et APS1, les teneurs en COV sont les plus faibles.

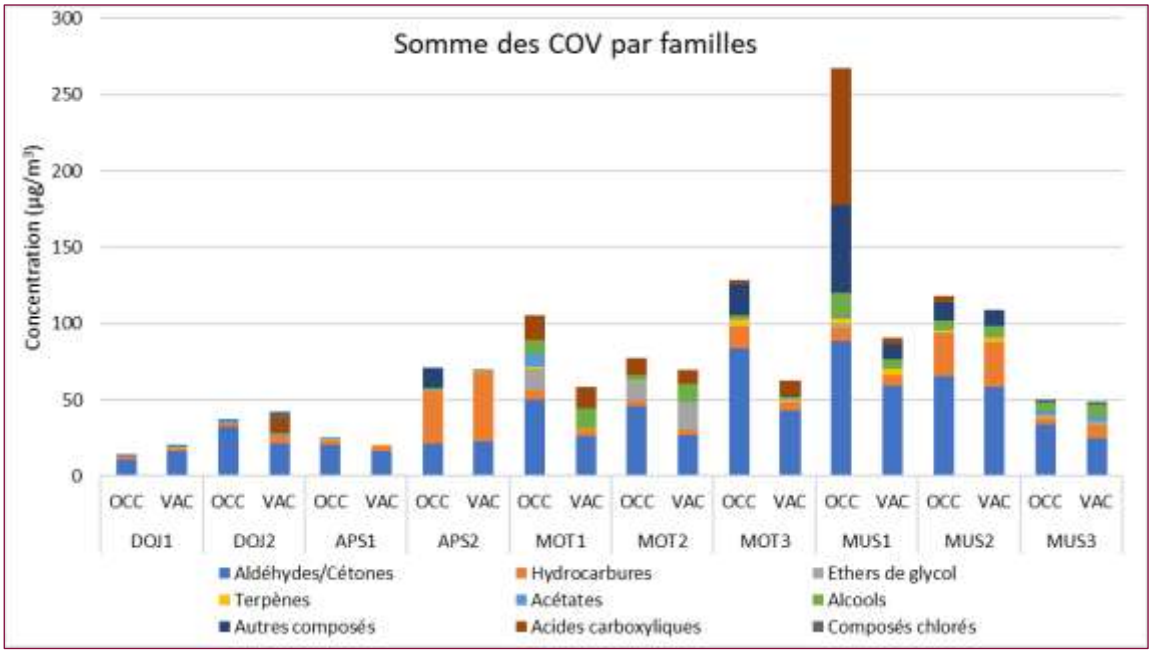

Figure 5 : Somme des COV par famille dans les 10 salles

Des résultats complémentaires sont présentés pour les familles des carbonylés (Figure 6), des hydrocarbures (Figure 7), des composés émergents (Figure 8).

S'agissant des composés carbonylés (Figure 6), les concentrations les plus élevées ont été mesurées pour l'hexanal (en bleu) et l'acétone (en gris) avec une concentration de 45 µg/m³ pour l'hexanal dans la salle

MOT3. A noter que les concentrations en formaldéhyde, composé règlementé dans l'air intérieur (VGAI[1] actuelle de 100 µg/m³) (ANSES, 2018), sont inférieures à 10 µg/m³ dans neuf salles et comprises entre 10 et 20 µg/m³ dans la salle MUS1. L'acétone (en gris) et la 6-méthyl-5-hepten-one aussi appelé sulcatone, (en rose) sont des traceurs de l'occupation humaine.

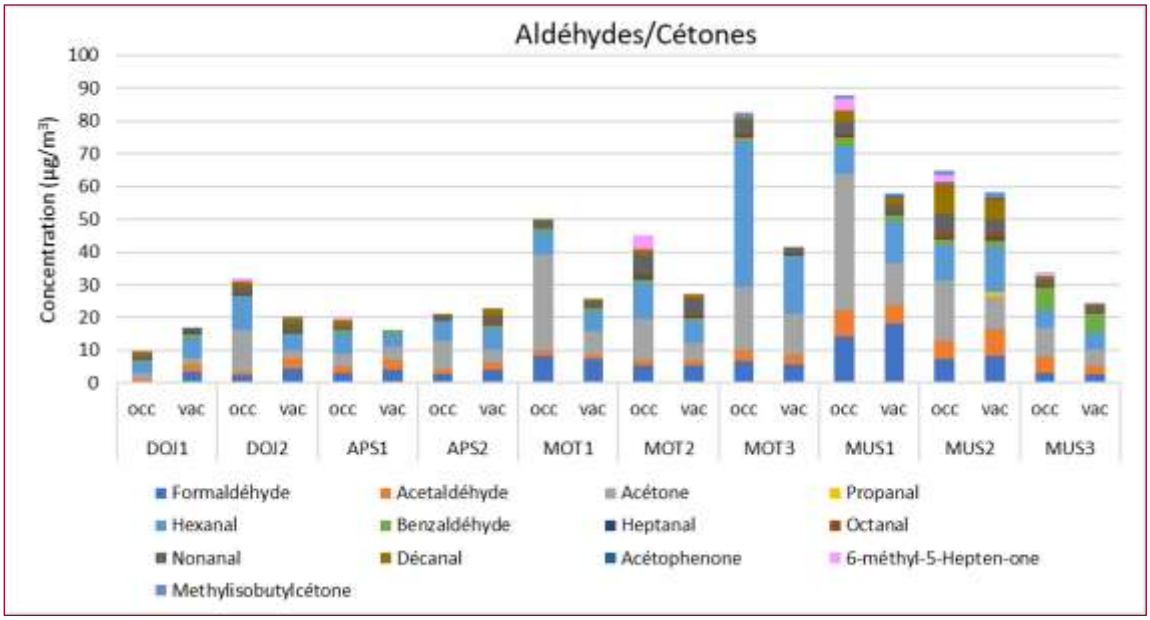

Figure 6 : Somme des aldéhydes et cétones dans les 10 salles occupées

Concernant les hydrocarbures (Figure 7), deux salles dans lesquelles les concentrations sont les plus importantes ont été identifiées : la salle APS2 avec la présence de xylènes (somme des 3 m,p,o-xylène de 38 µg/m³) et la salle MUS2 avec la présence de composés C9-C13. A noter que les concentrations en benzène, composé règlementé dans l'air intérieur sont, dans toutes les salles, inférieures à 2 µg/m³ (VGAI long terme pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10^{-5}).

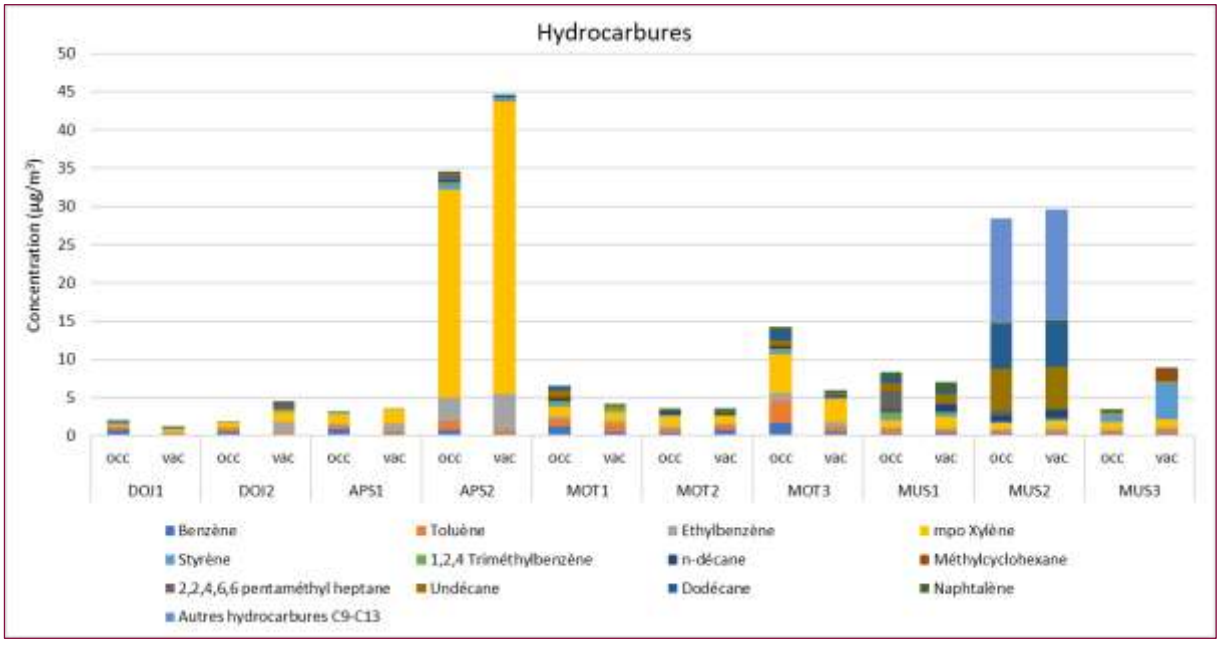

Figure 7 : Somme des hydrocarbures dans les 10 salles occupées (occ) et non-occupées (vac)

[1] Valeur Guide de la qualité de l'Air Intérieur

Dans le graphe de la Figure 8, sont reportés les composés émergents qui peuvent être émis :

- Par les matériaux tels que le 1,3-dichloropropanol (intermédiaire de synthèse de matière première de résines époxydiques et de résines polyuréthanes) dans le DOJ2, un éther de glycol (C7) dans la salle MOT2, le benzothiazole (catalyseur de vulcanisation du caoutchouc) dans les trois salles de musculation,
- Par les personnes tels que le siloxane D5 (décaméthylcyclopentasiloxane) et le benzyl alcool contenus dans les produits cosmétiques,
- Par les activités de ménage, le benzyl alcool étant utilisé couramment dans une variété de produits ménagers.

Les teneurs mesurées dans l'air pour les différents composés émergents varient de moins de 1 µg/m³ à 34 µg/m³ pour le siloxane D5 dans la salle MUS1 occ.

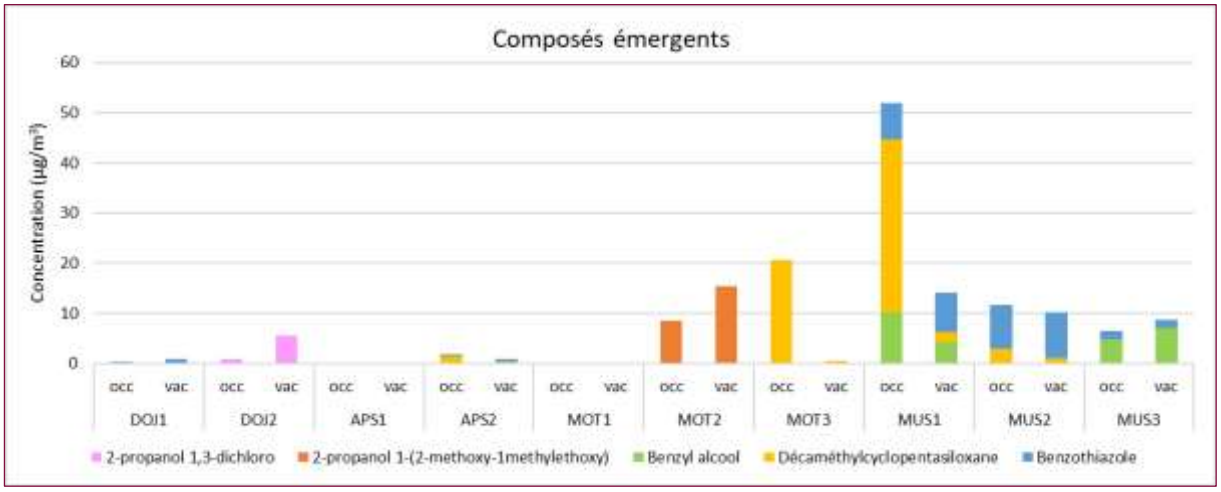

Figure 8 : Concentration des COV émergents dans les 10 salles occupées (occ) et non-occupées (vac)

Toxicité des polluants :

Parmi les COV identifiés et quantifiés dans l'air des 10 salles, 11 sont classés CMR[2] et sont reportés dans le Tableau A2 (Annexe 2) qui indique également le classement des COV selon l'IARC (International Agency for Research on Cancer, 2018).

Ce tableau liste aussi les COV pour lesquels des Valeurs Toxicologiques de Référence Anses existent et les valeurs de celles-ci pour l'exposition par inhalation[3]. Les concentrations mesurées pour les 12 COV répertoriés dans ce tableau sont toutes inférieures aux VTR. On constate que le 1,3-dichloro-2-propanol, cancérogène probable, n'a pas, à la date de ce rapport, de VTR construites ou choisies par l'ANSES, de même que le styrène et l'acide 2-éthyl hexanoïque, également classés CMR.

Parmi les COV identifiés dans l'air mais non répertoriés dans le Tableau A2, le benzothiazole est considéré comme polluant émergent : en effet, il existe peu d'information sur l'exposition par inhalation à ce polluant (Wang et al., 2016). Il est classé dans le règlement CE n° 1272/2008 (CLP) comme présentant une

[2] CMR de catégorie 1A, 1B et 2 de l'annexe VI du règlement (CE) n°1272/2008 modifié (CLP) qui tient compte de la 18ème adaptation au progrès technique et scientifique du CLP (règlement délégué (UE) 2022/692 du 16 février 2022). Liste INRS des substances classées CMR, version du 10/10/2022

[3] Anses, VTR construites et choisies par l'Anses, BDD mise à jour le 01/08/2023

toxicité aigüe (Acute Tox 4) en cas d'inhalation (mention de danger H332), d'ingestion (H302) et de contact cutané (H312) et il provoque une irritation sévère des yeux (Eye Irrit 2 ; H319).

La toxicité de l'hexanal, qui est un composé majoritaire dans l'air des salles, n'est pas non plus très bien renseignée dans la littérature. Son impact sur la santé respiratoire a fait l'objet du récent projet ADEME RESPAL (RESPAL, 2022). Cette étude a révélé que l'hexanal pouvait présenter des risques pour la santé respiratoire en participant à la modulation de la réponse inflammatoire et des mécanismes épigénétiques.

4.2.2. COSV dans l'air et les poussières

La Figure 9 présente la somme des COSV par famille dans l'air et la Figure 10, la somme des COSV et des ammoniums quaternaires mesurés dans les poussières.

Les limites de quantification des COSV analysés dans les prélèvements d'air et de poussières sont reportés dans le Tableau 4.

Composés	Méthodes analytiques	LQ dans l'air (ng/m³) Prélèvement moyen : 11,1 m³	LQ dans les poussières (ng/g) prise d'essai : 50 mg, sauf biocides : 5 mg
Phtalates	PLE-GC-MS/MS	2,2 - 45	500 – 10 000
HAP	PLE-GC-MS/MS	0,22-0,45	50 - 100
Muscs	PLE-GC-MS/MS	1,1	250
Retardateurs de flamme	PLE-GC-MS/MS	0,0045 – 3,37	1,0 - 750
Biocides semi-volatils	PLE-GC-MS/MS (air) Agitation/incubation-GC-MS/MS (poussières)	0,045 – 0,90	5,0 - 1000
Biocides non volatils (ammoniums quaternaires)	Agitation/incubation-GC-MS/MS (poussières)	Non analysés dans l'air	20 - 200

Tableau 4 : Limites de quantification (LQ) dans l'air et les poussières pour les COSV étudiés

Dans l'air, les plus fortes concentrations de COSV ont été mesurées dans deux des salles de musculation, avec un total dépassant les 2 000 ng/m³. Dans les poussières les concentrations totales mesurées, cumulant à la fois les différentes familles de COSV et les ammoniums quaternaires, dépassent le mg/g dans six salles parmi les 10 investiguées, avec des maxima supérieurs à 9 mg/g observés dans l'une des salles de motricité et dans l'une des salles de musculation. Cette contamination est largement dominée par les phthalates dans les poussières, avec toutefois une contribution significative, supérieure à 30 %, des ammoniums quaternaires dans la salle de musculation MUS3 (2,9 mg/g). Les phalates dominent également la contamination de l'air, suivis par les HAP dans les salles de musculation et les retardateurs de flamme organophosphorés (OPFR) dans l'un des dojos. Peu de différences sont observées selon l'occupation des salles, à l'exception de la salle de musculation MUS1, en lien avec une plus faible concentration en phthalates lorsque la salle est inoccupée.

Les concentrations cumulées de COSV dans l'air et les poussières sont les plus faibles dans les salles DOJ1 et APS1 qui font partie des salles de sport les plus récentes du projet (construites en 2016).

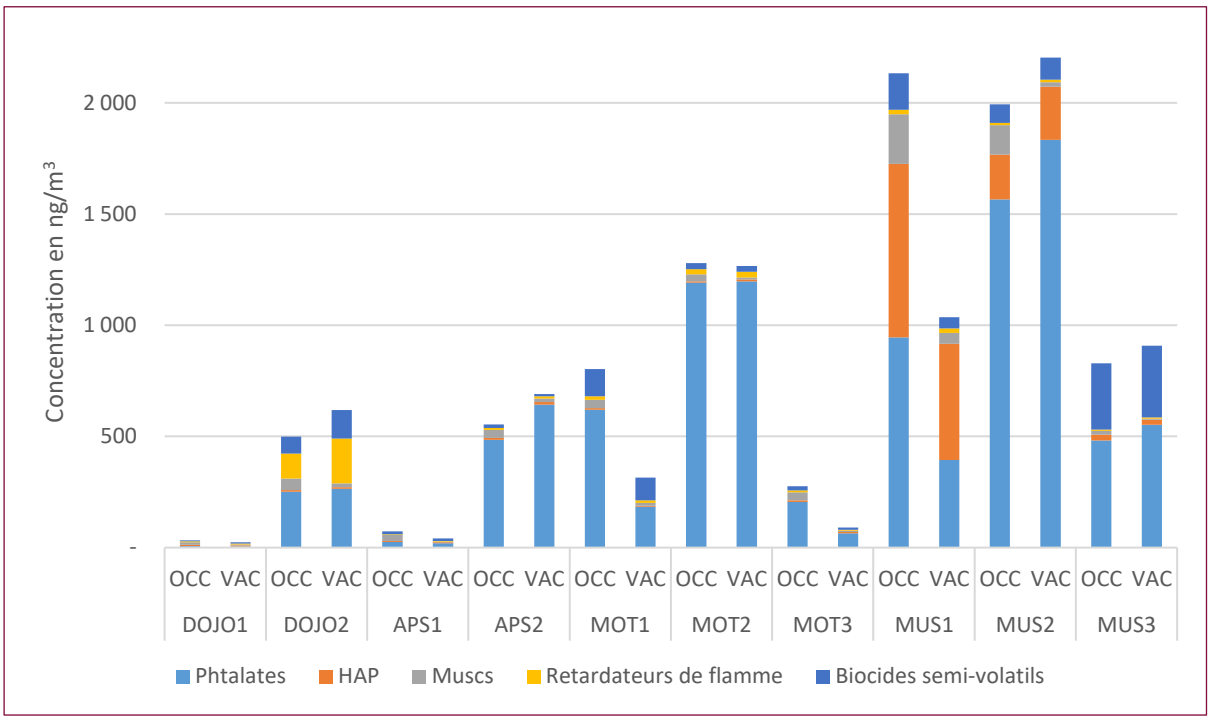

Figure 9 : Somme des COSV par famille dans l'air

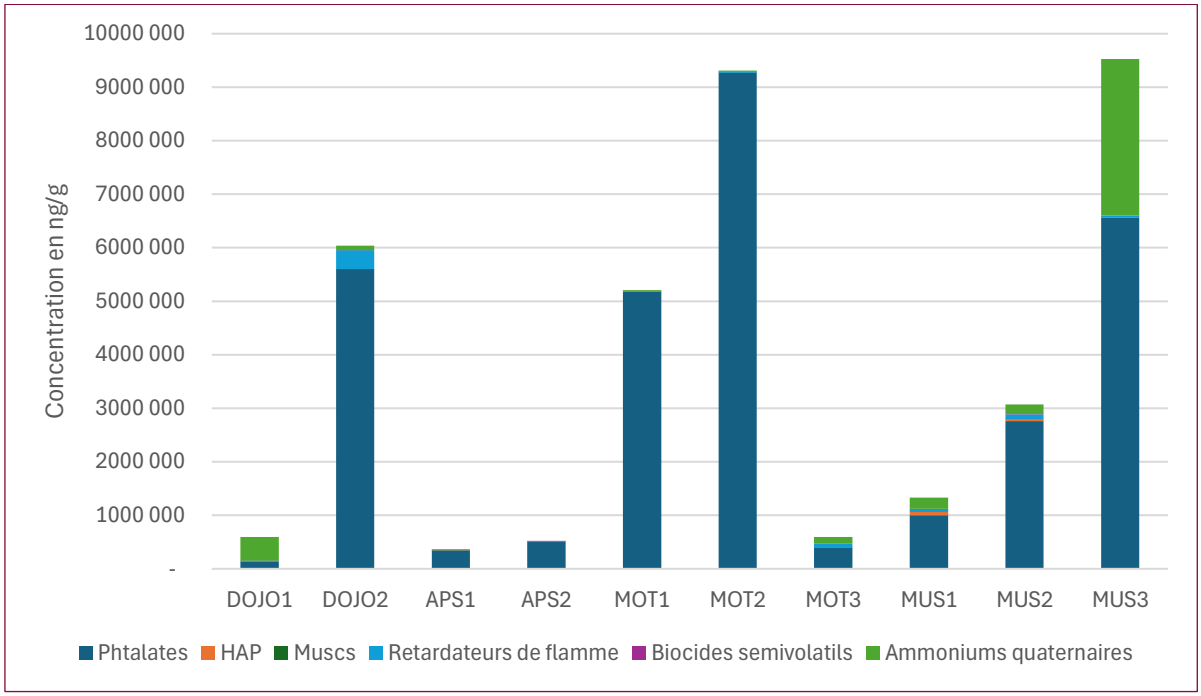

Figure 10 : Somme des COSV par famille et des ammoniums quaternaires dans les poussières

4.2.2.1. Phtalates dans l'air et les poussières

Le profil des phthalates retrouvés dans les salles de sport diffère entre l'air et les poussières. Les substances les plus volatiles telles que le DiBP et le DBP sont retrouvées dans l'air (Figure 11) tandis que le DEHP et le DiNP, moins volatils sont retrouvés dans les poussières (Figure 12). Bien qu'interdit depuis 2011, le DEHP est encore présent dans les salles de motricité les plus anciennes et dans l'une des salles de musculation.

Dans l'air, les concentrations les plus faibles sont mesurées dans DOJ1 et APS1 tandis que les concentrations maximales sont mesurées dans MUS2, avec une moyenne occupée/non-occupée d'environ 1 700 ng/m³. Dans les poussières, la plus forte concentration, excédant 9 mg/g, est mesurée dans MOT2, avec le DEHP comme principal contributeur. Cette concentration est comparable aux concentrations maximales observées lors de la Campagne Nationale Ecole de l'Observatoire de la Qualité de l'Air intérieur (Dassonville et al., 2019).

Dans l'air, le profil varie peu entre salles occupées et non occupées, à l'exception de la salle de musculation MUS1, en raison d'une baisse de moitié de la concentration du DiBP dans les conditions de non-occupation. L'utilisation du DiBP dans la vaisselle jetable, dans des articles textiles (boutons, fermetures-éclair, réflecteurs, étiquettes, paillettes) ou dans la formulation de parfum peut expliquer cette concentration plus forte en conditions d'occupation de la salle (INERIS, 2024).

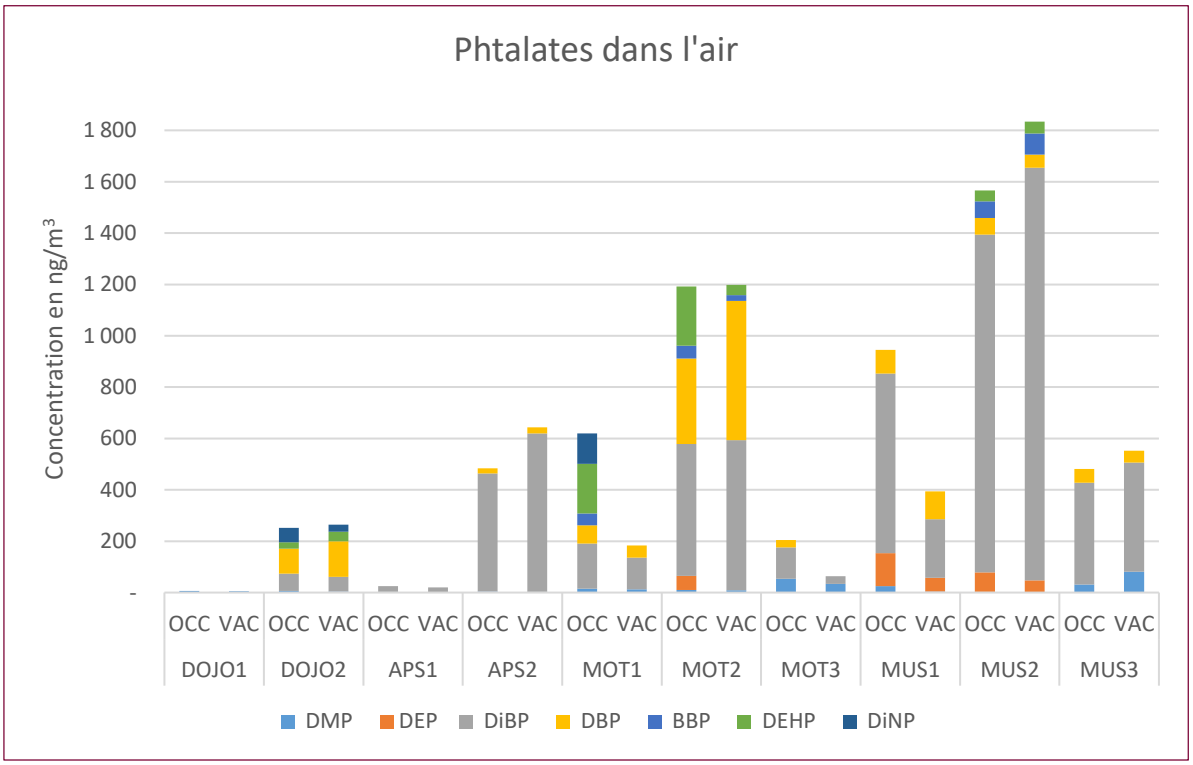

Figure 11 : Somme des phtalates dans l'air

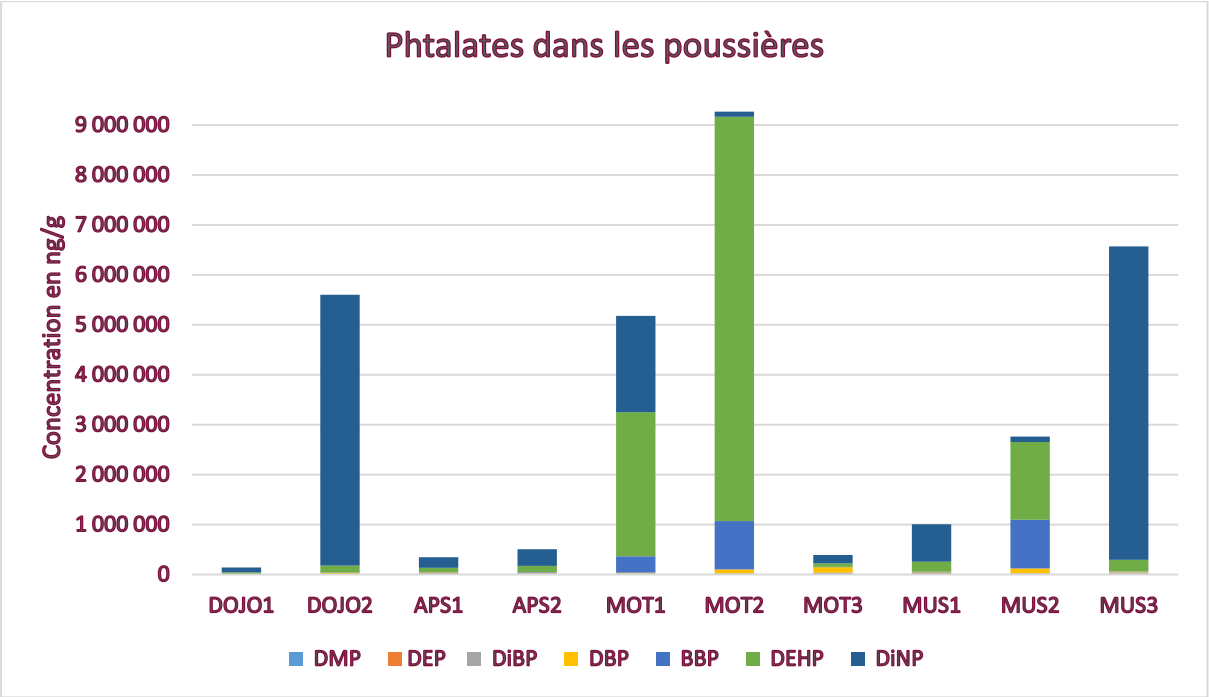

Figure 12 : Somme des phtalates dans les poussières

4.2.2.2. HAP dans l'air et les poussières

Les HAP ont été principalement mesurés dans les salles de musculation MUS 1 et MUS2, aussi bien dans l'air (Figure 13) avec des concentrations approchant les 800 ng/m³, que dans les poussières (Figure 14) avec des concentrations cumulées dépassant 60 µg/g. Les principaux contributeurs de la contamination dans l'air sont le fluorène et le phénanthrène, tandis que la contamination dans les poussières est expliquée majoritairement par le phénanthrène, le fluoranthène et le pyrène. La présence de matériaux recyclés dans ces salles de musculation pourrait être à l'origine de cette contamination.

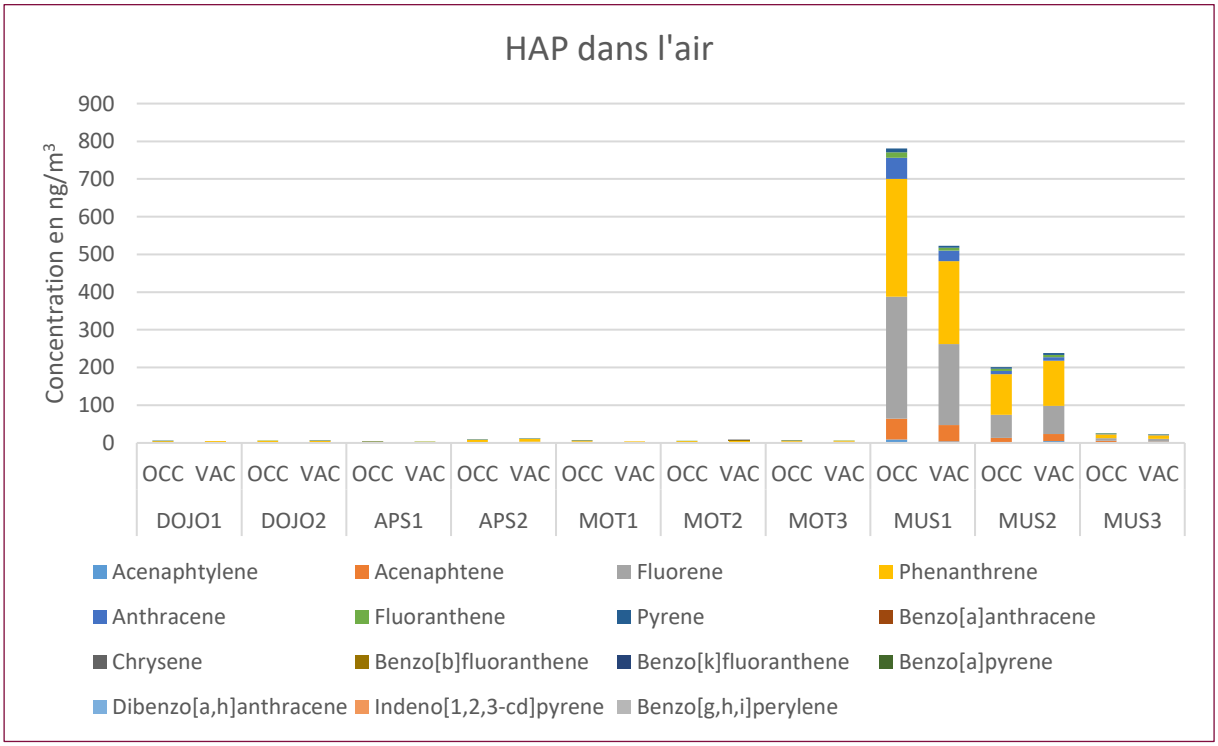

Figure 13 : Somme des HAP dans l'air

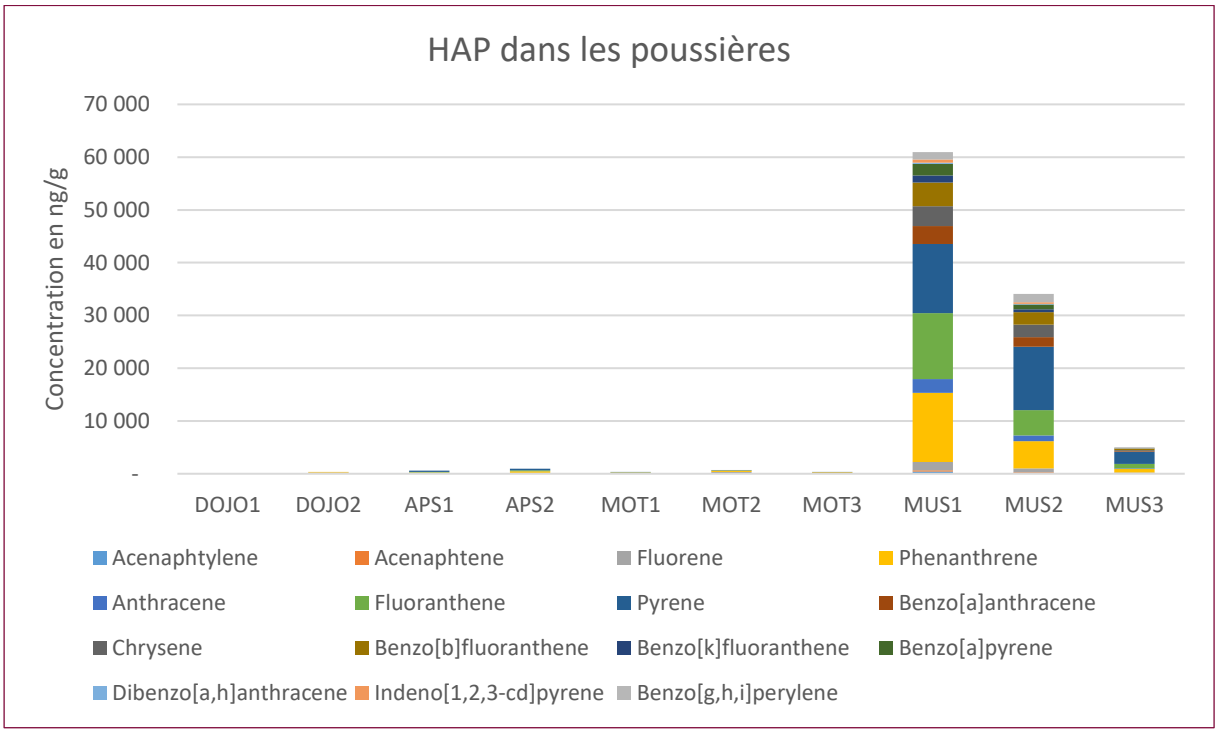

Figure 14 : Somme des HAP dans les poussières

4.2.2.3. Retardateurs de flamme dans l'air et les poussières

Les plus fortes concentrations de retardateurs de flamme ont été mesurées dans l'un des dojos, le DOJ2, aussi bien dans l'air avec une concentration cumulée de 200 ng/m^3 en condition d'occupation et de non-occupation de la salle (Figure 15), que dans les poussières avec une concentration cumulée de 350 µg/g (Figure 16).

Dans l'air, les principaux contributeurs de la contamination sont le TCPP et l'EHDPP, tandis que dans les poussières, ce sont le TDCPP, l'EHDPP et le TPP qui contribuent le plus à la contamination.

La présence de TBEP est également mesurée dans les salles de musculation MUS1 et MUS3.

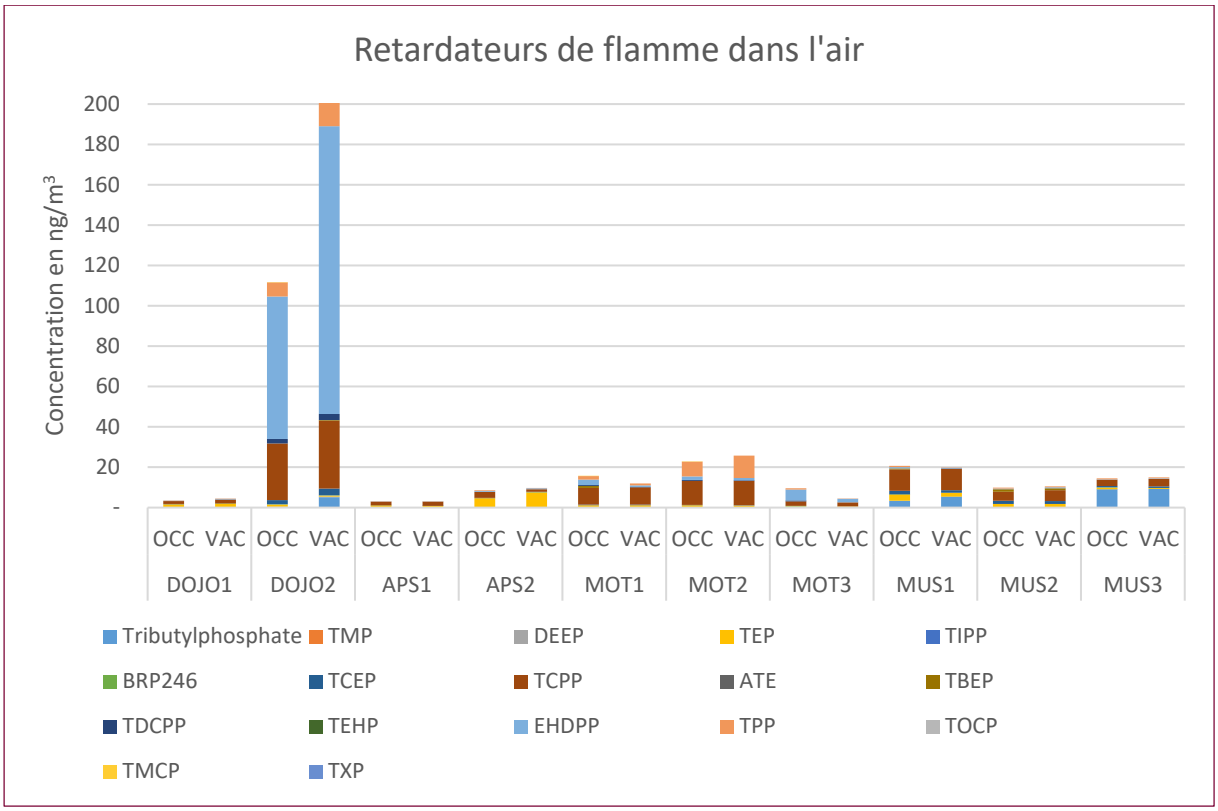

Figure 15 : Somme des retardateurs de flamme dans l'air

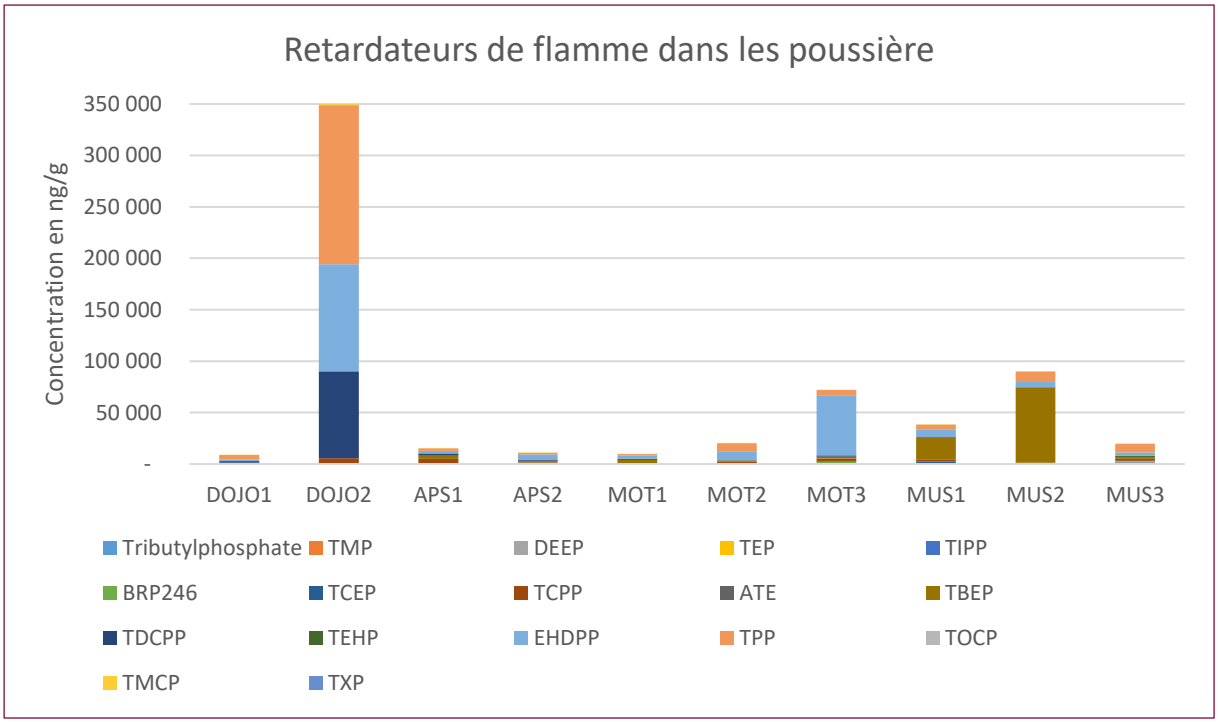

Figure 16 : Somme des retardateurs de flamme dans les poussières

4.2.2.4. Biocides dans l'air et les poussières

Dans l'air (Figure 17), les concentrations cumulées en biocides semi-volatils les plus importantes ont été mesurées dans les salles de musculation MUS1 en condition d'occupation de la salle (387 ng/m³) et MUS3 (321 ng/m³ en moyenne occupée / non occupée). Les biocides les plus fréquemment rencontrés sont le

galaxolide, le 4-tert-butylphénol, notamment dans le dojo DOJ2, et la benzophénone. Des différences entre salles occupées et non-occupées sont observées : elles sont le plus souvent associées à des baisses de concentration du galaxolide dans les salles non-occupées, en lien avec l'utilisation de cette substance (musc) dans les parfums, les lessives et les produits de beauté et de soins (savons, gels douche, déodorants, crèmes, lotions, shampooings, lotions après-lavage, etc.) (INERIS, 2024b).

Dans les poussières (Figure 18), les plus fortes concentrations sont également observées dans les salles de musculation (jusqu'à 18 µg/g dans MUS1, ainsi que dans l'une des salles d'activité physique et sportive (APS1). Les plus forts contributeurs de cette contamination sont la benzophénone ainsi que le 4-tert-octylphénol.

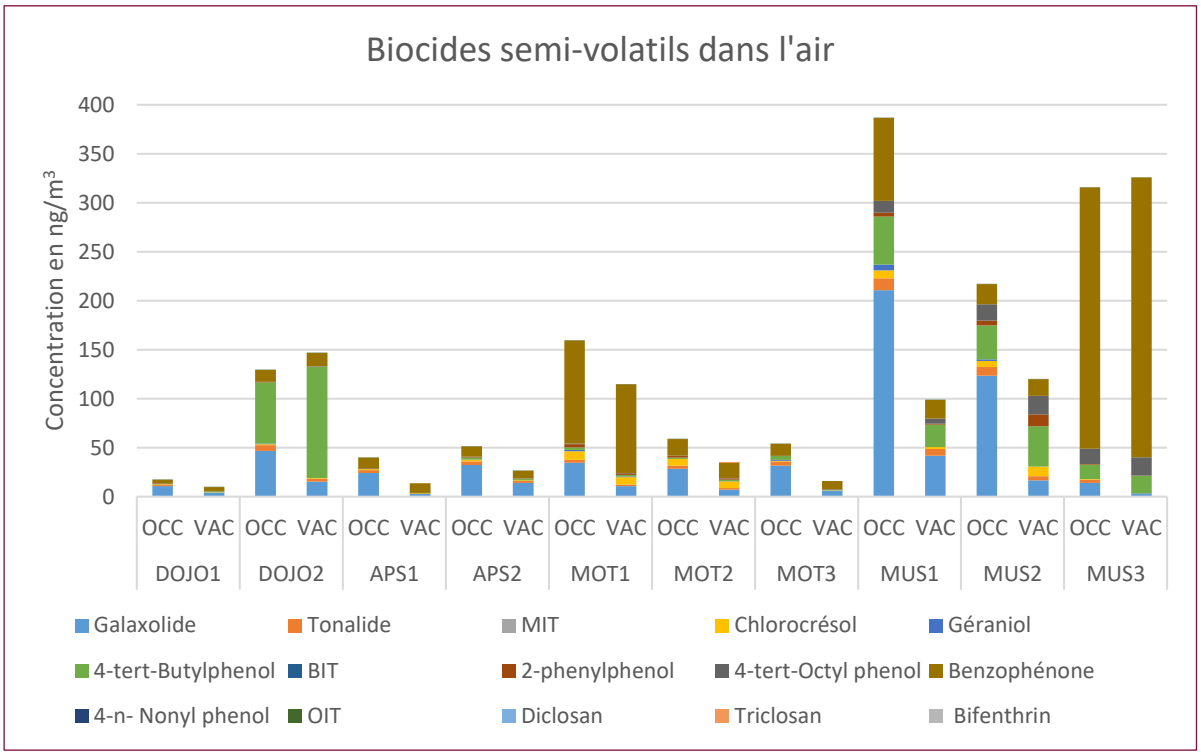

Figure 17 : Somme des biocides semi-volatils dans l'air

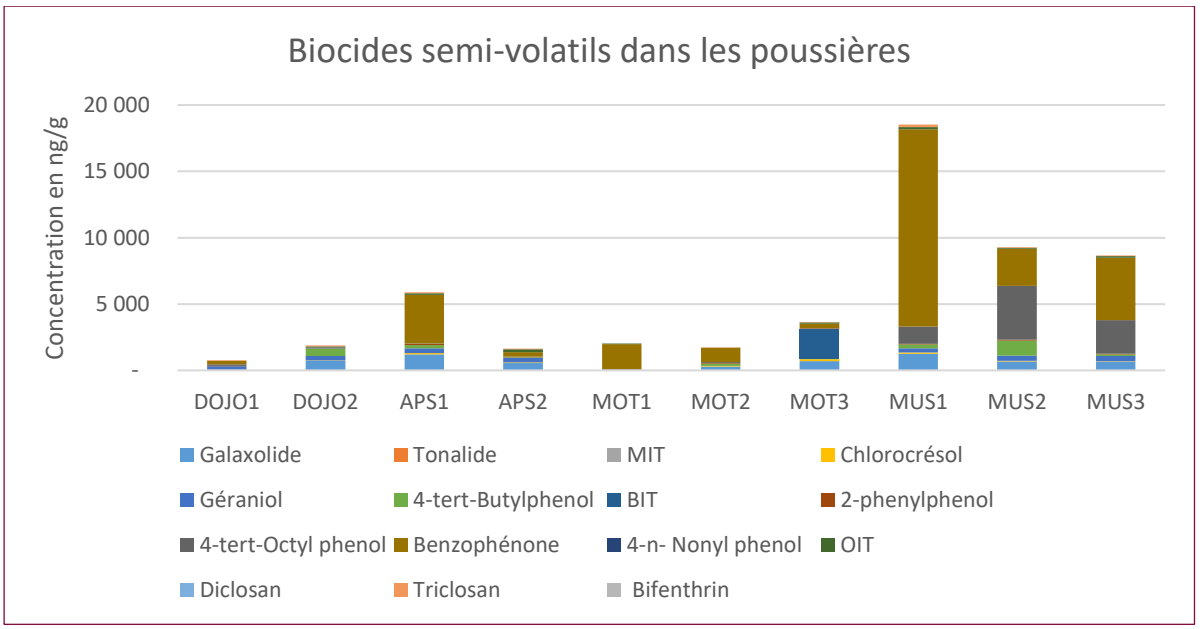

Figure 18 : Somme des biocides dans les poussières

4.2.3.Toxicité des COSV

Comme pour les COV, le classement CMR des 55 COSV quantifiés ainsi que les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) par voie orale issues de l'article de Bonvallot et al. (Bonvallot et al.,2010), de l'ANSES, de l'INERIS ou du travail de Mayoro Mane sur les biocides (Mémoire de stage Météores 2023) sont répertoriés dans le Tableau A3 (Annexe 2). Huit COSV sont classés CMR. Quatre sont suspectés ou présumés cancérogènes, le benzo(k)fluoranthène (C1B), le benzo(a)pyrène (C1B), la benzophénone (C1B), le tributylphosphate (C2), le TCEP (C2) et le TDCPP (C2). Six composés sont suspectés être reprotoxiques (R1B) : 4 phtalates (DiBP, DBP, BBP, DEHP), 1 RFOP (TCEP) et un HAP (benzo(a)pyrène). Onze COSVs sont perturbateurs endocriniens (PE).

Pour interpréter les concentrations observées et les risques associés, une évaluation des expositions est à réaliser selon des scenarii à définir dans les différentes salles étudiées et selon l'âge des occupants.

4.2.4. Ammoniums quaternaires dans les poussières

Les concentrations des ammoniums quaternaires dans les poussières des salles de sport n'avaient pas pu être incluses dans le rapport intermédiaire n°2 du projet QAI-Sport. La liste des substances étudiées est donc présentée dans le Tableau 5.

Pour les analyser, une méthode a été mise au point au LERES (Tableau 2). Elle se base sur une prise d'essai de 5 mg, à laquelle est ajoutée de l'acide formique, du sulfate de magnésium et un solvant d'extraction composé d'un mélange d'acétonitrile et d'acétate d'éthyle. Après ajout d'étalons internes, les ammoniums quaternaires sont extraits par agitation et incubation pendant 2 heures à 50°C. Les tubes sont ensuite centrifugés, le surnageant récupéré, et la procédure d'extraction renouvelée une fois. Après combinaison des surnageants, le solvant d'extraction est évaporé et les extraits repris dans 1 mL d'un solvant de la phase mobile utilisée pour la séparation par chromatographie. Les extraits sont ensuite analysés par UHPLC-MS/MS sur un système Acquity Premier / Xevo TQ-XS (Waters). Dans ces conditions, les limites de quantification (LQ) des ammoniums quaternaires varient de 20 à 200 ng/g et sont précisées dans le Tableau 5.

N° CAS	Substances	Abbréviation	LQ poussières (ng/g)
959-55-7	Benzyldimethyloctylammonium chloride	C8-BAC	20
965-32-2	Benzyldimethyldecylammonium chloride	C10-BAC	200
139-07-1	Benzyldimethyldodecylammonium chloride	C12-BAC	100
139-08-2	Benzyldimethyltetradecylammonium chloride	C14-BAC	100
122-18-9	Benzyldimethylhexadecylammonium chloride	C16-BAC	200
122-19-0	Benzyldimethyloctadecylammonium chloride	C18-BAC	200
5538-94-3	Dimethyldioctylammonium chloride	C8-DDAC	200
7173-51-5	Didecyldimethylammonium chloride	C10-DDAC	200
3401-74-9	Didodecyldimethylammonium chloride	C12-DDAC	200
10108-91-5	Dimethylditetradecylammonium chloride	C14-DDAC	200
1812-53-9	Dimethyldihexadecylammonium chloride	C16-DDAC	200
107-64-2	Dimethyldioctadecylammonium chloride	C18-DDAC	200
112-00-5	Dodecyltrimethylammonium chloride	C12-TMAC	200
4574-04-3	Myristyltrimethylammonium chloride	C14-TMAC	200
112-02-7	Hexadecyltrimethylammonium chloride	C16-TMAC	200
112-03-8	Trimethloctadecylammonium chloride	C18-TMAC	200

Tableau 5 : Ammoniums quaternaires recherchés dans les poussières des salles étudiées et limites de quantification (LQ) pour une prise d'essai de 5 mg

Les ammoniums quaternaires (AQ) sont des biocides non-volatils. Ce sont des substances aux propriétés tensio-actives et bactériostatiques largement utilisées au quotidien, dans des produits de nettoyage (ex. détergents), des désinfectants et de nombreux produits cosmétiques (ex. shampoings, lotions, dentifrices) (Kerdine-Römer, 2021).

De fortes concentrations en AQ ont été mesurées dans les salles de sport. Leur cumul se comptabilise en mg/g, soit de l'ordre de grandeur des concentrations mesurées dans les poussières pour des plastifiants comme les phtalates. Les plus fortes concentrations ont été mesurées dans la salle de musculation MUS3 avec un cumul de 2,9 mg/g, et une forte contribution du C12-BAC (2,1 mg/g), suivie du C14-BAC (420 µg/g) et du C10-DDAC (240 µg/g). Les concentrations médianes mesurées dans les salles de sport sont toutefois comparables à celles mesurées dans de la poussière domestique aux Etats-Unis, les concentrations en C12-BAC (6,97 µg/g), C14-BAC (8,80 µg/g) et C10-DDAC (7,86 µg/g) étant talonnées par celles du C8-DDAC (3,42 µg/g), C10-TMAC (6,13 µg/g) et C16 TMAC (4,84 µg/g) (Hu et al., 2024). En Chine, une concentration médiane de 42,2 µg/g a été mesurée dans des logements, avec comme principaux contributeurs le C12-BAC (16,6 µg/g), le C14-BAC (5,94 µg/g), le C16-ATMAC (2,37 µg/g) et le C18-TMAC (3,71 µg/g) (Cheng et al., 2024). Les AQ apparaissent donc comme des substances émergentes, présentes dans les environnements intérieurs, et suscitant un intérêt sanitaire en raison de potentiels effets toxiques sur le système immunitaire, le développement et la reproduction (Cheng et al., 2024).

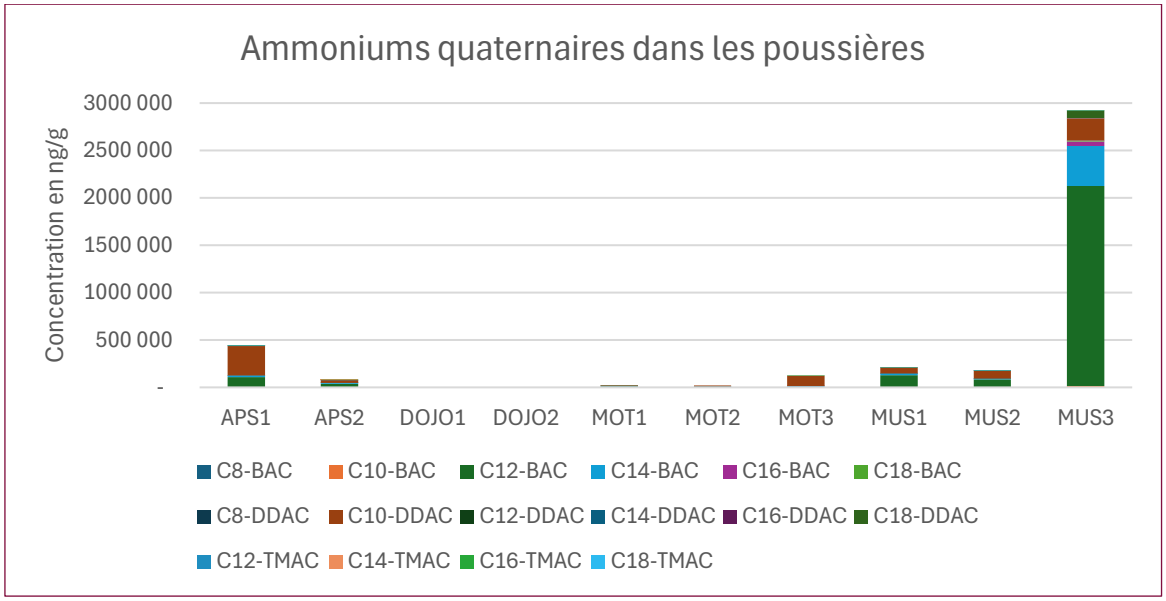

Figure 19 : Somme des ammoniums quaternaires dans les poussières[4]

4.2.5. Micro-organismes dans l'air

Les résultats sont présentés sur la Figure 20. De façon générale, le niveau de contamination microbien est inférieur à celui des logements sauf pour les bactéries en période d'occupation des salles. Deux concentrations élevées sont observées dans deux salles en condition d'occupation avec des valeurs de 1 800 et 2 800 UFC/m^3. Cette contamination notamment représentée par les *Micrococcus* et les *Staphylococcus*, est apportée par les occupants.

[4] Note : les analyses n'ont pas pu être réalisées pour les salles DOJ1 et DOJ2 en raison d'une quantité de poussière insuffisante.

La contamination par les moisissures est faible et représentée par les espèces régulièrement retrouvées en habitat.

Le SARSCOV 2 n'a pas été détecté, ce qui peut être dû à la limite de quantification (160 UG/m^3).

Il n'existe pas de règlementation française pour la contamination microbienne dans l'air dans les lieux publics. Seul un rapport de l'ANSES de 2016 évoque une valeur de 1 000 UFC/m^3 de moisissures comme étant une valeur à partir de laquelle il faut identifier les sources d'humidité qui pourraient expliquer cette valeur, et ceci pour les personnes allergiques. Au niveau international, pour les bactéries totales, les valeurs sont supérieures à la concentration bactérienne fixée par les lignes directrices[5] de l'Europe qui est de 1 000 UFC/m^3 ou encore de la valeur guide de l'OMS qui est de 500 UFC/m^3 dans l'air intérieur des logements.

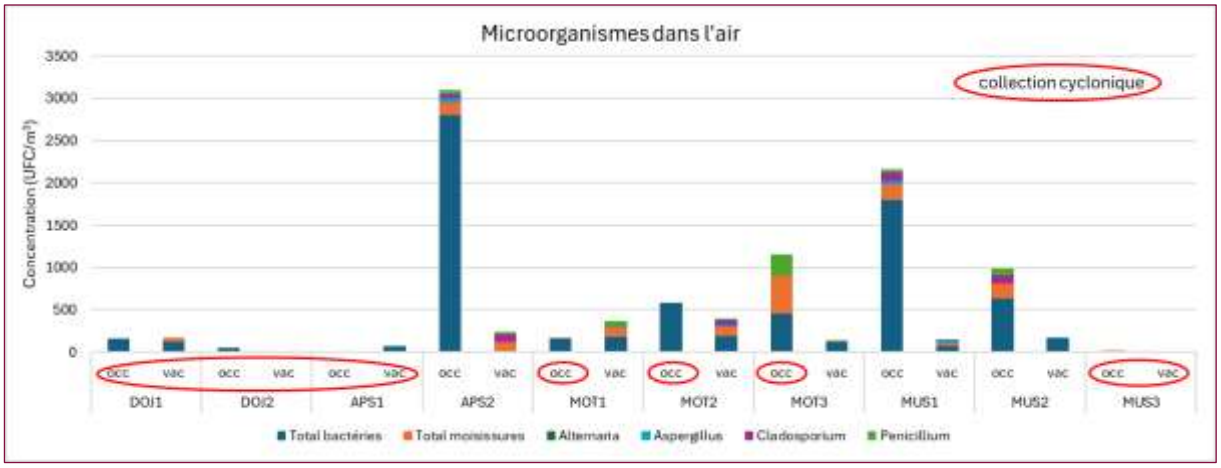

Figure 20 : Microorganismes dans l'air des 10 salles étudiées (occ : salles occupées – vac : salles non occupées) – Pour les salles entourées en rouge, des prélèvements cycloniques ont été réalisés.

4.3. Effet de l'occupation humaine sur la contamination des salles

Le Tableau 6 présente les informations obtenues sur l'occupation des salles selon leur typologie. Ces informations ont été recueillies auprès des gestionnaires des 10 salles étudiées.

Type de salle	Public	Fréquence	Durée d'une séance
Dojo (DOJ)	Enfants à partir de 6 ans et adultes	Une fois par semaine	120 min
Salle musculation (MUS)	16 ans et plus	Une à deux fois par semaine	90-120 min
Salle de motricité (MOT)	Enfants de 3 à 6 ans	Trois à cinq fois par semaine	30-45 min
Salle multisport (APS)	Enfants à partir de 5 ans et adultes	Une fois par semaine	60 -120 min

Tableau 6 : Age des pratiquants, fréquence et durée d'une séance de sport selon la typologie des salles étudiées

Effet de l'occupation sur la contamination aux COV

Discussion des concentrations globales de COV

[5] EU guidelines for the air of residential houses (1000 CFU/m^3)

Les sommes des concentrations de COV obtenues pour les salles occupées et non occupées sont présentées sur la Figure 21. Les dojos représentent la seule typologie de salles pour laquelle on observe des concentrations plus élevées (environ 30%) dans les salles inoccupées que dans les salles occupées. Cela s'explique par le grand volume des dojos par rapport aux autres salles étudiées et par la présence de grandes surfaces de matériaux émetteurs de COV (mousses de protection murales, tatamis). Les plus fortes différences entre salles occupées et inoccupées s'observent pour les salles MOT1, MOT3 et MUS1, avec une augmentation des concentrations globales en COV respectivement de 81 %, 106 % et 194 %. Cela peut s'expliquer par le fort taux d'occupation des salles par rapport à leur volume mais aussi par le type et l'intensité de l'activité sportive : musculation pour MUS1 et exercices de motricité pour jeunes enfants pour MOT 1 et MOT 3. Pour les autres salles, il n'y a pas de différence significative entre occupation et inoccupation.

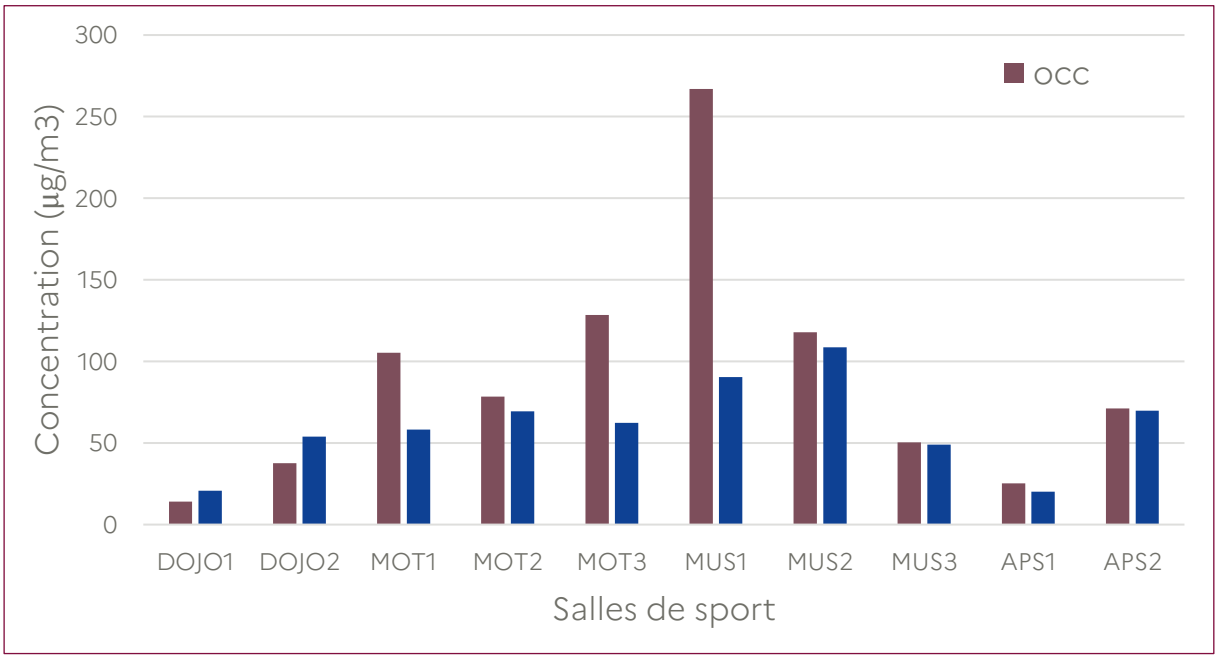

Figure 21 : Somme des concentrations des COV quantifiés en conditions d'occupation et d'inoccupation des salles de sport.

Identification de COV spécifiques de la présence humaine

Des COV émis par le corps humain ont été identifiés et quantifiés : il s'agit notamment de l'acétone, émis par la peau et exhalé (Tsushima et al., 2018), de la 6-méthyl-5-hepten-one (ou sulcatone), produit de réaction de l'ozone et du squalène présent sur la peau (Rankin-Turner and McMeniman, 2022) (Figure 22).

D'autres composés issus de produits cosmétiques semblent aussi être liés à la présence humaine dans les salles. Le décaméthylcyclopentasiloxane (D5) présente des concentrations systématiquement plus élevées d'un facteur 3 (MUS1) à 40 (MOT3) en conditions d'occupation. Le limonène, composant de parfums, bien que présent en très faibles concentrations (de l'ordre du µg/m^3), semble se comporter de façon similaire, avec des teneurs plus élevées dans les salles occupées.

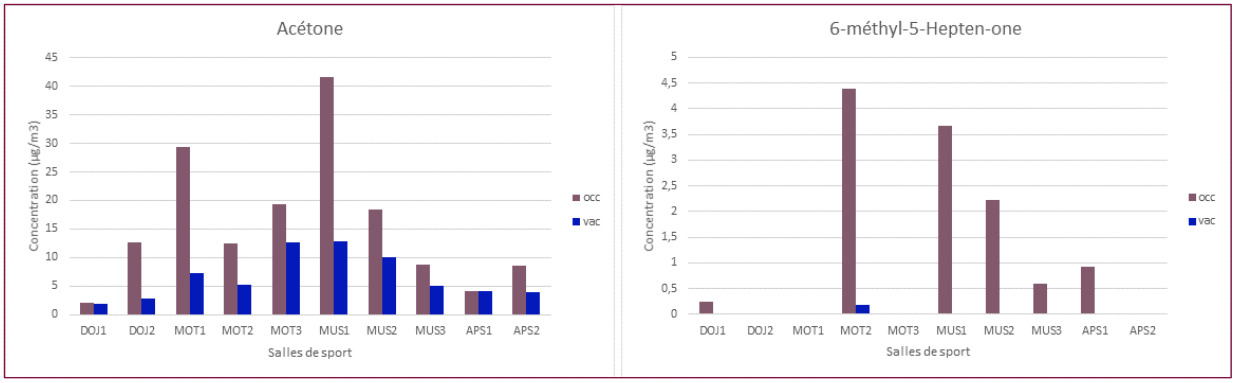

Figure 22 : Somme des concentrations d'acétone et 6-méthyl-5-hepten-one (sulcatone) en conditions d'occupation et d'inoccupation des salles de sport

Effet de l'occupation sur la contamination aux COSV dans l'air

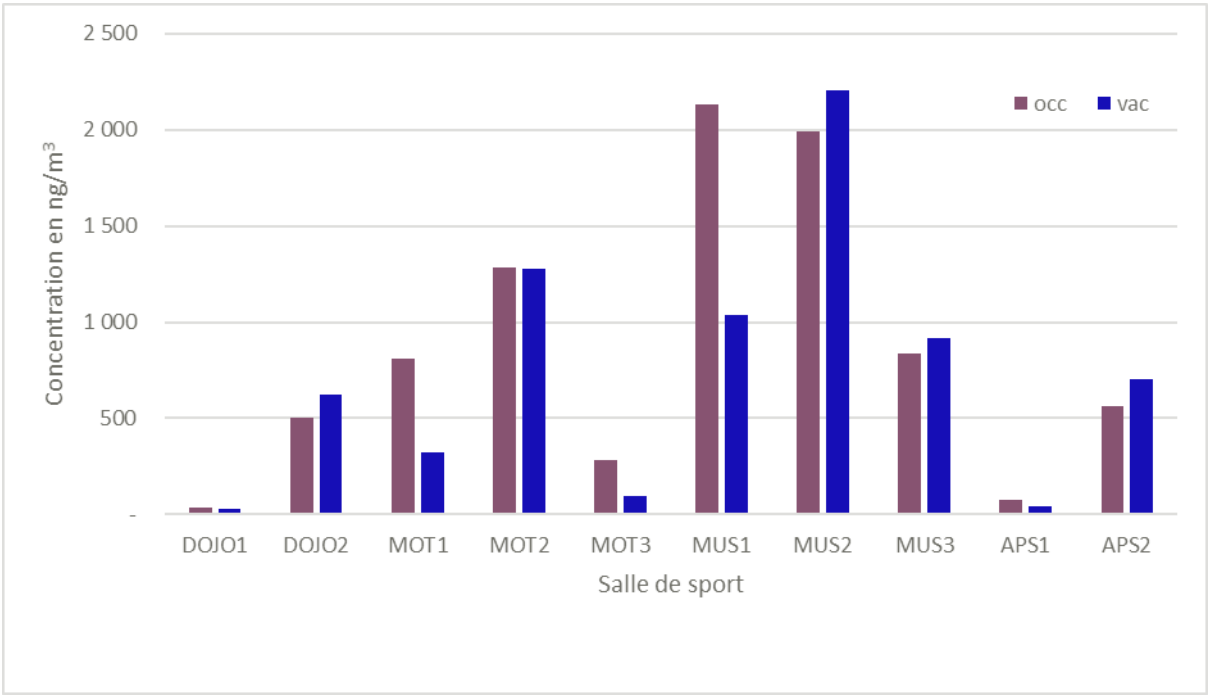

Figure 23 : Somme des concentrations des COSV quantifiés en conditions d'occupation et d'inoccupation des salles de sport.

Les COSV quantifiés ne semblent pas spécifiques à l'occupation des salles (Figure 23). Seules les substances comme le squalène ou cholestérol ou encore l'acide palmitique, identifiés par les analyses non-ciblées, sont des traceurs de la présence humaine.

Les COSV ont plusieurs origines, ils sont émis par les matériaux de la salle (volatilisation) comme les phtalates et les retardateurs de flamme. Ils sont également apportés par des activités spécifiques comme le ménage, cela concerne des détergents, biocides ou parfums (exemple des muscs) ou par l'introduction d'air extérieur dans la salle comme, par exemple la contamination urbaine avec les HAP (rejets automobiles ou activité industrielle).

Les variations en COSV observées entre salles occupées et non occupées sont plus liées à l'aération/ventilation qui diminue les concentrations des COSV dans les salles ou encore le confinement et la chaleur (en lien avec le nombre de personnes) qui peut conduire à une augmentation de la contamination de l'air.

Les salles où l'on observe le plus de variation entre « occupé » et « non occupé », sont MOT1, MOT3 et MUS1. La salle MUS1 présente les concentrations les plus élevées en COSV. Pour cette salle, la différence entre occupation et non occupation est principalement due à une baisse de moitié de la concentration en DiBP. L'utilisation de ce phtalate dans des articles textiles ou dans des parfums peut expliquer l'augmentation de sa concentration en période occupée (INERIS, 2024). Il en est de même pour le galaxolide, utilisé dans des produits cosmétiques, de nettoyage ou soin personnel, et que l'on retrouve en plus forte concentration dans MUS1 occupée. MUS1 présente aussi le taux de renouvellement d'air le plus bas des 10 salles : 0,22 h^{-1}. Cela peut donc expliquer, avec également le nombre de pratiquants (qui n'a pas pu être évalué), la différence de concentrations de COSV dans l'air selon les conditions d'occupation.

Effet de l'occupation sur la concentration en microorganismes

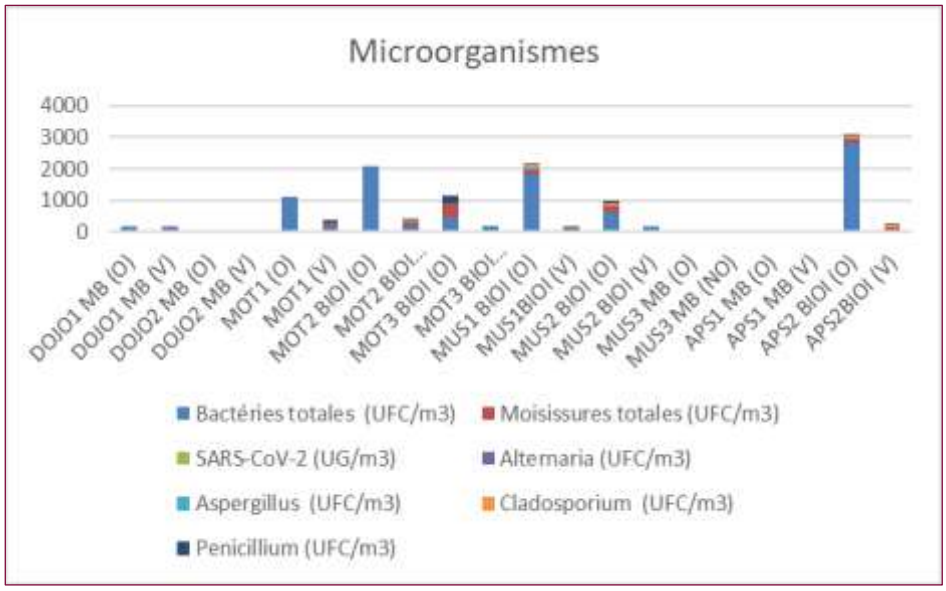

Figure 24 : Somme des concentrations des microorganismes quantifiés en condition d'occupation et d'inoccupation des salles de sport- O : occupé, V : vacant

La concentration en bactéries dans l'environnement intérieur est influencée par la présence humaine comme on peut le voir en Figure 24. En effet, les bactéries sont largement apportées par la présence humaine comme le montre la présence de *Micrococcus* et *Staphylococcus* après identification par séquençage des espèces présentes. La contamination aux moisissures est assez faible et peu influencée par l'occupation des salles. En effet, elle est surtout influencée par la présence d'humidité.

4.4. Effet du taux de renouvellement de l'air sur les concentrations en COV et en COSV

Le taux de renouvellement de l'air a été déterminé dans chaque pièce à partir de la cinétique de décroissance du CO_2 en période de post occupation conformément à la norme ASTM (E741-00, 2006). Les valeurs moyennes obtenues à partir de trois mesures sont indiquées dans le Tableau 1.

Les salles les moins contaminées sont DOJ1 et APS1 qui sont situées dans le même bâtiment récent datant de 2016. Les matériaux et les équipements sportifs (tatami, notamment) ont été choisis pour leurs faibles

émissions dans l'air et le bâtiment est équipé d'une ventilation double flux qui conduit à un renouvellement d'air de 1 h^{-1}, le plus élevé de l'ensemble des salles de sports étudiées.

Les concentrations les plus élevées en COV et en COSV dans l'air se trouvent dans les salles de musculation et les salles de motricité qui présentent les taux de renouvellement d'air les plus faibles de 0,22 h^{-1} pour MUS1, 0,44 h^{-1} pour MUS2 et 0,39 h^{-1} pour MOT2.

La Figure 25 présente les concentrations cumulées de COV et de COSV dans l'air dans des conditions d'occupation et d'inoccupation des locaux en fonction du taux de renouvellement d'air.

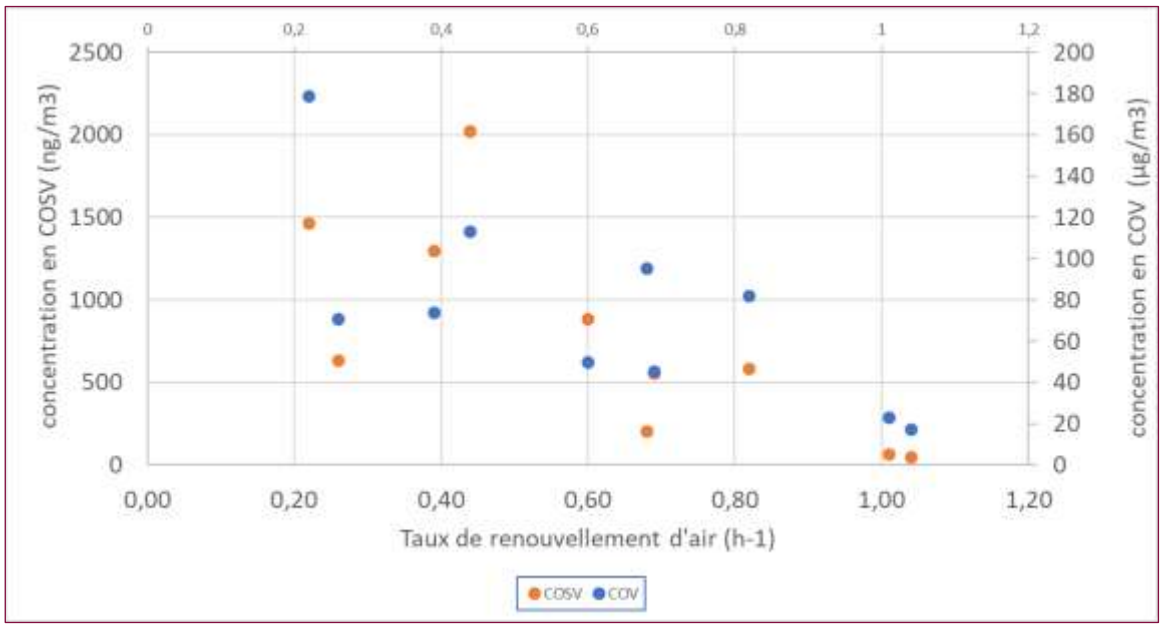

Figure 25 : Somme des concentrations en COV et en COSV dans l'air des salles de sport occupées et inoccupées en fonction du taux de renouvellement d'air des salles

Une tendance générale assez nette sur la diminution des concentrations avec l'augmentation du taux de renouvellement de l'air se dégage de ces résultats, malgré les différences entre les salles en termes d'activités, d'équipements (ventilation et matériaux), de type et d'âge des bâtiments. Cela confirme l'importance de la ventilation dans la gestion de la qualité de l'air intérieur.

4.5. Sélection de 3 salles pour l'étude approfondie (lot 4)

Le lot 4 a pour objectifs d'approfondir les connaissances sur les sources et les transferts des polluants mis en évidence dans le lot 3 et de compléter les données d'exposition avec des mesures de migration de polluants issus de matériaux dans la sueur et la salive. Pour cela, trois salles ayant des typologies d'activité différentes ainsi que des caractéristiques de contamination chimique ou microbiologique contrastées ont été sélectionnées.

4.5.1. Critères de sélection des salles

Les critères suivants ont été retenus pour la sélection des trois salles du lot 4 :

- Niveaux de concentrations : les salles pour lesquelles les niveaux de concentrations en polluants (COV, COSV et contaminants microbiologiques) sont les plus élevés ont été privilégiées afin de pouvoir identifier les sources des polluants ciblés et si possible quantifier leur répartition.

- Spécificité des composés : Les salles présentant des polluants spécifiques, par exemple des traceurs de l'activité sportive pratiquée, ont aussi été prioritairement sélectionnées.
- Nature des polluants : un des principaux objectifs du projet QAI-sport étant de mettre en évidence et d'étudier des polluants émergents, ceux-ci ont également été intégrés dans les critères de sélection des salles.
- Contraintes techniques : les contraintes en termes de prélèvements ont aussi été considérées dans le choix des salles.

4.5.2. Salles sélectionnées

Compte tenu des résultats du lot 3 discutés et analysés dans les paragraphes précédents, les trois salles retenues pour le lot 4, sont les suivantes :

- DOJ2 : ce dojo a été choisi principalement en raison des niveaux de concentrations en polluants (COV et COSV) plus élevés que dans le DOJ1, avec des niveaux de concentrations importants de DEHP, DiNP, EHDPP (composé émergent utilisé en alternative aux phtalates) et de TPP dans les poussières.
- MOT2 : pour cette salle, les concentrations en COV, COSV et contaminants biologiques sont globalement plus élevées que dans les deux autres salles de motricité.
- MUS1 : l'air de cette salle présente une majorité de composés oxygénés ainsi que des concentrations importantes (quelques centaines de ng/m3) de DiBP et de deux HAP (fluorène et phénanthrene). Les HAP, famille de composés spécifique à cette salle, sont également présents dans les poussières (phénanthrene, fluoranthène, pyrène) de même que des phtalates (DEHP, DiNP), des composés organophosphorés (TCEP, TBEP, EHDPP, TPP) et un biocide (benzophénone). Les teneurs les plus élevées en bactéries ont aussi été mesurées dans cette salle. A noter que la salle MUS1 étant très volumineuse, cela peut compliquer l'étude de modélisation (mesure du taux de renouvellement de l'air). Cependant, elle présente un intérêt du point de vue des composés identifiés et de sa configuration qui se rapproche de celles des salles de musculation/fitness privées.

Les salles APS n'ont pas été retenues car elles présentent un très faible niveau de pollution et l'APS2 représente une typologie de gymnase déjà étudiée dans d'autres projets et dans la littérature.

5. Résultats du lot 4 : Sources et transfert des polluants dans les environnements intérieurs et voies d'exposition

L'objectif de ce lot est d'approfondir les connaissances acquises au lot 3 pour les 3 salles sélectionnées (DOJ2, MOT2 et MUS1). Il s'agit de quantifier les agents chimiques (COV et COSV) sélectionnés au lot 3, et d'identifier leurs sources. La diversité microbiologique dans les différents milieux a également été caractérisée. Deux campagnes de mesures à des périodes distinctes (saisonnalité différente) ont été effectuées, l'une en octobre 2023, la deuxième en avril 2024.

Lors de la deuxième campagne, les voies d'exposition (inhalation, ingestion et contact cutané) ont été estimées à l'aide de simulants type salive et sueurs acide et basique lors d'essais de migration.

De la même façon que dans le cadre du lot 3, le déploiement des méthodes de prélèvement a été organisé sur 4,5 jours (du lundi matin au vendredi soir) en veillant à éviter les éventuelles interactions entre les différentes méthodes. Seule la mesure de l'émission de COSV des matériaux a été prolongée jusqu'à 9 jours.

A l'issue de ces campagnes de mesures, des prélèvements utilisant de la salive et sueur acide et basique synthétiques ont également été réalisés pour estimer les voies d'exposition (ingestion et contact dermique).

La Figure 26 décrit l'organisation type des prélèvements et des mesures.

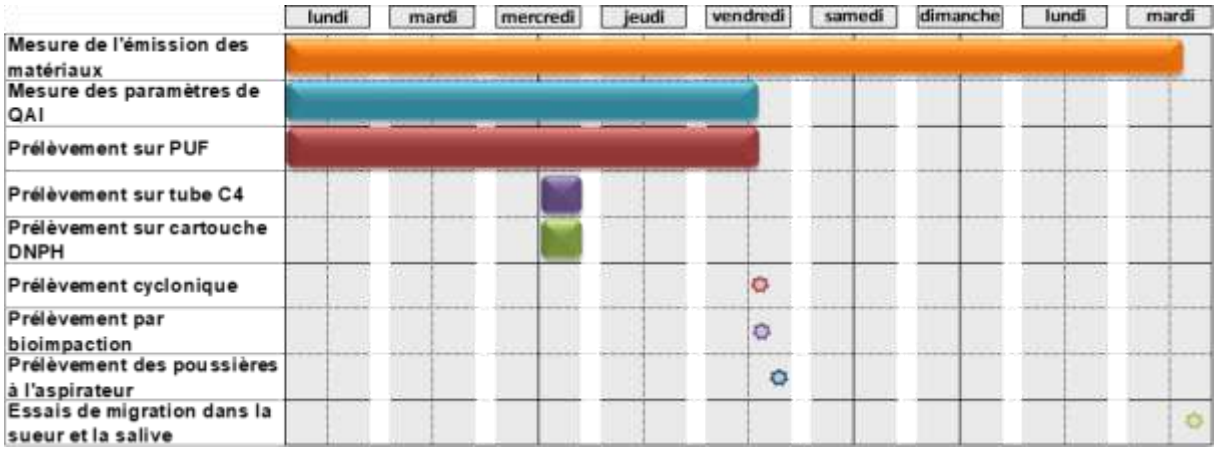

Figure 26 : déploiement des prélèvements au cours d'une série de mesures dans le cadre du lot 4.

Les méthodologies de mesures, prélèvements et analyses sont similaires à celles mises en œuvre dans le cadre du lot 3 (Tableau 1).

5.1. Composés organiques volatils dans les 3 salles et pour les deux campagnes

5.1.1. COV dans l'air

Deux campagnes (C1 et C2) de prélèvements actifs (sur cartouches d'adsorbant C4 et DNPH également utilisées lors du lot 3) ont été réalisées dans chacune des 3 salles en condition d'occupation, ainsi qu'à

l'extérieur. Les méthodes de prélèvements et d'analyse sont identiques à celles mises en œuvre lors du lot 3.

Dans le Tableau 7, sont reportées des informations concernant les campagnes de prélèvements dans les trois salles retenues.

Un bilan des concentrations en COV dans les trois salles pour les deux campagnes C1 et C2 est reporté dans la Figure 27 avec une comparaison des concentrations mesurées lors du lot 3 en période occupée ainsi qu'à l'extérieur, et une indication de la période (mois/année) des prélèvements.

Salle	DOJ2		MOT2		MUS1	
Campagnes de prélèvement	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Date des prélèvements	02/10/2023 15/04/2024		04/10/2023 17/04/2024		05/10/2023 18/04/2024	
Prélèvements à l'intérieur des salles						
Température début/fin (°C)	22,7/25,2 19,7/19,4		17,6/21,1 18,0/20,4		21,3/22,2 18,8/19,4	
Humidité relative début/fin (%)	69,4/72,6 51,0/63,4		57,9/58,2 46,6/48,4		54,1/57,9 55,5/59,4	
Prélèvements à l'extérieur						
Température début/fin (°C)	22,7/28,4 15,2/17,3		13,1/16,5 9,0/13,1		15,9/21,4 12,7/13,5	
Humidité relative début/fin (%)	66,7/54,3 58,1/59,0		69,4/59,6 70,4/48,9		65,1/46,9 41,0/47,3	

Tableau 7 : Informations concernant les 2 campagnes de prélèvements des COVs dans les trois salles

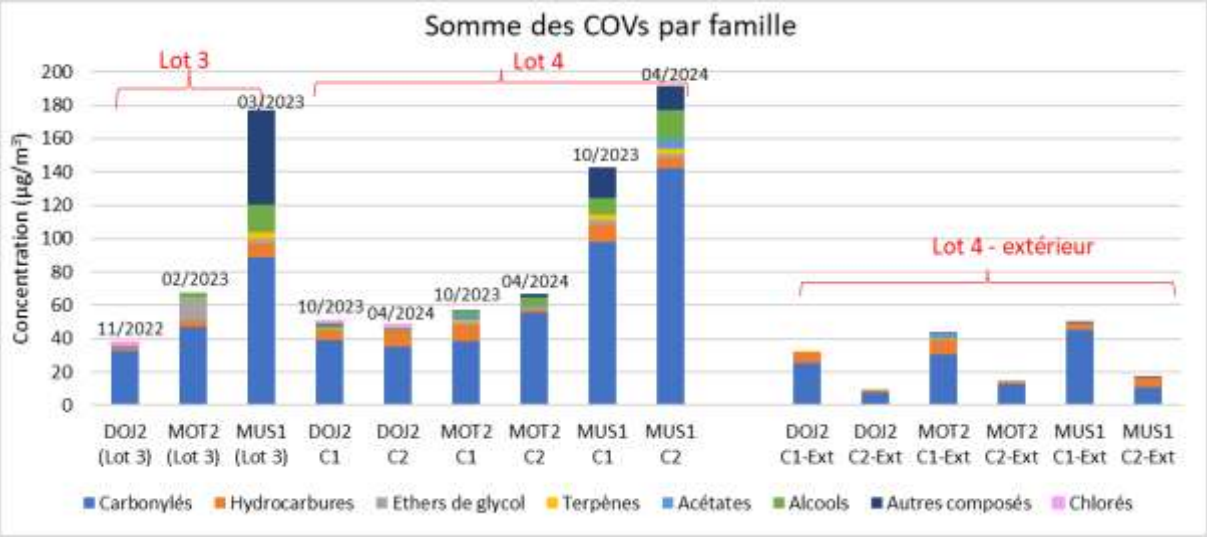

Figure 27 : Bilan des COV par familles dans les trois salles

Les teneurs globales en COV sont comparables aux résultats du lot 3 pour les deux campagnes (C1 et C2) dans chacune des trois salles (Figure 27). Les composés carbonylés, principalement l'hexanal et l'acétone sont majoritaires. Les différences les plus significatives concernent :

- Les éthers de glycol dans la salle MOT2, dont la concentration s'élève à environ 13 µg/m³ dans le lot 3 et à moins de 2 µg/m³ dans le lot 4 ;
- Les autres composés, notamment le siloxane D5 dans la salle MUS1 dont la concentration mesurée dans les deux campagnes du lot 4 est diminuée de plus d'un facteur 3 par rapport à celle du lot 3 en période occupée.

Pour les composés règlementés dans l'air intérieur, la concentration en benzène est inférieure à 1 µg/m³ dans les trois salles pour tous les prélèvements et la concentration en formaldéhyde est inférieure à 10 µg/m³ pour tous les prélèvements de DOJ2 et MOT2 et est inférieure à 20 µg/m³ pour tous les prélèvements de MUS1.

5.1.2. Identification des matériaux sources de COV dans l'air

Pour les trois salles sélectionnées à l'issue du lot 3, différents matériaux potentiellement sources de COV ont été retenus dont trois matériaux dans le DOJ2, six matériaux dans la salle MOT2 et huit matériaux dans la salle MUS1. Pour les trois salles, les 5 COV spécifiques ciblés sont reportés dans le Tableau 8. En accord avec les objectifs du projet, les COV choisis pour l'étude du lot 4 sont des polluants émergents, atypiques et dont la quantification est réalisable avec les techniques de mesure proposées. Parmi les COV retenus, à noter que le 1,3-dichloro-2-propanol (DOJ2) est classé cancérogène probable (C1B) sans VTR (Tableau A2, Annexe 2).

Salle	DOJ2	MOT2	MUS1
Matériaux sources retenus	- Tatami - Mousse murale - Mur peint	- Tapis rouge - Pont vert - Sol plastique - Mur peint - Rideau plastique - Faux plafond	<u>Rez-de-chaussée</u> - Dalle noire - Sol plastique bleu - Banc de muscu - Mur blanc - Faux plafond <u>Etage</u> - Tapis bleu - Sol plastique rouge - Plafond lambris
COV spécifiques émergents ciblés	1-3 dichloro-2-propanol	- Benzyl alcool - 2-propanol 1-(2-methoxy-1 methylethoxy)	- Benzyl alcool - Benzaldéhyde - Benzothiazole

Tableau 8 : Matériaux et COV étudiés pour l'identification des sources

La concentration gazeuse des polluants à l'interface matériau/air (y0) est déterminée par la méthode MOSEC développée par IMT Mines Alès. Cette méthode d'échantillonnage passif consiste à poser sur le matériau étudié une cellule d'émission en verre (MOSEC) spécifique aux COSV (Ghislain et al., 2017) et adaptée, pour cette étude, à l'échantillonnage simultané des COV.

Le protocole d'échantillonnage et d'analyse comporte trois étapes qui sont illustrées Figure 28 :

- 1)- La cellule MOSEC est posée sur la surface du matériau à analyser. Les composés sont émis dans le volume de la cellule jusqu'à atteindre une concentration stable, correspondant à y0. Un temps de stabilisation de 4 heures a été appliqué pour les COV dans le cadre de cette étude ;
- 2)- Un prélèvement des COV est ensuite effectué dans la cellule par micro-extraction sur phase solide (SPME). Pour les COV, une fibre 65 µm PDMS/DVB (polydiméthylsiloxane/ divinylbenzène) est utilisée. Un temps d'extraction de 20 min a été appliqué ;
- 3)- Après échantillonnage, la fibre est conservée dans un tube étanche à 4°C durant 48 heures maximum. De retour au laboratoire, elle est analysée par GC/MS/FID après désorption thermique à 250°C dans l'injecteur du GC. Comme pour l'analyse des COV dans l'air, l'identification des composés a été effectuée par spectrométrie de masse en mode scan et la quantification en FID.

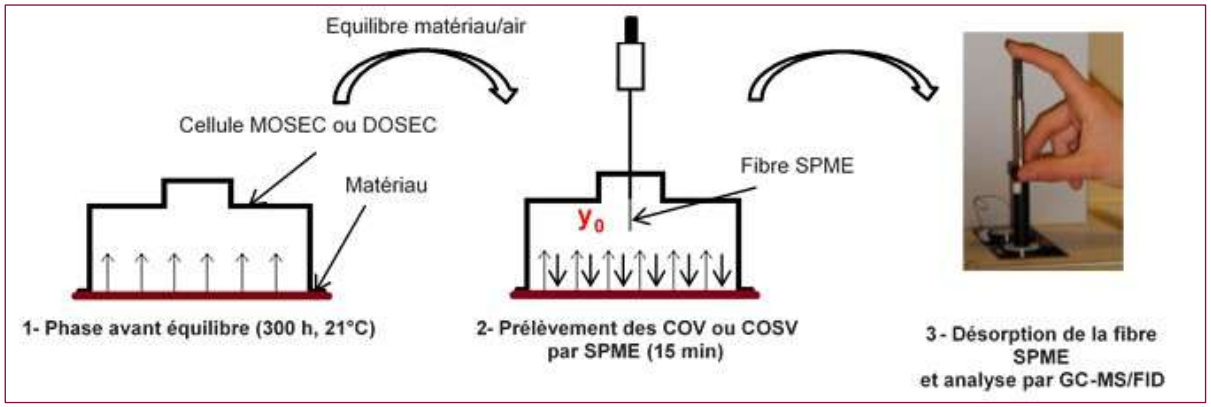

Figure 28 : Principe de la méthode d'échantillonnage des COV à l'interface matériau/air

Les informations relatives à l'étalonnage par la méthode MOSEC-SPME ainsi que les données d'étalonnage pour les COV spécifiques étudiés lors de cette étude sont reportées en Annexe 1.

Un bilan des concentrations mesurées dans l'air pour les quatre campagnes (2 campagnes du lot 3 et 2 campagnes du lot 4) et à l'interface matériaux/air pour les deux campagnes du lot 4 est reporté dans les tableaux et figures suivantes.

5.1.2.1. Salle DOJ2

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 9 et la Figure 29.

Campagne (date)	1-3 dichloro-2-propanol Concentration dans l'air (µg/m³)
Lot 3 vac (30/12/2022)	5,43
Lot 3 occ (23/11/2022)	0,79
Lot 4 C1 (2/10/2023)	<0,64
Lot 4 C2 (15/04/2024)	1,03

Tableau 9 : Bilan des concentrations dans l'air du 1,3-dichloro-2-propanol pour la salle DOJ2

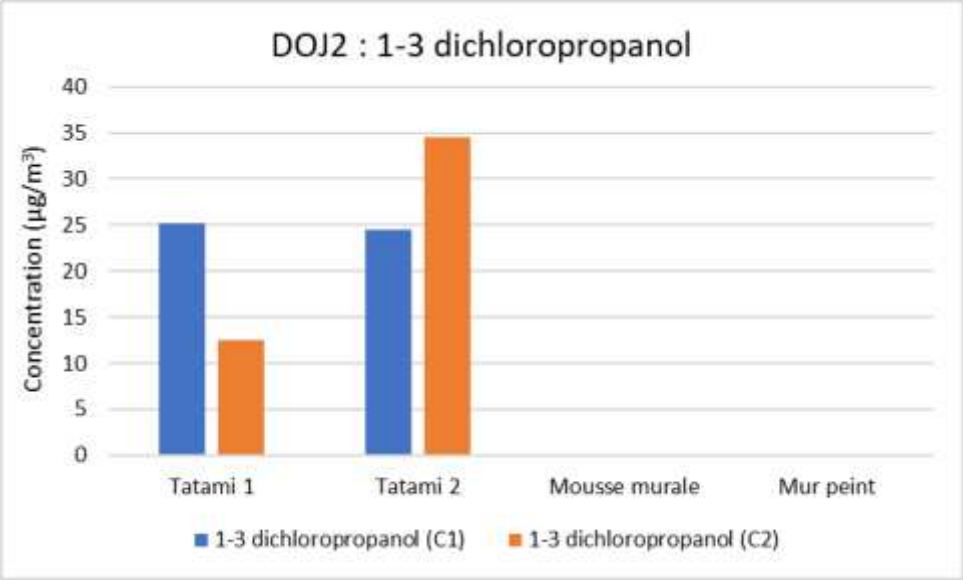

Figure 29 : Concentration à l'interface matériau/air (y0) du COV ciblé pour les 3 matériaux de DOJ2

D'après les résultats du Tableau 9 et de la Figure 29, il apparaît que le tatami est la seule source du 1-3 dichloro-2-propanol, avec une concentration moyenne à l'interface matériau/air (y0) d'environ 25 µg/m³ et une concentration dans l'air de l'ordre du µg/m³ pour les 2 campagnes du lot 4.

5.1.2.2. Salle MOT2

Les résultats obtenus pour MOT2 sont présentés dans le Tableau 10 et la Figure 30.

Campagne (date)	2-propanol 1-(2-methoxy-1 methylethoxy) Concentration dans l'air (µg/m³)	Benzyl alcool Concentration dans l'air (µg/m³)
Lot 3 vac (21/02/2023)	15,36	<0,22
Lot 3 occ (2/02/2023)	8,47	<0,22
Lot 4 C1 (4/10/2023)	0,54	<0,22
Lot 4 C2 (17/04/2024)	0,55	0,55

Tableau 10 : Bilan des concentrations dans l'air des deux COV ciblés pour la salle MOT2

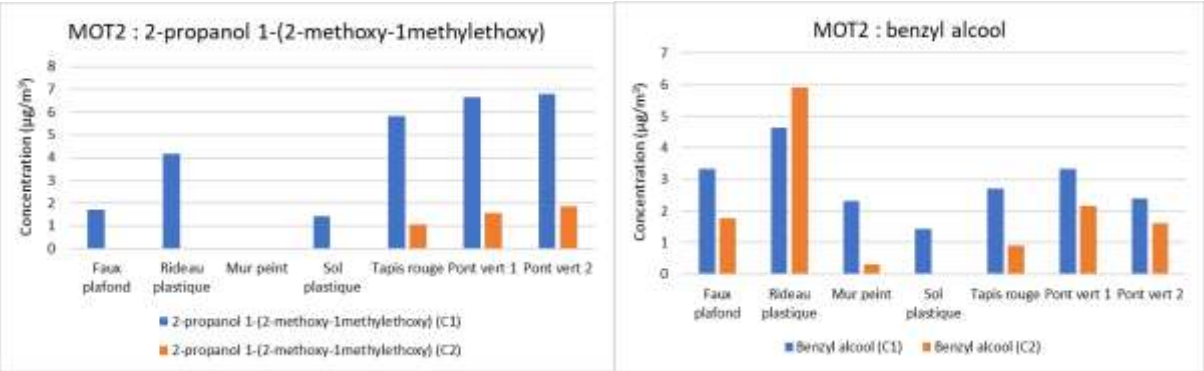

Figure 30 : Concentration à l'interface matériau/air (y0) des COV ciblés pour les 6 matériaux de MOT2

D'après les résultats du Tableau 10, les concentrations dans l'air de l'éther de glycol pour les campagnes du lot 4 sont inférieures à celles précédemment mesurées dans le lot 3. D'après la Figure 30, il apparaît que pour les 2 COV ciblés (2-propanol 1-(2-methoxy-1methylethoxy et benzyl alcool), de très faibles concentrations sont mesurées au niveau des matériaux, avec des écarts importants entre les deux campagnes pour l'éther de glycol. Les 2 matériaux tapis rouge et pont vert paraissent être les sources du 2-propanol 1-(2-methoxy-1methylethoxy avec une concentration moyenne à l'interface matériau/air (y0) d'environ 6 µg/m³ pour la campagne 1 et de 1,5 µg/m³ pour la campagne 2. Le rideau plastique semble être la principale source du benzyl alcool avec une concentration moyenne à l'interface matériau/air (y0) d'environ 5 µg/m³ pour les 2 campagnes du lot 4.

5.1.2.3. Salle MUS1

Les résultats obtenus pour MUS1 sont présentés dans le Tableau 11 et la Figure 31.

Campagne (date)	Benzothiazole Concentration dans l'air (µg/m³)	Benzyl alcool Concentration dans l'air (µg/m³)	Benzaldéhyde Concentration dans l'air (µg/m³)
Lot 3 vac (24/04/2023)	7,74	4,13	1,89
Lot 3 occ (13/03/2023)	7,26	10,23	2,67
Lot 4 C1 (5/10/2023)	7,85	5,06	2,18
Lot 4 C2 (18/04/2024)	9,55	10,83	3,20

Tableau 11 : Bilan des concentrations dans l'air des 3 COV ciblés pour la salle MUS1

D'après les résultats du Tableau 11, les concentrations des trois COV mesurées pour les différentes campagnes dans l'air de la salle MUS1 sont relativement stables. D'après la Figure 31, il apparaît que pour les trois COV ciblés (benzothiazole, benzyl alcool et benzaldéhyde), des concentrations y0 globalement plus élevées ont été mesurées lors de la 1ère campagne, alors que la température ambiante évolue peu (environ +3°C) (Tableau 7).Pour le benzyl alcool et le benzaldéhyde, les tendances sont similaires avec les plus fortes concentrations mesurées pour le sol plastique bleu avec une concentration moyenne à l'interface matériau/air (y0) d'environ 61 µg/m³ de benzyl alcool et 20 µg/m³ de benzaldéhyde pour la campagne n°1 et d'environ 31 µg/m³ de benzyl alcool et 24 µg/m³ de benzaldéhyde pour la campagne n°2. Pour le benzothiazole, la dalle noire apparaît être le matériau source avec une concentration moyenne à l'interface matériau/air (y0) d'environ 84 µg/m³ pour la campagne 1 et 35 µg/m³ pour la campagne 2.

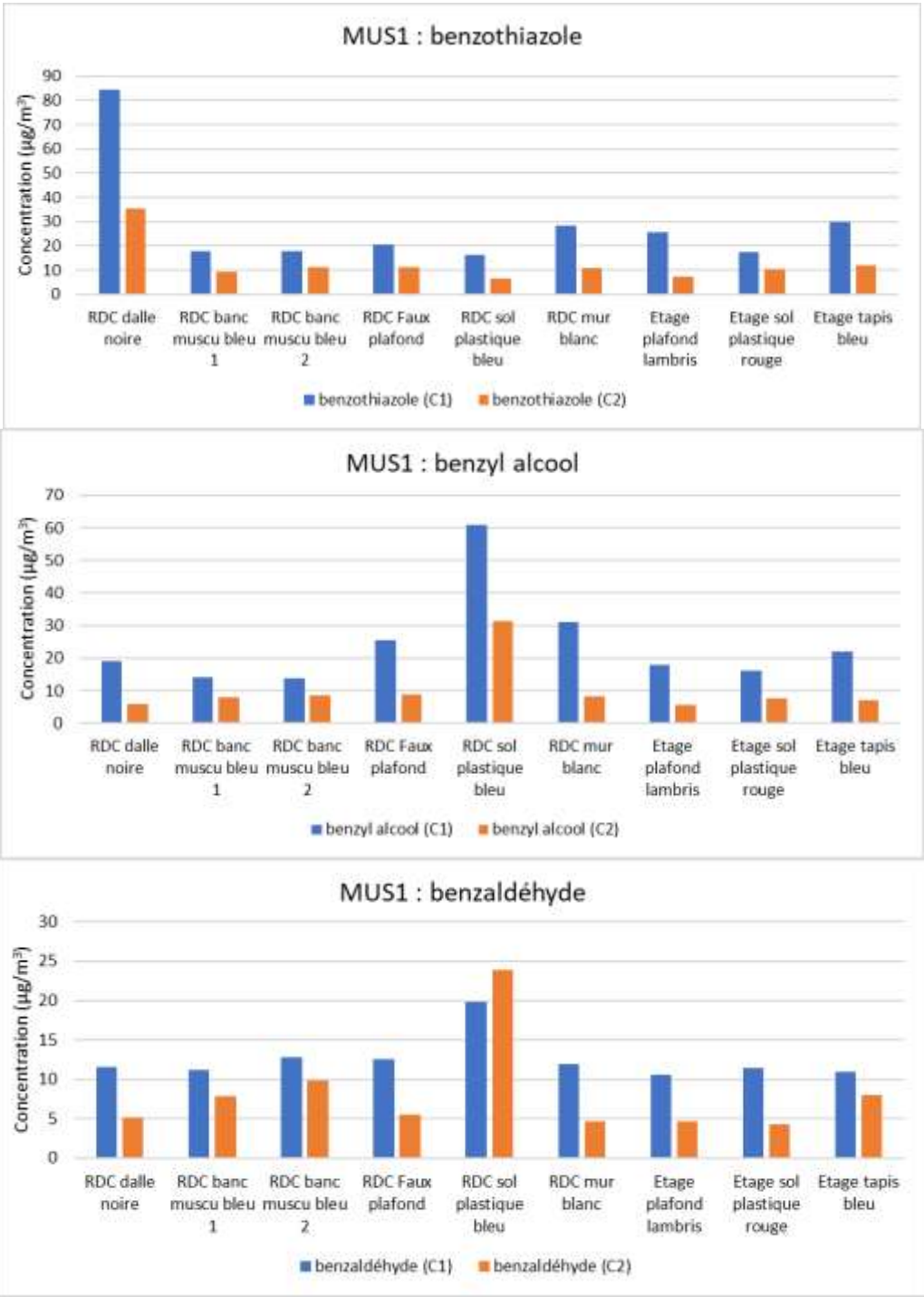

Figure 31 : Concentration à l'interface matériau/air des COV ciblés pour les 8 matériaux de MUS1

5.1.2.4. Sorption et réémission de COV à la surface de matériaux

Les mesures de concentrations à l'interface matériau/air (y0) permettent de mettre en évidence des cas de sorption et réémission de COV sur des surfaces de matériaux. C'est le cas du benzothiazole qui, dans la salle MUS1, a logiquement comme source principale la dalle noire en caoutchouc recyclé, mais qui présente des concentrations à la surface des autres matériaux supérieures à la concentration dans l'air. Ces autres matériaux (lambris, murs peints, …) ne sont pas censés avoir du benzothiazole dans leur composition. Ces concentrations à la surface de ces matériaux proviennent probablement d'une

sorption/réémission du COV. Ce processus est également observé pour le benzylalcool et le benzaldéhyde dans la salle MUS1 et dans une moindre mesure pour le benzylalcool et le 1-(2-méthoxy-1-méthyléthoxy)-2-propanol dans la salle MOT2. Seul le 1,3-dichloropropanol, le COV le plus volatil des 5 composés étudiés, n'est présent que sur une seule surface intérieure de la salle DOJ2 (tatamis).

5.1.3. Relation entre les émissions des matériaux sources et les concentrations de COV dans l'air

Cette partie traite de l'application d'un modèle monozone utilisant les concentrations gazeuses à la surface des matériaux (appelée y0 ou C_{sij} dans les équations suivantes), le taux de renouvellement de l'air et l'estimation du coefficient de transfert convectif pour prédire les concentrations dans l'air des trois salles. Ce modèle monozone a été développé dans le cadre de la thèse de D. Bourdin (Bourdin et al., 2014) et a fait par la suite l'objet d'applications dans le projet ADEME COVBAT-BOIS (Mocho et al., 2017).

Dans ce type de modèle monozone, la pièce est délimitée par une enveloppe, qui constitue l'interface d'échange entre l'extérieur et l'intérieur de la zone, dans laquelle les grandeurs intensives (température, pression, concentration en polluants) sont supposées uniformes. Le modèle repose sur l'application de la conservation de la matière dans la zone considérée, conduisant à l'$\frac{dC_i}{dt} = a \times C_{iout} - a \times C_i + \sum_{j=1}^{m} Q_{ij}$ Équation *1* suivante :

$$\frac{dC_i}{dt} = a \times C_{iout} - a \times C_i + \sum_{j=1}^{m} Q_{ij} \qquad \text{Équation 1}$$

où C_i est la concentration moyenne du polluant i dans l'air de la zone (µg/m³), Q_{ij} le flux massique de polluant par unité de volume associé au matériau j (source ou puits de polluant) (µg/(m³.h)), a le taux de renouvellement d'air (h^{-1}), C_{iout} la concentration moyenne du polluant i dans l'air extérieur (µg/m³), t le temps (h) et m le nombre de matériaux présents dans la zone.

A l'interface matériau/air, le transfert de COV (ou émission) dans la couche limite peut s'exprimer de la manière suivante :

$$Q_{ij} = h_{ij} \times \frac{A_j}{V} \times (C_{sij} - C_i) \qquad \text{Équation 2}$$

avec h_{ij} le coefficient de transfert convectif du pollutant i dans la couche limite sur le matériau j (m/h), C_{sij} la concentration en polluant i dans la phase gazeuse à la surface du matériau j (µg/m³), A_j la surface de contact air/matériau j (m²) et V le volume de la zone étudiée (m³).

En reportant l'expression de Q_{ij} de l'équation [2] dans l'équation [1], on aboutit à l'équation différentielle d'ordre 1 :

$$\frac{dC_i}{dt} = a \times C_{iout} + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V} \times C_{sij} - \left(a + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V}\right) \times C_i \qquad \text{Équation 3}$$

Cette équation différentielle a une solution analytique en considérant que h_{ij}, C_{sij} et a soient constants :

$$C_i(t) = \frac{a \times C_{iout} + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V} \times C_{sij}}{a + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V}} \times \left(1 - e^{-\left(a + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V}\right) \times t}\right) + C_{i0} \times e^{-\left(a + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V}\right) \times t} \qquad \text{Équation 4}$$

Avec C_{io} la concentration initiale en COVi dans l'air intérieur. Les termes exponentiels tendent vers 0 quand t augmente. La concentration C_i tend alors vers une valeur constante, on dit que le système a atteint un régime permanent :

$$C_i(t) = \frac{a \times C_{iout} + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V} \times C_{sij}}{a + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} \times \frac{A_j}{V}} \qquad \text{Équation 5}$$

Le coefficient de transfert convectif (h_{ij}) du polluant i pour le matériau j est estimé grâce au programme PARAMS de l'US EPA (Guo, 2002). Il implique le calcul du coefficient de diffusion du COV dans l'air et des nombres de Reynolds, Schmidt et Sherwood. Les paramètres pris en compte pour ces calculs sont : la longueur caractéristique approximée par la racine carrée de la surface du matériau en contact avec l'air et des vitesses d'air allant de 0,01 à 0,05 m/s (gamme caractéristique des environnements intérieurs) (Guo, 2002).

Les Tableau 12 à Tableau 14 récapitulent les paramètres pris en compte dans l'application du modèle pour cinq COV (le Benzothiazole, le 1,3-dichloropropanol, le 1-(2-méthoxy-1-méthyléthoxy)-2-propanol, le Benzylalcool et le Benzaldéhyde) quantifiés à la fois sur des surfaces intérieures avec la méthode MOSEC-SPME et dans l'air. Un métrage des surfaces intérieures a été réalisé dans les trois salles selectionnées. Le taux de renouvellement de l'air a été estimé dans les trois salles en analysant la décroissance de la concentration en CO_2 après les phases d'occupation des salles conformément à la méthode décrite dans Plaisance et al. (2013). En raison de contraintes logistiques, les prélèvements des COV dans l'air et ceux réalisés sur les surfaces intérieures n'ont pas tous été faits le même jour durant les deux séries de mesures (de 0 à 3 jours d'intervalle). Nous avons donc choisi de considérer les moyennes des concentrations à la surface des matériaux des deux séries pour estimer les concentrations modélisées et de comparer ces dernières à celles mesurées dans l'air. Les résultats présentés dans les tableaux suivants mettent en évidence les sources principales des COV (valeurs reportées en gras dans les trois tableaux). Les concentrations gazeuses à la surface de ces matériaux sources sont de 6 à 32 fois supérieures aux concentrations mesurées dans l'air intérieur

	Surface (m^2)	1,3-dichloropropanol y0 ($\mu g/m^3$) Moyenne [Min_Max]
Mousse murale : Tatami : Dalles de faux-plafond : Murs peints :	106 215 224 57	< LD **24,2** [12,5-34,5] Non mesurée < LD
Coefficients de transfert convectif (m/h) : Pour une vitesse d'air de 0,01 m/s : Pour une vitesse d'air de 0,05 m/s :		 0,15 0,34
Concentration dans l'air ($\mu g/m^3$) : Moyenne [Min_Max]		0,76 [0,49_1,03]
Volume de la pièce (m^3) :	731	
Taux de renouvellement de l'air (h^{-1}) :	1,18	

Tableau 12 : Paramètres pour l'application du modèle au COV mesuré dans DOJ2.

	Surface (m^2)	Benzothiazole y0 ($\mu g/m^3$) Moyenne [Min_Max]	Benzylalcool y0 ($\mu g/m^3$) Moyenne [Min_Max]	Benzaldehyde y0 ($\mu g/m^3$) Moyenne [Min_Max]
Dalles en caoutchouc recyclé au RDC : **Sol plastique bleu au RDC** : Dalles de faux-plafond au RDC : Murs peints : Tapis bleu à l'étage : Sol plastique rouge à l'étage : Lambris au plafond : Revêtement PVC bleu sur appareils de musculation :	101 123 162 309 32 123 96 7,8	**60** [35_84] 11,5 [6,7_16,3] 16,0 [11,3_20] 19,6 [10,7_28] 21 [12_30] 14,0 [10,5_17,5] 16,5 [7,3_26] 13,5 [9,2_17,9]	12,5 [6,0_19,1] **46,1** [31,3_61] 17,1 [8,7_25,4] 19,7 [8,3_31,1] 14,4 [7,0_21,9] 11,9 [7,8_16] 11,8 [5,6_18] 11,0 [7,9_14]	8,4 [5,1_11,6] **21,9** [19,8_23,9] 9,1 [5,5_12,6] 8,3 [4,6_11,9] 9,5 [8,0_12] 7,9 [4,3_11,5] 7,6 [4,6_10,6] 10,4 [7,9_12,8]
Coefficients de transfert convectif (m/h) Pour une vitesse d'air de 0,01 $m.s^{-1}$: Pour une vitesse d'air de 0,05 $m.s^{-1}$:		de 0,14 à 0,35 de 0,31 à 0,79	de 0,14 à 0,35 de 0,31 à 0,78	de 0,14 à 0,35 de 0,31 à 0,79
Concentration dans l'air intérieur ($\mu g/m^3$):		8,7 [7,85_9,55]	7,95 [5,1_10,8]	2,7 [2,2_3,2]
Concentration dans l'air extérieur ($\mu g/m^3$)				0,25
Volume de la pièce (m^3)	1 350			
Taux de renouvellement de l'air (h^{-1})	0,22			

Tableau 13 : Paramètres pour le modèle appliqué aux COV mesurés dans la salle MUS1.

	Surface (m^2)	Benzylalcool y0 ($\mu g/m^3$) Moyenne [Min_Max]	2-methoxy-1-methylethoxy)-2-propanol y0 ($\mu g/m^3$) Moyenne [Min_Max]
Dalle de faux-plafond Sol plastique **Rideaux en plastique** Mur peint **Objets en mousse dans la salle (tapis de sol, objets de jeux)**	87 87 13 25 42,5	2,5 [1,8_3,3] 0,7 [0_1,4] **5,3** [4,6_5,9] 1,3 [0,3_2,3] 2,4 [1,6_3,3]	0,9 [0_1,7] 0,7 [0_1,4] 2,1 [0_4,2] <LD **4,0** [1,1_6,8]
Coefficients de transfert convectif (m/h) Pour une vitesse d'air de 0,01 m/s : Pour une vitesse d'air de 0,05 m/s :		de 0,19 à 0,31 de 0,43 à 0,69	de 0,17 à 0,27 de 0,38 à 0,61
Concentration dans l'air ($\mu g/m^3$) : Moyenne [Min_Max]		0,35 [0,14_0,55]	0,55 [0,54_0,55]
Volume de la pièce (m^3)	242		
Taux de renouvellement de l'air (h^{-1})	0,41		

Tableau 14 : Paramètres pour le modèle appliqué aux COV mesurés dans la salle MOT2.

Les concentrations moyennes estimées par le modèle (Eq. 5) pour cinq COV dans les trois salles sont ensuite comparées aux moyennes des concentrations mesurées en considérant deux vitesses d'air à la surface des matériaux différentes. Le modèle fournit des prédictions proches des concentrations moyennes mesurées pour une vitesse d'air à la surface des matériaux de 0,01 m/s (Figure 32). Une corrélation similaire est obtenue avec une vitesse d'air de 0,05 m/s avec une pente de 1,39 et un coefficient R^2 de 0,96.

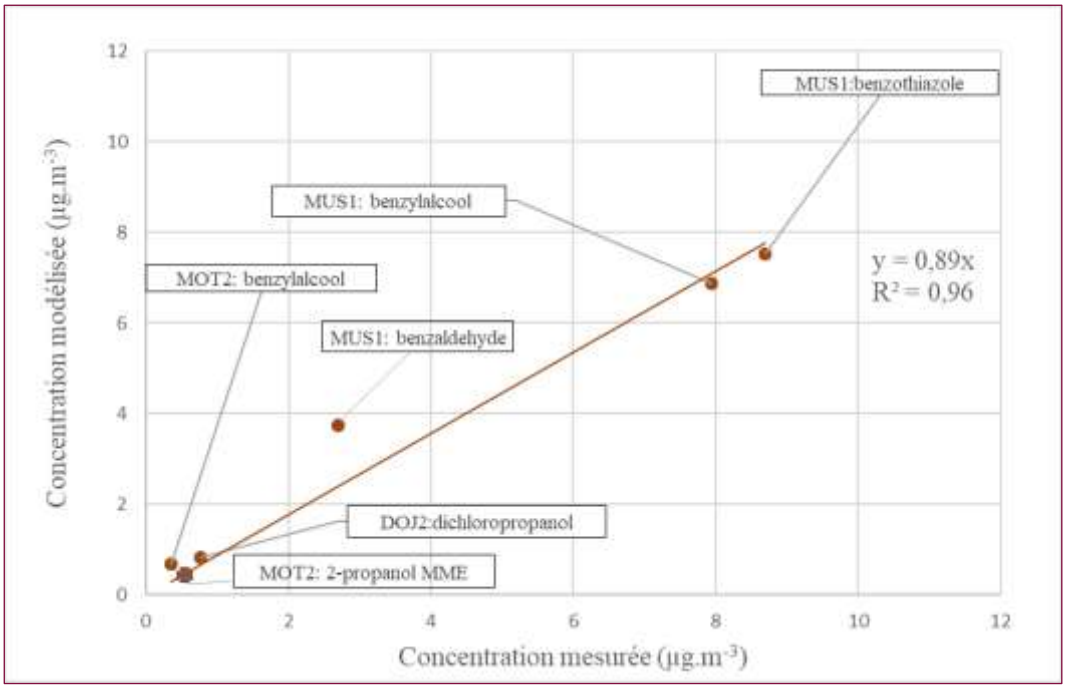

Figure 32 : Comparaison des concentrations moyennes modélisées et mesurées pour une vitesse d'air à la surface des matériaux de 0,01 m/s.

Pour la salle MUS1, il est vraisemblable que les trois composés (benzothiazole, benzylalcool et benzaldéhyde) proviennent du matériau ayant la concentration à sa surface (y0) la plus élevée et que la présence de ces composés sur les autres surfaces est due au processus de sorption/réémission. En se basant sur l'équation 5, un bilan des contributions de la source principale et de celles des autres matériaux (considérées ici comme provenant du processus de sorption/réémission) à la concentration dans l'air intérieur peut être réalisé. Le Tableau 15 présente l'estimation de ces contributions. Plus des 2/3 de la concentration dans l'air intérieur proviendrait du processus de sorption/réémission et moins d'1/3 serait dû à la source principale. Cette répartition est retrouvée pour les trois COV.

COV	Contribution de la source principale (%)	Contribution des autres matériaux (%)	Contribution de l'air extérieur (%)
Benzothiazole	32,5 Source principale : Dalles en caoutchouc recyclé au RDC	67,5	0
Benzylalcool	31,7 Source principale : Sol plastique bleu au RDC	68,3	0
Benzaldéhyde	27,7 Source principale : Sol plastique bleu au RDC	68,1	4,2

Tableau 15 : Contributions aux concentrations des 3 COV dans l'air intérieur de la salle MUS1.

5.2. Composés organiques semi-volatils et non volatils dans les 3 salles et pour les deux campagnes

Les analyses de COSV dans l'air pour le Lot 4 ont fait l'objet d'une modification du protocole par rapport au Lot 3. En effet, afin de pouvoir établir les coefficients de partage des COSV entre les phases gazeuses et particulaires de l'air, ces phases ont été analysées séparément. Cependant, afin de pouvoir comparer les résultats des Lots 3 et 4, les concentrations mesurées dans les phases gazeuses et particulaires ont été sommées dans les graphiques suivants.

5.2.1. COSV dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) puis, COSV et ammoniums quaternaires dans les poussières

Les concentrations totales en COSV mesurées dans les deux campagnes du Lot 4 confirment les observations du Lot 3, en termes de familles principalement retrouvées dans l'air : phtalates et retardateurs de flamme dans le dojo (DOJ2), phtalates dans la salle de motricité (MOT2), et phtalates et HAP dans la salle de musculation (MUS1), malgré quelques variations sur les grandeurs des concentrations mesurées (Figure 33). De même pour les poussières, la prédominance de la contribution des phtalates se confirme, en particulier dans la salle de motricité (Figure 34).

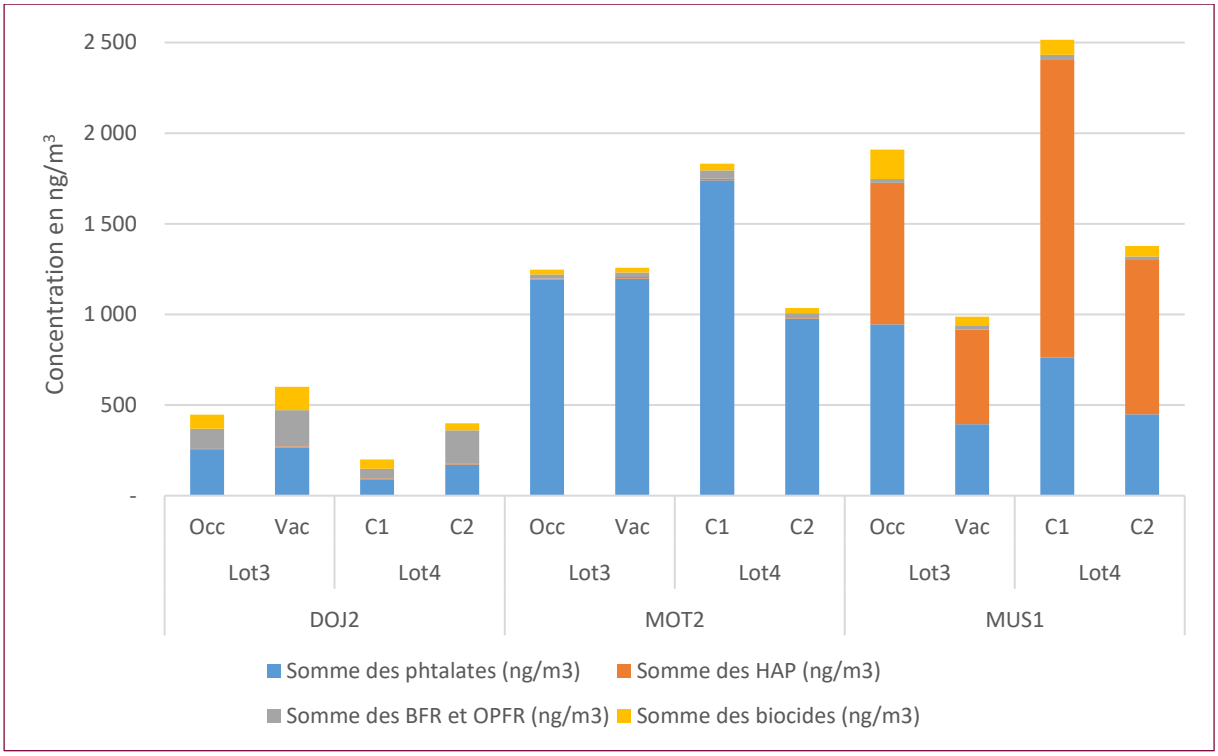

Figure 33 : COSV dans l'air des salles de sport du lot 4 (DOJ2, MOT2, MUS1)

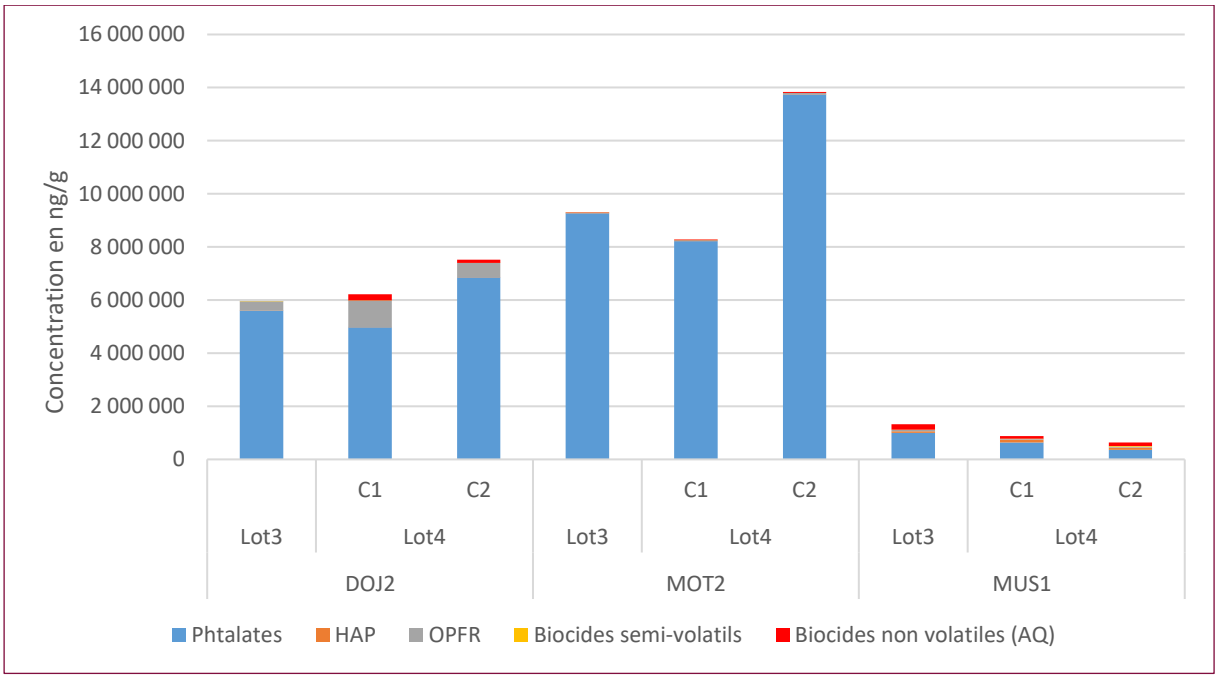

Figure 34 : COSV et ammoniums quaternaires (AQ) dans les poussières des salles de sport du lot 4 (DOJ2, MOT2, MUS1)

5.2.2. Phtalates dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières

Les concentrations de phtalates mesurées dans l'air des trois salles de sport sont cohérentes d'une campagne à l'autre, et signent des profils caractéristiques de chaque salle de sport, malgré quelques fluctuations des concentrations en DiBP (Figure 35). Dans les poussières, les concentrations importantes de DEHP se confirment pour la salle de motricité avec une concentration maximale de 12,2 mg/g mesurée lors de la deuxième campagne du Lot 4, et dans une moindre mesure, celles du DiNP dans le dojo avec une concentration maximale de 6,6 mg/g lors de cette même campagne (Figure 36).

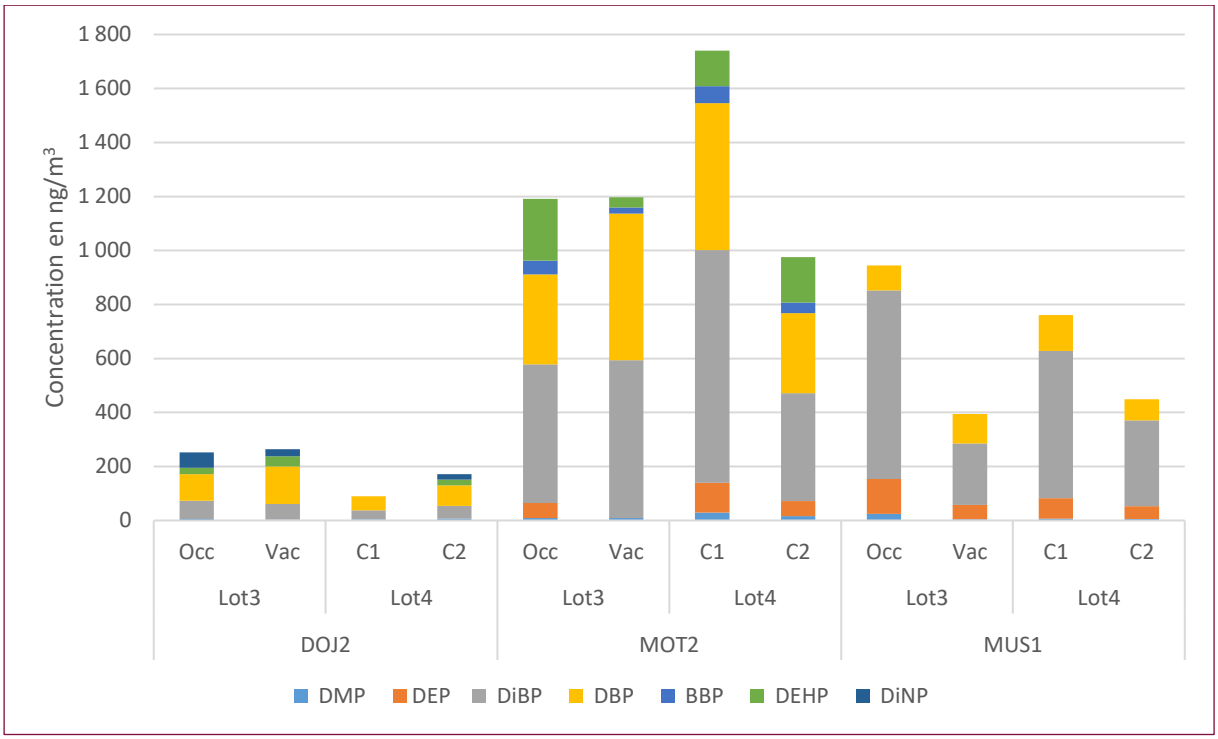

Figure 35 : phtalates dans l'air des salles de sport du Lot 4

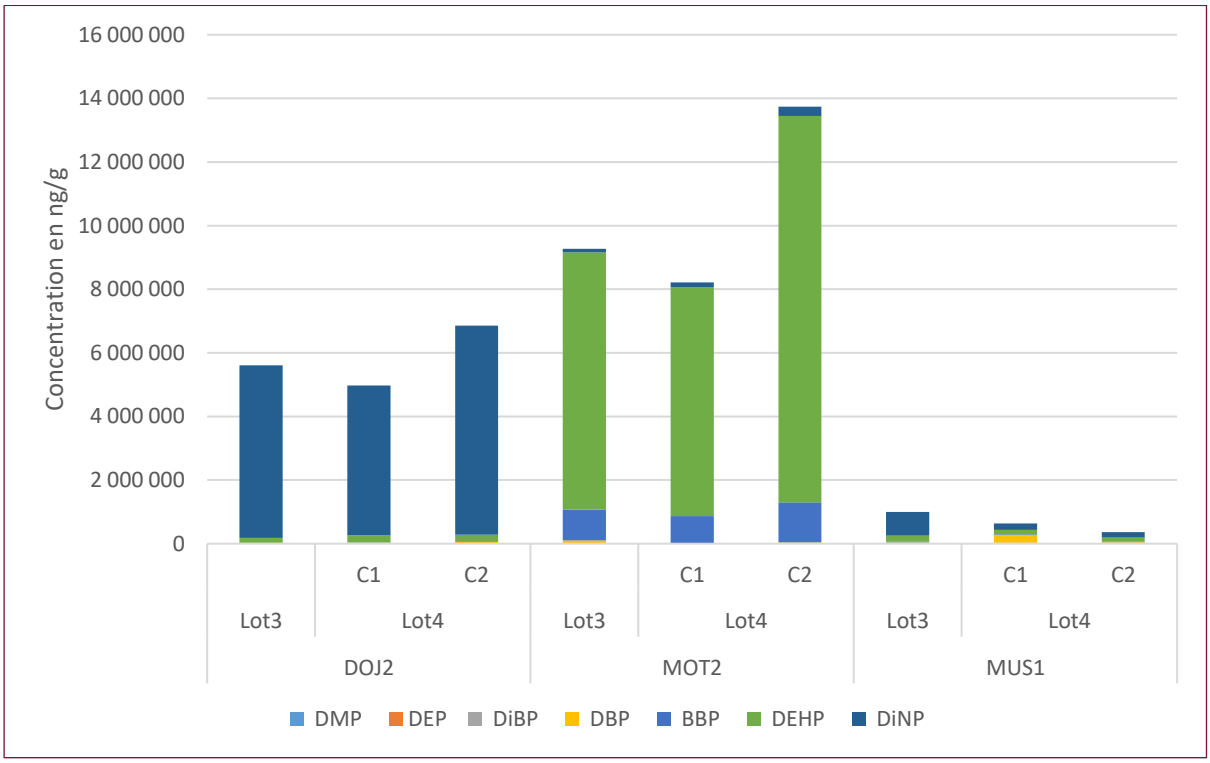

Figure 36 : phtalates dans les poussières des salles de sport du Lot 4

5.2.3. HAP dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières

La présence caractéristique des HAP, et notamment du fluorène et du phénanthrène, se confirme dans l'air de la salle de musculation MUS1 (Figure 37), de même que la contribution multi-substances, mais avec

une prédominance du phénanthrène, du fluoranthène et du pyrène, dans les poussières de cette même salle (Figure 38).

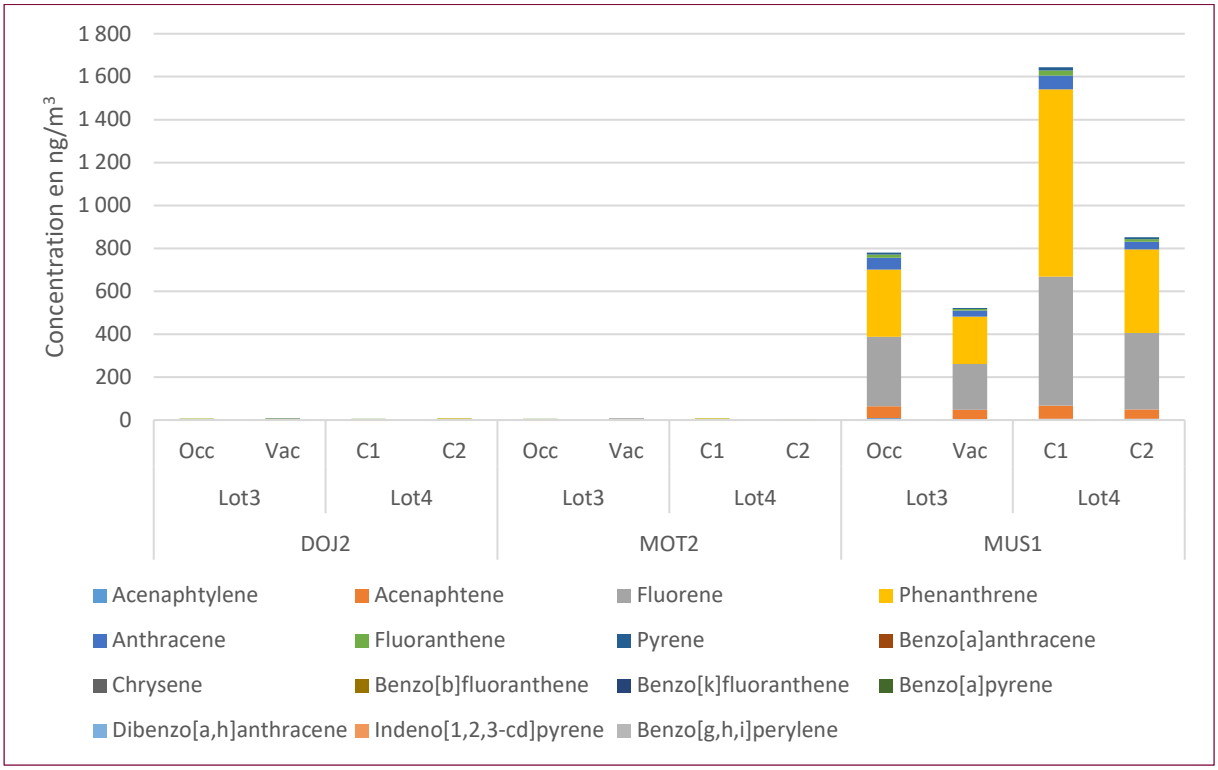

Figure 37 : HAP dans l'air des salles de sport du Lot 4

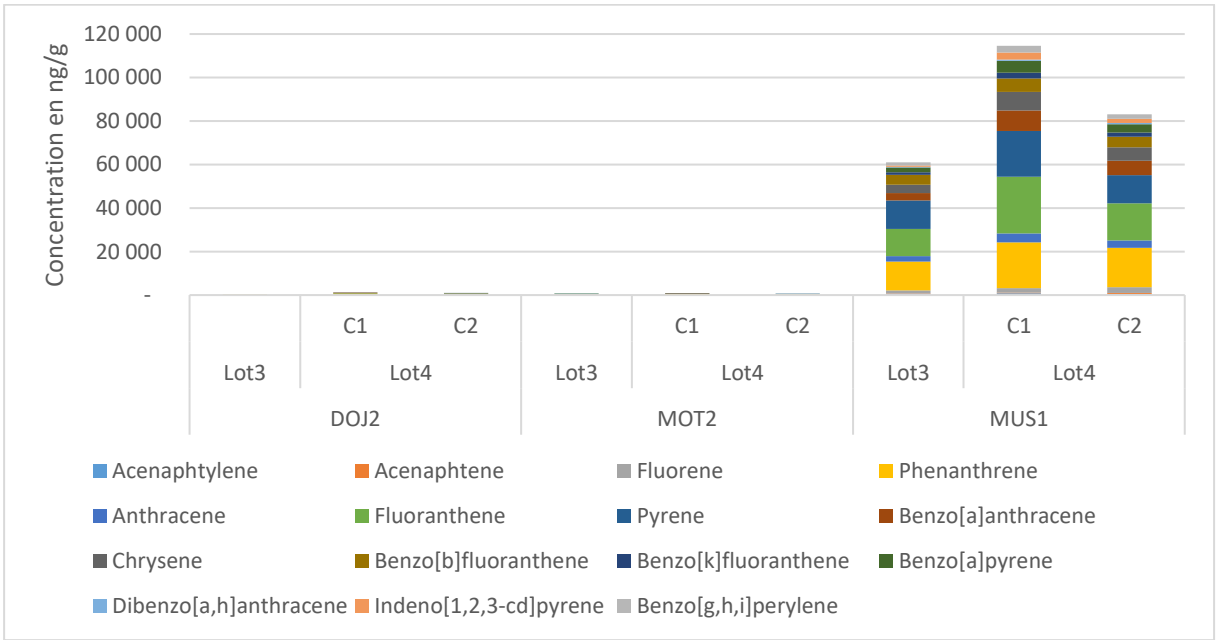

Figure 38 : HAP dans les poussières des salles de sport du Lot 4

5.2.4. OPFR dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières

Les substances identifiées dans l'air du dojo DOJ2, TCPP et EHDPP, sont également retrouvées dans les deux campagnes du lot 4, avec toutefois une variation importante de la concentration en EHDPP, de

26 ng/m³ lors de la première campagne à 143 ng/m³ lors de la deuxième campagne (Figure 39). Les sources d'EHDPP sans le dojo pourraient donc être davantage liées à l'occupation de la salle (chaussures, détergents, parfums et désodorisants, etc.) (ECHA, 2023) qu'à son équipement. De même dans les poussières, même si les substances initialement identifiées dans le lot 3 (TDCPP, EHDPP et TPP) sont confirmées dans le lot 4, la concentration du TPP est fluctuante avec une concentration maximale de 721 µg/g mesurée lors de la première campagne du lot 4 (Figure 40).

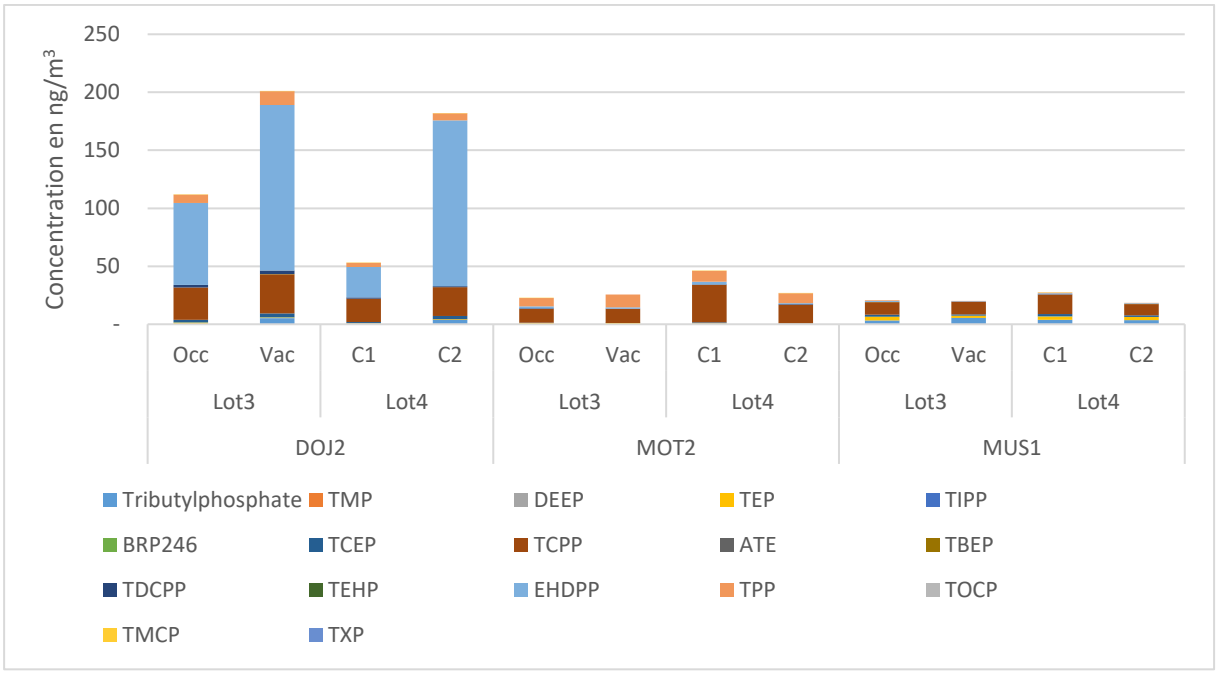

Figure 39 : retardateurs de flamme dans l'air des salles de sport du Lot 4

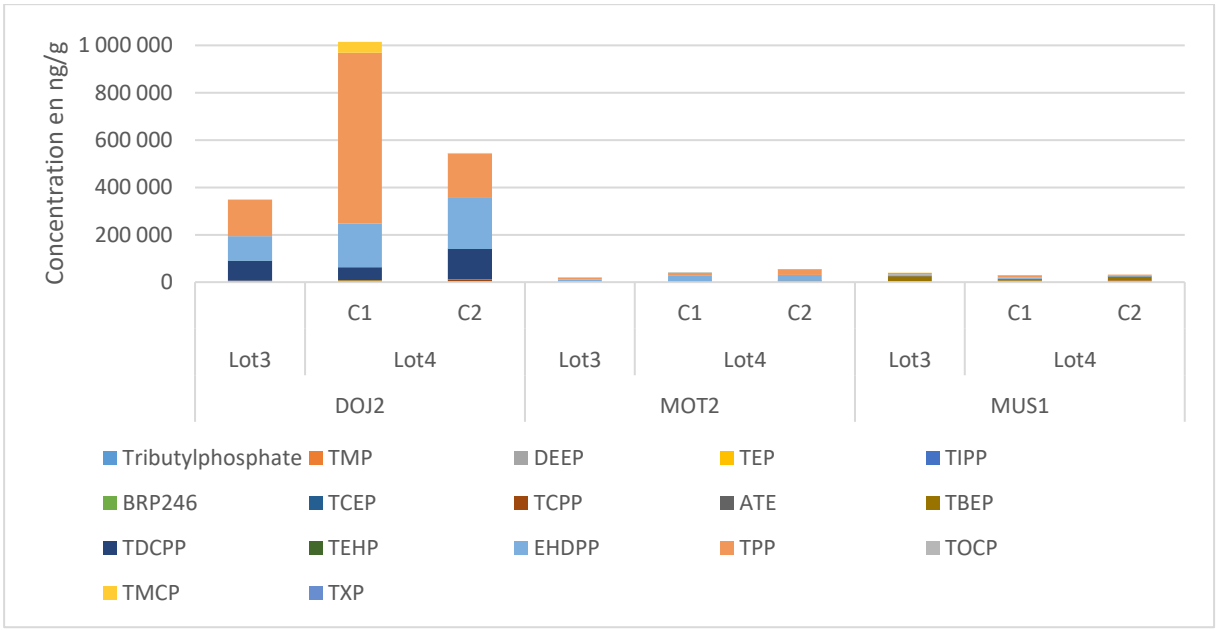

Figure 40 : retardateurs de flamme dans les poussières des salles de sport du Lot 4

5.2.5. Biocides semi-volatils dans l'air (phase gazeuse et particules en suspension) et les poussières

Les profils de contamination de l'air des trois salles de sport en biocides semi-volatils sont un peu moins caractéristiques de chaque salle de sport, avec la contribution du galaxolide et de la benzophénone, ainsi que du 4-tert-butylphénol dans le dojo et la salle de musculation (Figure 41). En revanche la poussière de la salle de musculation est plus caractérisée par sa concentration en benzophénone, jusqu'à 20 µg/g lors de la deuxième campagne du lot 4 (Figure 42).

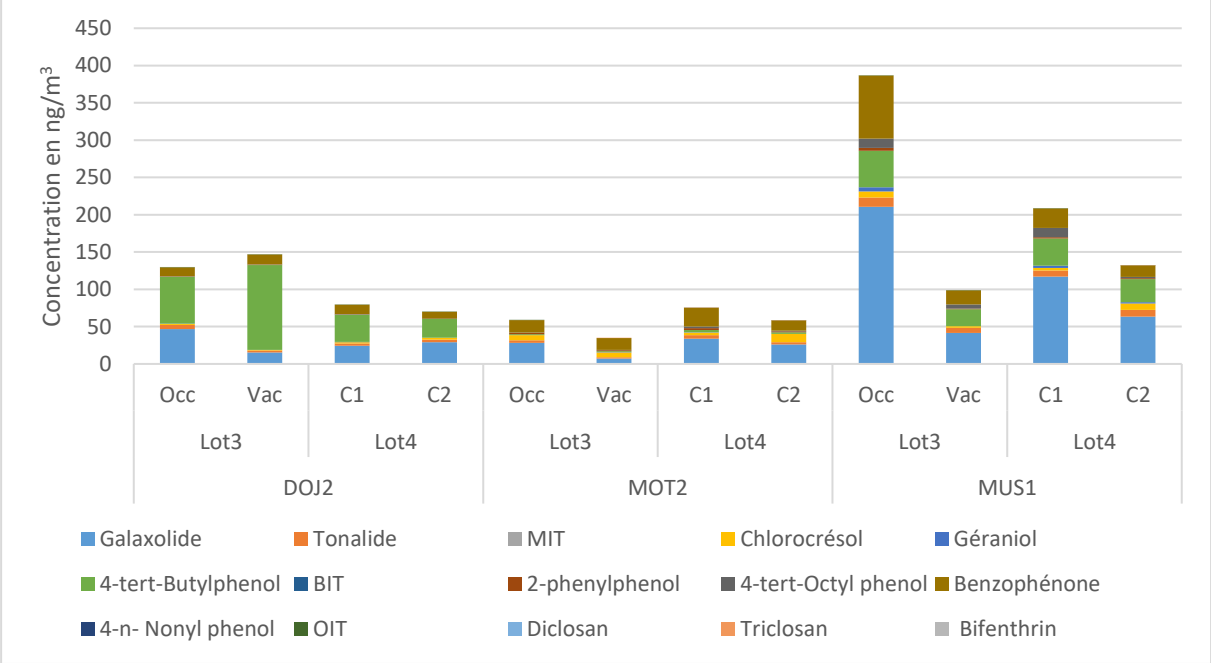

Figure 41 : biocides semi-volatils dans l'air des salles de sport du Lot 4

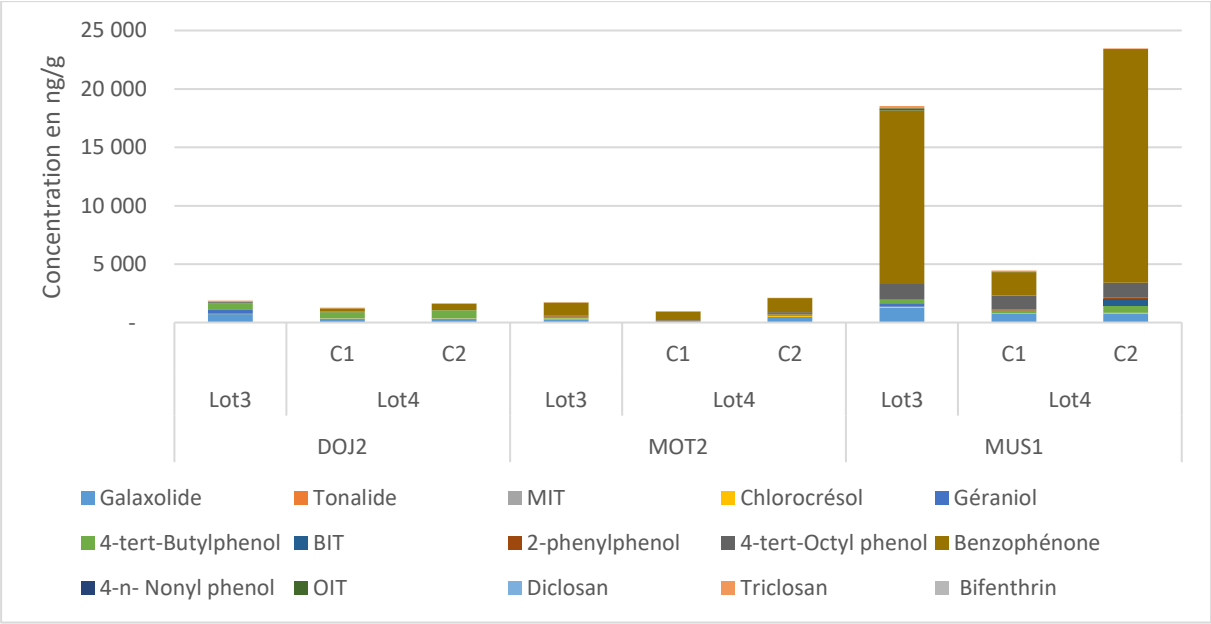

Figure 42 : biocides semi-volatils dans les poussières des salles de sport du Lot 4

5.2.6. Biocides non-volatils (ammoniums quaternaires) dans les poussières

La présence d'ammoniums quaternaires dans les poussières concerne davantage le dojo et la salle de musculation que la salle de motricité. Dans le dojo, la concentration en C10-DDAC est assez constante (environ 96 µg/g), tandis que le C12-BAC est principalement présent lors de la première campagne (106 µg/g). En revanche, le ratio entre C10-DDAC et C14-BAC est plus constant, ce qui peut suggérer leur utilisation dans une formulation commune (Figure 43).

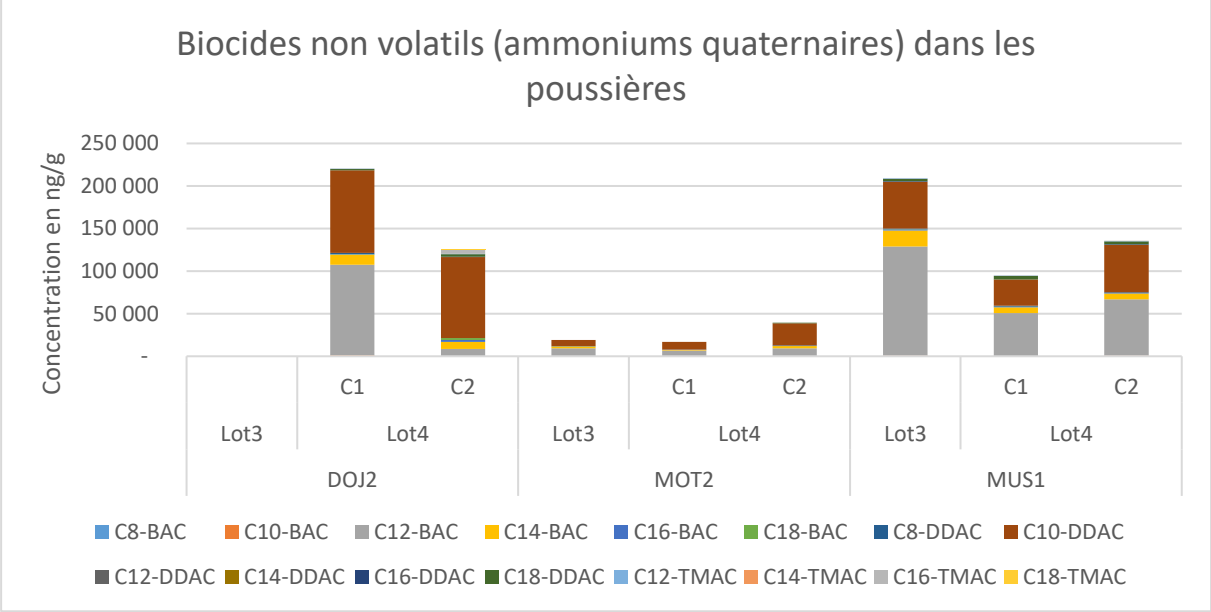

Figure 43 : biocides non-volatils (ammoniums quaternaires) dans les poussières des salles de sport du Lot 4 (note, pas de mesure pour le Lot3 de DOJ2 en raison d'une quantité insuffisante de poussière pour l'analyse)

5.2.7. Coefficients de partage

Pour évaluer les coefficients de partage des COSV entre les phases gazeuse et particulaire de l'air, la formule suivante est appliquée :

$$Kp = \frac{F}{CgTSP}$$

Avec Kp le coefficient de partage particules / air en $m^3/\mu g$;
F, la concentration de COSV dans la phase particulaire $\mu g/m^3$;
Cg, la concentration de COSV dans la phase gazeuse en en $\mu g/m^3$;
et TSP la concentration des particules en suspension dans l'air (en $\mu g/m^3$).
Plus la valeur de Kp est importante, plus le COSV se retrouvera majoritairement dans les particules en suspension.

Pour évaluer les coefficients de partage des COSV entre la phase gazeuse de l'air et les poussières sédimentées, c'est la formule suivante qui est appliquée :

$$Kd = \frac{Xd}{Cg}$$

Avec Kd le coefficient de partage poussière sédimentées / air en $m^3/\mu g$;
Xd, la concentration des COSV dans les poussières sédimentées en g/g ;
Et Cg, la concentration de COSV dans la phase gazeuse en en $\mu g/m^3$.

Une valeur de Kd élevée désignera une partition du COSV avec une fraction élevée dans les poussières sédimentées

5.2.7.1. Détermination des masses de particules collectées dans les salles de sport

En parallèle des prélèvements d'air pour l'analyse des COSV, un second prélèvement a été réalisé avec le même dispositif, pour l'évaluation de concentration massique de particules en suspension. Cette évaluation a été sous-traitée à l'INERIS, qui l'a réalisée au moyen de mesures gravimétriques (Tableau 16). Toutefois des problèmes liés à la dégradation des filtres pendant le prélèvement n'ont pas permis de conclure sur une masse certifiée pour certains prélèvements, indiqués en gris.

	DOJ2 C1	DOJ2 C2	MOT2 C1	MOT2 C2	MUS1 C1	MUS1 C2
Volume prélevé (m^3)	11,4	12,3	11,6	11,8	11,7	11,9
Masse de particules (µg)	117	211	229	148	28	136
Concentration des particules TSP (µg/m^3)	10,3	17,1	19,8	12,5	2,4	11,5

Tableau 16 : concentration des particules en suspension dans les salles de sport du Lot 4. En gris, masses indicatives.

Ainsi, les coefficients de partage fournis dans le paragraphe suivant sont donnés qu'à titre indicatif pour les salles concernées.

5.2.7.2. Coefficients de partage Kp

Les Kp ont pu être déterminés pour les substances semi-volatiles quantifiées à la fois dans la phase gazeuse de l'air et dans sa phase particulaire (Tableau 17). Les valeurs de Kp se répartissent entre $8,5\times10^{-5}$ et 1 $m^3.\mu g^{-1}$ pour celles qui sont associées à des concentrations en particules en suspension validées. Les valeurs de Kd les plus faibles sont observées pour les biocides et des valeurs intermédiaires sont obtenues pour les phtalates. Quelques valeurs élevées de Kp > 0,9 $m^3.\mu g^{-1}$ (logKp> -0,03) sont relevées pour les OPFRs, dont la majorité sont reportées à titre indicatif. Ces valeurs ont pu être comparées aux travaux de Wei et al (2016) et de Bahrami et al. (2024). Les Kp estimés dans les salles de sport s'avèrent être plus élevés ou dans la fourchette haute de ceux reportés dans la littérature.

log(Kp en $m^3/\mu g$)	DOJ2 C1	DOJ2 C2	MOT2 C1	MOT2 C2	MUS1 C1	MUS1 C2	Wei 2016 (min/max)	Bahrami 2024 (min max)
DiBP			-1,41	-0,49	-1,13	-1,40	-5,72/-2,03	-4,07/-0,28
DBP			-0,91		-0,65	-0,89	-4,70/-1,90	-4,00/-0,89
DEEP	-1,20	-1,09						
TEP	-1,35	-1,00	-1,59	-1,34	-1,06	-1,72		
TCEP					0,59			
TDCPP	-0,40							
EHDPP	-0,43	2,14	0,03		0,67			
TPP	-0,19		-0,03		0,90			
Galaxolide		-2,02		-2,41	-2,13	-2,24	-5,04/-2,42	
Chlorocrésol			-3,57					

4-tert-Butylphenol		-3,32	-3,19			-4,07	-7,44/-3,89	
2-phenylphenol		-1,89	-2,69	-2,70				
4-tert-Octyl phenol			-3,22		-2,35	-2,24	-4,79/-2,49	
Benzophénone		-1,28	-2,47	-2,43				

Tableau 17 : coefficients de partage Kp dans les salles de sport (en grisé, valeurs indicatives)

5.2.7.3. Coefficients de partage Kd

Les Kd ont pu être déterminés pour les substances semi-volatiles quantifiées à la fois dans la phase gazeuse de l'air et dans les poussières sédimentées (Tableau 18). Des valeurs faibles de Kd sont observées pour les biocides et les HAP les plus volatils (acenaphtylène, acenaphtène et fluorène). Des valeurs intermédiaires sont observées pour les phtalates, les HAP les moins volatils (fluroanthène et pyrène) et les OPFR les plus volatils (DEEP et TEP). Enfin des valeurs de Kd élevés sont observées pour les OPFR les plus lourds (TCEP, TDCPP, EHDPP et TPP). La comparaison avec les données de la littérature fournies par Wei et al. (2016) montre que les valeurs de Kd obtenues dans cette étude sont globalement plus élevées.

log(Kd en $m^3/\mu g$)	DOJ2 C1	DOJ2 C2	MOT2 C1	MOT2 C2	MUS1 C1	MUS1 C2	Wei et al.,2016 (min/max)
DMP					-1,11		-6,39/-5,48
DiBP			-1,48	-0,43	-1,18	-0,75	-4,86/-3,38
DBP			-1,22		0,46	-0,35	-4,74/-3,17
Acenaphtylene					-0,93	-1,05	
Acenaphtene					-2,29	-1,99	-7,04/-6,48
Fluorene	-0,72	-0,74	-1,20	-0,79	-2,46	-2,12	-6,90/-6,07
Phenanthrene	-0,68	-1,17	-1,18	-1,11	-1,62	-1,33	-6,06/-5,32
Anthracene					-1,18	-1,01	-6,06/-5,29
Fluoranthene	-0,40	-0,61	-0,65		0,04	0,12	-4,93/-4,06
Pyrene					0,15	0,19	-5,38/-4,06
DEEP	-1,16	-1,01					
TEP	-0,44	0,20	-1,18	-1,39	-0,79	-1,46	
TCEP					1,25		
TDCPP	2,38						
EHDPP	1,53	3,56	2,35		1,96		
TPP	3,20		1,28		2,32		
Galaxolide	-1,87	-1,86		-1,71	-2,19	-1,88	-5,04/-2,42
Chlorocrésol	-1,57	-2,33	-2,02	-2,29	-1,92	-2,27	
4-tert-Butylphenol	-1,85	-1,55	-1,55	-1,21	-2,19	-1,72	-5,53/-5,35
2-phenylphenol	-1,26		-1,77	-1,00	-1,25	-0,99	
4-tert-Octyl phenol	-1,13		-1,68	-1,10	-1,01	-0,10	-4,15/-3,77
Benzophénone	-1,63	-0,95	-1,50	-1,03	-1,12	0,11	
Triclosan			-0,49				

Tableau 18 : coefficients de partage Kd dans les salles de sport

La régression linéaire entre les valeurs de log Kp et log Kd (Figure 44) montre qu'il y a un lien entre ces deux coefficients de partage. Ce lien est plus marqué lorsque toutes les valeurs de Kp sont incluses, y compris celles calculées à partir d'un TSP indicatif (n=40, Figure 44), que lorsque ces valeurs sont exclues (n=16, Figure 45) Dans les deux cas, l'équation de la régression linéaire diffère de celle reportée dans les travaux de Wei et al. (2016), y= x+0,92 avec R^2=0,88. A partir de cette équation log Kp= f (log Kd) établie avec les données de 72 COSV, Wei et al. (2016) en déduisent une relation empirique entre les deux coefficients de la forme : Kp= 8,32×Kd. Si on applique ce même procédé aux données reportées sur la Figure 44, on aboutit à l'équation empirique suivante : Kp = 0,034 Kd, c'est à dire à un ratio Kp/Kd très inférieur à celui donné par Wei et al. (2016). Dans l'étude de Weschler and Nazaroff (2010), le ratio Kp/Kd des COSV a été estimé à 4. Le faible ratio Kp/Kd obtenu dans cette étude semble être surtout lié à des teneurs élevées en COSV dans les poussières sédimentées. En effet, les Kp sont dans la fourchette haute des valeurs retrouvées dans la littérature. Par contre, celles du Kd les dépassent très largement. Ce faible ratio Kp/Kd peut être une caractéristique propre aux salles de sport, les données de la littérature n'incluant pas à ce jour ce type d'environnements intérieurs.

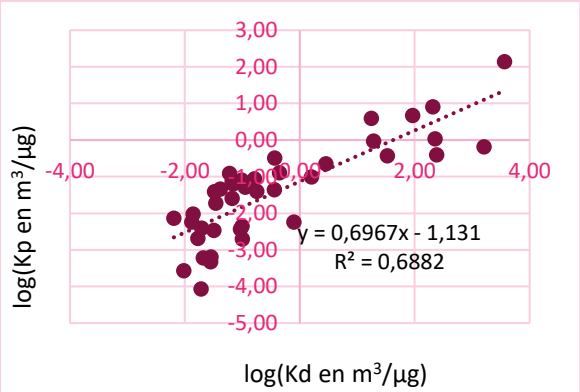

Figure 44 : régression linéaire des valeurs de log (Kp) et log (Kd). n = 40 points représentant chacun un COSV dans une salle de sport, pour lesquels à la fois le Kd et le Kp (indicatif ou validé) sont disponibles

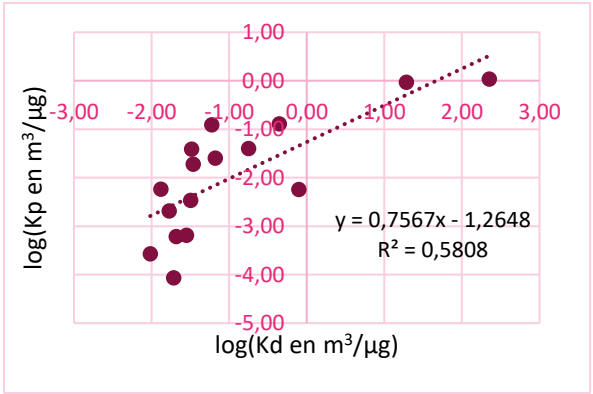

Figure 45 : régression linéaire des valeurs de log (Kp) et log (Kd). n=16 points représentant chacun un COSV dans une salle de sport, pour lesquels à la fois le Kd et le Kp (validé) sont disponibles

5.2.8. Identification des matériaux sources de COSV dans l'air des trois salles

Comme pour les COV (Cf. § 5.1.2), des prélèvements ont été réalisés avec la méthode MOSEC-SPME dans les trois salles sélectionnées dans le but d'identifier les matériaux sources de COSV en quantifiant les concentrations à l'interface matériau/air (y0) de deux phtalates, le dibultylphtalate (DBP) et le diisobutylphtalate (DiBP). Ces deux phtalates ont fait l'objet d'un étalonnage spécifique permettant de convertir la réponse obtenue par l'analyse en GC-MS de la fibre SPME (Aire de pic) en concentration dans l'air (µg/m³). Le protocole suivi pour cet étalonnage est décrit dans un article précédent (Plaisance et al., 2021). Les matériaux échantillonnés dans les trois salles sont les mêmes que pour les COV et le protocole d'échantillonnage est proche de celui présenté dans le § 5.1.2. Il diffère seulement par l'utilisation d'une autre fibre SPME, PDMS 100 µm, plus adaptée à l'échantillonnage des COSV (Ghislain et al., 2017) et par une durée de pose des cellules MOSEC plus longue (10 jours) avant le prélèvement SPME de manière à atteindre la stabilisation des concentrations gazeuses en COSV dans la cellule MOSEC (Plaisance et al., 2021). L'analyse a été réalisée en GC-MS/FID selon les conditions analytiques décrites par Souillier et al.

(2022) et en privilégiant la réponse en spectrométrie de masse (en mode SIM et m/z = 149). Des blancs de fibres non maîtrisés au moment de la préparation des deux campagnes d'échantillonnage et des résultats incohérents entre les deux séries de mesures ont conduit à considérer uniquement les données du DiBP et du DBP obtenues dans la salle de Motricité 2 (MOT2) et du DBP dans la salle de Musculation 1 (MUS1). Les résultats sont présentés dans les Tableau 19 et Tableau 20. Les gammes d'étalonnage s'étendent de 2,3 (LQ) à 10,6 µg/m³ pour le DiBP de la campagne 1 (C1), de 0,9 (LQ) à 1,6 µg/m³ pour le DBP de la série 1, de 7 (LQ) à 10,6 µg/m³ pour le DiBP de la campagne 2 (C2) et avec une gamme d'étalonnage en-dessous de la LQ (2,7 µg/m³) pour le DBP de la campagne 2 (liée à des blancs de fibres anormalement élevés dans la série 2). Moins de 15% des valeurs de y0 pour les deux composés appartiennent aux gammes d'étalonnage réalisées pour ces composés, ce qui contraint à une analyse qualitative uniquement. Le tapis de sol dans la salle MOT2 apparaît comme la source principale de DiBP, alors que le DBP a comme principale origine les rideaux en plastique. Pour la salle MUS1, le DBP provient principalement du tapis bleu à l'étage. Le processus de sorption/réémission identifié pour les COV semble aussi avoir une contribution et expliquer la présence de DiBP et de DBP sur la surface de matériaux qui ne sont pas connus pour contenir ces phtalates (cas du DiBP et du DBP identifiés sur les dalles de faux-plafond et le mur peint dans la salle MOT2).

Concentrations de DiBP et de DBP à l'interface matériau/air (y0) (µg/m³)							
Campagne	COSV	Pont vert (Objet de jeux)	Sol plastique	Tapis de sol rouge	Rideaux en plastique	Dalles de faux-plafond	Mur peint
C1	DiBP	20* / 18,9*	25*	66*	6,3	5,4	17,4*
C2		< 7	< 7	8,8	nd	nd	< 7
C1	DBP	1,6 / 1,4	1,0	3,0*	9,9*	3,1*	2,7*
C2		< 2,7	nd	nd	5,6*	nd	<2,7

Tableau 19 : Concentrations gazeuses y0 (µg/m³) mesurées à la surface des matériaux dans la salle MOT2 - : valeur au-delà de la gamme d'étalonnage donnée à titre indicatif. < LQ : inférieur à la limite de quantification (LQ = 10 × écart-type des blancs fibres (Plaisance et al., 2021)). nd : non détecté*

Concentrations de DBP à l'interface matériau/air (y0) (µg/m³)								
Campagne	Murs peints	Tapis bleu à l'étage	Sol plastique rouge à l'étage	Lambris plafond	Dalle noire au RDC	PVC bleu sur banc de muscu.	Dalles faux-plafond au RDC	Sol plastique bleu au RDC
C1	< 0,9	19,3*	< 0,9	< 0,9	< 0,9	< 0,9	1,8*	1,9*
C2	nd	10,5*	nd	3,7*	nd	nd	< 2,7	nd

Tableau 20 : Concentrations gazeuses y0 (µg/m³) de DBP mesurées à la surface des matériaux dans la salle MUS1 - : : valeur au-delà de la gamme d'étalonnage donnée à titre indicatif. < LQ : inférieur à la limite de quantification (LQ = 10 × écart-type des blancs fibres (Plaisance et al., 2021)). nd : non détecté*

5.3. Migration de COV et de COSV dans la sueur et la salive synthétiques

Un des objectifs du projet était de caractériser l'exposition humaine aux contaminants chimiques dans les salles de sport en fonction du type d'activité pratiquée. Afin de renseigner l'exposition par contact

dermique et contact main-bouche, la caractérisation de la migration dans la sueur et la salive synthétiques de polluants sélectionnés a été réalisée sur site. Cette exposition a été estimée à l'aide de simulants fournis par FCBA, type salive (Ionas et al., 2016), sueurs acide (EN 1811 – 2011) et basique (NF EN ISO 11641 – 2013) pour les essais de migration.

La méthode a consisté à mettre en contact 23,76 cm^2 de matériau avec un disque de papier filtre imprégné de 2 à 4 mL de simulant. Le temps de contact a été de 15 min, considéré dans les références et normes citées plus haut comme représentant une faible exposition (15 min par jour). La pression de contact a été de 70g/cm^2. Deux répliquats ont été réalisés par modalité lors des essais de migration : un répliquat a été analysé, le second a été conservé au congélateur.

Les prélèvements ont été réalisés in situ dans les 3 salles par l'IMT Mines Alès. Les analyses ont été réalisées en GC-MS par FCBA après une extraction des filtres par 5 mL de dichlorométhane.

5.3.1. Matériaux caractérisés et polluants recherchés

Les analyses de migration dans la sueur (acide + basique) et dans la salive ont été réalisées sur les 10 matériaux suivants :

DOJ2 : deux matériaux : tatamis et mousse protectrice murale

MOT2 : trois matériaux : tapis mousse rouge, pont mousse vert, sol plastique

MUS1 : cinq matériaux : 2 sols plastiques (RDC et étage), dalle noire (matériau recyclé), tapis bleu, banc de musculation.

Une liste de composés organiques (COSV + COV) à analyser a été élaborée à partir des résultats des analyses de poussières (Lot 3) pour les COSV et des analyses de l'air à la surface des matériaux (Lot 4, Campagne 1) pour les COV (voir Tableau 21 ci-dessous). Pour les COSV, cette liste considère les composés dont les concentrations sont les plus élevées dans les poussières.

Compte tenu de la problématique émergente sur les matériaux recyclés, l'analyse des métaux suivants : As, Co, Cu, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, et Zn, potentiellement contenus dans la dalle noire (MUS1), a été ajoutée aux analyses de composés organiques (analyse de métaux totaux par ICP-MS).

Substances et métaux recherchés	n° CAS	LD (ng/cm^2)	LQ (ng/cm^2)
DiNP	28553-12-0	4,2	21
DEHP	117-81-7	4,2	21
BBP	85-68-7	4,2	21
DBP	84-74-2	4,2	21
DiBP	84-69-5	4,2	21
TPP	115-86-6	25	84
EHDPP	1241-94-7	25	84
TBEP	78-51-3	25	84
TDCPP	13674-87-8	32	105
Fluoranthène	206-44-0	4,2	21
Phénanthrène	85-01-8	4,2	21
Pyrène	129-00-0	4,2	21
Benzophénone	119-61-9	4,2	21
1-3 dichloropropanol	96-23-1	4,2	21

2-propanol 1-(2-methoxy-1methylethoxy)	20324-32-7	25	84
Benzothiazole	95-16-9	4,2	21
Benzyl alcool	100-51-6	4,2	21
BAC (C8-C18)*	63449-41-2	3,0	10,5
Métaux (As, Co, Cu, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn)	-	3,0	10

*Tableau 21 : Substances organiques et métaux recherchés dans l'étude de migration dans la sueur et la salive, limites de détection (LD) et de quantification (LQ) - *« BAC » : chlorure de benzalkonium, représente un mélange de plusieurs composés regroupés sous l'entrée générique dans le règlement CLP : « Composés d'ammonium quaternaire, alkyl en C8-18 benzyl diméthyles, chlorures (CAS n° 63449-41-2).*

5.3.2. Résultats

Le Tableau 22 suivant présente uniquement les résultats des substances organiques pour lesquelles une concentration au-dessus de la limite de quantification est obtenue.

Concentration (ng.cm^{-2})											
Salle	Matériau	Milieu	DEHP	BBP	TPP	EHDPP	TBEP	Fluoranthène	Pyrène	Benzothiazole	BAC
MUS1	sol plastique rouge	sueur basique					130				
	dalle noire	salive								d<21	
	dalle noire	sueur acide								d<21	
	dalle noire	sueur basique	69					d<21	d<21		
MOT2	tapis mousse rouge	salive	160		107						d<10,5
	tapis mousse rouge	sueur acide	194								
	tapis mousse rouge	sueur basique	444 *(56)**		109						d<10,5
	sol plastique	salive	181	105							d<10,5
	sol plastique	sueur acide	154								
	sol plastique	sueur basique	190	105							
	pont mousse vert	salive	d<21		122						

	pont mousse vert	sueur acide	63		137						
	pont mousse vert	sueur basique	63		173						d<10,5
DOJ2	mousse murale	salive	93			109	126				
	mousse murale	sueur acide	78								
	mousse murale	sueur basique	103								
	tatami	sueur acide									d<10,5
	tatami	sueur basique	d<21		135						

*Tableau 22 : Résultats de migration de COV, COSV, BAC à partir des matériaux des salles dans les simulants de salive et sueurs acide et basique (d : composé détecté < LQ) - * résultat du 2ème prélèvement.*

On constate que les matériaux pour lesquels on observe une migration significative dans les simulants sont principalement ceux de la salle de motricité (MOT2). On observe surtout la migration de DEHP, de TPP et de BBP avec des concentrations variant de 63 à 444 ng/cm^2 pour le pont en mousse vert et le tapis en mousse rouge respectivement. Pour le tapis en mousse rouge, l'analyse du 2ème prélèvement a été faite et une concentration de 56 ng/cm^2 a été mesurée. Cet écart important entre les deux prélèvements peut s'expliquer par l'inhomogénéité du DEHP dans le matériau et/ou la variabilité de la méthode de prélèvement (application de la pression sur le filtre imprégné, par exemple), la répétabilité analytique (n=6 injections) étant de 3%. Ces résultats de migration sont cohérents avec les niveaux élevés des mêmes composés organiques observés dans l'air et les poussières de cette salle. De plus, cette typologie de salle présente plusieurs facteurs favorisant le risque d'exposition à ces substances : la présence et l'utilisation de nombreux équipements/mobiliers en mousse revêtue de PVC, l'âge de ces équipements et du bâtiment (présence de composés interdits actuellement comme le DEHP), l'accueil d'enfants, population plus à risque que les adultes, les activités sportives pratiquées comportant de nombreux contacts main-matériau pouvant se poursuivre en contact main-bouche (exposition dermique et orale).

Dans le dojo (DOJ2), la mousse protectrice murale montre la migration de DEHP, de EHDPP et de TPP. Pour le tatami, seule la migration de TPP dans la sueur basique est observée (concentration de 135 ng/cm^2). Les arts martiaux se pratiquant pieds nus avec de nombreuses chutes au sol, les contacts avec la peau seront plus fréquents qu'avec la mousse murale. Le risque d'exposition par contacts dermique ou main-bouche aux polluants issus du tatami est donc potentiellement plus élevé que le risque d'exposition aux polluants de la mousse murale.

Pour la dalle noire de la salle MUS1, on constate aussi la migration de DEHP, alors que la salle a été récemment rénovée (en 2021) et que le DEHP est interdit depuis 2011. Cette dalle étant constituée de matériaux recyclés, il se pourrait que la source de DEHP soit un matériau plus ancien, constitutif de la dalle. Pour la dalle exclusivement, on identifie aussi des HAP (fluoranthène et pyrène) ainsi que du benzothiazole, confirmant que ce matériau en est émetteur (Cf. § 5.1.2). Les métaux ont aussi été analysés pour ce matériau et les résultats sont présentés dans le Tableau . Comme pour les composés organiques, seuls les métaux détectés et quantifiés sont mentionnés. Le cuivre est détecté dans la salive (concentration inférieure à la limite de quantification), mais on observe surtout du zinc à des concentrations variant de 350 à 930 ng/cm^2, globalement plus élevées que les concentrations mesurées pour les composés organiques. Ces résultats alertent sur l'impact potentiel des matériaux recyclés sur la

santé et sur l'importance de pouvoir tracer la présence de substances dangereuses dans les matériaux destinés à être réemployés ou recyclés.

Métaux	Cu	Cr	Zn
Salive (ng.cm^{-2})	d<10	10	400
Sueur basique (ng.cm^{-2})			930
Sueur acide (ng.cm^{-2})			350

Tableau 23 : Résultats de migration des métaux à partir de la dalle noire (salle MUS1) dans les simulants de salive et sueurs acide et basique (d : composé détecté < LQ)

Cette étude de migration est exploratoire. Le manque de données dans la littérature sur des études similaires ne permet pas d'estimer si les niveaux de concentrations mesurés sont élevés ou faibles et s'ils peuvent présenter un risque pour la santé. De plus, en l'absence de scénario de contact dermal ou de contact main-bouche en relation avec les activités sportives étudiées, il n'est pas possible d'aller plus loin sur l'exploitation de ces résultats de migration et sur l'évaluation du risque sanitaire associé.

5.4. Contaminants microbiologiques dans les 3 salles

5.4.1. Méthodes d'analyse des bactéries et moisissures

Analyse dans l'air

Les bactéries totales et moisissures cultivables ont été recherchées dans l'air intérieur.

Les bactéries et moisissures ont été prélevées dans l'air intérieur par bio-impaction sur gélose et prélèvement cyclonique.

Les prélèvements par bio-impaction ont été réalisés en duplicats sur les milieux TSA (Tryptone Soja Agar) (50 L x 2), MEA (Malt Extract Agar) (50L x 2+100L x 2) et DG18 (Dichloran Glycerol) (50L x 2+100L x 2) :

- Sur gélose MEA et DG18 pour la recherche des moisissures totales et des 4 grands genres de moisissures retrouvés dans l'environnement intérieur et pouvant avoir un impact sur la santé (Aspergillus, Penicillium, Cladosporium, Alternaria), puis incubés à 25°C entre 3 et 8 jours
- Sur gélose TSA pour la recherche des bactéries totales de l'air, puis incubés à 36°C 48 h

Les colonies repérées ont été dénombrées et isolées sur gélose puis identifiées par microscopie optique pour les moisissures. Pour confirmer les identifications et identifier les autres colonies, en particulier les bactéries, l'ADN de ces colonies a été extrait avec le kit QIamp UCP Pathogen mini kit de QIAGEN puis amplifié par PCR pour être séquencé par la méthode Sanger (Eurofins genomics).

La limite de quantification est de 10 UFC/m^3.

Les bactéries et moisissures ont été analysées par séquençage haut débit sur les gènes 16S pour les bactéries et ITS pour les moisissures à partir de prélèvement cyclonique. La totalité du tampon de collecte a été déposé sur filtre 0,45 µm en polycarbonate et mis directement dans le tube de lyse. L'ADN est extrait en utilisant le kit DNeasy powerwater de QIAGEN et transmis pour séquençage à Eurofins genomics sur Illumina NextSeq 500 sequencing. Les ADN bactériens 16S sont séquencés sur la partie V3-V4 et les ADN fongiques sur la partie ITS2. Les séquences sont ensuite identifiées par alignement sur les bases SILVA pour les bactéries et UNITE pour les moisissures.

La diversité intra échantillon des bactéries et moisissures de l'air a été analysée au moyen de trois indices qui sont : la diversité observée (nombre d'espèces différentes), l'indice de Shannon (varie en fonction du

nombre d'espèces et de la proportion relative de ces différentes espèces) et l'indice de Simpson (probabilité que deux espèces tirées au hasard soient différentes).

Analyse dans les poussières

Les bactéries et moisissures cultivables ont été recherchées dans les poussières par culture et par séquençage haut débit des gènes 16S des bactéries et ITS des moisissures.

Pour la culture des bactéries et moisissures, les poussières ont été tamisées sur filtre 300µm et 50mg ont été resuspendus dans 4,5 ml de solution de PBS-Tween (0.05%).

200 µL de suspension en pur, dilués au 1/10 et 1/100 ont été étalés en duplicat :

- Sur gélose MEA et DG18 pour la recherche des moisissures totales et des 4 grands genres de moisissures retrouvés dans l'environnement intérieur et pouvant avoir un impact sur la santé (Aspergillus, Penicillium, Cladosporium, Alternaria), puis incubés à 25°C entre 3 et 8 jours
- Sur gélose TSA pour la recherche des bactéries totales de l'air, puis incubés à 36°C 48 h.

Pour l'analyse de séquençage haut débit, 250 mg de poussières ont été dilués directement dans le tampon de lyse pour l'extraction de l'ADN par le kit DNeasy powerwater de QIAGEN et l'ADN extrait a été transmis pour séquençage à Eurofins genomics suivant le protocole décrit plus haut.

5.4.2. Résultats globaux

Les résultats montrent de façon générale (Figure 46), une stabilité de la contamination bactérienne et fongique entre les trois campagnes d'analyse et les différentes salles, excepté pour le dojo et pour la salle de motricité 2 pour lesquels un problème technique a été rencontré dans la campagne du lot 3.

Pour les moisissures, la valeur observée dans la salle de motricité dépasse la valeur de 1 000 UFC/m3 (1500 UFC/m^3) lors de la première campagne, valeur définie par l'ANSES comme étant un seuil à partir duquel il faut identifier les sources de contamination et les gérer. Pour les bactéries, la valeur de 1 000 UFC/m^3, considérée comme élevée en environnement intérieur selon la ligne directrice de l'Europe est aussi largement dépassée.

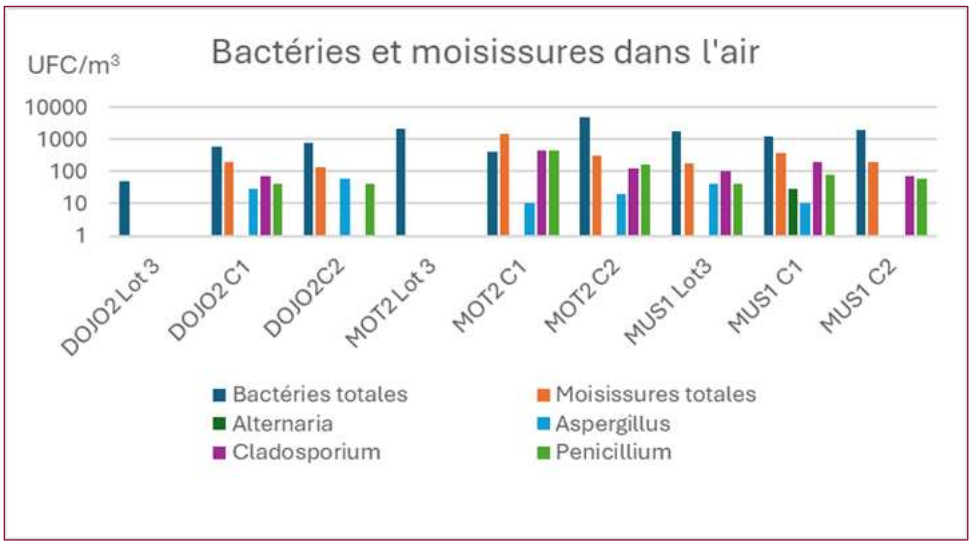

Figure 46 : Bactéries et moisissures dans l'air détectées par culture

La diversité des bactéries et des moisissures dans l'air et les poussières est illustrée Figure 47 et Figure 48. Trois indices ont été utilisés : la diversité observée (nombre d'espèces différentes), l'indice de Shannon

(varie en fonction du nombre d'espèces et de la proportion relative de ces différentes espèces) et l'indice de Simpson (probabilité que deux espèces tirées au hasard soient différentes).

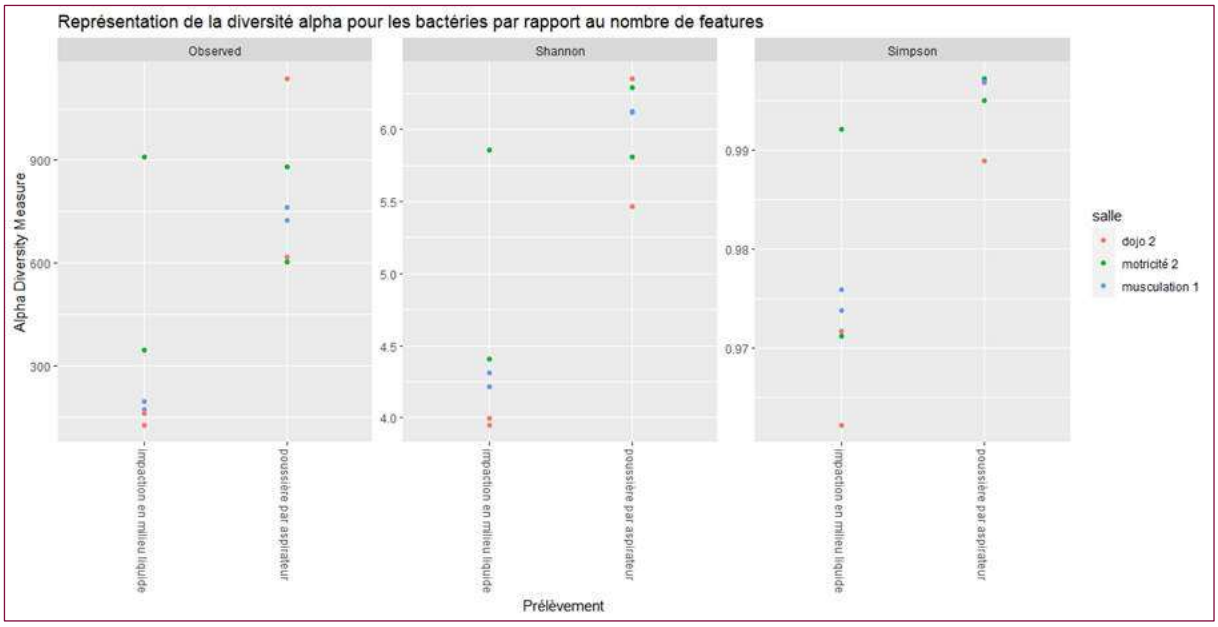

Figure 47 : Diversité intra échantillon des bactéries dans l'air (impaction en milieu liquide) et dans les poussières par rapport au nombre de séquences.

Les indices sont concordants. La diversité alpha (intra échantillon) des bactéries est plus importante dans les échantillons de poussières que d'air, comme attendu, sauf pour l'échantillon de la salle de motricité prélevé pendant la période estivale. Aucune explication à ce résultat surprenant n'a pu être avancée. Globalement, la diversité est la plus importante dans les poussières du Dojo 2 lors du prélèvement estival.

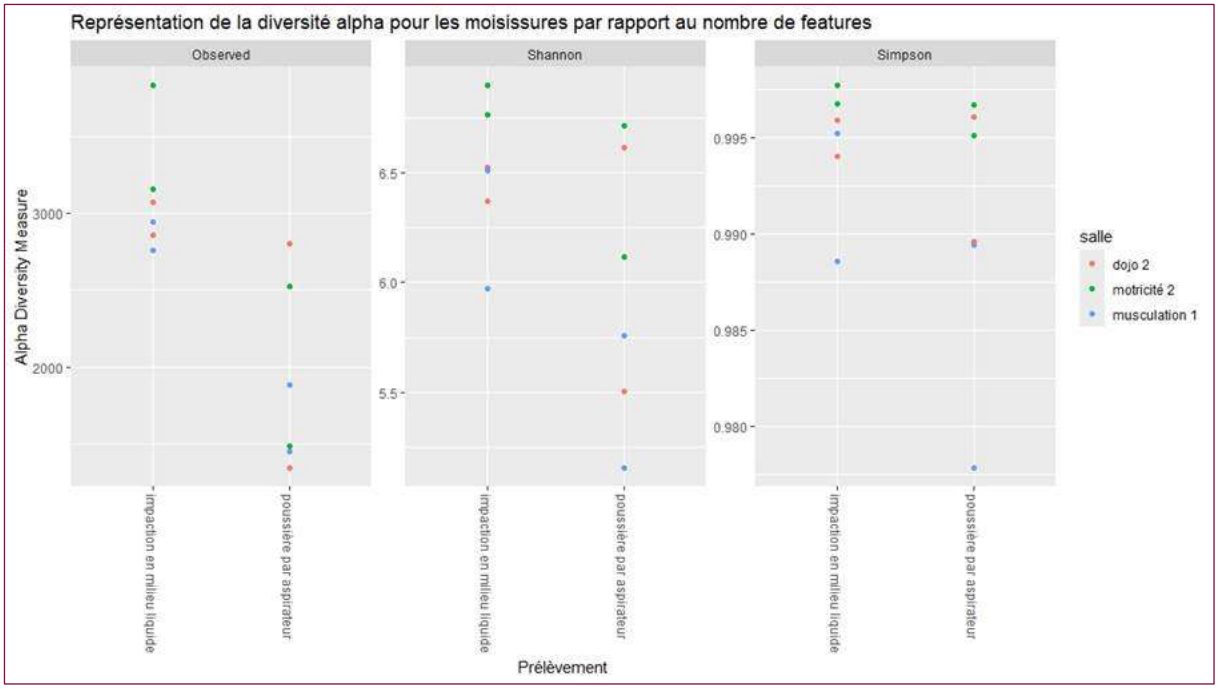

Figure 48 : Diversité intra échantillon des moisissures dans l'air (impaction en milieu liquide) et dans les poussières par rapport au nombre de séquences.

Contrairement aux bactéries, la diversité des moisissures est plus importante dans l'air. Ceci s'explique par l'aérosolisation des spores qui peuvent persister dans l'air pendant longtemps, contrairement aux bactéries dont la survie est limitée dans l'air. La diversité est plus importante dans la salle de motricité (Figure 48).

5.4.3. Bactéries dans l'air

La faible diversité bactérienne dans l'air des salles de sport se confirme par la présence presque exclusive des seules protéobactéries, excepté pour la salle de motricité (Figure 49).

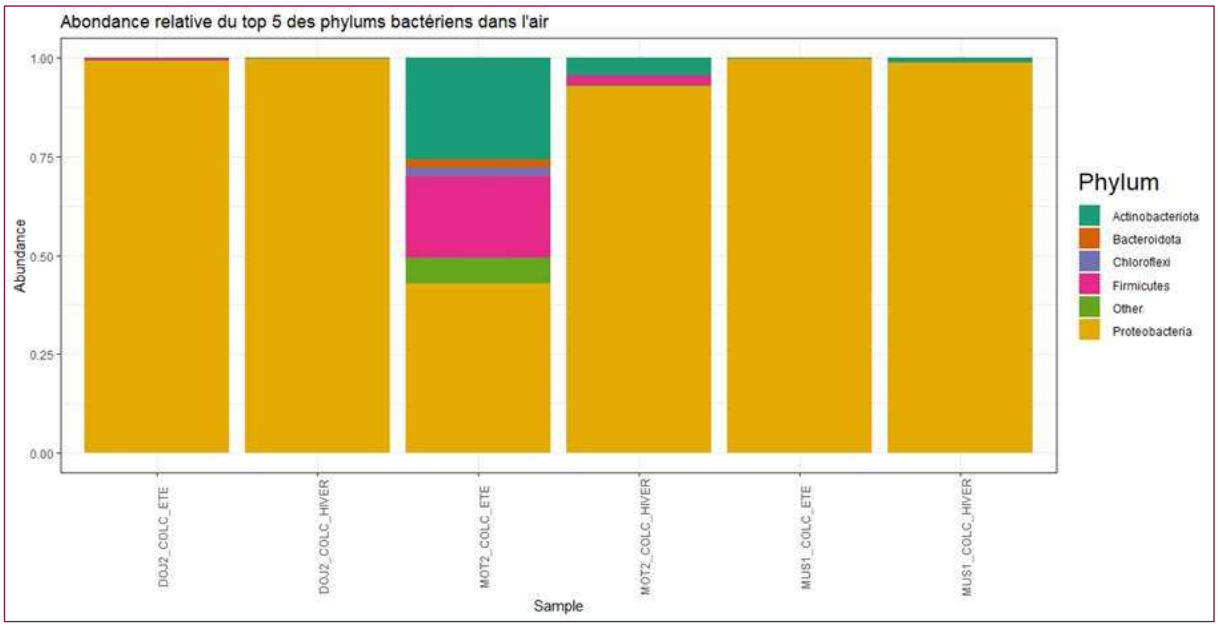

Figure 49 : 5 principaux phyla bactériens dans l'air

La Figure 50 suivante présente les genres de bactéries identifiés. Acinetobacter est largement retrouvé, c'est une protéobactérie environnementale ubiquitaire, pathogène opportuniste qui peut poser un problème dans l'environnement hospitalier chez les personnes fragiles (Acinetobacter baumanii). Les staphylocoques et streptocoques, associés à la présence humaine ou animale, sont présents aussi mais moins représentés. Ici aussi, la salle de motricité se distingue, avec notamment l'absence d'Acinetobacter mais aucune explication n'a pu être avancée.

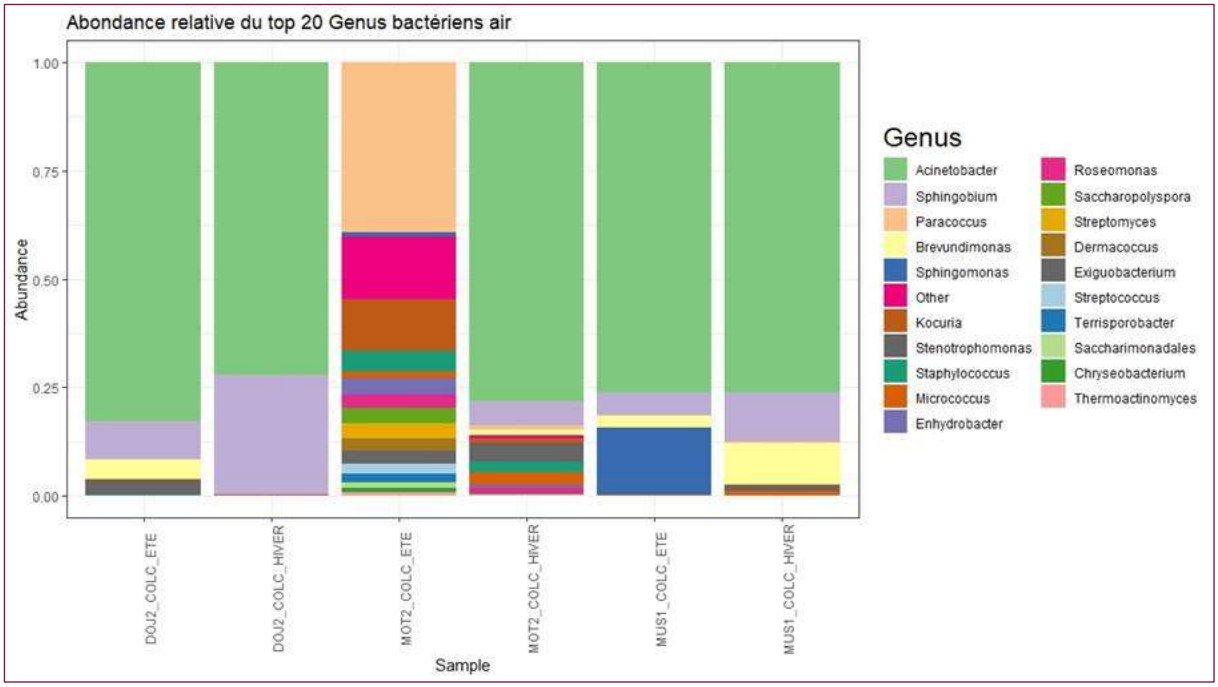

Figure 50 : Vingt principaux genres bactériens dans l'air

5.4.4. Bactéries dans les poussières

Les résultats sont présentés sur la Figure 51.

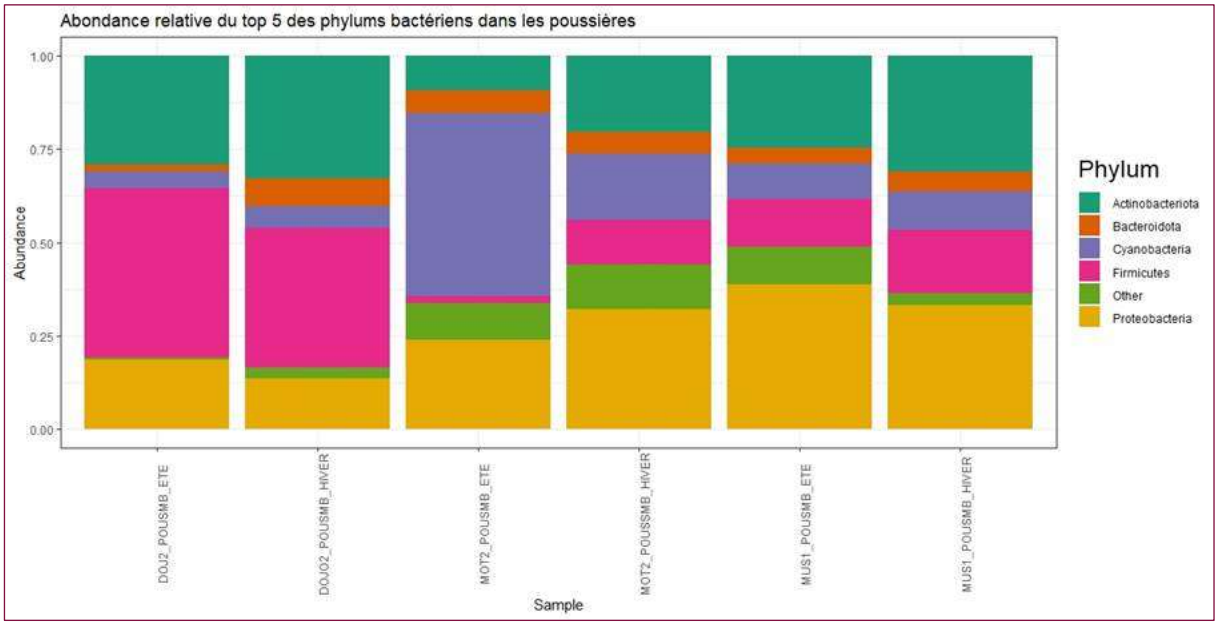

Figure 51 : Cinq principaux phyla bactériens dans les poussières

Comme pour l'air, il ne semble pas y avoir de différence entre l'été et l'hiver. Le dojo se distingue par une abondance plus importante de firmicutes, dont font partie les staphylocoques. Les protéobactéries sont très représentées mais nettement moins que dans l'air, ce qui peut s'expliquer par une meilleure survie des autres phyla bactériens dans les poussières, en particulier les firmicutes.

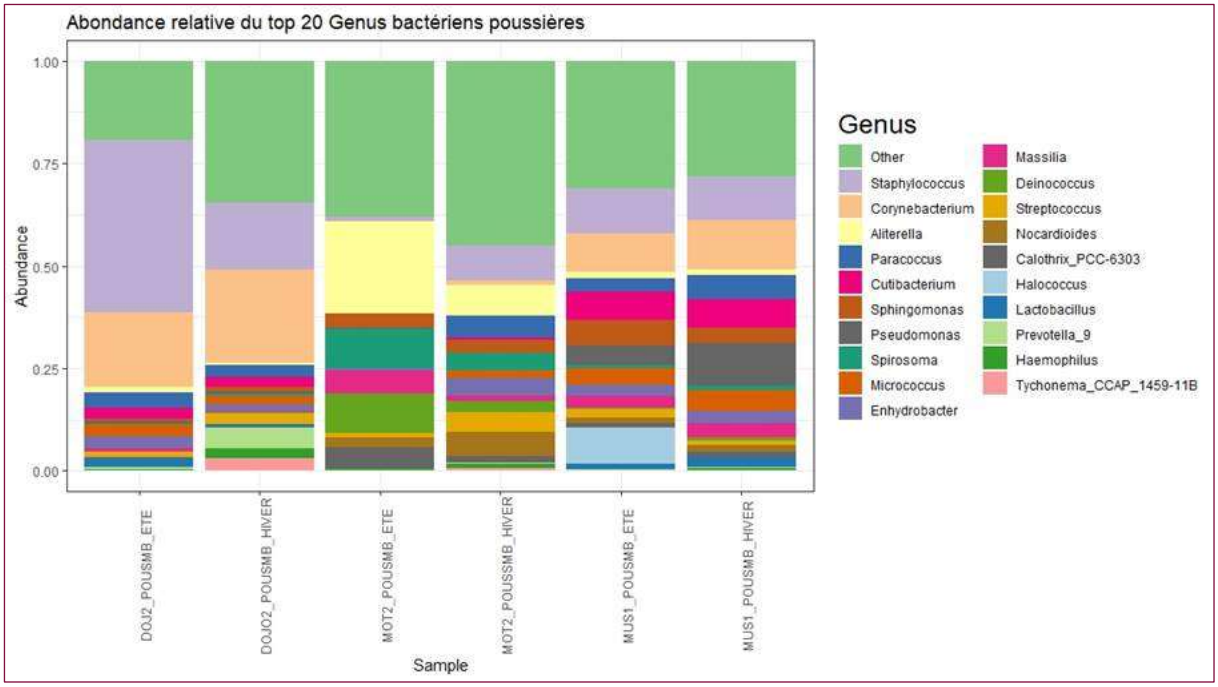

Figure 52 : Vingt principaux genres bactériens dans les poussières

Les poussières du dojo (DOJ2) et de la salle de musculation (MUS1) se caractérisent par la présence majoritaire de Staphylococcus et de Corynebacterium, qui, toutes les deux, peuvent être d'origine humaine, animale ou environnementale (Figure 52). Il n'y a pas réellement de différence entre l'été et l'hiver. La salle de motricité se distingue par la présence plus importante des genres Aliterrella, bactérie environnementale découverte récemment, Spirosoma, et Deinococcus, qui sont aussi des bactéries environnementales.

5.4.5. Moisissures dans l'air

Les principaux genres fongiques sont présentés sur la *Figure 53* :

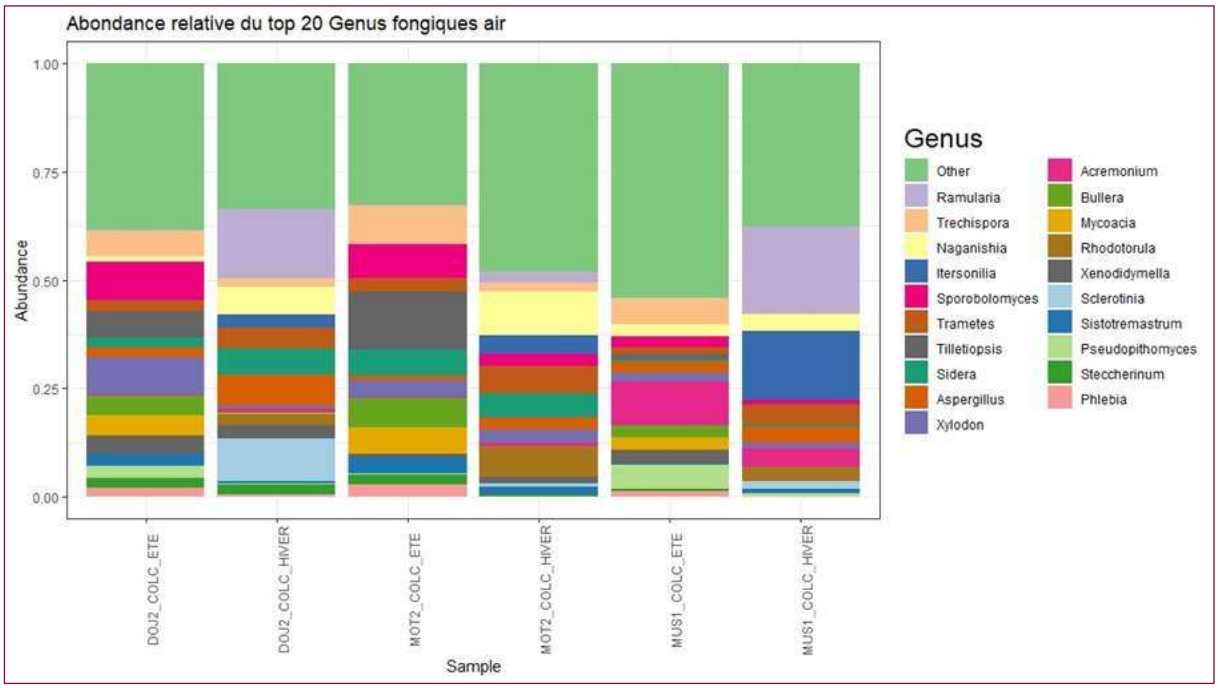

Figure 53 : Vingt principaux genres fongiques dans l'air

De façon générale, les espèces observées sont très différentes des espèces détectées par culture. Cela s'explique par l'utilisation de milieux particuliers en culture qui ciblent certaines espèces fongiques, ce qui n'est pas le cas de l'identification par séquençage, qui détecte aussi, en particulier les espèces phytopathogènes et les basidiomycètes (champignons à chapeau), largement présentes dans l'environnement extérieur mais qui peuvent rentrer dans les salles par les ouvertures.

Contrairement aux bactéries, une différence de composition est observée entre l'été et l'hiver. En effet, les Trechispora (champignon du bois) et Sporobolomyces (levure phytopathogène) sont particulièrement retrouvés en été alors que les Ramularia (parasite végétal) et Naganishia (anciennement Cryptococcus) le sont en hiver. Aspergillus, retrouvé en culture, est également présent plutôt l'hiver.

5.4.6. Moisissures dans les poussières

Les genres fongiques détectés dans les poussières sont présentés Figure 54.

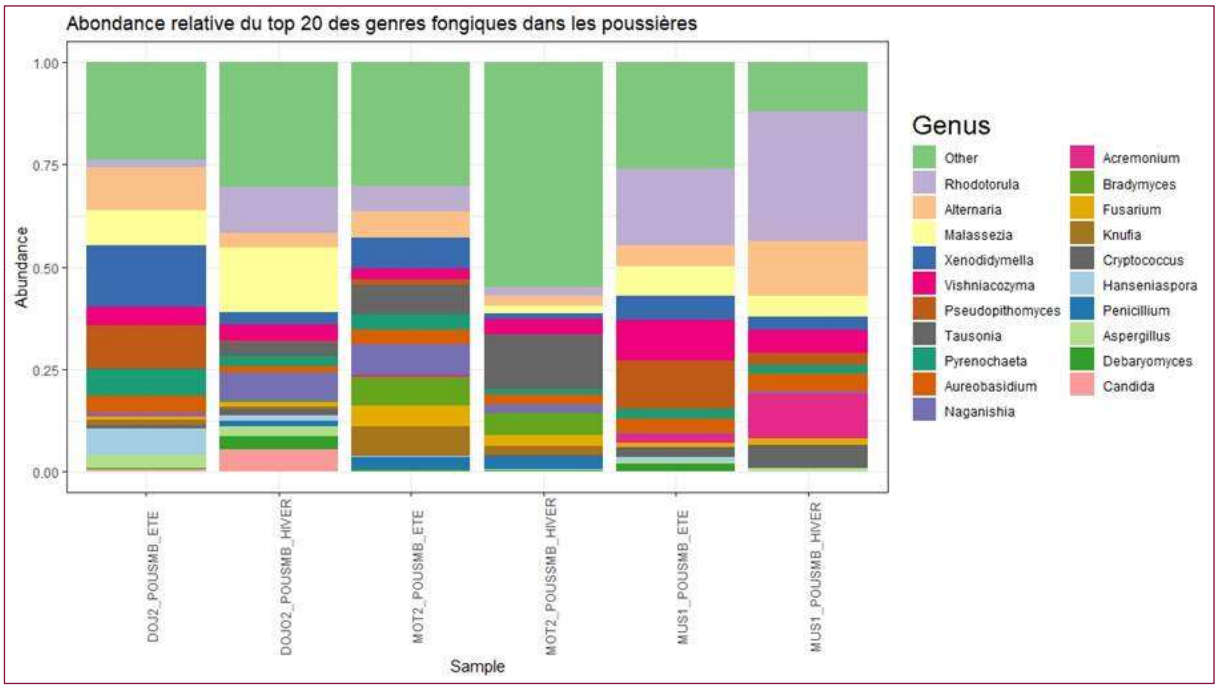

Figure 54 : Vingt principaux genres fongiques dans les poussières

La variabilité des espèces fongiques détectées est plus importante entre les différents échantillons de poussière que d'air. Les espèces les plus fréquentes sont Rhodotorula, levure très fréquente dans la nature mais également sur la peau et dans les intestins. Alternaria, moisissure très allergisante, rarement détectée dans l'air par culture et pas dans les 20 moisissures les plus détectées par séquençage, est largement retrouvée dans les poussières. Malassezia, très représentée, levure commensale de la peau, peut devenir pathogène et entraîner des mycoses dermiques.

5.4.7. Conclusion

L'analyse par séquençage haut débit apporte des éléments nouveaux qui démontrent la grande diversité des espèces présentes dans les environnements intérieurs avec des espèces potentiellement pathogènes. La recherche de la composition bactérienne et fongique dans les poussières apporte un complément d'information quant à la diversité des espèces auxquelles on est exposé dans ces salles par rapport à la seule analyse de l'air.

5.5. Perspectives sur l'évaluation de l'exposition dans les salles de sport

Les résultats du projet QAI-Sport montrent une contamination de l'air et des poussières des dix salles de sport de trois typologies différentes par des contaminants chimiques volatils, semi volatils ou non volatils, mais également par des agents microbiologiques. Cette étude n'a pas mis en évidence la présence du SARS-CoV-2 dont la concentration est inférieure à la LQ (2,6 puis 1,6.10^2 UG/m^3).

Les concentrations en moisissures totales observées dans les salles de sport sont nettement inférieures aux concentrations dans les logements (Dallongeville et al., 2015). Le genre *Alternaria* n'a pas été identifié par culture avec des concentrations toutes inférieures à la LQ (5-10 UFC/m^3) dans l'air mais par contre

retrouvé par séquençage dans les poussières. Les médiane et moyenne du genre *Penicillium* sont proches des logements alors que les concentrations de *Cladosporium* sont moins élevées dans les salles de sport. Pour les bactéries totales, des concentrations élevées sont observées dans trois salles en condition d'occupation avec des valeurs de 1800, 2800 et 5100 UFC/m^3, elles sont supérieures aux seuils proposés par la directive européenne qui est de 1000 UFC/m^3 ou encore de l'OMS qui est de 500 UFC/m^3 dans l'air intérieur des logements (Zavieh et al., 2021).

Les concentrations médianes des COV quantifiés dans l'air des salles de sport étudiées sont inférieures aux VGAI (Valeurs Guides de la Qualité de l'air Intérieur) françaises (ANSES, 2024) ou de l'OMS (WHO, 2010) si elles existent. Elles sont par ailleurs inférieures aux concentrations médianes ou moyennes mesurées dans les écoles (Dassonville et al., 2019) et les logements (Campagne nationale Logements 1, OQAI, 2006) (Kirchner et al., 2006) en France. Cependant,19 COV quantifiés dans l'air des salles de sport n'ont pas pu être comparés par manque de données dans la littérature. Pour une dizaine de COV, dont la plupart des hydrocarbures, les teneurs sont inférieures à la limite de quantification dans toutes les salles étudiées.

Les différentes concentrations des COSV quantifiés dans l'air des salles de sport sont pour la plupart inférieures ou similaires à celles rencontrées dans les bureaux, les écoles et les logements en France (Blanchard et al., 2014 ; Projet POEME, 2020) Campagne nationale écoles, OQAI, 2019) (Dassonville et al., 2019). Les phtalates sont présents dans 30 à 100 % des salles de sport étudiées, les HAP de 20 à 100 % et les muscs à 100 %. Parmi les retardateurs de flamme, cinq sont détectés dans 100% des échantillons d'air, le EHDPP, TBP, TPP et TEP sont quantifiés avec des concentrations supérieures aux autres environnements intérieurs. Les COSV issus des produits biocides sont également détectés dans l'air de toutes les salles, mais difficile de comparer avec d'autres environnements par manque de données. Dix COSV n'ont pas été quantifiés dans l'air des salles de sports.

Tout comme dans l'air, la plupart des concentrations des COSV quantifiés dans les poussières des salles de sport sont aussi inférieures ou similaires à celles rencontrées dans les écoles et les logements en France. La fréquence de détection des phtalates dans les poussières varie de 0-100%. Le DBP et le DiNP présentent des concentrations médianes supérieures à celles rencontrées dans les logements français (Blanchard et al., 2014 ; Corinne Mandin, 2015).

Les HAP sont détectés dans les poussières de 20 à 90% des salles de sport. Le fluorène, détecté dans 90 % des salles présente une moyenne nettement supérieure à celles rencontrées dans les écoles et logements en France.

Six retardateurs de flamme n'ont pas été quantifiés, les autres ont une fréquence de détection allant de 20 à 100 %. L'EHDPP et le TPP sont détectés dans les poussières de toutes les salles de sport avec des médianes deux à trois fois supérieures aux valeurs dans les poussières des écoles et logements en Europe (Chupeau et al., 2020). La concentration médiane du TDCPP dépasse celle quantifiée dans les logements (Chupeau et al., 2020).

La benzophénone et le 4tOP ont une fréquence de détection de 100% et le 4tBP 90%. Les concentrations médianes sont de l'ordre de 1 500, 80 et 152 ng/g respectivement.

Les ammoniums quaternaires sont également présents dans les poussières des salles de sport, avec 100% de fréquence de détection pour le C12-BAC, C14-BAC, C8-DDAC et C10-DDAC et des concentrations médianes > 60 µg/g pour le C12-BAC et le C10-DDAC.

Ces premières données dans les salles de sport montrent que ces environnements intérieurs peu étudiés peuvent constituer une source d'exposition pour les enfants et adultes pratiquant des activités physiques. En première intention, l'exposition au DEHP, à certains retardateurs de flamme et biocides semi-volatils ou non volatils semble d'intérêt.

Des agents microbiologiques et chimiques sont documentés au niveau du danger ou de la toxicité (CMR, VTR) et mériteraient d'être étudiés plus précisément dans les salles de sport en termes d'évaluation des expositions et des risques associés pour les sportifs.

Limites identifiées

En l'état actuel des connaissances, les paramètres d'exposition des sportifs ne sont pas disponibles. Les taux d'ingestion de poussières et leur variabilité individuelle (variation selon l'âge, les activités, les comportements individuels) ne sont pas connus. La contribution des autres voies d'exposition (inhalation et contact cutané) selon l'activité n'est pas non plus documentée (volumes respirés selon l'âge et l'activité ; le temps de contact cutanée…). Des études spécifiques sont à réaliser afin de mieux définir ces paramètres d'exposition à l'image de ce qui est fait à l'EPA (Environmental Protection Agency).

Les données de contamination des salles de sport ne sont pas non plus suffisantes à ce jour (uniquement 10 salles de sport étudiées dans cette étude), et ne représentent pas les différents types de disciplines sportives ainsi que la diversité des sportifs.

6. Recommandations

6.1. Choix des matériaux

Cette étude sur la qualité de l'air des salles de sport a permis d'identifier et de quantifier plus d'une centaine de COV et de COSV ainsi que plusieurs contaminants microbiologiques dans l'air intérieur et les poussières, dans des conditions d'occupation et d'inoccupation des salles étudiées. La plupart des composés chimiques sont émis par les matériaux de construction, de décoration ou par les équipements sportifs. Ce sont essentiellement des plastifiants (phtalates) et des retardateurs de flamme organophosphorés qui sont retrouvés dans l'air mais aussi dans les poussières avec des concentrations pouvant atteindre des niveaux de l'ordre du mg/g. Les concentrations de ces polluants sont particulièrement élevées dans les bâtiments les plus anciens (datant des années 1960 – 1970) dans lesquels on retrouve aussi des molécules qui sont aujourd'hui interdites, comme le DEHP. Les concentrations les plus faibles ont été mesurées dans une salle récemment construite (2016) et pour laquelle les matériaux de construction les moins émissifs ont été sélectionnés.

Avec la loi AGEC (Antigaspillage et économie circulaire) de 2020 et l'incitation à augmenter la proportion de matériaux réemployés ou recyclés, de nouveaux produits fabriqués à base de matériaux recyclés sont commercialisés. Dans ce projet, des HAP et du benzothiazole (catalyseur de vulcanisation du caoutchouc), composés toxiques, ont été retrouvés dans l'air et les poussières d'une salle équipée d'un tapis de sol en caoutchouc recyclé. Ce matériau a été identifié comme la source de ces composés.

Une première recommandation est donc, lors de la construction ou rénovation d'une salle de sport, d'établir un cahier des charges strict pour la sélection de matériaux de construction peu émissifs (en se basant notamment sur l'étiquetage sanitaire des matériaux de construction) et ne contenant pas de substances dangereuses, mais aussi de choisir des équipements sportifs fabriqués avec des matériaux présentant les meilleures caractéristiques sanitaires. Les bâtiments anciens, surtout ceux accueillant de jeunes enfants, devraient pouvoir aussi être rénovés en priorité et leurs équipements (objets de jeux en mousse) remplacés pour réduire voire supprimer le risque d'exposition à des substances dangereuses interdites aujourd'hui.

6.2. Renouvellement de l'air, taux d'occupation et entretien des salles

L'impact positif de la ventilation sur les concentrations dans l'air de COV et de COSV a également été mis en évidence dans ce projet, confirmant le rôle clé du taux de renouvellement de l'air dans les bâtiments pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Des stratégies appropriées, telles que l'augmentation et le contrôle du taux de ventilation ainsi que le contrôle du taux d'occupation pourraient être envisagées.

Comme cela a été mentionné dans le paragraphe 5.5, pour les bactéries totales, des concentrations élevées ont été observées dans les salles en condition d'occupation avec des valeurs supérieures à la concentration bactérienne fixée par la directive européenne : la gestion de l'occupation des salles est donc aussi un facteur important pour garantir un air sain.

Des concentrations très élevées (environ 10 mg/g) de certains COSV ont été quantifiées dans les poussières de certaines salles, augmentant le risque d'exposition par contact cutané ou par inhalation en cas de remobilisation des poussières par l'activité sportive. Une bonne gestion du ménage dans les salles est donc recommandée.

6.3. Composés émergents et risque d'exposition

Ce projet QAI-Sport a permis, grâce aux analyses non ciblées, d'identifier (voire, dans certains cas, de quantifier) des composés (COV, COSV) émergents. Des ammoniums quaternaires ont aussi été étudiés pour la première fois dans ce type d'environnement. Le manque d'information actuel sur la toxicité de certaines de ces molécules et sur les scénarii d'exposition sont une limitation à l'exploitation de ces données pour évaluer le risque sanitaire dans les salles de sport. Des recherches sont donc encore nécessaires pour évaluer la toxicité des composés émergents, leurs voies d'exposition et le risque induit.

Dans le cadre de ce projet, une étude originale de la migration potentielle de COV et COSV dans la sueur et la salive synthétiques a été menée. Cependant, ces données ne peuvent, à ce jour, être exploitées en raison du manque d'éléments sur les scénarii d'exposition dans les salles de sport.

7.Conclusion / Perspectives

Le projet QAI-Sport a permis d'évaluer la qualité de l'air intérieur de 10 salles de sport de différentes activités : dojos (DOJ1, DOJ2), salles de motricité pour jeunes enfants (MOT1, MOT2, MOT3), salles de musculation (MUS1, MUS2, MUS3) et salles multisport (APS1, APS2).

Des analyses ciblées et non ciblées ont permis d'identifier et de quantifier plus d'une centaine de COV et de COSV ainsi que plusieurs contaminants microbiologiques dans l'air intérieur et les poussières des salles en conditions d'occupation et d'inoccupation.

La pollution par les COV est globalement similaire à celle des autres environnements intérieurs, avec une prédominance des composés carbonylés. Certains composés spécifiques et émergents (comme le benzothiazole, le décaméthylcyclopentasiloxane et le 1-(2-méthoxy-1-méthyl éthoxy)-2-propanol) ont également été mis en évidence. L'acétone et le 6-méthyl-5-hepten-one, émis par le corps humain, ont été identifiés comme des traceurs d'occupation.

Les concentrations en COSV dans l'air suivent la même tendance que celles des COV et sont très variables selon les typologies, les années de construction, les choix des matériaux ou produits d'entretien et le renouvellement de l'air. Les concentrations en COSV les plus élevées sont dues à une contamination par les phtalates, principalement le DEHP et le DINP (95 à 99% de la concentration). Au niveau des contaminations des poussières par les COSV, les salles de sport les plus contaminées sont DOJ2, MOT1, MOT2 et MUS3, avec des concentrations qui dépassent systématiquement 5 mg/g avec le DEHP et DINP comme contaminants principaux. Les poussières des salles MUS1, MUS2 et MUS3 sont particulièrement contaminées par les HAP avec des niveaux de concentration de 5 à 60 µg/g. Le DOJ2 a la poussière la plus concentrée en retardateurs de flamme (349 µg/g) puis suivent les salles de musculation avec 89 µg/g pour MUS2 et 38 µg/g pour MUS1. Les biocides semi-volatils sont le plus concentrés dans les poussières de la salle MUS1 (17 µg/g), et APS1 (4 µg/g) avec la benzophénone comme biocide largement majoritaire. La troisième salle avec la poussière la plus contaminée est la MOT3 (3 µg/g) avec une isothiazolinone (le BIT) comme biocide largement majoritaire. Les biocides non volatils (ammoniums quaternaires) sont le plus concentrés dans la salle MUS3 (2,9 mg/g) avec le C12-BAC comme composé largement majoritaire (2 mg/g).

La concentration en microorganismes dans les salles de sport est plutôt faible et le SARS-CoV-2 n'a pas été identifié. Les moisissures sont peu présentes et les espèces identifiées sont régulièrement observées en environnement intérieur. Les bactéries sont observées en phase occupée dans plusieurs salles, notamment dans les salles de musculation, à des concentrations qui peuvent atteindre 5100 UFC/m^3, valeurs supérieures à la concentration bactérienne fixée par la directive européenne. Pour les moisissures, une concentration supérieure à la valeur définie par l'ANSES comme seuil à partir duquel les sources de contamination doivent être identifiées et gérées, a été mesurée dans la salle MOT2.

Une étude approfondie a été menée sur une sélection de trois salles (DOJ2, MOT2 et MUS1). Dans cette phase du projet, les concentrations de COSV ont été déterminées dans la phase gazeuse, les particules en suspension et les poussières. Les résultats de concentrations dans l'air et les poussières sont comparables à ceux obtenus dans la phase de screening. Des coefficients de partage air/particules (Kp) en suspension et air/poussières (Kd) ont été déterminés et pourront servir de données d'entrée pour des modèles prédictifs de la QAI et pour l'évaluation de l'exposition.

Les matériaux sources de COV et de COSV ont aussi été identifiés et un processus de sorption/réémission sur d'autres surfaces présentes dans la pièce a pu être mis en évidence. Pour trois COV étudiés dans MUS1, ce processus de sorption/réemission peut contribuer pour plus de 2/3 à leur concentration dans l'air intérieur. Dans cette même salle, un tapis de sol en caoutchouc recyclé a été identifié comme la source des HAP et du benzothiazole retrouvé dans l'air et les poussières.

L'étude de la migration dans la sueur et la salive synthétiques d'une sélection de COV et de COSV a aussi été réalisée. On constate que les matériaux pour lesquels on observe une migration significative dans les simulants sont principalement ceux de la salle de motricité (MOT2). On observe surtout la migration de DEHP, de TPP et de BBP. Dans la salle MUS1, la migration de DEHP à partir du tapis de sol recyclé a été mise en évidence. Le DEHP, actuellement interdit, pourrait provenir de matériaux plus anciens entrant dans la composition de ce tapis de sol.

Ce projet QAI-Sport a permis d'acquérir un grand nombre de données originales sur la nature et les concentrations de contaminants de différentes salles de sport et a notamment mis en évidence des concentrations élevées de COSV et de biocides non volatils dans les poussières de certaines salles (plusieurs mg/g de phtalates dans DOJ2, MOT1, MOT2 et MUS3 et d'ammoniums quaternaires dans MUS3). Les analyses non ciblées ont aussi permis d'identifier de nombreux composés émergents, utilisés comme substituts à des substances sujettes à restriction ou interdiction comme certains plastifiants (DEHP par exemple) et dont on ne connaît pas les effets sur la santé.

Les résultats du projet permettent aussi de mettre en lumière des solutions d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. En effet, des salles de sport récentes comme le DOJ1 ou l'APS1, montrent qu'il est possible de diminuer les niveaux de concentrations par un cahier des charges strict sur l'achat des matériaux, des produits d'usage afin de diminuer les concentrations en phtalates, retardateur de flamme, HAP ou encore biocides. Un point de vigilance est aussi mis en évidence concernant l'utilisation de matériaux recyclés, pouvant contenir des substances qui ne sont plus autorisées aujourd'hui. La nouvelle réglementation découlant de la loi AGEC et de REACH (Registration, evaluation, and autorisation of chemicals) sur la restriction des quantités de substances dangereuses à 0,1% (m/m) dans les matériaux recyclés ou réemployés devrait permettre de limiter la mise sur le marché de tels produits. L'impact positif du renouvellement de l'air sur les concentrations en COV et en COSV dans l'air a aussi été démontré, confirmant le rôle clé de ce paramètre sur la qualité et de l'air intérieur des bâtiments et sa gestion. Un entretien des salles fréquent et régulier (ménage) permettrait aussi de minimiser le risque d'exposition aux substances retrouvées en fortes concentrations dans les poussières.

La littérature internationale a produit peu de connaissances sur la QAI des salles de sport, et ces ERP nécessitent donc une attention particulière car un impact sur la santé des occupants n'est pas exclu. Il apparaît donc essentiel de poursuivre ces travaux par une évaluation des expositions aux contaminants dans ces environnements particuliers en établissant, lorsqu'elles n'existent pas, des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) et en travaillant sur des scenarii d'exposition afin de déterminer l'impact sanitaire de ces salles de sport. Une méthodologie de mesure de l'exposition dermique directement sur des sportifs est peut-être à réfléchir car difficile à ce jour de documenter cette exposition par des mesures indirectes.

Références bibliographiques

Andrade A., Dominski F.H., Coimbra D.R. (2017) Scientific production on indoor air quality of environments used for physical exercise and sports practice : Bibliometric analysis, Journal of Environmental Management, 196 : 188-200

Andrade A., Dominski F.H. (2018) Indoor air quality of environments used for physical exercise and sports practice : Systematic review, Journal of Environmental Management, 206 : 577-586

ANSES (2013) Valeur toxicologique de référence par inhalation pour le naphtalène – Avis de L'ANSES, Rapports d'expertise collective, ANSES Editions, octobre 2013, 68 pages

ANSES (2015) Caractérisation des dangers et des expositions du 4-tert-butylphénol, Avis de l'ANSES, Rapports d'expertise collective, ANSES Éditions, Décembre 2015, 116 pages

ANSES (2018) Mise à jour des valeurs guides de qualité d'air intérieur : le formaldéhyde, avis de l'ANSES, Rapport d'expertise collective, février 2018- Anses Editions, 214 pages

ANSES (2024) Valeurs Guides de Qualité de l'Air Intérieur, https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualite-dair-interieur-vgai [Consulté le 20/02/2025]

Bahrami A., Haghighat F, Zhu J. (2024) Indoor environment gas-particle partitioning models of SVOCs and impact of particle properties on the partitioning: A review, Building and Environment (153): 111791

Blanchard O., Glorennec P., Mercier F., Bonvallot N., Chevrier C., Ramalho O., Mandin C., Le Bot B. (2014) Semivolatile Organic Compounds in Indoor Air and Settled Dust in 30 French Dwellings, Environmental Science and Technology, 48(7): 3959-3969

Bonvallot N, Mandin C, Mercier F, Le Bot B, Glorennec P. (2010) Health ranking of ingested semi-volatile organic compounds in house dust: an application to France. Indoor Air, 20(6):458-72

Bouillard L, Michel O, Dramaix M, Devleeschouwer M. (2005) Bacterial contamination of indoor air, surfaces, and settled dust, and related dust endotoxin concentrations in healthy office buildings. Ann Agric Environ Med, 12(2):187-92

Bourdin D, Mocho P, Desauziers V, Plaisance H. (2014) Formaldehyde emission behavior of building materials: On-site measurements and modeling approach to predict indoor air pollution. Journal of Hazardous Materials, 280, 164-173.

Cancer environnement, fiche exposition aux HAP, 2022, https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/hydrocarbures-aromatiques-polycycliques-hap/ [consulté le 20/02/2025]

Cantau C., Kinadjian-Caplat N., Desauziers V., Plaisance H., Garay H., Costarramone N. (2020) Émissions de polluants et vieillissement des matériaux commercialisés (Revêtements de sol) – SafeMATER : Suivi de la pollution dans l'air avec des produits pétrosourcés, biosourcés ou dépolluants, neufs et vieillis (essais au laboratoire et expérimentation en condition réelle). Rapport, 102 pages, www.ademe.fr/mediatheque

Centre d'Etude et de Recherche sur le Sport (CERES) (2021), Enquête CERES/Active-FNEAPL Fitness 2020, https://www.active-fneapl.fr/enquete-ceres-active-fneapl-fitness-2020/ [consulté le 29/04/2022]

Cheng Y., Liu C., Liang Y., Xie Y., Wang C., Leng X., Hu M., Zheng G. (2024) High-Resolution Mass Spectrometry Screening of Quaternary Ammonium Compounds (QACs) in Dust from Homes and Various Microenvironments in South China, Environmental Science & Technology, 58(7): 3182-3193

Chupeau Z., Mercier F., Rouxe E., Le Bot B., Chauvet G., et al. (2022) Pre- and post-natal exposure of children to organophosphate flame retardants: a nationwide survey in France. Environment International, 107435

European Chemical Agency (ECHA) (2023), ECHA Chemicals database, substance info card: 2-ethylhexyl diphenyl phosphate, https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.013.625 [consulté le 20/02/2025]

Dallongeville A., Le Cann P., Zmirou-Navier D., Chevrier C., Costet N., Annesi-Maesano I., Blanchard O. (2015) Concentration and determinants of molds and allergens in indoor air and house dust of French dwellings. Sci. Total Environ., 536:964-72.

Dassonville C. Sivanantham S., Grégoire A., et al. (2019) Qualité de l'air intérieur et contamination des poussières déposées au sol dans les écoles en France. Rapport référencé CSTB-OQAI/2018-125, Décembre 2019, 178 pages.

Deloitte (2019), European Health & Fitness market report 2019, Europe Active, 165 p.

Deloitte (2023), European Health & Fitness market report 2013, Europe Active, 178 p.

European Commission, Directorate General for health&Consumers, Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS) (2011), Opinion on triclosan, 22 mars 2011, https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_054.pdf [consulté le 20/02/2025]

Fédération Française de Judo (2025), www.ffjudo.com [consulté le 20/02/2025]

Flores C.M., Mota L.C., Green C.F., Mena C.D., Balcazar H., Gibbs S.G. (2009) Evaluation of respiratory symptoms and their Possible association with residential Indoor Bioaerosol concentrations and other Environmental Influences, Journal of Environmental Health, 72(4) : 8-13

Ghislain M., Beigbeder J., Plaisance H., Desauziers V. (2017) New sampling device for on-site measurement of SVOC gas-phase concentration at the emitting material surface. Analytical and Bioanalytical Chemistry 409, 3199-3210

Guo Z. (2002) Review of indoor emission source models. Part 2. Parameter estimation, Environmental Pollution, 120(3) : 551-564

Haut Conseil de la Santé Publique (20/10/2020), Coronavirus SARS-CoV-2 : recommandations relatives aux mesures barrières pour l'activité physique et sportive, https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=945 [consulté le 23/11/2020]

Hu M., Li L., Zhong Lv., Sangion A., Zheng G., Cai Z., Salamova A. (2024) Quaternary ammonium compounds in paired samples of blood and indoor dust from the united states, Environnmental Science &Technology letters, 11(12): 1308-1313

IARC (2018) Some Industrial Chemicals Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 115, https://publications.iarc.fr/563 [consulté le 20/05/2025]

INERIS (2024) Portail substances chimiques, https://substances.ineris.fr/substance/84-69-5#usage_entity [consulté le 20/02/2025]

INERIS (2024b) Portail substances chimiques, https://substances.ineris.fr/substance/1222-05-5#usage_entity [consulté le 20/02/2025]

Institut National de la Jeunesse et de l'Education Populaire (INJEP) (2023) Les chiffres clés du sport 2023, rapport, 66 p.

INSPQ (2020), les hydrocarbures aromatiques polycycliques : exposition et risques dans la population générale, https://www.inspq.qc.ca/bise/les-hydrocarbures-aromatiques-polycycliques-exposition-et-risques-dans-la-population-generale

INRS, Galaxolide - HHCB, Verneuil-en-Halatte : Ineris - DRC-18-158744-11571C. file:///C:/Users/blebot/Downloads/1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylindeno[5,6-c]pyranne.pdf

INRS, Fiche toxicologique n°317, Phtalate de benzyle et de butyle, juillet 2017, https://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_317-5/FicheTox_317.pdf

Ionas A.C., Ulevicus J., Ballesteros Gomez A., Brandsma S.H., Leonards P.E.G., Van den Bor M., Covaci A. (2016) Children's exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) through mouthing toys, Environment International, 87: 101-107

Johnson, N.F. (2018), Pulmonary Toxicity of Benzalkonium Chloride, Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery, 31(1) : 1-17

Kerdine-Römer S. (2021) L'exposition professionnelle aux ammoniums quaternaires. Les cahiers de la Recherche : Santé, Environnement, Travail, 2021, Les contaminants chimiques seuls ou en mélange,16, pp.36-37. anses-03210954

Kirchner S., Arenes J.F., Cochet C., Derbez M. et al. (2006) Observatoire de la qualité de l'air interieur, campagne nationale logements : état de la qualité de l'air dans les logements français – rapport final, CSTB 1-log-cnl1-etat-qai, 151 pages

Mandin C. (2011) Qualité de l'air intérieur dans les gymnases : état des connaissances, Air Pur (80) :15-21

Mandin C. (2015) Contamination des logements français en composés organiques semi-volatils en phase particulaire. Médecine humaine et pathologie. Thèse de l'Université de Rennes. https://theses.hal.science/tel-01308524/

Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités et de la Famille (2024) Surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public, https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/batiments/article/surveillance-de-la-qualite-de-l-air-interieur-dans-les-etablissements-recevant, [consulté le 20/02/2025]

Ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (2023) Le sport à l'école maternelle, https://www.education.gouv.fr/le-sport-l-ecole-maternelle-41648, [consulté le 20/02/2025]

Mocho P., Desauziers V., Plaisance H., Sauvat N. (2017) Improvement of the performance of a simple box model using CFD modeling to predict indoor air formaldehyde concentration, Building and Environment, 124: 450-459

Nazaroff W. Indoor aerosol science aspects of SARS-CoV-2 transmission (2022) Indoor air 2022;32:e12970.

Plaisance H., Blondel A., Desauziers V., Mocho P. (2013) Field investigation on the removal of formaldehyde in indoor air, building and Environment, 70: 277-283

Plaisance H. Blondel A., Desauziers V., Mocho P. (2014) Hierarchical cluster analysis of carbonyl compounds emission profiles from building and furniture materials, Building and Environment (75): 40-45

Plaisance H., Mocho P., Sauvat N., Vignau-Laulhere J., Desauziers V. (2017) Using the chemical mass balance model to estimate VOC source contributions in newly built timber frame houses: a case study, Environmental Science and pollution Research (24): 24156-24166

Plaisance H., Ghislain M.. Desauziers V. (2021) Assessment of gas-phase concentrations of organophosphate flame retardants at the material surface using a midget emission cell coupled to solid-phase microextraction, Analytica Chimica Acta, 1186, 339100

Raffy G., Mercier F., Blanchard O., Derbez M., Dassonville C., et al.. Semi-volatile organic compounds in the air and dust of 30 French schools: a pilot study. Indoor Air, 2017, 27 (1), pp.114-127. 10.1111/ina.12288 ; hal-01286254

Ramos C.A., Wolterbeek H.T., Almeida S.M. (2014) Exposure to indoor air pollutants during physical activity in fitness centers, Building and Environment, 82 : 349-360

Ramos C.A., Reis J.F., Almeida T., Alves F., Wolterbeek H.T., Almeida S.M. (2015) Estimating the inhaled dose of pollutants during indoor air activity, The Science of Total Environment (527-528) : 111-118

Rankin-Turner S., McMeniman C.J. (2022) A headspace collection chamber for whole body volatolomics, Analyst (147): 5210-5222

RESPAL : Impact sur la santé respiratoire d'aldéhydes étudiés en mélange de polluants représentatifs de la qualité de l'air intérieur (2022). Desauziers V., Plaisance H., Costarramone N., Dallies G., Achard S., Al Zallouha M. Rapport, 43 pages. https://librairie.ademe.fr/

Salonen H., Salthammer T., Morawska L. (2020) Human exposure to air contaminants in sports environments, Indoor Air 30 : 1109-1129

Salthammer T. (2020) Emerging indoor pollutants, International Journal of Hygiene and Environmental Health (224) : 113423

Santé Canada, Benzophénone-fiche d'information septembre 2023 ; https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/substances-chimiques/fiches-renseignements/en-bref/benzophenone.html [Consulté le 20/02/2025]

Santé Publique France (2019) Imprégnation de la population française par les phtalates, Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. Saint- Maurice: Santé Publique France, septembre 2019, 51 pages.

Souillier A., Plaisance H., Desauziers V. (2022) New SPME-based method for on-site measurement of gas-phase concentration of phthalates and alternatives at the surface of PVC floorings, Green Analytical Chemistry (1): 100012

Tushima S., Wargocki P., Tanabe S. (2018) Sensory evaluation and chemical analysis of exhaled and dermally emitted bioeffluents, Indoor Air (28): 146-163

Tuduri L., Desauziers V., Fanlo J.L. (2002) Dynamic sampling versus static sampling for the quantitative analysis of VOC traces in air with PDMS/Carboxen SPME fibers, Journal of Chromatography A, 963: 49-56

Verriele M., Plaisance H., Depelchin L., Benchabane S., Locoge N., Meunier G., (2012) Determination of 14 amines in air samples using midget impingers sampling followed by analysis with ion chromatography in tandem with mass spectrometry, Journal of Environmental Monitoring (14): 402-408

Ville data.com (2025), https://ville-data.com/salle-de-combat-dojo/ [Consulté le 20/02/2025]

Wang Y., Xue J., Kannan K. (2016) Benzothiazoles in indoor air from Albany, New York, USA, and its implications for inhalation exposure, Journal of Hazardous Materials (311): 37-42

Wei J., Mandin C., Blanchard O., Mercier F., Pelletier M., Le Bot B., Glorennec P., Ramalho O. (2016) Distributions of the particle/gas and dust/gas partition coefficients for seventy-two semi-volatile organic compounds in indoor environment, Chemosphere, (153): 212-219.

Weschler C.J., Nazaroff W.W., (2010). SVOC partitioning between the gas phase and settled dust indoors. Atmos. Environ. (44): 3609-3620.

Weschler CJ, Langer S, Fischer A, Bekö G, Toftum J, Clausen G. (2011) Squalene and cholesterol in dust from danish homes and daycare centers. Environ Sci Technol., 1;45(9): 3872-9

WHO (2010) WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, World Health Organization Editor, 454 pages

WHO (2016) Physical Activity Strategy for the WHO European Region 2016-2025. Copenhagen, Denmark: World Health Organization (WHO)

Zavieh F.S., Mohammadi M.J., Vosoughi M., Abadazari M., Raesee E., Fazlzadeh M., Geravandi S., Behzad A. (2021) Assessment of types of bacterial bio-aerosols and concentrations in the indoor of gyms, Environmental Geochemistry and Health, 43: 2165-2173

Zheng, G., Filippelli, G.M., Salamova, A. (2020) Increased Indoor Exposure to Commonly Used Disinfectants during the COVID-19 Pandemic, Environmental Science and Technology Letters 7(10) : 760-765

Annexe 1

Etalonnage des COV spécifiques par la méthode MOSEC-SPME

Dans cette étude, une quantification de cinq COV spécifiques a été réalisée sur la base de la réponse des composés en FID. Pour cela, une atmosphère gazeuse étalon de chaque COV individuel a été générée à l'aide d'un dispositif d'injection continue (figure A1) consistant à introduire, à l'aide d'un pousse-seringue, un faible débit (2 µL/h) de COV liquide (composé commercial) dans un flux d'air zéro à 10 L/min où le COV est vaporisé. Le gaz concentré généré est ensuite dilué successivement par de l'air zéro humidifié à 50 % à 23 ± 2 °C jusqu'à la concentration souhaitée (C). Cette concentration est déterminée et validée par une méthode de prélèvement par tube d'adsorbant et une analyse par ATD/GC/MS/FID considérée comme référence. Une cellule MOSEC est alors balayée par l'atmosphère de COV ainsi générée, puis la cellule est hermétiquement fermée et un prélèvement SPME est réalisé. Cette opération est répétée pour différents temps d'extraction SPME (t) variant de 2 à 30 min. Une droite d'étalonnage « aire de pic = f(Cxt) » (Tuduri et al., 2002) est ainsi établie avec minimum six niveaux de calibration (Figure A2).

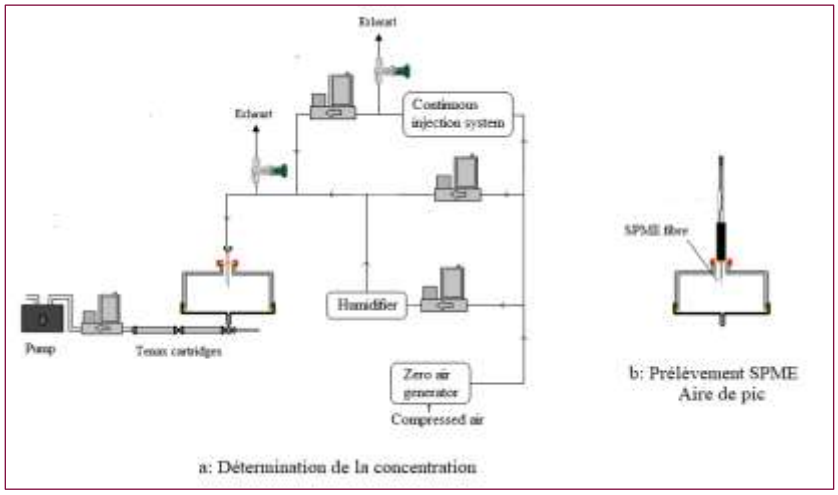

Figure A1 : Dispositif d'étalonnage de COV par la méthode MOSEC-SPME

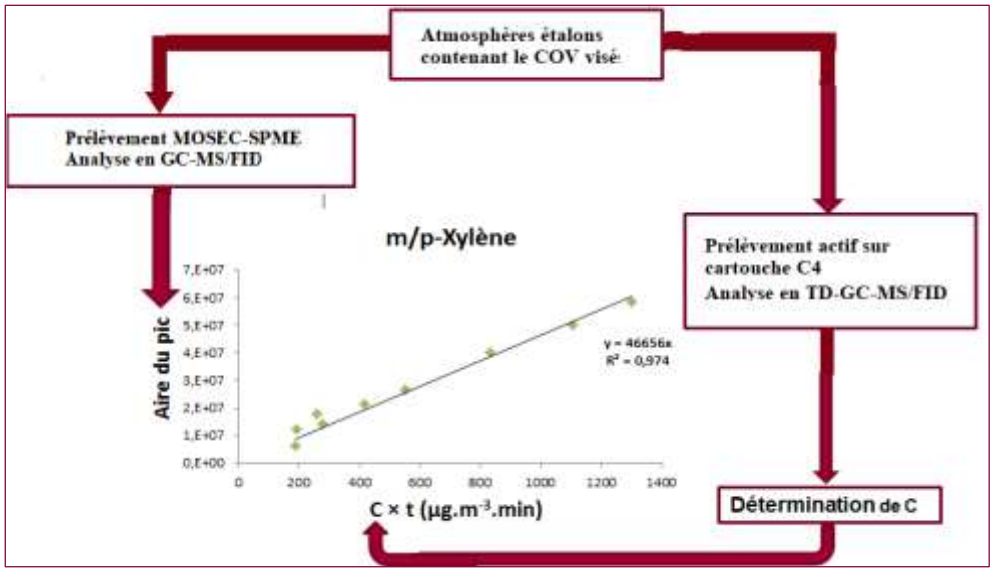

Figure A2 : Principe et exemple d'étalonnage par la méthode MOSEC-SPME

Les résultats d'étalonnage MOSEC-SPME obtenus pour les cinq COV spécifiques ciblés pour le lot 4 sont reportés dans la Figure A3. La limite de quantification et la reproductibilité de chaque COV sont reportées dans le Tableau A1.

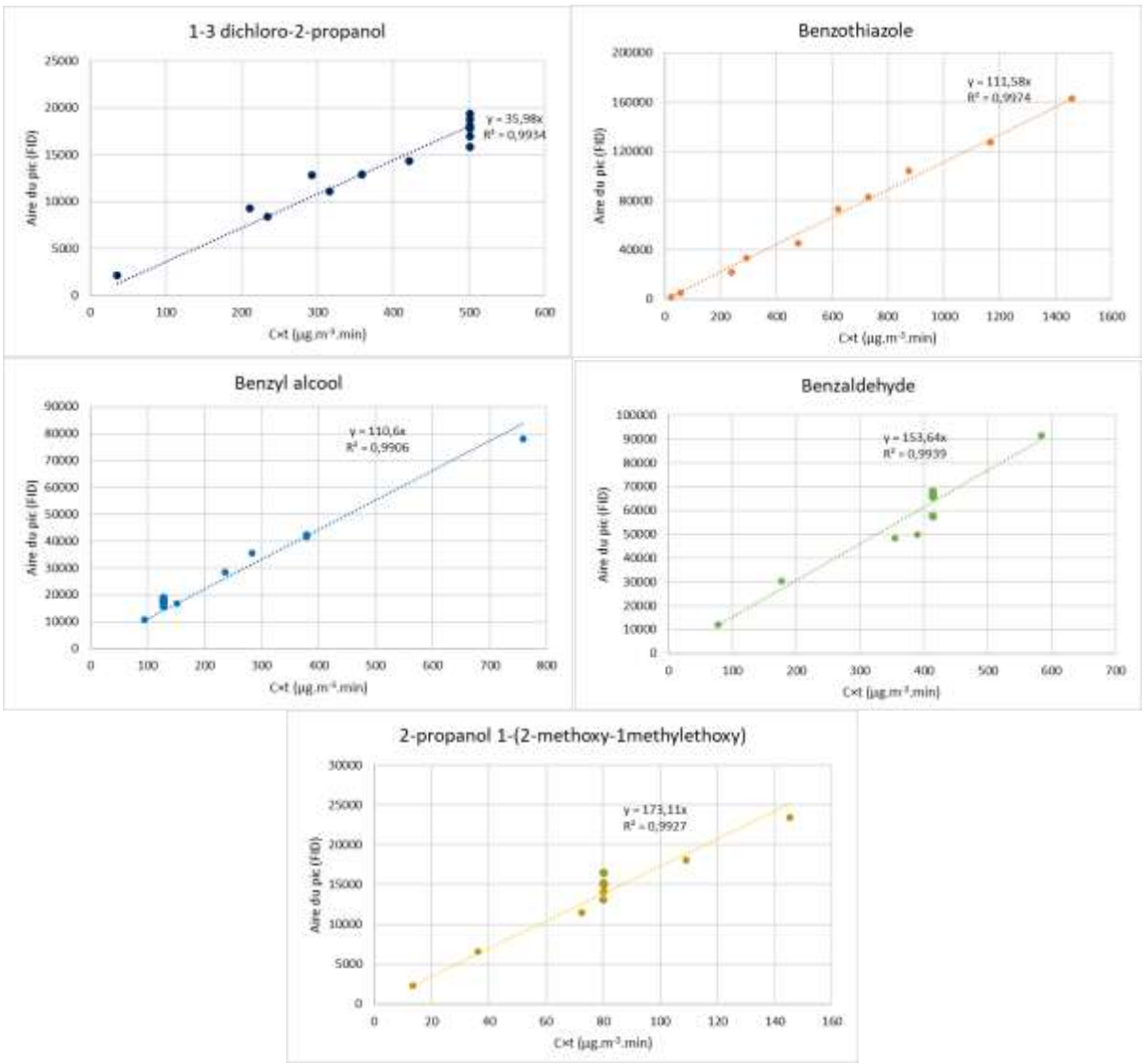

Figure A3 : Résultats de l'étalonnage MOSEC-SPME pour les 5 COV spécifiques ciblés

Composé	LD pour 20 min d'extraction (µg.m^{-3})	LQ pour 20 min d'extraction (µg.m^{-3})	Reproductibilité CV n=6
Benzothiazole	0,5	1,5	8,0% (à 20 µg.m^{-3})
2-propanol, 1,3-dichloro-	1,5	5,0	7,1% (à 33 µg.m^{-3})
Benzylalcool	0,5	1,7	6,5% (à 8,5 µg.m^{-3})
Benzaldéhyde	0,9	3,1	5,9 % (à 41 µg.m^{-3})
2-propanol, 1-(2-methoxy-1-methylethoxy)-	0,3	1,0	7,9% (à 7 µg.m^{-3})

Tableau A1 : Limite de quantification (LQ) et reproductibilité avec la méthode MOSEC-SPME pour les 5 COV spécifiques

Annexe 2

Classements CMR et IARC, VTR des COV et COSV identifiés et quantifiés lors des campagnes de mesures du lot 3

COV	Classement CMR *(Classement IARC)*	VTR inhalation (Anses) (en concentration dans l'air ou ERU* pour VTR cancérogène)
Formaldéhyde	C1B, M2 *(groupe 1)*	Aiguë : 123 µg/m³ Chronique à seuil : 123 µg/m³
Acétaldéhyde	C1B, M2 *(groupe 2B)*	Subchronique (8h) : 300 µg/m³
Benzène	C1A, M1B *(groupe 1)*	Chronique à seuil : 10 µg/m³ Cancérogène sans seuil : $(2{,}6.10^{-5}$ µg/m³$)^{-1}$
Toluène	R2 *(groupe 3)*	Aiguë : 31 mg/m³ Chronique à seuil : 19 mg/m³
Ethylbenzène	*(groupe 2B)*	Aiguë : 22 mg/m³ Subchronique : 4,3 mg/m³ Chronique à seuil : 1,5 mg/m³
m,p,o Xylène	*(groupe 3)*	Aiguë : 8,3 mg/m³ Chronique à seuil : 100 µg/m³
Styrène	R2 *(groupe 2A)*	Sans VTR
Naphtalène	C2 *(groupe 2B)*	Chronique à seuil : 37 µg/m³ Cancérogène sans seuil : $(5{,}6.10^{-3}$ mg/m³$)^{-1}$
Butylacétate	*(groupe 3)*	Chronique à seuil : 2 mg/m³
Méthylméthacrylate		Chronique à seuil : 0,7 mg/m³
Dichlorométhane	C2 *(groupe 2A)*	Sans VTR
Trichlorométhane	C2 *(groupe 2B)*	Chronique à seuil : 63 µg/m³
2-propanol 1,3-dichloro	C1B *(groupe 2B)*	Sans VTR
Tétrahydrofurane	C2 *(groupe 2B)*	Sans VTR
Acide 2-éthyl hexanoïque	R2	Sans VTR

*Tableau A2 : Classements CMR et IARC, VTR des COV identifiés et quantifiés dans l'air des 10 salles étudiées. (*ERU : Excès de Risque Unitaire)*

COSV (n°CAS)	Classement CMR *(IARC) et PE*	VTR par voie orale (µg/kg pc/j) (1) Bonvallot et al., 2010), (2) Anses*, (3) Ineris**, (4) Rapport Météores, EHESP, M. Mane 2023.
Phtalates		
DMP (131-11-3)	-	Chronique à seuil : 1500 (1)
DEP (84-66-2)	PE	Chronique à seuil : 200 (1)
DiBP (84-69-5)	R1B	Chronique à seuil : 50 (1)
DBP (84-74-2)	R1B	Chronique à seuil : 52 (1)
BBP (85-68-7)	R1B *(groupe 3)*	Chronique à seuil : 200 (1)
DEHP (117-81-7)	PE, R1B *(groupe 2B)*	Chronique à seuil : 4 (1)
DiNP (28553-12-0)	PE	Chronique à seuil : 1000 (1)
HAP		
Acenaphtylene (208-96-8)	-	Chronique sans seuil : 1 (3)
Acenaphtene (83-32-9)	*(groupe 3)*	Chronique à seuil : 60 (1)
Fluorene (86-73-7)	-	Chronique à seuil : 40 (1)
Phenanthrene (85-01-8)	*(groupe 3)*	Chronique à seuil : 40 (1)
Anthracene (120-12-7)		Chronique à seuil : 40 (1)
Fluoranthene (206-44-0)	*(groupe 3)*	Chronique à seuil : 40 (1)
Pyrene (129-00-0)	*(groupe 3)*	Chronique à seuil : 30 (1)
Benzo[a]anthracene (56-55-3)	*(groupe 2B)*	Chronique sans seuil : 100 (3)
Chrysene (218-01-9)	*(groupe 2B)* Génotoxique	Chronique sans seuil : 0.005µg TEQ (3)
Benzo[b]fluoranthene (205-99-2)	PE *(groupe 2B)*	Chronique sans seuil : 0.005µg TEQ (3)
Benzo[k]fluoranthene	C1B *(groupe 2B)*	Chronique sans seuil : 0.005µg TEQ (3)
Benzo[a]pyrene	C1B, M1B, R1B *(groupe 3)*	Chronique à seuil : 0,3 (2)
Dibenzo[a,h]anthracene	*(groupe 2B)*	Chronique sans seuil : 0.005µg TEQ (3)
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	*(groupe 2B)*	Chronique sans seuil : 0.005µg TEQ (3)
Benzo[g,h,i]perylene	*(groupe 3)*	Chronique à seuil : 30 (1)
Muscs		
Galaxolide (1222-05-5)	PE	Chronique à seuil : 1500 (1)
Tonalide (21145-77-7)	PE	Chronique à seuil : 15 (1)
Retardateurs de Flamme		
Tributylphosphate (126-73-8)	C2	Chronique à seuil : 240 (1)
TMP (512-56-1)	-	Absence de VTR

DEEP (78-38-6)	-	Absence de VTR
TEP (78-40-0)	-	Absence de VTR
TIPP (513-02-0)	-	Absence de VTR
BRP246 (118-79-6)	-	Absence de VTR
TCEP (115-96-8)	C2, R1B (groupe 3)	Absence de VTR
TCPP (13674-84-5)	-	Absence de VTR
ATE (3278-89-5)	-	Absence de VTR
TBEP (78-51-3)	-	Chronique à seuil : 90 (3), hépatotoxique
TDCPP (13674-87-8)	C2, suspicion PE	Chronique à seuil : 20 (3), toxique pour le rein
TEHP (78-42-2)	-	Absence de VTR
EHDPP (1241-94-7)	-	Absence de VTR
TPP (115-86-6)	Suspicion PE	Absence de VTR
TOCP (78-30-8)	-	Absence de VTR
TMCP (563-04-2)	-	Absence de VTR
TXP (25155-23-1)	-	Absence de VTR
Biocides		
MIT	allergisant	Chronique à seuil : 2800 (4)
Chlorocrésol (59-50-7)	PE	Chronique à seuil : 30000 (4)
Géraniol	génotoxique	Chronique à seuil : 13 750 (4)
4-tert-Butylphenol	R2, PE	Chronique à seuil : 60000 (4)
TCC	PE, reprotoxique	
BIT	allergisant	Chronique à seuil : 10000 (4)
2-phenylphenol	irritant	Chronique à seuil : 400 (2)
4-tert-Octyl phenol	PE	Absence de VTR (2)
Benzophénone (119-61-9)	C1B, R2 (groupe 2) PE	Chronique à seuil : 30 (2)
4-n- Nonyl phenol (25154-52-3)	reprotoxique	Chronique : 30 (2)
OIT	allergisant	Chronique à seuil : 5000 (4)
Diclosan (3380-30-1)	PE, reprotoxique	Chronique à seuil : 20000 (4)
Triclosan	PE, reprotoxique	Chronique à seuil : 250 (1)
Bifenthrin	neurotoxique	Chronique à seuil : 15 (2)

* : https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-toxicologiques-de-reference-VTR

** : https://substances.ineris.fr/fr/substance

Tableau A3 : Toxicité et VTR des COSV par voie orale et chronique

Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des 10 salles sélectionnées – nd : non déterminé....17

Tableau 2 : Méthodologies de prélèvements et d'analyses....19

Tableau 3 : Limites de quantification (LQ) dans l'air pour les COV étudiés 20

Tableau 4 : Limites de quantification (LQ) dans l'air et les poussières pour les COSV étudiés 23

Tableau 5 : Ammoniums quaternaires recherchés dans les poussières des salles étudiées et limites de quantification (LQ) pour une prise d'essai de 5 mg 30

Tableau 6 : Age des pratiquants, fréquence et durée d'une séance de sport selon la typologie des salles étudiées 32

Tableau 7 : Informations concernant les 2 campagnes de prélèvements des COVs dans les 3 salles 39

Tableau 8 : Matériaux et COV étudiés pour l'identification des sources 40

Tableau 9 : Bilan des concentrations dans l'air du 1,3-dichloro-2-propanol pour la salle DOJ2 42

Tableau 10 : Bilan des concentrations dans l'air des deux COV ciblés pour la salle MOT2 42

Tableau 11 : Bilan des concentrations dans l'air des 3 COV ciblés pour la salle MUS1 43

Tableau 12 : Paramètres pour l'application du modèle au COV mesuré dans DOJ2. 46

Tableau 13 : Paramètres pour le modèle appliqué aux COV mesurés dans la salle MUS1. 47

Tableau 14 : Paramètres pour le modèle appliqué aux COV mesurés dans la salle MOT2. 47

Tableau 15 : Contributions aux concentrations des 3 COV dans l'air intérieur de la salle MUS1. 48

Tableau 16 : concentration des particules en suspension dans les salles de sport du Lot 4. En gris, masses indicatives. 56

Tableau 17 : coefficients de partage Kp dans les salles de sport (en grisé, valeurs indicatives) 57

Tableau 18 : coefficients de partage Kd dans les salles de sport 57

Tableau 20 : Concentrations gazeuses y0 (µg/m^3) mesurées à la surface des matériaux dans la salle MOT2 -* : valeur au-delà de la gamme d'étalonnage donnée à titre indicatif. < LQ : inférieur à la limite de quantification (LQ = 10 × écart-type des blancs fibres (Plaisance et al., 2021)). nd : non détecté..... 59

Tableau 21 : Concentrations gazeuses y0 (µg/m^3) de DBP mesurées à la surface des matériaux dans la salle MUS1 -* : : valeur au-delà de la gamme d'étalonnage donnée à titre indicatif. < LQ : inférieur à la limite de quantification (LQ = 10 × écart-type des blancs fibres (Plaisance et al., 2021)). nd : non détecté 59

Tableau 22 : Substances organiques et métaux recherchés dans l'étude de migration dans la sueur et la salive, limites de détection (LD) et de quantification (LQ) - *« BAC » : chlorure de benzalkonium, représente un mélange de plusieurs composés regroupés sous l'entrée générique dans le règlement CLP : « Composés d'ammonium quaternaire, alkyl en C8-18 benzyl diméthyles, chlorures (CAS n° 63449-41-2).....61

Tableau 23 : Résultats de migration de COV, COSV, BAC à partir des matériaux des salles dans les simulants de salive et sueurs acide et basique (d : composé détecté < LQ) - * résultat du 2ème prélèvement. 62

Tableau 24: Résultats de migration des métaux à partir de la dalle noire (salle MUS1) dans les simulants de salive et sueurs acide et basique (d : composé détecté < LQ) 63

FIGURES

Figure 1 : Tâches du projet QAI-Sport et leur articulation 10
Figure 2 : Licences délivrées en 2022 (en milliers) (recensement auprès des fédérations sportives) (INJEP, 2023) 14
Figure 3 : Evolution du nombre de publications scientifiques sur la qualité de l'air intérieur des salles de sport (Andrade et Dominski, 2018). 15
Figure 4 : Déploiement des prélèvements au cours d'une série de mesures 18
Figure 5 : Somme des COV par famille dans les 10 salles 20
Figure 6 : Somme des aldéhydes et cétones dans les 10 salles occupées (o -occupées (vac) 21
Figure 7 : Somme des hydrocarbures dans les 10 salles occupées (occ) et non-occupées (vac) 21
Figure 8 : Concentration des COV émergents dans les 10 salles occupées (occ) et non-occupées (vac) .. 22
Figure 9 : Somme des COSV par famille dans l'air 24
Figure 10 : Somme des COSV par famille et des ammoniums quaternaires dans les poussières 24
Figure 11 : Somme des phtalates dans l'air 25
Figure 12 : Somme des phtalates dans les poussières 26
Figure 13 : Somme des HAP dans l'air 26
Figure 14 : Somme des HAP dans les poussières 27
Figure 15 : Somme des retardateurs de flamme dans l'air 28
Figure 16 : Somme des retardateurs de flamme dans les poussières 28
Figure 17 : Somme des biocides semi-volatils dans l'air 29
Figure 18 : Somme des biocides dans les poussières 29
Figure 19 : Somme des ammoniums quaternaires dans les poussières 31
Figure 20 : Microorganismes dans l'air des 10 salles étudiées (occ : salles occupées – vac : salles non occupées) – Pour les salles entourées en rouge, des prélèvements cycloniques ont été réalisés. 32
Figure 21 : Somme des concentrations des COV quantifiés en conditions d'occupation et d'inoccupation des salles de sport. 33
Figure 22 : Somme des concentrations d'acétone et 6-méthyl-5-hepten-one (sulcatone) en conditions d'occupation et d'inoccupation des salles de sport 34
Figure 23 : Somme des concentrations des COSV quantifiés en conditions d'occupation et d'inoccupation des salles de sport. 34
Figure 24 : Somme des concentrations des microorganismes quantifiés en condition d'occupation et d'inoccupation des salles de sport- O : occupé, V : vacant 35
Figure 25 : Somme des concentrations en COV et en COSV dans l'air des salles de sport occupées et inoccupées en fonction du taux de renouvellement d'air des salles 36
Figure 26 : déploiement des prélèvements au cours d'une série de mesures dans le cadre du lot 4. 38
Figure 27 : Bilan des COV par familles dans les trois salles 39
Figure 28 : Principe de la méthode d'échantillonnage des COV à l'interface matériau/air 41
Figure 29 : Concentration à l'interface matériau/air (y0) du COV ciblé pour les 3 matériaux de DOJ2 42
Figure 30 : Concentration à l'interface matériau/air (y0) des COV ciblés pour les 6 matériaux de MOT2 43
Figure 31: Concentration à l'interface matériau/air des COV ciblés pour les 8 matériaux de MUS1 44

Figure 32 : Comparaison des concentrations moyennes modélisées et mesurées pour une vitesse d'air à la surface des matériaux de 0,01 m/s. 48
Figure 33 : COSV dans l'air des salles de sport du lot 4 (DOJ2, MOT2, MUS1)..... 49
Figure 34 : COSV et ammoniums quaternaires (AQ) dans les poussières des salles de sport du lot 4 (DOJ2, MOT2, MUS1) 50
Figure 35 : phtalates dans l'air des salles de sport du Lot 4..... 51
Figure 36 : phtalates dans les poussières des salles de sport du Lot 4 51
Figure 37 : HAP dans l'air des salles de sport du Lot 4..... 52
Figure 38 : HAP dans les poussières des salles de sport du Lot 4 52
Figure 39 : retardateurs de flamme dans l'air des salles de sport du Lot 4 53
Figure 40 : retardateurs de flamme dans les poussières des salles de sport du Lot 4 53
Figure 41 : biocides semi-volatils dans l'air des salles de sport du Lot 4..... 54
Figure 42 : biocides semi-volatils dans les poussières des salles de sport du Lot 4 54
Figure 43 : biocides non-volatils (ammoniums quaternaires) dans les poussières des salles de sport du Lot 4 (note, pas de mesure pour le Lot3 de DOJ2 en raison d'une quantité insuffisante de poussière pour l'analyse) 55
Figure 44 : régression linéaire des valeurs de log (Kp) et log (Kd). n = 40 points représentant chacun un COSV dans une salle de sport, pour lesquels à la fois le Kd et le Kp (indicatif ou validé) sont disponibles..... 58
Figure 45 : régression linéaire des valeurs de log (Kp) et log (Kd). n=16 points représentant chacun un COSV dans une salle de sport, pour lesquels à la fois le Kd et le Kp (validé) sont disponibles . 58
Figure 46 : Bactéries et moisissures dans l'air détectées par culture 64
Figure 47 : Diversité intra échantillon des bactéries dans l'air (impaction en milieu liquide) et dans les poussières par rapport au nombre de séquences..... 65
Figure 48 : Diversité intra échantillon des moisissures dans l'air (impaction en milieu liquide) et dans les poussières par rapport au nombre de séquences..... 65
Figure 49 : 5 principaux phyla bactériens dans l'air 66
Figure 50 : Vingt principaux genres bactériens dans l'air..... 67
Figure 51 : Cinq principaux phyla bactériens dans les poussières 67
Figure 52 : Vingt principaux genres bactériens dans les poussières 68
Figure 53 : Vingt principaux genres fongiques dans l'air 69
Figure 54 **:** Vingt principaux genres fongiques dans les poussières..... 70

L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique – partage ses expertises, assure le financement et l'accompagnement de projets de transformation dans des domaines variés : énergie, économie circulaire, décarbonation de l'industrie, mobilité, bâtiment, qualité de l'air, consommation et production responsables, alimentation durable, bioéconomie, gestion des sols, adaptation au changement climatique et transition juste.

L'ADEME mobilise les citoyens, les entreprises et les territoires pour les aider à progresser vers une société plus sobre en carbone et économe en ressources. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, elle conseille, facilite et soutient les initiatives, de la recherche à la diffusion des solutions.

Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), l'ADEME met également ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

www.ademe.fr

LES COLLECTIONS DE L'ADEME

FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.

HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

EXPERTISES

Qualité de l'air intérieur des salles de sport

La qualité de l'air intérieur (QAI) des salles de sport est à ce jour peu documentée alors que l'activité physique liée à la pratique sportive peut conduire à l'augmentation de l'exposition. L'objectif de ce projet était donc de caractériser l'exposition aux polluants organiques volatils (COV), semi-volatils (COSV) et aux contaminants microbiologiques (moisissures, virus et bactéries) dans 10 salles de sport de trois typologies différentes : dojos, salles de fitness/musculation, salles de motricité dans les écoles maternelles. La pollution par les COV et la contamination microbiologique sont globalement similaires à celles des autres environnements intérieurs. En revanche, des concentrations élevées de COSV dans les poussières de certaines salles (plusieurs mg/g de phtalates et d'ammoniums quaternaires) ont été mesurées. De nombreux composés émergents, utilisés comme alternatives à des substances interdites ou sujettes à restriction et dont on ne connaît pas les effets sur la santé, ont été identifiés. Il apparaît donc essentiel de poursuivre ces travaux par une évaluation des expositions aux contaminants dans ces environnements particuliers en fonction du temps passé dans les salles de sport et de l'âge des pratiquants. Les substances émergentes doivent également faire l'objet d'une attention particulière et d'une meilleure caractérisation en tant que substances potentiellement préoccupantes. Les résultats obtenus permettent aussi de proposer des solutions d'amélioration de la qualité de l'air intérieur des salles de sport. Les matériaux de construction et des équipements sportifs étant les principales sources des COV et COSV identifiés dans cette étude, la sélection de matériaux peu émetteurs devrait être intégrée dans toute démarche de construction ou de rénovation de salle de sport. Le renouvellement de l'air est aussi un paramètre déterminant d'amélioration de la qualité de l'air intérieur, de même qu'une bonne gestion de l'occupation des salles et de leur entretien.

QAI-Sport est une étude originale de la qualité de l'air intérieur de différents types de salles de sport.

Les principaux contaminants, mesurés parfois en fortes concentrations, sont des additifs de matériaux de construction ou d'équipements sportifs (plastifiants, retardateurs de flamme, biocides et leurs alternatives émergentes). Des substances non intentionnelles potentiellement toxiques sont aussi émises par des matériaux recyclés.

L'impact de la ventilation et de l'occupation des salles sur les concentrations de contaminants dans l'air a aussi été étudié.

Des stratégies appropriées, telles que l'augmentation du taux de renouvellement de l'air, le contrôle du taux d'occupation ou l'élimination des sources de contaminants, sont les principales recommandations de cette étude pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur de ces environnements spécifiques encore peu étudiés.