

Qualité de l'air dans les salles d'escalade en Wallonie

Auteur : Wysota, Louison

Promoteur(s) : Romain, Anne-Claude

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/27331>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège – Faculté des Sciences – Département des Sciences et Gestion de l’Environnement

QUALITÉ DE L’AIR INTÉRIEUR DANS LES SALLES D’ESCALADE EN WALLONIE



LOUISON WYSOTA

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L’OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN SCIENCES ET
GESTION DE L’ENVIRONNEMENT, À FINALITÉ SPÉCIALISÉE**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025 – 2026

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE LA PROFESSEURE ANNE-CLAUDE ROMAIN

COMITÉ DE LECTURE :

DR. CLAUDIA FALZONE

MR. LOÏC RAYMOND

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) (co-) promoteur(s), membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Wysota Louison
louisonwysota@yahoo.fr .

Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier ma promotrice, la Professeure A.-C. Romain pour son encadrement, ses conseils et sa supervision, et notamment pour avoir accepté aussi tardivement que je réalise mon mémoire au laboratoire SAM sous sa supervision.

Ensuite, je remercie toute l'équipe du laboratoire SAM de l'ULiège pour leur aide et leurs conseils. Je remercie particulièrement Alexandra Delperdange pour sa disponibilité et son aide, notamment pour les prélèvements et l'analyse du formaldéhyde. Je remercie également la Dr. Claudia Falzone, pour ses conseils et sa disponibilité.

J'adresse également un remerciement aux gérants des salles d'escalade étudiées d'avoir accepté que leur salle fasse l'objet de ce travail, ainsi que pour leur disponibilité, leur flexibilité et leur collaboration.

Merci à Antoine et Émilie, pour leur aide précieuse lors de l'installation des instruments, ainsi qu'à Éléa, qui a également réalisé son mémoire dans l'équipe SAM et qui a partagé cette expérience avec moi, la rendant d'autant plus agréable et divertissante.

Finalement, merci à Martin, pour sa présence, son aide et son soutien tout au long de mon mémoire.

Table des matières

Introduction	1
Partie bibliographique	3
I. Qualité de l’air intérieur	3
I.I Définition et enjeux	3
I.II Pollution	4
I.III Environnement intérieur	6
I.IV Effets sur la santé	6
II. Qualité de l’air intérieur dans les salles d’escalade.....	8
II.I La pratique de l’escalade.....	8
II.II État des connaissances scientifiques.....	9
III. Cadre règlementaire	19
III.I Europe	19
III.II Belgique.....	21
III.III Techniques de mesures	24
Objectifs du mémoire	27
Matériel et méthodes	28
I. Sites étudiés	28
I.I Salle A.....	28
I.II Salle B	30
I.III Salle C.....	33
I.IV Comparaison des salles.....	35
II. Méthodologie.....	36
II.I Instruments et étalonnage.....	36
II.II Campagne de mesure	41
II.III Questionnaire sur la perception des usagers.....	52
II.IV Législation	54
III. Analyse des données.....	56
III.I Données recueillies	56
III.II Traitement des données	56
Résultats	58
I. Polluants.....	58

I.I Mesures des PM et du CO ₂	58
I.II Mesures de formaldéhyde	69
II. Questionnaire.....	70
III. Entretiens.....	74
III.I Réponse de Mr. M. Degallier.....	74
III.II Entretien avec Mr. L. Raymond.....	77
Discussion	79
I. Polluants.....	79
I.I PM et CO ₂	79
I.II Formaldéhyde.....	83
II. Questionnaire.....	85
III. Législation	88
Conclusions et perspectives	90
Note de transparence	92
Bibliographie.....	93
I. Législation.....	93
I.I Législation européenne.....	93
I.II Législation belge	93
II. Ouvrages scientifiques.....	94
III. Littérature grise	102
Annexes	107
Annexe 1 : Questionnaire	107
Annexe 2 : Réponses au questionnaire sous forme de graphiques.....	112
Résumé	115
Abstract	115

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ADN	Acide désoxyribonucléique
AgBB	<i>Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten</i>
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
AR	Arrêté royal
ASHRAE	<i>American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers</i>
BRI	<i>Building related illnesses</i>
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
COSV	Composés organiques semi-volatils
COV	Composés organiques volatils
DNPH	2,4-dinitrophénylhydrazine
EPA	<i>Environmental protection agency</i>
EU-LCI	European Union lowest concentration of interest
HPLC	<i>High-performance liquid chromatography</i>
IFSC	<i>International federation of sport climbing</i>
IR	Infrarouge
Laboratoire SAM	<i>Sensing of atmospheres and monitoring</i>
Marquage CE	Conformité européenne
OMS	Organisation mondiale de la santé
OSB	<i>Oriented strand board</i>
PEB	Performance énergétique des bâtiments
PM	<i>Particulate matter</i> : particules en suspension
PVC	Polychlorure de vynile
QAI	Qualité de l'air intérieur
QR	<i>Quick response</i>
RGPD	Règlement général sur la protection des données
SBS	<i>Sick building syndrom</i>
SPF	Service public fédéral
SPW	Service public de Wallonie
UE	Union Européenne
ULiège	Université de Liège
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs seuils pour le formaldéhyde, le CO ₂ et les PM.....	22
Tableau 2 : Campagne de mesure des PM et CO ₂	49
Tableau 3 : Conditions de prélèvement du formaldéhyde	50
Tableau 4 : Dépassement des seuils OMS des concentrations en PM des trois salles	60
Tableau 5 : Dépassement des seuils du Code du bien-être au travail pour le CO ₂ dans les trois salles	61
Tableau 6 : Concentrations des polluants et dépassements des seuils réglementaires par salle	62
Tableau 7 : Coefficients de variation.....	63
Tableau 8 Résultats des mesures de formaldéhyde	69

Liste des figures

Figure 1 : Particules de caoutchouc dans les chaussons (Sherman et al., 2025).....	14
Figure 2 : Accueil et salle de bloc de la Salle A	29
Figure 3 : Plan de la salle de bloc de la salle A	30
Figure 4 : Accueil et salle de bloc de la salle B.....	31
Figure 5 : Plan de la Salle B.....	32
Figure 6 : Cafétéria, accueil et salle de bloc de la Salle C	33
Figure 7 : Plan de la salle de bloc de la Salle C	35
Figure 8 : Capteur SPS30 PM	36
Figure 9 : Séries temporelles comparant les données PM2,5 et PM10 des trois instruments ; Graphiques de dispersion comparant les données PM2,5 et PM10 des trois instruments	37
Figure 10 : Capteur CO2 Dynamant	39
Figure 11 : Module WInsen et capteur CO ₂	40
Figure 12 : Cartouche LpDNPH.....	40
Figure 13 : Plan des mesures dans la Salle B	42
Figure 14 : Emplacements des mesures à la Salle B : (A et B) ECT et 3PM à l'accueil ; (C) Winsen et 3PM ; (D) prélèvement formaldéhyde.....	42
Figure 15 : Plan des mesures dans la Salle C	43
Figure 16 : Emplacements des mesures à la Salle C : (A) ECT et 3PM à l'accueil ;(B) Winsen et 3PM dans la salle ; (C) prélèvement formaldéhyde.	43
Figure 17 : Emplacements des mesures dans la Salle A : (A) ECT et 3PM à l'accueil ; (B) Winsen et 3PM dans la salle ; (C) prélèvement formaldéhyde.	44
Figure 18 : Plan des mesures dans la Salle A	44
Figure 19 : Installation des instruments : (A, B) Salle A ; (C) Salle B.	47
Figure 20 : Affiche utilisée pour la promotion du questionnaire	53
Figure 21 : Distribution des concentrations de PM2,5, PM10 et CO ₂ selon la salle d'escalade et la zone (accueil et salle)	64
Figure 22 : Évolution temporelle des concentrations de PM2,5, PM10 et CO ₂ et fréquentation journalières dans les 3 salles de bloc.....	67
Figure 23 : Évolution temporelle des concentrations de PM2,5, PM10 et CO ₂ et fréquentation journalière à l'accueil des 3 salles.....	68
Figure 24 : Concentrations en formaldéhyde dans les salles.....	69
Figure 25 : Appréciation de la qualité de l'air dans les salles d'escalade	71
Figure 26 : Appréciation de la qualité de l'air dans les salles de bloc et de voie	71
Figure 27 : Fréquence des symptômes respiratoires et oculaires	73
Figure 28 : Comparaison de l'appréciation de la qualité de l'air dans les salles d'escalade selon la présence de symptômes respiratoires et/ou oculaires.....	73

Introduction

L'air est nécessaire à la vie sur Terre. Ainsi, respirer un air pur devient un droit inaliénable pour chaque humain. Pourtant, la pollution de l'air ambiant, bien que généralement invisible, représente un réel risque sanitaire (Atafar et al., 2025).

En effet, l'atmosphère est confrontée à de nombreux polluants, dont l'origine peut être naturelle (activité volcanique, feux de forêt, embruns marins, foudre, désintégration radioactive naturelle, phénomènes météorologiques, etc.) ou anthropique (transports, émissions industrielles, gestion des déchets, activités résidentielles, pratiques agricoles, etc.) (Atafar et al., 2025).

La présence de polluants de l'air n'est pas contemporaine. Dès les premiers feux de bois pour la cuisson des aliments en milieu confiné, la pollution de l'air a entraîné des problèmes de santé. Dans le monde antique, de nombreux écrits, tels que ceux de Pliny l'Ancien ou d'Arétée de Cappadoce, relatent que les maladies pulmonaires étaient déjà répandues. Dans les grandes villes comme Athènes et Rome, on parlait d'ailleurs de « ciel pesant » et d'« air infâme », causé notamment par l'extraction et la fusion du plomb et du cuivre (Mosley, 2014).

La Révolution Industrielle marque un tournant historique pour l'économie mondiale mais également pour la pollution de l'air. Les diverses sources d'énergie (bois, charbon, pétrole) contribuent à l'essor de grandes villes industrielles et de nouvelles technologies, entraînant un meilleur niveau de vie, mais également, par la combustion, une pollution atmosphérique élevée et, par conséquent, des maladies humaines (Atafar et al., 2025). La bronchite, à cette époque, est la première cause de mortalité dans les villes britanniques et certains enfants souffrent de rachitisme en raison du manque d'ensoleillement dû à la pollution (Mosley, 2014).

Il faudra des catastrophes majeures pour que des mesures fortes soient adoptées. Les cas de la Vallée de la Meuse en 1930 et de Donora en Pennsylvanie en 1948 sont interpellants, mais c'est l'évènement du smog (contraction de fumée *smoke* et brouillard *fog*) de Londres en 1952 qui marque les esprits par son lourd tribut : 4000 morts, voire jusqu'à 12 000 selon les recherches récentes. À la suite de cette tragédie, le *British Clean Air Act*, législation fondamentale de la protection de l'environnement, est promulgué en 1956. Par la suite, de nombreuses sources de polluants seront elles aussi réglementées : automobiles, liquides réfrigérants, industries, ... (Atafar et al., 2025; Mosley, 2014).

Ces dernières décennies, une nouvelle problématique sanitaire a émergé : les citoyens, passant environ 90% de leur temps en intérieur, sont exposés à des taux élevés de polluants dans les bâtiments, parfois plus pollués que l'air l'extérieur (Mannan & Al-Ghamdi, 2021; US EPA, 2014b).

En parallèle, la pratique de l'escalade est devenue très populaire ces dernières années, la Belgique ne faisant pas exception. Le sport présente de nombreux avantages, tant sur la santé physique que mentale, mais des craintes autour de la qualité de l'air dans ces salles ont récemment émergées. En effet, l'usage de la magnésie et les matériaux des chaussons ont été démontrés comme étant des sources de substances polluantes dans l'air intérieur. C'est ce contexte qui a initié ce mémoire.

Ce travail a pour objectifs (1) d'évaluer l'état de la qualité de l'air dans des salles d'escalade en bloc en Wallonie, (2) d'évaluer la perception de la qualité de l'air des usagers des salles d'escalade en Wallonie et, finalement (3), d'interroger la législation en place et les pratiques pouvant être mises en œuvre.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la littérature scientifique et au cadre réglementaire concernant la qualité de l'air intérieur dans les salles d'escalade. La seconde partie de ce travail présente le travail expérimental mené, puis les résultats seront ensuite interprétés et discutés. Finalement, nous concluons ce travail en proposant des perspectives.

Partie bibliographique

Cette partie bibliographique s'intéresse dans un premier temps à la littérature scientifique concernant la qualité de l'air intérieur de façon globale. Nous nous pencherons ensuite sur la qualité de l'air dans les salles d'escalade, puis finalement nous énoncerons le cadre réglementaire en vigueur pour les polluants qui nous intéressent.

I. Qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air intérieur est d'abord abordée par sa définition et ses enjeux. Les sources principales de polluants sont ensuite décrites, ainsi que les principaux polluants et paramètres d'air intérieur, et finalement leurs effets sur la santé.

I.I Définition et enjeux

En 2019, 99% de la population mondiale était exposée à un air ambiant qui dépassait les seuils de concentration de polluants de l'OMS, causant 4,2 millions de morts prématurées (*Ambient (Outdoor) Air Pollution*, 2024). La pollution de l'air intérieur est également préoccupante : en 2021, elle a été responsable d'environ 2,9 millions de décès dans le monde, ainsi que de 95 millions d'années de vie en bonne santé perdues (*Household Air Pollution*, 2025). La pollution de l'air est ainsi un risque sanitaire environnemental majeur, malgré l'implémentation de normes nationales et européennes qui ont réduit la pollution de l'air ces deux dernières décennies (*Air Quality*, 2023; *Air Quality Status in Europe 2026*, 2026).

L'OMS définit la pollution de l'air comme la **contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par tout agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère** (*Air Pollution*, s. d.). La qualité de l'air intérieur se réfère à la qualité de l'air dans les bâtiments, englobant les polluants présents mais également la température, l'humidité relative, la luminosité, l'odeur et le bruit. Celle-ci permet d'évaluer les risques sur la santé des occupants et leur confort (Tran et al., 2020; US EPA, 2014a). Une bonne qualité d'air est d'autant plus importante pour la santé que nous passons une majeure partie de notre temps en intérieur. C'est notamment les cas pour les citoyens, qui occupent des environnements fermés 90% de leur temps (habitation, bureau, voiture, ...) (Mannan & Al-Ghamdi, 2021). De plus, les personnes particulièrement vulnérables sont également celles qui

passent le plus de temps en intérieur : les jeunes, les personnes âgées et les malades chroniques (US EPA, 2014b).

Depuis les années 1970 et la première crise pétrolière, les bâtiments sont devenus de plus en plus étanches et hermétiques, pour réduire la consommation d'énergie (Prajakta P. Shrimandilkar, 2013). Ce phénomène d'efficacité énergétique s'est amplifié ces dernières décennies en raison du dérèglement climatique et des préoccupations environnementales qui en découlent (Wang et al., 2017). Les bâtiments passifs, bien que moins consommateurs en énergie, ne permettent pas à l'air de se renouveler grâce à l'infiltration d'air et la dilution des polluants, en raison de l'étanchéité du bâtiment (Spiru & Simona, 2017). À cela s'ajoute également l'introduction dans nos intérieurs de matériaux synthétiques et de produits chimiques, tant pour la construction que pour la décoration intérieure, dont la présence croît avec l'amélioration du niveau de vie (Mannan & Al-Ghamdi, 2021). Ainsi, l'air intérieur en est impacté, et peut être plus pollué que l'air extérieur, même dans de grandes villes (US EPA, 2014b).

Depuis les années 1960, la recherche s'est principalement concentrée sur la pollution de l'air ambiant, mais s'est progressivement intéressée à l'air intérieur au vu de son importance grandissante (Sundell, 2004).

I.II Pollution

a) Polluants

Les principaux polluants retrouvés en intérieur sont d'origine **chimique**. Par exemple, on retrouve une grande quantité de composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV) divers (formaldéhyde, phtalates, benzène, naphthalène, phénol, ...) qui peuvent avoir une toxicité élevée. On retrouve également des particules en suspension (PM), de nombreux gaz (CO, NO₂, SO₂, O₃, ...), certains métaux et fibres minérales (Cincinelli & Martellini, 2017; Romain, 2025; Tran et al., 2020).

Les polluants d'air intérieur **biologiques** correspondent aux particules biologiques, telles que les bactéries, les moisissures, le pollen, les spores, les virus et les acariens (Cincinelli & Martellini, 2017; Tran et al., 2020).

L'origine de la pollution peut être **physique**. Cela comprend les ondes électro-magnétiques générées notamment par les appareils électriques, et le radon, élément radioactif qui se stabilise en se désintégrant en plomb, et peut donc s'avérer dangereux si inhalé (Romain, 2025).

b) Sources

Les sources de pollution d'air intérieur sont nombreuses et diverses. Les principales sont les émissions des matériaux, l'infiltration de l'air extérieur, les occupants et leurs comportements, le chauffage, la ventilation, les contaminants biologiques (moisissures, acariens) et, finalement, le radon. (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010; Jones, 1999).

Les **matériaux** de construction, de revêtement et de mobilier tels que, par exemple, les revêtements de sols, le parquet, les colles, les laques, les vernis, les produits de préservation du bois, les peintures, le bois contreplaqué et les solvants émettent des composés toxiques tels que des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, des siloxanes, du formaldéhyde, ... (Jones, 1999; Tran et al., 2020). Certains équipements tels que les ordinateurs, les imprimantes et les photocopieurs peuvent également émettre de l'ozone et des composés volatils (Tran et al., 2020). Certains matériaux se dégradent dans le temps, deviennent friables et continuent à libérer des contaminants à des concentrations basses, bien que diffuses et continues (Cincinelli & Martellini, 2017; Jones, 1999; Wanner, 1993).

La pollution de l'**air extérieur** pénètre dans les environnements intérieurs par infiltration (ouvertures, joints, fissures) et par ventilation naturelle ou mécanique (Cincinelli & Martellini, 2017; US EPA, 2014b). Elle provient principalement du trafic routier et des activités industrielles, et peut parfois être la source principale de polluants à l'intérieur, notamment dans les bâtiments situés en zone urbaine, industrielle ou à forte circulation (Cincinelli & Martellini, 2017; Jones, 1999). Toutefois, l'aération et la ventilation des bâtiments garantissent le renouvellement de l'air intérieur et la dilution des polluants intérieurs. En effet, une des causes majeures de la pollution de l'air intérieur est une ventilation inadéquate, souvent trop faible. D'ailleurs, plusieurs études ont démontré que la qualité de l'air intérieur est moins bonne en hiver dans certaines habitations par manque d'aération, afin de ne pas refroidir les pièces (Spiru & Simona, 2017; Wang et al., 2017).

Le **comportement des occupants** du bâtiment est également à l'origine de la pollution : combustion, chauffage, ventilation, humidificateurs, équipements électroniques, produits de nettoyage, désodorisants, parfum, encens, animaux, cigarette, peinture, pesticides, fibres et allergènes, ... (Cincinelli & Martellini, 2017; Micallef et al., 1998; Tran et al., 2020; US EPA, 2014a). Ainsi, le comportement et les activités des individus vont directement affecter leur niveau d'exposition (Jones, 1999).

L'importance d'une source va évidemment dépendre de la quantité des polluants qu'elle émet ainsi que de la dangerosité des polluants émis. La fréquence importe aussi puisque certains polluants peuvent être émis de façon quasi continue, comme c'est le cas pour les matériaux de construction et de mobilier, tandis que d'autres sources peuvent être ponctuelles, comme le tabac, les désodorisants ou les produits ménagers. Par ailleurs, certains polluants peuvent persister longtemps dans l'air après leur émission. (US EPA, 2014a).

La qualité de l'air intérieur est donc dépendante de nombreux facteurs : la saison, l'environnement extérieur, le système de chauffage et de ventilation, les caractéristiques du bâtiment, ... (Spiru & Simona, 2017).

Une pollution de l'air intérieur peut être indiquée par différents indices : odeurs inhabituelles, moisissures, humidité excessive, manque de circulation d'air, système de ventilation sale ou défectueux, ..., mais également par des symptômes physiques (*cf.* I.V Effets sur la santé) (Spiru & Simona, 2017).

I.III Environnement intérieur

L'environnement intérieur comprend la qualité de l'air intérieur, le confort thermique, la lumière et le bruit et peut avoir une incidence sur le confort et la santé des occupants d'environnements clos (Orientations stratégiques et scientifiques de l'OQEI, 2025).

En effet, **la température et l'humidité relative** sont des aspects essentiels de l'environnement intérieur puisqu'ils peuvent influencer les concentrations de certains polluants. C'est notamment le cas lorsque certains matériaux sont soumis à une température élevée. Ainsi, ces paramètres peuvent résoudre certains problèmes de qualité de l'air en étant réajustés (Fang et al., 1998; Jones, 1999; Tran et al., 2020; US EPA, 2014a).

Il apparaît également que la perception de la qualité de l'air est fortement corrélée au confort thermique. Si celui-ci est maintenu grâce à la circulation d'air, alors la qualité de l'air sera perçue comme acceptable, même si la température fluctue. Le confort thermique peut également affecter la productivité des occupants du bâtiment (H. Zhang et al., 2011).

I.IV Effets sur la santé

Il est aujourd'hui communément admis qu'une mauvaise qualité de l'air intérieur peut entraîner des maladies et des symptômes particuliers. En effet, les polluants présents dans l'air sont inhalés et pénètrent dans l'organisme. Bien que généralement présents à faible concentration, les polluants d'air intérieur restent omniprésents et l'exposition à ceux-ci presque constante.

Ainsi, l'air intérieur est la cause de nombreuses maladies, mais également de morbidité et de mortalité (*Air Pollution*, s. d.; Mannan & Al-Ghamdi, 2021; Spiru & Simona, 2017; Tran et al., 2020). Les risques engendrés par une mauvaise qualité de l'air peuvent aller de simples symptômes qui détériorent légèrement l'état de santé, telle une toux, à des maladies telles que des cardiopathies ischémiques (oxygénation insuffisante du cœur) ou le cancer du poumon, qui entraînent un décès prématuré (*Définition et causes de l'insuffisance cardiaque*, 2025; *Harm to Human Health from Air Pollution in Europe*, 2025). Les conséquences courantes sont des infections respiratoires aiguës, des maladies pulmonaires (asthme, dermatite atopique, rhinite allergique) et des maladies cardiovasculaires (Tran et al., 2020).

Les effets peuvent se manifester peu après l'exposition ou parfois des années plus tard. Lorsqu'ils sont immédiats, les effets sont généralement de courte durée et peuvent être traités en éliminant l'exposition au polluant. Les symptômes peuvent comprendre des irritations des yeux, du nez et de la gorge, des maux de tête, des vertiges et de la fatigue. Néanmoins, ces symptômes étant associés à de nombreuses maladies virales, il n'est pas évident de les lier à la qualité de l'air. De plus, certaines maladies telles que l'asthme peuvent apparaître ou s'intensifier peu de temps après l'exposition. Des effets peuvent également apparaître dans les années suivant l'exposition, ou lorsque l'exposition a été longue et répétée. Les maladies engendrées peuvent être beaucoup plus sérieuses et invalidantes : maladies respiratoires, cardiaques, et cancers, allant parfois jusqu'à la mort (US EPA, 2014a).

Selon l'OMS, deux catégories de maladies sont liées aux bâtiments : le syndrome du bâtiment malsain (SBS : *Sick Building Syndrom*) et les maladies liées aux bâtiments (BRI : *Building Related Illnesses*). Le SBS désigne des symptômes non spécifiques qui sont généralement associés à un bâtiment : irritation des voies respiratoires supérieures, maux de tête, fatigue, éruptions cutanées, ..., et qui disparaissent après avoir quitté le bâtiment. Le BRI désigne, lui, les symptômes d'une maladie qui peut être directement attribuée à un contaminant spécifique dans l'air intérieur (Redlich et al., 1997; Tran et al., 2020).

Certaines études avancent que des maladies métaboliques, telles que l'obésité et le diabète de type II, pourraient également être induites par certains polluants intérieurs. Par ailleurs, certaines molécules retrouvées sous forme de particules auraient un rôle de perturbateur endocrinien (Hamanaka & Mutlu, 2018). De plus, la santé mentale pourrait être affectée par la qualité de l'air en raison de modifications de la structure et du fonctionnement des neurones, aggravant les risques de certaines pathologies, comme la démence, l'anxiété et les troubles dépressifs (*Harm to Human Health from Air Pollution in Europe*, 2025; Zundel et al., 2022).

Bien que la causalité entre de nombreux polluants et des maladies soit établie, il existe une grande incertitude quant aux concentrations ou aux durées d'exposition nécessaires pour entraîner des maladies et des effets spécifiques (US EPA, 2014a). Cela est notamment expliqué par la sensibilité de chaque individu face aux différents polluants. En effet, de nombreux facteurs vont influencer le risque de maladie d'un individu : son état de santé physique et psychologique, son âge, ses pathologies préexistantes, la fréquence et la durée d'exposition, etc. À cela s'ajoute également les activités et les comportements des individus, qui vont affecter leur exposition (Jones, 1999; Seltzer, 1997.; US EPA, 2014a).

Finalement, l'exposition aux combinaisons de polluants est inévitable mais les connaissances sur ce sujet sont très limitées et ne peuvent donc pas proposer de recommandations ou des seuils pour ces cocktails de polluants (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010).

II. Qualité de l'air intérieur dans les salles d'escalade

Après un bref aperçu de la pratique de l'escalade, l'état de l'art des connaissances scientifiques sur la qualité de l'air dans les salles d'escalade est exposé.

II.I La pratique de l'escalade

L'escalade trouve ses racines dans l'alpinisme. En effet, pour se préparer à gravir des sommets en hiver, des clubs d'alpinisme voient le jour dès les années 1870. Ils permettent aux alpinistes de s'entraîner en été sur des blocs, des falaises et des parois en Europe. Au fil du temps, l'escalade se développe, bien qu'elle reste un sport d'extérieur jusqu'en 1986, date à laquelle voit le jour la première salle d'escalade privée à Bruxelles. Par la suite, dans les années 90, de nombreuses salles d'escalade ouvrent leurs portes et rendent ainsi cette pratique accessible à tous (Jourdain, 2020).

Aujourd'hui, l'escalade en salle se pratique en voie ou en bloc. La voie imite l'escalade de falaise et se pratique sur des parois, généralement entre 10 et 20 mètres de hauteur, auxquelles les grimpeurs sont encordés pour l'assurage. Le bloc, quant à lui, se pratique sur des murs plus bas, généralement hauts de 3 à 4 mètres, auxquels les grimpeurs ne sont pas encordés.

En 2020, l'escalade a acquis le titre de discipline olympique aux Jeux Olympiques de Tokyo, (*World Climbing*, 2020) et a aujourd'hui intégré la liste des sports officiels pour les Jeux Olympiques de Los Angeles en 2028, démontrant la popularité grandissante de ce sport ces

dernières années (*Vingt-huit sports inclus dans le programme initial axé sur les jeunes des Jeux de LA28 - Actualité Olympique*, 2022).

En 2019, l'IFSC (*International Federation of Sport Climbing*) estimait à 44,5 millions le nombre de grimpeurs à travers le monde (IFSC 2019 Annual Report, 2020). En Belgique, le chiffre s'élevait à environ 200 000 grimpeurs en 2020. Une enquête de la fédération francophone d'escalade estimait que les salles d'escalades engrangeaient 50 000 entrées par mois, 3 millions d'euros de chiffre d'affaires et employaient environ 150 personnes (*Les salles d'escalade au bord de la chute*, 2020).

Aujourd'hui, on dénombre une soixantaine de salles d'escalade en Belgique, dont une vingtaine en Wallonie (*Sites Escalade Indoor*, s. d.). La Belgique compte également de nombreuses falaises, une salle aménagée dans une église désacralisée à Bruxelles (Ducol, 2023), et son plus grand centre d'escalade, situé à Gand, est composé de 180 voies d'escalade (NWS, 2024).

II.II État des connaissances scientifiques

Cette section se veut exhaustive de l'état des connaissances scientifiques sur la qualité de l'air dans les salles d'escalade. Dans un premier temps, les bénéfices et risques de la pratique de l'escalade sont présentés. L'état de la qualité de l'air dans les complexes sportifs, et en particulier les salles d'escalade, est ensuite dressé, suivi des différentes sources de polluants ainsi que d'une description des polluants majeurs. Les facteurs influençant l'exposition et les personnes à risques sont ensuite décrits, et les solutions à cette problématique concluent cette section.

a) Bénéfices de l'escalade

L'OMS recommande aux adultes de pratiquer une activité sportive modérée entre 2,5 heures et 5 heures par semaine. En effet, l'activité physique bénéficie à la santé en prévenant certaines maladies (ex : maladies cardiovasculaires, diabète de type II), en améliorant la santé mentale (notamment en retardant l'arrivée de la démence), en contribuant à maintenir un poids équilibré et en contribuant à un bien-être général (*WHO Guidelines on Physical Activity and Sedentary Behaviour*, 2020).

À l'instar des recommandations de l'OMS, la pratique de l'escalade apporte de nombreux bénéfices sur la santé physique et mentale des grimpeurs. De fait, l'escalade développe l'endurance musculaire du haut du corps, la force de préhension, mais améliore également la performance d'autres exercices musculaires tels que les tractions, les pompes, les abdominaux

et la puissance des membres inférieurs. L'escalade permet d'améliorer la flexibilité et augmente de manière significative la VO₂ max (consommation maximale d'oxygène lors d'un effort physique) (Baláš et al., 2009; González-Rojas et al., 2025; Langer et al., 2023; Li et al., 2018; Siegel & Fryer, 2017).

L'escalade permettrait également d'atténuer les symptômes dépressifs, d'améliorer la régulation des émotions, d'entraîner des changements dans le fonctionnement du cerveau et de protéger les adolescents de troubles anxieux (Karg et al., 2020; Rosołowska-Żak et al., 2024).

b) Risques liés à l'escalade

Néanmoins, la pratique de l'escalade peut présenter des risques de blessures. Celles-ci vont des lésions traumatiques aiguës aux lésions chroniques dues à une sollicitation excessive. Les blessures plus courantes sont les entorses ligamentaires et les claquages musculaires tendineux, en particulier au niveau des doigts, des mains, des chevilles et des épaules. Les lésions des poulies (tendons fléchisseurs des doigts) sont des blessures spécifiques à ce sport (Cole et al., 2020; Vagy et al., 2026).

c) Qualité de l'air dans les salles de sport

Ces dernières années, une nouvelle préoccupation est apparue dans les salles d'escalade, concernant l'impact de la qualité de l'air sur les grimpeurs.

En effet, les salles de sport, comme tout environnement intérieur, voient leur qualité de l'air affectée par de nombreux polluants. Ces environnements sont notamment caractérisés par une forte fréquentation et par la nature des activités qui s'y déroulent. À cela s'ajoute également la présence d'équipements sportifs et donc de nombreux matériaux en plastiques et en caoutchouc, ainsi que des produits d'entretien et d'hygiène personnelle. De plus, les installations sportives se situent parfois dans des bâtiments qui n'étaient pas conçus initialement à cette fin, résultant à des systèmes de ventilation peu ou pas adaptés à la pratique sportive. Ainsi, la qualité de l'air est un enjeu préoccupant pour de nombreuses disciplines sportives qui se déroulent en intérieur. Par exemple, le NO₂ et le CO sont des polluants issus de la combustion et émis par les gaz d'échappements des surfaceuses (machines lissant la glace) dans les patinoires, les particules en suspension sont retrouvées dans les gymnases, les centres de fitness et les manèges, et les concentrations en chloramines et trihalométhanes sont contrôlées dans les piscines (Salonen et al., 2020).

Dès 2001, la recherche s'est intéressée aux effets de la qualité de l'air sur la santé des sportifs (Carlisle & Sharp, 2001). Ainsi, il est aujourd'hui admis que la pollution de l'air ambiant, par

le biais de nombreux mécanismes interconnectés, a un effet néfaste sur les performances sportives et la santé des sportifs. Les effets peuvent affecter le système cardiopulmonaire, parfois seulement après de courtes expositions d'une heure. Le stress oxydatif et l'inflammation sont également des conséquences d'une mauvaise qualité de l'air. De plus, le risque de développer des maladies chroniques (ex : hypertension, bronchopneumopathie chronique obstructive) est accru (González-Rojas et al., 2025).

Il a également été démontré que l'impact d'une mauvaise qualité de l'air est aggravé sur les sportifs puisque l'effort physique augmente la respiration et donc l'inhalation de polluants. En effet, l'activité sportive multiplie par 2 à 10 fois la ventilation alvéolaire minute par rapport aux conditions de repos. Par ailleurs, la majorité des polluants est inhalé par la bouche et évite donc la filtration nasale des grosses particules (Nicolici et al., 2026; Salonen et al., 2020; Watts, 2004).

À mesure que la pratique de l'escalade se développe, les salles sont de plus en plus fréquentées et un nombre grandissant de personnes se retrouvent exposées aux polluants d'air intérieur générés dans les salles d'escalade (Almand-Hunter et al., 2014). Il est estimé que les grimpeurs amateurs sont soumis à une durée d'exposition de 3 à 8 heures par semaine, et ce chiffre est de 8 à 12 heures pour les grimpeurs professionnels (Weinbruch et al., 2008, 2012). Les employés, eux, subissent une exposition d'autant plus importante puisqu'il s'agit de leur lieu de travail, soulevant ainsi une problématique sanitaire potentielle.

d) Sources de polluants

L'escalade en salle étant une pratique assez récente, l'étude de la qualité de l'air de celles-ci n'a commencée qu'en 2008 et la littérature à ce sujet n'est pas très étayée.

Magnésie

La première étude se penchant sur la question a été réalisée en 2008 par Weinbruch et al. et avait pour objectif de comparer la présence de particules en suspension dans les salles d'escalade par rapport aux autres salles de sport. Cette étude a démontré que les salles d'escalade, en raison de la magnésie utilisée par les grimpeurs, avaient des concentrations plus élevées en PM (*particulate matter* : particules en suspension ; cf. « PM », p.16) que les autres salles de sport (outre les salles de gymnastique dans lesquelles la magnésie est également utilisée par les sportifs).

La magnésie est utilisée dans les salles d'escalade car elle permet d'améliorer l'adhérence en augmentant le frottement entre les doigts et les prises grâce à la réduction de l'humidité des mains. Il a été démontré que la magnésie a un effet positif significatif sur les performances des grimpeurs et, de ce fait, elle est adoptée par la plupart des grimpeurs (Amca et al., 2012).

La magnésie, qui représente la majorité des particules présentes dans les salles d'escalade, est constituée de carbonate de magnésium (MgCO_3). Bien que commercialisée sous cette composition « pure », des analyses ont démontré que des traces de carbonate de calcium, des impuretés de silices et des additifs inorganiques étaient également présents dans les produits vendus au grand public (Nicolici et al., 2026; Weinbruch et al., 2008).

La magnésie se retrouve dans le commerce sous différentes formes, les principales étant la magnésie en poudre (en bloc, en boule, tamisée) et la magnésie liquide (solution de magnésie en suspension dans de l'éthanol) (Weinbruch et al., 2012).

Elle est mise en suspension dans l'air intérieur lors de l'application de magnésie sur les mains des grimpeurs, mais également à partir de surfaces maculées de magnésie (prises, matelas, brosses) ou lors de perturbations mécaniques telles que brosser des prises, chuter sur un tapis, ou encore frapper dans ses mains (Almand-Hunter et al., 2014; Nicolici et al., 2026; Salonen et al., 2020; Weinbruch et al., 2012).

De nombreuses études ont révélé des concentrations élevées de particules en suspension dans les salles d'escalade, notamment de $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} (Almand-Hunter et al., 2014). En effet, la magnésie produit des particules présentant une large distribution granulométrique, incluant les $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} . Les $\text{PM}_{2,5}$ peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et les PM_{10} se déposent dans les voies respiratoires bronchiques, ce qui peut impacter la santé humaine (Almand-Hunter et al., 2014; Nicolici et al., 2026). En Allemagne, (Weinbruch et al., 2008) ont mesuré des concentrations supérieures aux valeurs guides applicables dans le pays pour les lieux de travail ne faisant pas appel à des substances dangereuses. Aux États-Unis, des concentrations de PM_{10} pouvant atteindre $597 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne sur 6 heures) ont été mesurées par Almand-Hunter et al. (2014). Zajchowski et al. (2020) ont observé des concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ variant entre $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $152,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de PM_{10} entre $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $2\ 016,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans des universités américaines. En Autriche, des concentrations élevées de particules en suspension ont été mesurées : de $590 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $1\ 990 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les particules pouvant atteindre la fraction des voies respiratoires supérieures, c'est-à-dire la cavité nasale, la bouche, le pharynx et le larynx ($> 6,4 \mu\text{m}$), et de $890 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $1\ 080 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les particules pouvant atteindre la fraction des

voies respiratoires inférieures, c'est-à-dire la trachée, les bronches, les bronchioles et les alvéoles pulmonaires ($< 6,4 \mu\text{m}$) (*Anatomie de l'appareil respiratoire*, s. d.; Sherman et al., 2025).

Des analyses granulométriques ont montré que la magnésie génère principalement des particules de diamètre supérieur à $1 \mu\text{m}$ (Weinbruch et al., 2012). Ainsi, la magnésie ne semblerait pas être une source importante de particules ultrafines (Weinbruch et al., 2008).

De plus, les particules de magnésie ne se dissolvent pas en fonction de l'humidité relative, même si celle-ci atteint 100%, ce qui confirme que les particules de magnésie en suspension se déposent dans les voies respiratoires humaines (Weinbruch et al., 2008).

Il n'existe pas d'études spécifiques aux propriétés toxicologiques de la magnésie (Weinbruch et al., 2008, 2012). La magnésite, dont la composition chimique est similaire, a été évaluée aux Pays-Bas et pourrait provoquer des bronchites, un emphysème pulmonaire, une pneumoconiose, des inflammations nasales et oculaires, de la fatigue et des maux de tête – à noter qu'une co-exposition à la silice et l'amiante a pu entraîner ces symptômes (Magnesium carbonate: Healthbased reassessment of administrative occupational exposure limits, 2003; Weinbruch et al., 2008). Par ailleurs, comme dit précédemment, la magnésie n'est généralement pas retrouvée sous sa forme « pure » dans le commerce et d'autres agents peuvent également constituer un risque sanitaire (Nicolici et al., 2026; Weinbruch et al., 2008).

Toutefois, une étude a été réalisée par Moshhammer et al. (2016) pour déterminer si une exposition à la magnésie entraînait des effets à court terme (1h) et à plus long terme (24h) sur la fonction pulmonaire des grimpeurs. Bien qu'une baisse de la fonction pulmonaire fût observée à mesure que l'exposition augmentait, ils en conclurent que les effets sur les grimpeurs n'étaient pas très prononcés mais pourraient toutefois être dangereux pour certaines personnes sensibles.

Ainsi, bien que considérée non-toxique, l'inhalation de magnésie peut engendrer des réactions inflammatoires des voies respiratoires et aggraver des troubles préexistants, tel que l'asthme, notamment puisqu'il est très probable que peu de produits commercialisés contiennent uniquement du MgCO_3 pur (Karczewski et al., 2026; Kuschner et al., 1997; Reamer, 2017).

Chaussons

Sherman et al. (2025) ont réalisé une étude dont les résultats ont beaucoup été relayés dans les médias (Delbot, 2025; Ladouce & Boever, 2025; Reporterre, 2025). Cette étude se penchait sur

les émissions des chaussons d'escalade puisque ceux-ci représentent une source de polluants dans l'air intérieur. En effet, les chaussons d'escalade sont composés de caoutchouc, ce qui leur permet de créer de la friction avec les prises et améliorer les performances des grimpeurs. L'abrasion des semelles génèrent toutefois des particules qui se retrouvent en suspension dans l'air, notamment en raison du brossage des prises par les grimpeurs. Certaines de ces particules sont grosses ($>100\text{ }\mu\text{m}$) et peuvent donc être avalées après s'être déposées dans le nez et dans les voies respiratoires. D'autres, cependant, sont inférieures à $10\text{ }\mu\text{m}$ voire $2,5\text{ }\mu\text{m}$ et peuvent donc être inhalées et se retrouver dans le système respiratoire et jusque dans les alvéoles. Bien que la composition des chaussons varie selon le modèle, Sherman et al. ont détecté dans chacun des modèles analysés de nombreux polymères synthétiques et divers additifs. Les conséquences de ces particules peuvent être considérables : stress oxydatif localisé, cascades inflammatoires, lésions de l'ADN et mort cellulaire dans les cellules pulmonaires humaines. Ainsi, même si ces concentrations retrouvées dans les salles d'escalade sont minimales comparées à celles de la magnésie, les particules de caoutchouc sont beaucoup plus toxiques et représentent un véritable risque pour la santé (Karczewski et al., 2026; Sherman et al., 2025).

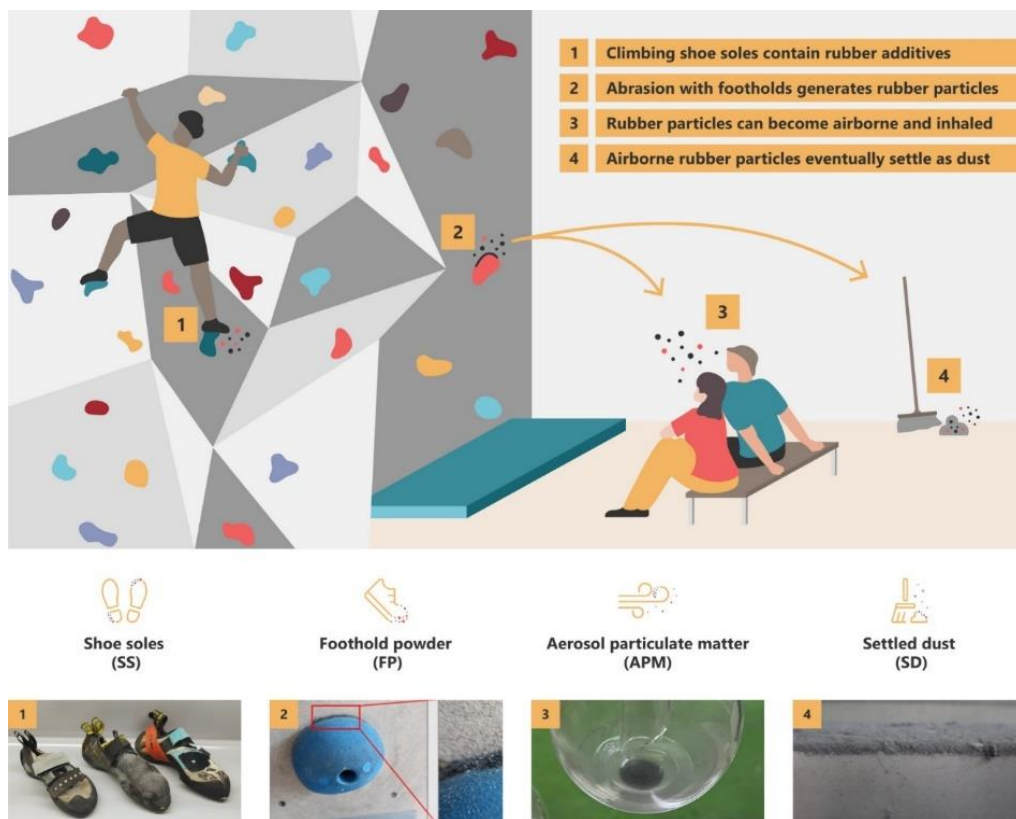


Figure 1 : Particules de caoutchouc dans les chaussons (Sherman et al., 2025)

Prises

Les prises sont utilisées en escalade pour grimper jusqu'au sommet des voies et peuvent être constituées par des matériaux différents. Le matériau le plus répandu est le polyester. Les résines de polyester sont associées à de la silice (sable) ou des billes de verres, auxquelles sont ajoutés des pigments de couleur. Le polyuréthane est également un matériau populaire et il existe des prises en fibre de verre et résine de polyester, ainsi que des prises composées de thermoplastique, provenant des thermoplastiques polyuréthane (*Comment sont fabriquées les prises d'escalade ?*, s. d.).

Une étude a montré que des objets composés de ce type de plastiques émettaient effectivement des polluants dans l'air intérieur qui augmentent en fonction de la température, dont le formaldéhyde. Toutefois, cette source de polluant n'est pas importante en termes de concentrations (Beel et al., 2023).

Murs et volumes

Dans les salles d'escalade, les murs sur lesquels les grimpeurs montent sont des panneaux de bois contreplaqués auxquels sont vissés des prises. Les volumes sont également constitués de ces mêmes panneaux de bois. Les panneaux sont découpés puis collés, vissés ou assemblés entre eux pour former les volumes. Les panneaux sont ensuite résinés-sablés (*Comment sont fabriquées les prises d'escalade ?*, s. d.).

Ces panneaux de bois contreplaqués sont responsables de l'émission de nombreux COV, notamment du formaldéhyde (Adamová et al., 2020; Negrete-Carrillo et al., 2026; Salem et al., 2012). Ainsi, pour élaborer les différentes voies, les ouvriers (employés qui créent les voies) doivent dévisser et visser les prises dans ces panneaux de bois, ce qui émet des polluants et des fibres de bois.

Tapis moquette

Certaines salles utilisent des tapis surmontés de moquettes et se targuent que la moquette permet de capturer les particules en suspension et entraîne donc un effet bénéfique sur la qualité de l'air intérieur (Hodnik, 2024; *La qualité de l'air*, 2025).

Toutefois, les moquettes nécessitent des procédures de nettoyage beaucoup plus complètes et coûteuses que pour des sols durs, et doivent être effectuées régulièrement. De plus, elles peuvent dissimuler des agrégats de poussières puisqu'elles retiennent davantage les particules, poussières et allergènes que les sols sans revêtement. Ces particules peuvent être remises en

suspension par les activités humaines (passage de l'aspirateur, marche). Par ailleurs, les moquettes peuvent favoriser la prolifération fongique et la présence de virus (Haines et al., 2020; Nastasi et al., 2022; Noorian Najafabadi et al., 2022).

En conclusion, la littérature scientifique ne prouve pas que la moquette réduirait les poussières (Becher et al., 2018).

D'autres potentielles sources de polluants de l'air intérieur dans les salles d'escalade incluent l'usure par frottement des cordes, les émissions des matériaux (tapis, mobilier) et les produits de nettoyage et d'hygiène personnelle (Salonen et al., 2020; Weinbruch et al., 2008).

Ainsi, la problématique de la pollution de l'air intérieur en salle d'escalade doit être considérée. Elle peut entraîner l'irritation des voies respiratoires supérieures. Les impacts vont varier en fonction de l'exposition et des pathologies sous-jacentes de la personne. Les symptômes les plus courants sont la rhinorrhée, les éternuements, la congestion nasale, la toux sèche et une gêne pharyngée. (Karczewski et al., 2026; Reamer, 2017)

e) Polluants spécifiques

Les polluants spécifiques aux salles d'escalade sont donc les particules de magnésie, les dérivés de caoutchouc et les COV. Il ne faut pas non plus négliger la teneur en CO₂ qui peut être trop élevée si le renouvellement d'air n'est pas optimal. Dans le cadre de ce travail et pour des raisons d'instrumentation, nous nous pencherons spécifiquement sur les particules, le formaldéhyde et le CO₂.

PM

Les particules (PM, en anglais *particulate matter*) sont classées en fonction de leur taille : les PM₁₀ (diamètre < 10 µm), les PM_{2,5} (diamètre < 2,5 µm) et les PM₁ (diamètre < 1 µm). Les PM₁₀, lorsqu'elles sont inhalées, ne pénètrent pas au-delà des bronches supérieures. Les PM_{2,5} et PM₁, elles, pénètrent dans les voies respiratoires jusqu'aux alvéoles pulmonaires (Almand-Hunter et al., 2014; Hamanaka & Mutlu, 2018; Nicolici et al., 2026).

Dans le cas de la pollution atmosphérique, les PM sont généralement constituées de particules carbonées auxquelles s'adsorbent des métaux réactifs et des composés organiques. Elles sont associées à des maladies cardiovasculaires, respiratoires et neurologiques (González-Martín et al., 2021; Hamanaka & Mutlu, 2018). Ainsi, bien que la composition chimique des particules

de magnésie ne soit pas toxique, celles-ci peuvent servir de véhicules à d'autres polluants plus dangereux pour la santé humaine, en plus de pouvoir être irritante (cf. Magnésie, p. 21).

Formaldéhyde

Le formaldéhyde (HCOH) est un COV omniprésent dans notre environnement. Il provient de sources naturelles, telles que la combustion de la biomasse et la décomposition, et d'activités anthropiques, telles que les émissions industrielles et la combustion de carburants liée au trafic routier (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010).

Le formaldéhyde est utilisé comme fixateur et comme liant dans des résines, et comme désinfectant ou biocide. Ainsi, dans les environnements intérieurs, de nombreux matériaux peuvent émettre du formaldéhyde, en particulier les résines, les colles et adhésifs (dont l'OSB et les panneaux de contreplaqué, si la colle utilisée contient du formaldéhyde), les peintures, les fumées de cigarette et bougies, les mousses isolantes et les désinfectants. Ces matériaux peuvent émettre du formaldéhyde pendant plusieurs mois, en particulier si la température est élevée. Le taux de renouvellement, l'âge des matériaux et la saison influencent également les concentrations dans l'air (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010; *Formaldéhyde et effets sur la santé*, 2025; Romain, 2025; Spiru & Simona, 2017).

Le formaldéhyde est classé comme cancérigène pour l'homme (groupe 1) par le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer). En effet, le formaldéhyde peut provoquer le cancer du nasopharynx ainsi que la leucémie myéloïde. Les effets sur la santé comprennent également des irritations sensorielles des yeux et des voies supérieures respiratoires, des effets pulmonaires tels que l'asthme et des allergies, et de l'eczéma (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010; Chung et al., 2013). Les seuils de concentration fixés par les institutions belges et internationales sont retrouvés dans le Tableau 1.

CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz incolore et inodore qui est principalement présent dans l'air ambiant suite à la combustion de combustibles fossiles, et en air intérieur par le processus de respiration des occupants. Depuis quelques années, le taux de CO₂ est utilisé comme référence pour l'évaluation de la qualité d'air intérieur et pour le contrôle de la ventilation. (Jones, 1999; Tran et al., 2020).

Les concentrations en air intérieur varient généralement entre 600 et 2000 ppm. Au-delà de 1000 ppm, le CO₂ peut affecter les performances cognitives et entraîner des symptômes tels que des maux de têtes, vertiges et nausées (Azuma et al., 2018; Jones, 1999; X. Zhang et al., 2017).

f) Facteurs influençant l'exposition

De nombreux facteurs influencent l'exposition des grimpeurs, le plus important étant le moment de l'activité. Si l'exposition a lieu lors d'un pic de fréquentation de la salle, le taux de particules étant plus élevé, le risque est plus sérieux. Ainsi, les grimpeurs les plus exposés à la magnésie et aux dérivés de caoutchouc sont ceux présents lors des heures de pointes. (Almand-Hunter et al., 2014; Nicolici et al., 2026; Sherman et al., 2025; Weinbruch et al., 2008, 2012).

D'autres facteurs rentrent également en compte : le comportement des grimpeurs, la taille de la salle, le système de ventilation et de climatisation, la circulation de l'air, la température, l'humidité relative et les pratiques de nettoyage (Salonen et al., 2020; Sherman et al., 2025; Zajchowski et al., 2020). Concernant la taille de la salle, les salles de bloc sont caractérisées par des volumes plus petits, la densité d'occupation y est donc plus élevée que dans les salles de voie (Weinbruch et al., 2008).

g) Personnes à risques et employés

Des groupes de personnes vulnérables pratiquent l'escalade, notamment les enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant de maladies respiratoires telles que l'asthme (Karczewski et al., 2026; Salonen et al., 2020; Weinbruch et al., 2012).

Sherman et al. (2025) ont démontré que les employés, en raison de leur durée d'exposition plus importante, seraient exposés à des niveaux plus élevés de polluants que les grimpeurs malgré un débit d'inhalation plus faible. En effet, dans de nombreuses salles d'escalade, l'accueil et les zones de service des employés ne sont pas séparées de la salle (Weinbruch et al., 2012). De plus, les employés sont généralement ceux qui créent les voies et sont donc directement exposés aux particules mises en suspension lors du vissage et dévissage des prises. Ainsi, les employés sont la population la plus à risque et peuvent développer des symptômes semblables à une bronchite chronique ainsi qu'un déclin de leur capacité d'expiration (Karczewski et al., 2026).

h) Solutions

Il existe trois stratégies fondamentales pour améliorer la qualité de l'air : réduire la source, améliorer la ventilation, et purifier ou filtrer l'air (US EPA, 2014a).

Concernant la **réduction de la source**, (Weinbruch et al., 2012) ont démontré que l'utilisation de la magnésie liquide plutôt que solide pouvait réduire de manière significative les concentrations en PM, allant jusqu'à des concentrations similaires à celles où la magnésie est interdite. C'est une solution efficace et peu coûteuse, mais qui peut potentiellement entraîner des effets néfastes sur la peau en raison de l'alcool présent dans la magnésie liquide. De plus, cette solution ne concerne que les salles de bloc puisqu'il faut ses deux mains pour en appliquer, ce qui n'est pas possible en voie (Weinbruch et al., 2012). Par ailleurs, les pratiques de nettoyage peuvent influencer fortement la qualité de l'air, ainsi nettoyer plus souvent va réduire les concentrations de polluants (Zajchowski et al., 2020).

La **ventilation** est un moyen évident de réduire les concentrations de polluants. Pourtant, dans de nombreuses salles d'escalade, il n'est pas possible d'équiper la salle d'un système de ventilation moderne pour des raisons économiques. De plus, la température peut influencer la ventilation. De fait, s'il fait froid, celle-ci ne va pas être mise en marche. Une solution serait donc de la laisser constamment allumée, en particulier lorsque la fréquentation est élevée, indépendamment de la température (Almand-Hunter et al., 2014; Salonen et al., 2020; Weinbruch et al., 2012).

Finalement, Almand-Hunter et al. (2014) préconisent l'utilisation de **purificateurs d'air** personnels pour réduire les concentrations de polluants pour les employés, à placer au niveau de la réception.

III. Cadre réglementaire

Ce cadre réglementaire se limite à la législation européenne et belge.

III.I Europe

Au niveau européen, il n'existe **pas de lois spécifiques** pour la qualité de l'air dans les salles d'escalade (Nicolici et al., 2026).

La **Directive européenne 2008/50/CE** concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe établit des valeurs uniquement pour l'air extérieur. Il n'existe pas, à ce jour, de directive similaire consacrée à l'air intérieur, bien que la Directive européenne 2024/1275 sur la performance énergétique des bâtiments a été amendée et intègre dorénavant la qualité de l'environnement intérieur.

Toutefois, il existe des standards européens concernant la ventilation des bâtiments, notamment les standards EN 16798-1:2019 (performance énergétique des bâtiments) et ASHRAE 62.1 (ventilation et qualité de l'air intérieur) qui vont prioriser la performance de la ventilation basée sur un critère lié au taux de CO₂ (900 – 1000 ppm) et à un taux minimal de renouvellement d'air. Pourtant, la conformité au critère de CO₂ ne garantit pas un contrôle des polluants adéquat, particulièrement dans les environnements d'activité intensive tels que les salles d'escalade (Nicolici et al., 2026). L'OMS, dont les recommandations concernent pour la plupart l'air ambiant, fixe également un seuil pour certains polluants en air intérieur, ce qui est le cas pour le formaldéhyde sur une durée courte (*cf.* Tableau 1) (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010).

De plus, il existe un règlement relatif aux émissions intérieures des matériaux. Le **règlement 305/2011** établit des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction au sein de l'Union européenne et, par son article 5, renvoie au **règlement REACH** (CE) n°1907/2006. Ce règlement concerne l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques et, à partir du 6 août 2026, les seuils pour le formaldéhyde seront rendus plus restrictifs (*Exigences plus strictes concernant le formaldéhyde libéré par les panneaux de construction dans le cadre de la nouvelle restriction REACH*, 2025).

L'UE dispose également des **valeurs guides EU-LCI**, qui sont des concentrations de référence pour les COV émis par les matériaux dont l'objectif est d'éviter tout risque sur la santé humaine (*EU-LCI Values*, 2023).

Pour les matériaux de construction, il existe également différents labels qui sont établis grâce à des protocoles d'évaluation spécifiques aux émissions des matériaux. Par exemple, un matériau qui a le label allemand **AgBB** (*Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten* : Comité chargé de l'évaluation sanitaire des produits de construction) a réussi les tests de mesure d'émissions de COV, est considéré comme non-émissif et peut être utilisé en air intérieur. C'est un des deux protocoles de référence en Europe avec celui de l'**Anses** (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), en France. Les mesures sur les matériaux sont réalisées après 3 et 28 jours. De plus, le Règlement (UE) 2024/3110 établissant des règles harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et qui encadre le **marquage CE** des produits de construction intègre désormais dans ses caractéristiques l'air intérieur. (*Avis et rapport de l'Afsset*, 2009; *Committee for Health-Related Evaluation of Building Products*, 2026; Règlement (UE) 2024/3110 du Parlement européen et

du Conseil du 27 novembre 2024 établissant des règles harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant le règlement (UE) n° 305/2011, 2024; Romain, 2025).

Récemment, des valeurs guides en air intérieur et des recommandations ont été proposées par l'Allemagne pour certains polluants en air intérieur (*German Committee on Indoor Air Guide Values*, 2026).

III.II Belgique

Au niveau belge, il existe deux lois relatives à la qualité de l'air intérieur :

- **La loi du 06 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public.** Cette loi a pour but de sensibiliser les exploitants de lieux accessibles au public à la nécessité d'évaluer la qualité de l'air intérieur dans leurs établissements (*Impact de la qualité de l'air intérieur sur votre santé*, 2026). Elle peut notamment s'appliquer aux établissements sportifs et donc aux salles d'escalade. Actuellement, la loi se concentre uniquement sur le CO₂ et les débits de ventilation et de purification et devrait, par la suite, se pencher sur des polluants tels que les particules et les COV (Entretien avec Mr. M. Degaillez du 07 mai 2026) ;
- **L'arrêté royal du 8 mai 2014 fixant les valeurs limites d'émission de COV provenant de produits de construction utilisés en intérieur.** Il impose notamment aux fabricants, importateurs et distributeurs de démontrer que les valeurs limites d'émission des matériaux sont respectées.

En parallèle de ces lois, différents arrêtés et guides pratiques ont été publiés : l'arrêté royal du 7 février 2024 concernant les CO₂ mètres ; l'arrêté royal du 9 février 2024 déterminant les conditions de la mise sur le marché de systèmes de purification de l'air ; l'arrêté royal du 12 mai 2024 déterminant les modalités visées aux articles 3 et 4 de la loi du 6 novembre 2022 (niveaux de référence pour la qualité de l'air intérieur et obligations et responsabilités) ; le guide d'élaboration d'une analyse de risques et d'un plan d'action, le guide sur le choix d'un système de purification d'air ; le guide sur le choix, l'installation, l'utilisation et la maintenance des appareils de mesure de la qualité de l'air.

En Wallonie, le **décret relatif à la qualité du milieu intérieur du 31 janvier 2019** a pour objectif de « prévenir ou limiter les nuisances occasionnées au milieu intérieur des espaces fermés afin de limiter les risques pour l'environnement et pour la santé des habitants ou usagers » (art. 1^{er}, §1^{er}). Il énonce que le gouvernement fixe des valeurs guides et d'intervention

basées sur les connaissances scientifiques et les recommandations internationales (art. 7). Ainsi, le gouvernement wallon a édicté un arrêté déterminant ces valeurs guides, comprenant notamment le formaldéhyde, les PM et le CO₂. Cet arrêté est **l'arrêté du Gouvernement wallon du 30 mai 2024 déterminant les valeurs guides et les valeurs d'intervention** mentionné à l'article 7 du décret sur la qualité du milieu intérieur du 31 janvier 2019. Il édicte des valeurs guides et des valeurs d'intervention, notamment pour le formaldéhyde. Toutefois, les valeurs énoncées dans cet arrêté sont très basses (*cf.* Tableau 1), notamment en comparaison des recommandations de l'OMS et de l'Anses. En effet, l'Anses s'est basée sur l'étude de (Lang et al., 2008) pour déterminer une valeur toxicologique de référence (indice toxicologique qui permet de quantifier un risque pour la santé humaine) pour le formaldéhyde : 123 µg/m³ (Avis et rapport de l'Anses relatif à l'Evaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le formaldéhyde, 2018; Michiels et al., 2020).

Concernant les employés, le **Code du bien-être au travail** établit des valeurs seuils pour de nombreux polluants (Livre VI, titre 1^{er}, annexe VI.1-1), dont certains retrouvés en salle d'escalade. Il fixe également des obligations concernant le confort thermique (Livre III, titre 1^{er}, chapitre V).

Le SPW (Service public de Wallonie) met à disposition des fiches techniques concernant l'infrastructure de différents sports, ce qui est notamment le cas pour l'escalade. La dernière fiche date de 2025 et énonce les normes de la fédération et les recommandations d'Infrasport en ce qui concerne l'installation : dimensions, matériaux, éclairage, chauffage et ventilation, sécurité (Fiche technique : Escalade, 2025).

c) Différentes valeurs guides des 3 polluants étudiés

Ce tableau résume les valeurs guides des polluants étudiés, principalement les valeurs utilisées dans la suite de ce travail.

Tableau 1 : Valeurs seuils pour le formaldéhyde, le CO₂ et les PM

	Formaldéhyde	CO₂	PM
OMS	30 minutes : 100 µg/m ³		PM_{2,5} : 5 µg/m ³ /année et 15 µg/m ³ /24h

			PM10 : 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{année}$ et 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3/24\text{h}$
Code du Bien-Être au Travail	VLEP : 0,3 ppm Valeur courte durée : 380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	900 ppm ou débit minimal de ventilation de 40 $\text{m}^3/\text{h}/\text{personne}$ (95% du temps et en supposant 400 ppm de concentration extérieure)	PM fraction alvéolaire : 3 mg/m^3 PM fraction inhalable : 10 mg/m^3
Arrêté du Gouvernement wallon du 30/05/2024	Valeur guide : 0,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Valeur de vigilance : 0,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Valeur d'intervention à moyen terme : 8,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Valeur d'intervention immédiate : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		

Concernant les valeurs de l'OMS pour les PM, celles-ci sont en réalité celles fixées pour l'air ambiant, puisque l'OMS ne traite pas des PM dans ses lignes directrices pour l'air intérieur.

Le Code du bien-être au travail fixe une période de référence de 8 heures pour les valeurs limites. Ainsi, la VLEP correspond à la valeur limite d'exposition professionnelle et est de 8 heures (art. VI.1-5, 5°). La valeur de courte durée est, quant à elle, fixée sur une période de 15 minutes (art. VI.1-45). Les seuils des PM sont des valeurs limites sur une période de 8 heures.

Le Code du bien-être au travail n'utilise pas les références PM_{2,5} et PM₁₀ pour les particules mais fraction inhalable et alvéolaire. La fraction inhalable correspond aux particules susceptibles d'être inhalées par le nez ou par la bouche et la fraction alvéolaire correspond à la fraction des particules inhalées qui pénètrent profondément dans les poumons, jusqu'à la région alvéolaire (*Poussières*, 2023).

L'arrêté du Gouvernement wallon du 30 mai 2024 fixe, quant à lui, différentes valeurs. La valeur guide est la valeur qui a pour but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets sur la santé ou l'environnement (art. 1^{er}, 1^o). La valeur de vigilance correspond à la valeur au-delà de laquelle des investigations sont nécessaires (art. 1^{er}, 2^o). Finalement, la valeur d'intervention correspond au niveau à partir duquel des actions préventives et correctrices sont nécessaires art. 1^{er}, 3^o).

III.III Techniques de mesures

Il existe différentes techniques de mesures spécifiques à chaque polluant, chacune ayant des avantages et inconvénients. Nous nous intéresserons donc aux techniques communément utilisées par les scientifiques pour les polluants qui nous intéressent dans le cadre de ce travail : le formaldéhyde, le CO₂ et les PM.

a) Formaldéhyde

La quantification du formaldéhyde dans l'atmosphère est plus complexe que celles de certains autres polluants car les concentrations sont faibles et la réactivité chimique est grande.

La technique de référence préconisée par de nombreux organismes comme l'EPA est le **piégeage sur cartouche suivi d'une analyse chromatographique différée**. Cette méthode consiste à faire passer un volume d'air connu à travers une cartouche en silice imprégnée de 2,4-dinitrophénylhydrazine (2,4-DNPH). Les composés carbonylés (dont le formaldéhyde) vont réagir avec le DNPH pour former des hydrazones. Ces hydrazones, fixées sur les cartouches, sont extraites à l'acétonitrile et sont ensuite analysées par un chromatographe liquide à haute performance. Les différents aldéhydes et cétones séparés par la colonne chromatographique sont détectés par spectroscopie ultraviolette à une longueur d'onde de l'ordre de 360 nm. Cette technique a l'avantage de piéger tous les aldéhydes et cétones. Les cartouches sont relativement peu coûteuses, l'analyse consiste en la principale dépense. Le protocole de prélèvement est simple. Toutefois, la présence d'ozone peut conduire à la sous-estimation des concentrations. De plus, la limite de détection est d'environ 0,5 ppbv. Finalement, les

concentrations mesurées sont des valeurs moyennées sur la durée de l'échantillonnage (Chiappini, 2007; Dagnelie et al., 2008).

Les **capteurs électrochimiques** permettent également de détecter le formaldéhyde grâce à une réaction électrochimique au niveau d'une électrode, qui produit un signal électrique qui permet de déterminer la concentration de formaldéhyde. En fonction du capteur, la méthode peut présenter une bonne sensibilité, une bonne sélectivité et peut donner une mesure en temps réel. Néanmoins, un des désavantages est que le capteur peut réagir avec d'autres composés et peut être influencé par les conditions environnementales (Yang et al., 2024).

D'autres techniques existent, telles que des **instruments photoacoustiques** ou le **spectromètre de masse à transfert de proton (PTR-MS)** (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010; Chung et al., 2013; Dagnelie et al., 2008).

b) CO₂

Le principe de mesure de référence du CO₂ est l'**absorption Infrarouge** par des capteurs infrarouges. Ils sont constitués d'une source IR et d'un détecteur. Le CO₂ absorbe une partie du rayonnement infrarouge à une longueur d'onde spécifique, et l'absorbance est donc proportionnelle à la concentration du CO₂.

Il existe d'autres techniques de mesures, telles que les **capteurs électrochimiques ou semi-conducteurs** mais ceux-ci ne permettent pas une mesure sélective du CO₂ (Galland & Gérardin, 2022).

c) PM

Les instruments de mesure des PM donnent la concentration selon la taille de la particule. Les différentes techniques permettant de mesurer les PM sont la gravimétrie, la détection optique, la microbalance et la mesure par charge électrique.

La méthode de **détection optique** va mesurer la concentration de particules en fonction de la diffusion de lumière par celles-ci. Elle permet une mesure en temps réel.

La méthode **gravimétrique** consiste à peser des filtres avec et sans les particules.

La méthode de **Microbalance à élément oscillant** (TEOM : *Tapered Element Oscillation Microbalance*) utilise la variation de la fréquence de résonance pour déterminer la concentration en particules.

Enfin, la méthode par **charge électrique** mesure les PM à partir d'un courant électrique généré par les particules chargées. (Amaral et al., 2015).

Objectifs du mémoire

Malgré le risque sanitaire lié à la qualité de l'air intérieur et la popularité grandissante de l'escalade, les salles d'escalade en Belgique, et de ce fait en Wallonie, n'ont pas encore fait l'objet d'études scientifiques concernant la qualité de leur air intérieur.

Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la qualité de l'air intérieur dans les salles d'escalade, en particulier au regard des concentrations en particules (PM) ainsi que du formaldéhyde. La littérature scientifique ne traite pas du formaldéhyde dans les salles d'escalade. Pourtant, les murs de celles-ci sont composés de panneaux contreplaqués dans lesquels sont régulièrement vissés des prises pour créer les voies.

Il s'agira d'identifier les principaux facteurs susceptibles d'influencer ces concentrations et d'évaluer leur niveau au regard des valeurs ou recommandations disponibles. Cette analyse sera supportée par trois études de cas, en Wallonie, permettant de caractériser plus précisément l'évolution de la qualité de l'air intérieur dans une salle d'escalade.

L'étude se portera uniquement sur les salles de bloc, dans lesquelles les concentrations de polluants sont potentiellement plus importantes étant donné le volume plus petit que dans les salles de voies. De plus, celles-ci sont accessibles aux personnes seules et nécessitent moins de matériel qu'en voie, ce qui rend la pratique plus accessible et plus flexible pour les grimpeurs.

Il a également été décidé de se concentrer sur l'exposition des travailleurs. En effet, les usagers des salles d'escalade ne sont exposés que quelques heures par semaine, tandis que les employés passent la majorité de leur temps dans ces salles. À cela s'ajoute que les normes sur les polluants sont plus sévères pour les employés au vu de leur exposition prolongée. Ainsi, en plus des campagnes de mesure réalisées dans les salles. Des instruments sont placés à la réception de la salle, là où se trouvent les employés.

Ainsi, les objectifs principaux sont (1) **d'évaluer l'état de la qualité de l'air** dans des salles d'escalade en bloc en Wallonie, (2) **d'évaluer la perception** de la qualité de l'air **des usagers** dans les salles d'escalade en Wallonie et, finalement (3), **d'interroger la législation** en place et des pratiques pouvant être mises en œuvre.

Matériel et méthodes

Cette partie décrit dans un premier temps les différents sites étudiés, détaille ensuite la méthodologie, en particulier l'instrumentation ainsi que la campagne de mesure, et se conclut sur la présentation de l'analyse des données.

I. Sites étudiés

Trois salles d'escalade en bloc ont été choisies en Wallonie. Afin de préserver leur anonymat, celles-ci seront dénommées « Salle A », « Salle B » et « Salle C » dans la suite de ce mémoire.

D'autres salles en Wallonie auraient pu être considérées, telle que « The Wall » à Verviers, qui interdit l'utilisation de magnésie en poudre. Cela aurait nécessité de disposer de plus de temps et de plus d'instruments opérationnels que ceux mis à disposition par le laboratoire SAM de l'ULiège.

I.I Salle A

La Salle A est ouverte depuis le 1^{er} juillet 2003. Le bâtiment était un ancien hall de sport de l'armée. Ils ont aménagé le bâtiment en relevant la partie où les murs de voies sont présents, et ont ajouté un étage et cloisonné les murs.

La salle est ouverte du lundi au vendredi de 12h00 à 22h30 et de 10h00 à 20h00 le week-end.

Au premier étage de la Salle A se trouvent la réception, la cafétéria, la salle de fitness, les toilettes et les vestiaires. La réception et la cafétéria sont ouvertes sur la partie d'escalade en voie qui se situe au rez-de-chaussée. La salle de bloc (*cf.* Figures 2 et 3) se situe en-dessous de la cafétéria et est accessible par la partie voie. Ainsi, la salle de bloc est relativement séparée du reste du bâtiment, bien que deux ouvertures donnent sur la salle de voie.

Concernant les matériaux, le sol est en béton surmonté de tapis en PVC et de moquette de la marque FLIPP, d'une épaisseur totale de 30 cm. Les matelas couvrent la quasi-intégralité de la salle de bloc. Les murs de la salle ont été montés par l'entreprise néerlandaise SLVTR et sont des panneaux de bois contreplaqué. Les prises utilisées pour les voies proviennent de Composite-X, une entreprise qui fournit de nombreuses marques de prises.



Figure 2 : Accueil et salle de bloc de la Salle A

Le système de ventilation dans la salle de bloc se limite à de la ventilation naturelle : les fenêtres sont ouvertes par les clients lorsqu'ils veulent aérer la salle, généralement uniquement lorsqu'il fait chaud. Le reste du bâtiment est également ventilé naturellement : les portes, fenêtres, et plafond de la cafétéria sont ouverts ainsi que le haut de la grande salle de voie pour créer une circulation d'air par tirage vers le haut.

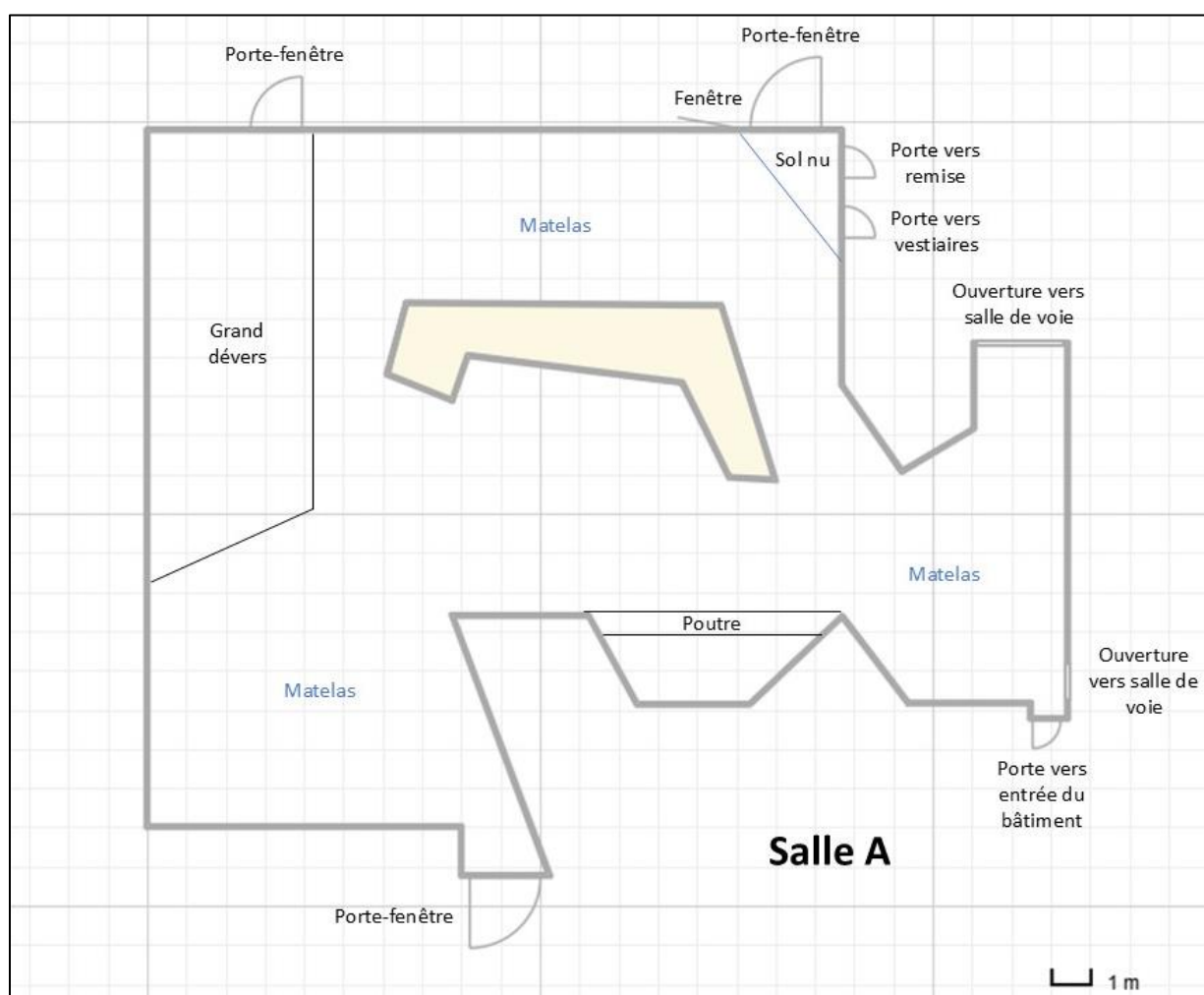
Le chauffage est assuré par un radiant au gaz de la marque Thermico. Des travaux d'isolation effectués en juin 2025 ont fortement réduit la consommation d'énergie.

Le nettoyage est effectué plus de 20 heures par semaine par une société de nettoyage extérieure. Au niveau de la salle de bloc, seul l'aspirateur est passé sur les matelas.

Aucune règle de bonne conduite n'est imposée concernant la magnésie. Le propriétaire constate qu'il n'y a pas encore d'excès par rapport à certaines autres salles. Ils n'ont donc pas implémenté de règles. Toutefois, s'ils remarquent une utilisation excessive, ils font des remarques aux clients.

Le propriétaire a vaguement connaissance des problématiques de qualité d'air intérieur et de la législation à ce sujet.

Figure 3 : Plan de la salle de bloc de la salle A



I.II Salle B

La Salle B est ouverte depuis juin 2018. Le bâtiment était anciennement une usine qui fabriquait des machines pharmaceutiques. La salle est de plain-pied et on y retrouve la partie bloc, la réception, la cafétéria, les vestiaires et les toilettes (cf. Figures 4 et 5).

La Salle B est ouverte du lundi au vendredi de 12h00 à 23h00 et de 12h00 à 20h00 le week-end.



Figure 4 : Accueil et salle de bloc de la salle B

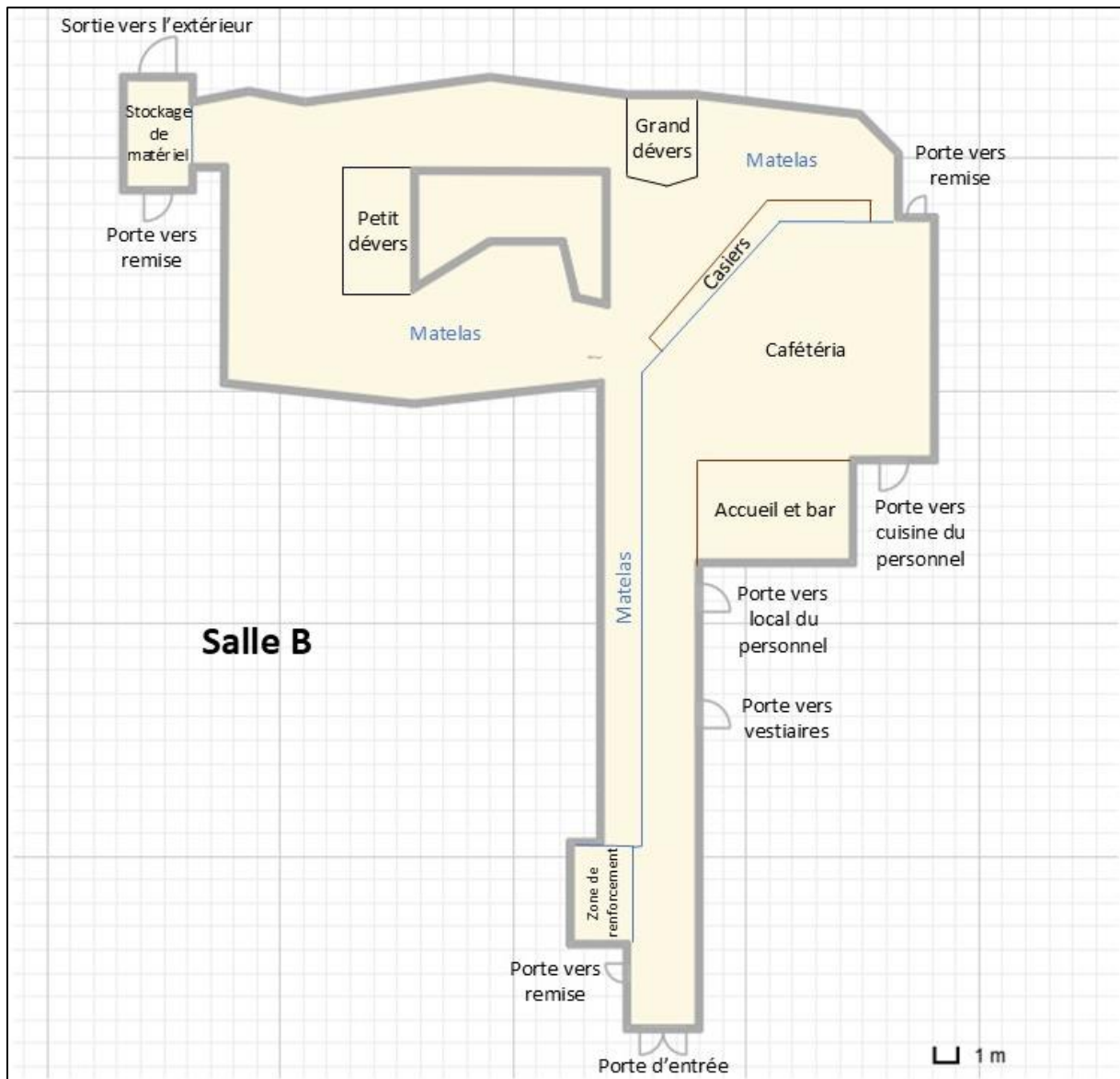
Concernant les matériaux, le sol est en carrelage et est surmontés de matelas près des murs. Les murs de la salle ont été montés par l'entreprise SLVTR et sont en panneaux de bois contreplaqué. Les prises utilisées pour les voies sont de nombreuses marques : flathold, AG, Cheetah, BlocX squadra, Xcult, axis.

Le système de ventilation est constitué de deux aérothermes de la marque Reznor qui sont utilisés pour la ventilation et le chauffage. Il y a également trois déstratificateurs de la marque Reznor. À cela s'ajoute une ventilation naturelle : la porte d'entrée principale et la porte au fond de la salle sont ouvertes. Cette ventilation est journalière et est assurée toute l'année. Lorsqu'il fait suffisamment chaud dehors, les portes restent ouvertes toute la journée, sinon, elles ne sont ouvertes que durant la matinée, avant que les clients n'arrivent pour ne pas les gêner avec des températures trop basses dans la salle. Lorsqu'il fait chaud, deux grands ventilateurs portables sont également actionnés.

Concernant le nettoyage, les matelas sont balayés tous les jours. Auparavant, ils utilisaient un aspirateur mais cela prenait beaucoup plus de temps et était assez pénible physiquement. Le bar

est nettoyé une fois par semaine. Le carrelage est nettoyé tous les jours à l'eau, sauf le dimanche. Des produits de nettoyage sont parfois utilisés car la magnésie laisse des tâches calcaires.

Figure 5 : Plan de la Salle B



Quant aux règles de bonne conduite autour de la magnésie, des bacs pour poser les sacs de magnésie sont installés entre les matelas et la cafétéria (cf. Figure 5). Idéalement, tous les usagers devraient les laisser dedans mais ils tolèrent que ce ne soit pas le cas. Tout type de magnésie est autorisé. Les employés font des remarques aux usagers s'ils trouvent que ceux-ci exagèrent (par exemple : taper dans les mains pleines de magnésie, laisser des tas de sacs de magnésie sur les tapis).

Cette salle a exprimé un grand intérêt pour la problématique de la qualité de l'air intérieur dans la salle.

L'équipe souhaitait n'accepter que la magnésie liquide dans la salle mais puisque les autres salles acceptent la magnésie en poudre, ils auraient risqué de perdre des clients, notamment car la magnésie liquide est plus chère. La salle est ventilée au maximum, même en hiver, pour renouveler l'air de la salle. En hiver, la ventilation naturelle est effectuée en matinée, lorsqu'il n'y a pas de clients, afin de ne pas refroidir la salle lorsqu'elle est occupée. L'usage de masques lors du démontage des voies a été pensé. Cette salle a montré un grand intérêt à recevoir les données de ce mémoire afin de les informer des possibles solutions d'amélioration de la qualité de l'air. Finalement, ils savent qu'il n'y a aujourd'hui aucune obligation en termes de respect de la qualité de l'air.

I.III Salle C

La salle est ouverte depuis le 22 mars 2025. Le bâtiment était un ancien entrepôt sans isolation, ni sur les murs, ni sur le plafond. Avant l'ouverture de la salle, des travaux ont été réalisés pour que l'isolation soit complète et conforme aux normes PEB.

La Salle C est ouverte du lundi au dimanche de 09h00 à 23h00.

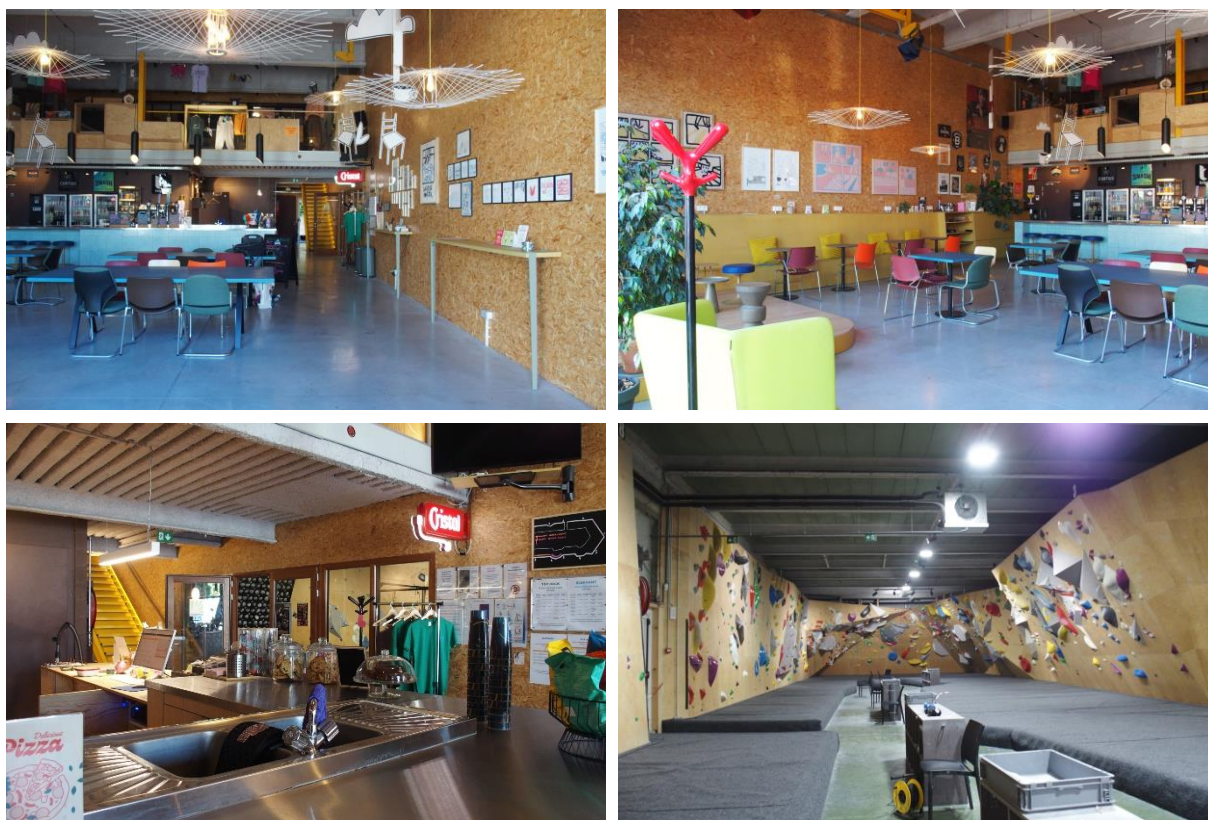


Figure 6 : Cafétéria, accueil et salle de bloc de la Salle C

Au rez-de-chaussée de la salle se trouvent la cafétéria, la réception, les toilettes, ainsi que la salle de bloc (*cf.* Figures 6 et 7) qui est séparée des autres parties par une baie vitrée et une porte double. Les vestiaires et un magasin d'équipement d'escalade et d'alpinisme se situent à l'étage.

Concernant les matériaux, le sol est fait du béton et de la peinture d'origine. Des tapis de revêtement de la marque Flipp en PVC, surmontés de moquette couvrent le sol et sont d'une épaisseur de 30 cm. Les murs de la salle ont été montés par l'entreprise SLVTR et sont en panneaux de bois contreplaqué. Les prises utilisées pour les voies sont des mêmes marques que la salle B (flathold, AG, Cheetah, BlocX squadra, Xcult, axis).

Le système de ventilation est constitué d'un extracteur d'air qui renouvelle l'air 3 fois par heure quand il est à plein régime. La ventilation est automatique et fonctionne entre 8h et 21h tous les jours. Il y a également deux aérothermes qui sont utilisés pour le chauffage de la salle.

En ce qui concerne le nettoyage, les tapis en moquette sont en principe aspirés tous les jours du lundi au vendredi, sauf lorsque les employés sont surchargés. Le week-end, le tapis est entièrement aspiré. De plus, une fois par semaine, la shampooineuse est passée sur les tapis et les bacs de magnésie sont aspirés.

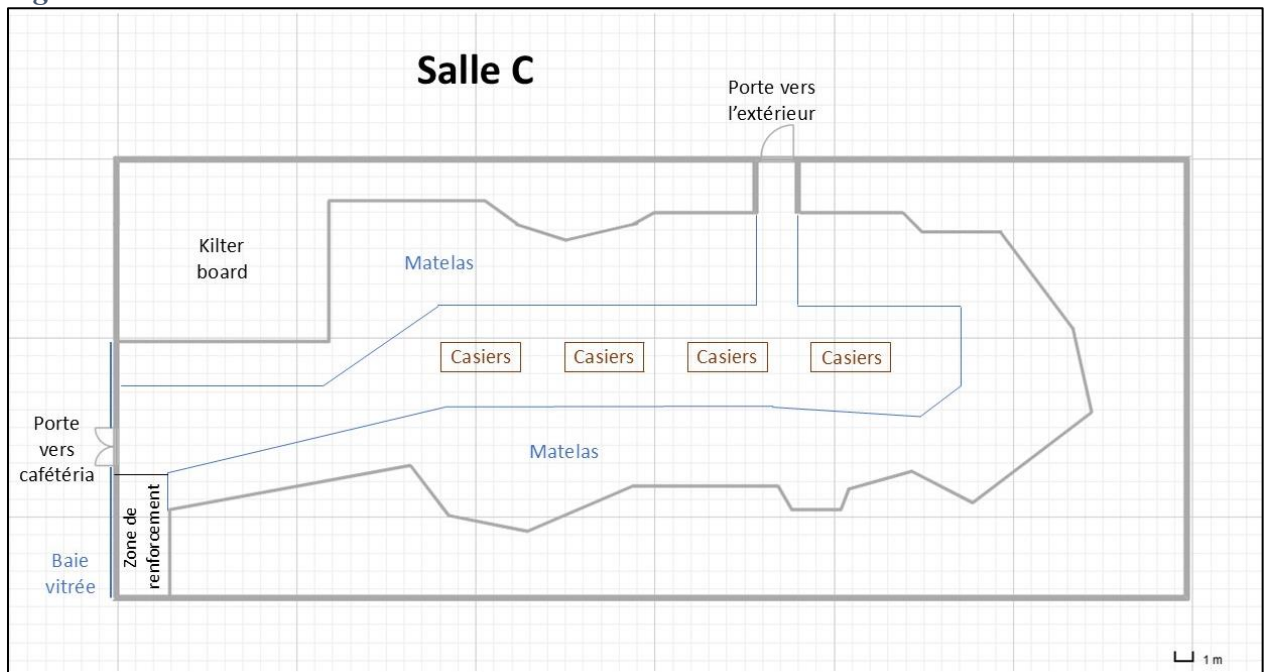
La magnésie en poudre n'est pas interdite car ils considèrent que la magnésie liquide moins efficace au niveau de l'adhérence et que l'éthanol est nocif pour la peau. Des bacs pour disposer les sacs à magnésie sont placés sur les casiers tout le long de l'allée centrale (*cf.* Figure 7), mais les sacs peuvent également être posés dans l'allée. Ils sont interdits sur les tapis mais les employés ne réprimandent pas les grimpeurs qui le font. Selon un employé, les bacs sont contre-productifs car la magnésie s'accroche sur les sacs et elle est remise en suspension dans l'air lorsque les sacs sont retirés du bac.

Quant à la connaissance de la problématique de qualité de l'air intérieur et de la législation à ce sujet, cet employé en a surtout connaissance via les réseaux sociaux mais la direction ne l'a pas spécialement informé. Il trouve que l'étude réalisée sur les chaussons, qui a fait beaucoup de bruit, a eu un impact sur les clients, qui se sont ensuite plaints. Selon lui, les clients devraient faire de l'autogestion au niveau de la magnésie, c'est-à-dire faire attention et réprimander les autres usagers eux-mêmes.

En ce qui concerne la fréquentation de la salle, il y a généralement une dizaine de grimpeurs dans la salle de 9h à 14h. Entre 14h et 16h, l'affluence est moindre, puis à partir de 16h et

jusqu'au soir, il y a de 30 à 80 grimpeurs. L'affluence est plus importante le mardi et le mercredi car ce sont des jours où de nouveaux secteurs de voies sont ouverts.

Figure 7 : Plan de la salle de bloc de la Salle C



I.IV Comparaison des salles

Les trois salles ont les mêmes règles autour de la magnésie : la magnésie en poudre est acceptée et il n'y a pas un contrôle strict de l'usage qu'en font les grimpeurs.

Quant au nettoyage, chacune des salles nettoie régulièrement ses tapis : chaque jour pour les salles B et C. Les salles A et C possèdent des tapis surmontés de moquette, ce qui nécessite l'usage d'un aspirateur, tandis que les tapis de la Salle B sont balayés.

Finalement, en ce qui concerne la ventilation, les salles A et B utilisent principalement une ventilation naturelle et la Salle B une ventilation mécanique. Toutefois, la Salle B est ventilée quotidiennement, tandis que la Salle A ne ventile que lorsqu'il fait chaud dans la salle.

II. Méthodologie

Cette partie présente les instruments de mesure des polluants utilisés dans le cadre de ce travail et explique la campagne de mesure. L'élaboration d'un questionnaire destinés aux clients des salles d'escalade et les entretiens relatifs à la législation terminent le volet méthodologique.

II.I Instruments et étalonnage

Les différents instruments utilisés dans le cadre de ce travail sont développés par le laboratoire SAM de l'ULiège. Puisque le sujet de ce mémoire n'était initialement pas prévu au sein du laboratoire, seuls quelques instruments étaient disponibles. Ce paramètre a fortement influencé le choix des polluants étudiés dans ce mémoire, puisque les mesures dépendaient de la disponibilité des appareils du laboratoire.

a) 3PM

L'instrument 3PM conçu par l'équipe SAM a pour particularité de posséder 3 capteurs PM. Chaque capteur donne une valeur de concentration pour les PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀. Trois de ces instruments étaient disponibles. Il a été nécessaire d'assurer leur maintenance avant utilisation et le système d'enregistrement des données devait être modifié. Cependant, ces modifications n'ont pas pu être réalisées avant le mémoire vu le délai très court entre la décision d'accepter ce mémoire au sein du laboratoire et le démarrage de celui-ci.

Les 3PM, en plus des 3 capteurs, comprennent une batterie, un tableau d'affichage des valeurs et des commandes qui permettent de régler l'heure, la durée et la fréquence de l'échantillonnage ainsi qu'une carte SD pour l'enregistrement des données. L'instrument peut également être branché à une source d'alimentation.

Les instruments seront référencés dans ce mémoire en fonction de leur numéro : 3PM-1, 3PM-2 et 3PM-3.

Capteurs

Les capteurs utilisés sont des SPS30 Particulate Matter (PM) de la marque Sensirion (Figure 8). Ce sont des capteurs optiques. La technique de mesure est basée sur la diffusion laser. Leur taille est de 41 x 41 x 12 mm.

Ce capteur a une exactitude de $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre 10°C et 40°C et entre 20 et 80% d'humidité relative. Leur durée de vie est d'au-moins 8 ans.



Figure 8 : Capteur SPS30 PM

Test de fonctionnement des capteurs PM

Pour vérifier le fonctionnement des instruments, ils ont été testés sous la supervision du Dr. Claudia Falzone du laboratoire SAM. Les instruments ont été placés dans une enceinte fermée en plexiglass dans lequel de l'encens a été brûlé, ce qui a créé un pic de concentration de PM. Le pic a été très rapide (± 1 min pour atteindre $>999\mu\text{g}/\text{m}^3$). La boîte a ensuite été ouverte pour ventiler naturellement, ce qui a fait redescendre graduellement les PM.

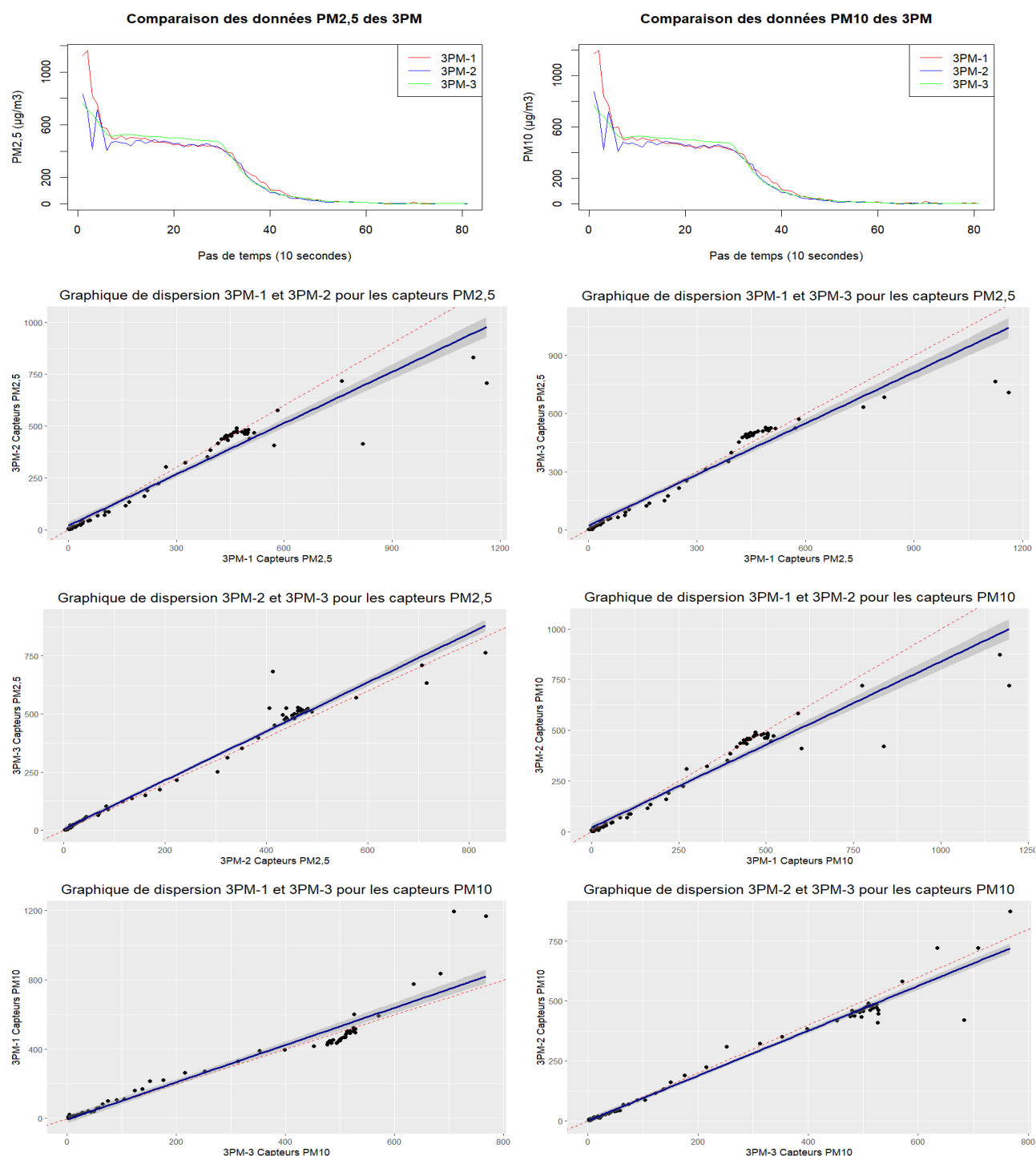


Figure 9 : Séries temporelles comparant les données PM2,5 et PM10 des trois instruments ;
Graphiques de dispersion comparant les données PM2,5 et PM10 des trois instruments

Les données des trois instruments ont ensuite été comparées dans R-Studio. Chaque capteur donnant 3 mesures, la médiane de celles-ci a été calculée puis comparée entre les 3 instruments. La dispersion et la corrélation ont été vérifiées. Il en a été conclu que les données des 3 instruments donnaient les mêmes valeurs et que les instruments étaient reproductibles entre eux (*cf.* Figure 9).

Ils ont ensuite été placés dans une maison du 28 au 31 mai. Leur batterie ne garantissait pas un fonctionnement constant plusieurs jours et ils ont été branchés à une source d'alimentation.

L'horloge de chaque instrument est reliée à une pile. Le 3PM-1 et le 3PM-3 avaient des piles qui avaient été remplacées, et le 3PM-2 avait sa pile d'origine. Les trois piles étaient déchargées. Par conséquent, la date et l'heure ainsi que la fréquence et la durée de l'échantillonnage ont dû être reconfigurées sur chaque appareil. L'air était mesuré toutes les minutes durant 30 secondes.

Durant la période de contrôle, le 3PM-3 s'est régulièrement arrêté, c'est-à-dire que l'horloge et l'échantillonnage s'arrêtaient, bien que l'instrument soit toujours connecté à la source d'alimentation. À chaque redémarrage de l'instrument, l'horloge du tableau de bord se remettait à zéro et écrasait les données préexistantes. En effet, l'heure et la date par défaut était le 01/01/2019, mais à chaque redémarrage, les données précédentes enregistrées sur la carte SD étaient effacées car elles correspondaient aux mêmes heures et dates et donc portaient le même nom.

Après ces 4 jours de contrôle, les données ont été analysées. Le 3PM-1 avait échantillonné durant tout l'essai, mais ce n'était pas le cas du 3PM-2 et du 3PM-3. Les données de ces deux appareils ne dépassaient pas 4h d'échantillonnage.

Malheureusement, ce problème a persisté pendant toute la campagne de mesure, bien que les piles du 3PM-1 et du 3PM-3 aient été remplacées, ce qui a retardé la prise de mesures et rendu de nombreuses données inutilisables.

b) ECT

L'ECT est un instrument conçu par l'équipe SAM. Il peut être équipé de différents capteurs, dont des capteurs PID, IR et électrochimiques. Les données des capteurs sont enregistrées sur une carte SD mais sont également disponibles en ligne et en temps réel sur la plateforme Grafana grâce à une connexion Internet. L'ECT fonctionne en étant branché à une source d'alimentation.

Dans le cadre de ce travail, l'ECT a été utilisé pour faire des mesures de CO₂.

Capteur

Le capteur CO₂ est un capteur infrarouge de la marque Dynament de type MSH-P-CO2/NC (Figure 10). Il fonctionne selon le principe non-dispersif à infrarouge pour détecter la présence de CO₂. Sa précision est de $\pm 2\%$. Il fonctionne entre -20°C jusqu'à 50°C et entre 0% et 95% d'humidité relative sans condensation. Son diamètre et sa hauteur sont de 20 mm.



Figure 10 : Capteur CO₂ Dynament

Test de fonctionnement du capteur CO₂ dans l'ECT

L'état de fonctionnement du capteur IR présent dans l'ECT a été contrôlé en exhalant non loin du capteur : un pic de CO₂ s'est bien affiché dans les données recueillies. Afin de vérifier la justesse des valeurs en ppm, les données ont été comparées à celle d'un instrument commercial de la marque Rotronic. Les valeurs étaient supérieures de 100 ppm pour des concentrations mesurées de 500 à 700 ppm.

L'ECT possède également un capteur PM. Celui-ci a été contrôlé de la même manière que les 3PM, c'est-à-dire en le mettant dans un environnement fermé et en créant un pic de PM avec de l'encens. L'instrument a été comparé au pic de l'instrument 3PM-1. Les résultats montraient que le capteur ne réagissait pas comme le 3PM-1 et que ses pics n'étaient pas visibles. Les données PM de l'ECT n'ont donc pas été prises en compte pour ce travail.

c) Winsen

Le « Winsen » est un module de capteurs multifonctions conçu par Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Le modèle utilisé est le ZPHS01B. Ce module a été intégré à un instrument du laboratoire SAM avec pour but d'être attaché à un drone. L'instrument de l'ULiège est composé de deux parties : un boîtier contenant le module de capteurs, et un autre permettant la transmission des données vers internet.

Le Winsen a été utilisé pour son capteur CO₂.

Capteur

Le capteur CO₂ du Winsen est un capteur infrarouge (cf. Figure 11). Sa gamme se situe entre 0 et 5000 ppm. Pour une concentration inférieure ou égale à 0,2 mg/m³, sa précision est de $\pm 0,03$ mg/m³. Pour une valeur supérieure, sa précision est de $\pm 20\%$. Sa durée de vie est de 5 ans dans des conditions entre 18°C et 25°C et dans un air propre.



Figure 11 : Module Winsen et capteur CO₂

Test de fonctionnement du capteur CO₂ dans le Winsen

Pour vérifier la justesse des valeurs en ppm du « Winsen », l'instrument a été placé à proximité de l'instrument commercial Rotronic dans la Salle A. Les mesures étaient similaires.

La réactivité du « Winsen » a également été confirmée par l'apparition d'un pic en exhalant non loin du capteur.

d) Prélèvement de formaldéhyde

L'air est aspiré au travers d'une cartouche LpDNPH S10L 3ml, 350mg SPE Tube Supelco (Figure 12) avec un débit constant grâce à une pompe GilAir Plus de la marque Gilian. La cartouche contient un gel de silice imprégné de DNPH [(2,4)-dinitrophénylhydrazine], qui va permettre au formaldéhyde de s'y adsorber.

La pompe a été étalonnée au laboratoire avant le prélèvement avec le Gilibrator 2 de la marque Gilian. Il fonctionne avec le principe du débitmètre à bulle de savon, avec une gestion électronique.

Après prélèvement, les cartouches sont désorbées et analysées par chromatographie en phase liquide (marque Shimadzu, modèle CBM-40lite). La méthode d'analyse est basée sur le standard international ISO 16000-3.

Il existe des risques d'interférence négative avec l'ozone, ce qui peut entraîner une sur ou sous-estimation des résultats.



Figure 12 : Cartouche LpDNPH

II.II Campagne de mesure

Plusieurs contraintes liées aux instruments, aux salles, ou à la rédaction du mémoire ont conditionné la campagne de mesure.

a) Période, durée et fréquence des mesures

Ce mémoire ayant débuté en mai, la campagne a été réalisée en été. L'idéal aurait été une campagne lors de périodes d'affluence telles que le printemps.

Vu que les polluants fluctuent en fonction de la fréquentation et de la ventilation, la durée prévue des mesures dans chaque salle était d'une semaine pour les PM et le CO₂.

Les instruments ont été réglés pour échantillonner toutes les minutes pendant 30 secondes.

Le formaldéhyde a été échantillonné sur la même période, c'est-à-dire en juin et juillet. Le prélèvement devait se dérouler après l'ouverture d'un mur, c'est-à-dire après le retrait et la nouvelle installation des prises pour créer des nouvelles voies. L'hypothèse était que l'émission du formaldéhyde devait être plus abondante après cette étape de changement des voies. La première mesure de formaldéhyde devait être réalisée le lendemain du changement des voies dès l'ouverture de la salle, lorsque la ventilation n'était pas encore mise en marche. La deuxième mesure devait être réalisée lorsque la ventilation était en fonctionnement.

La durée de prélèvement du formaldéhyde pour un volume d'air aspiré de 50L est d'environ 40-45 minutes.

b) Emplacement des mesures

Dans la Salle B (cf. Figures 13 et 14), l'ECT et le 3PM-1 sont placés à la réception pour évaluer les concentrations auxquelles sont exposées les employés. Le Winsen et le 3PM-2 sont placés sur un pilier dans la zone de bloc, non loin de la cafétéria. Cet emplacement a été choisi car les instruments ne pouvaient pas être placés sur les murs au risque qu'un grimpeur ne chute dessus. Cet emplacement était donc le plus sécurisé, tant pour les instruments que pour les grimpeurs. De plus, grâce à une rallonge électrique d'une vingtaine de mètres, les instruments pouvaient être branchés au secteur électrique.

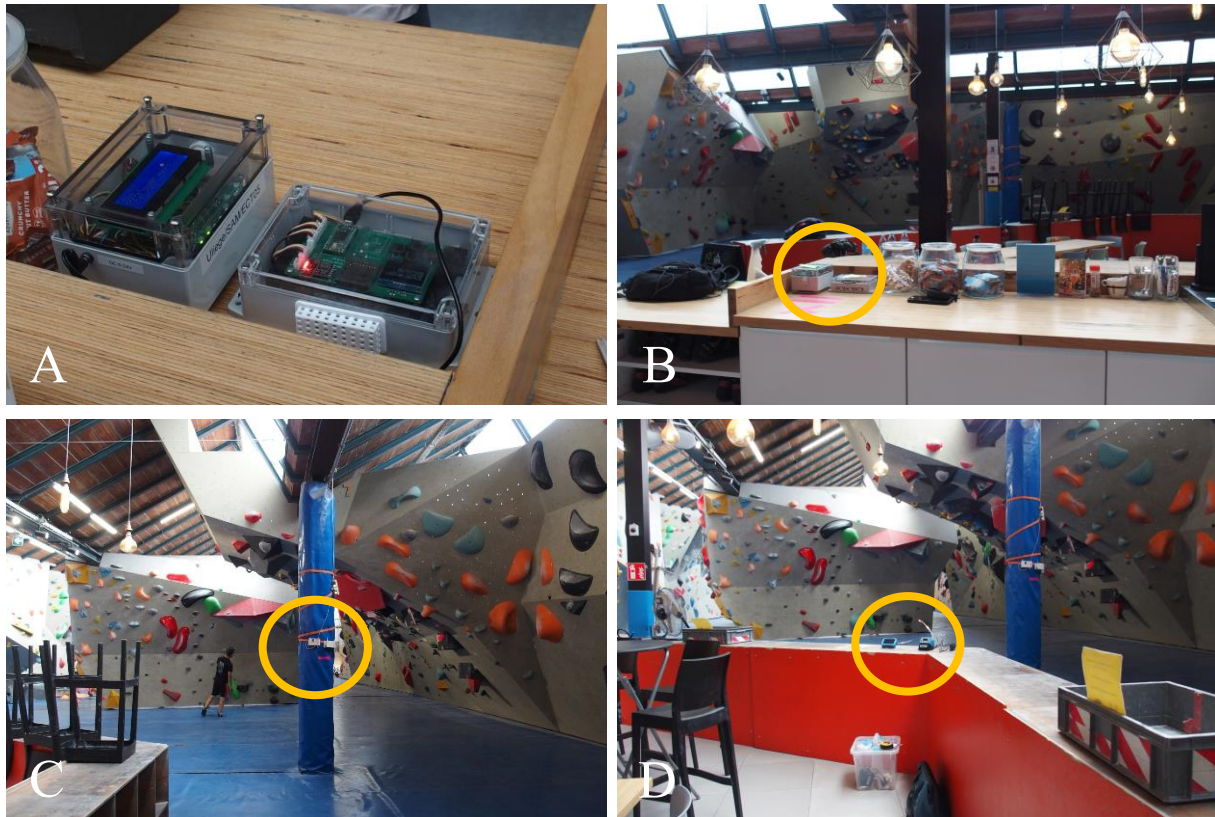


Figure 14 : Emplacements des mesures à la Salle B : (A et B) ECT et 3PM à l'accueil ; (C) Winsen et 3PM ; (D) prélèvement formaldéhyde

Quant au formaldéhyde, deux prélèvements sont réalisés (pour rappel : un premier le lendemain matin du remplacement de la voie, avant la mise en route de la ventilation, et un second lors du fonctionnement de la ventilation et de la présence des grimpeurs). La pompe est donc placée sur les meubles des casiers, sur une surface stable durant une quarantaine de minutes, non loin du pilier et non sur le matelas.

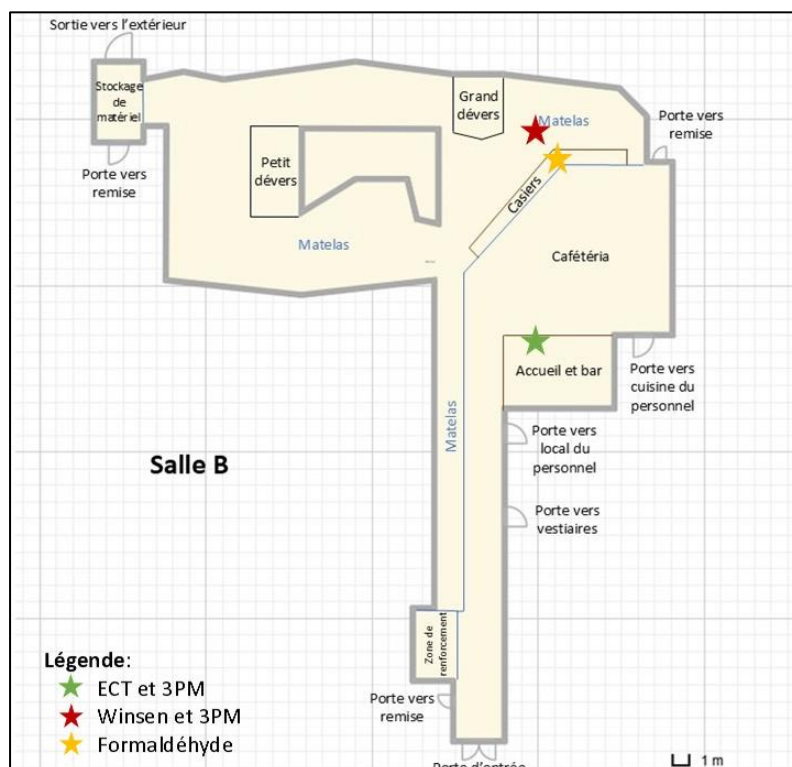


Figure 13 : Plan des mesures dans la Salle B

Dans la Salle C (Figures 15 et 16), l'ECT et le 3PM-1 sont placés dans la cafétéria, non loin de la réception, sur une table accolée à un mur. Cet emplacement a été choisi car il ne gênait pas les employés et était proche d'une prise.

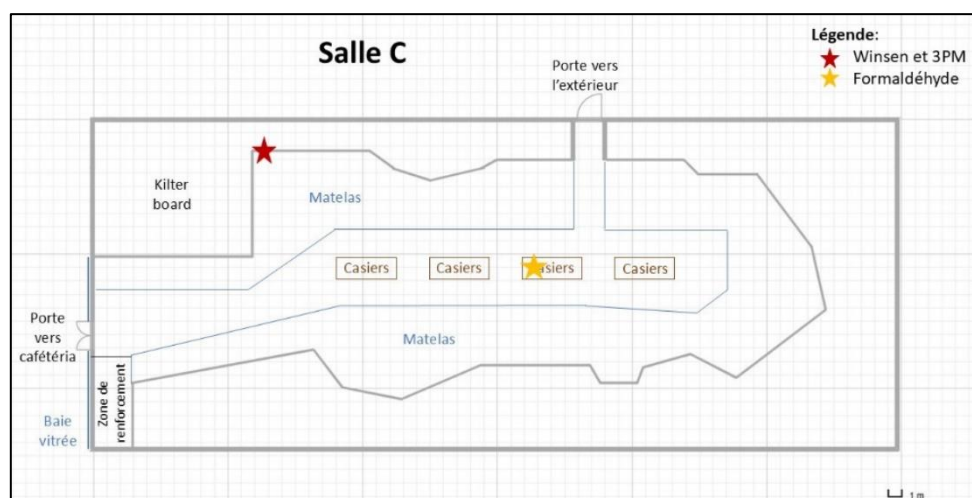


Figure 15 : Plan des mesures dans la Salle C

Le Winsen et le 3PM-2 sont placés entre la Kilter board et le commencement d'un pan de mur d'escalade. À nouveau, les instruments ne pouvaient être placés sur les murs d'escalade au risque de gêner les grimpeurs et d'être endommagés. Cet emplacement était non loin d'une prise et ne gênait aucun grimpeur, sans pour autant se situer près d'une porte.

Le formaldéhyde a été prélevé en face du mur qui venait d'être ouvert. Des casiers se trouvant tout le long de la salle, le choix de l'emplacement fût plus simple que pour la Salle A.

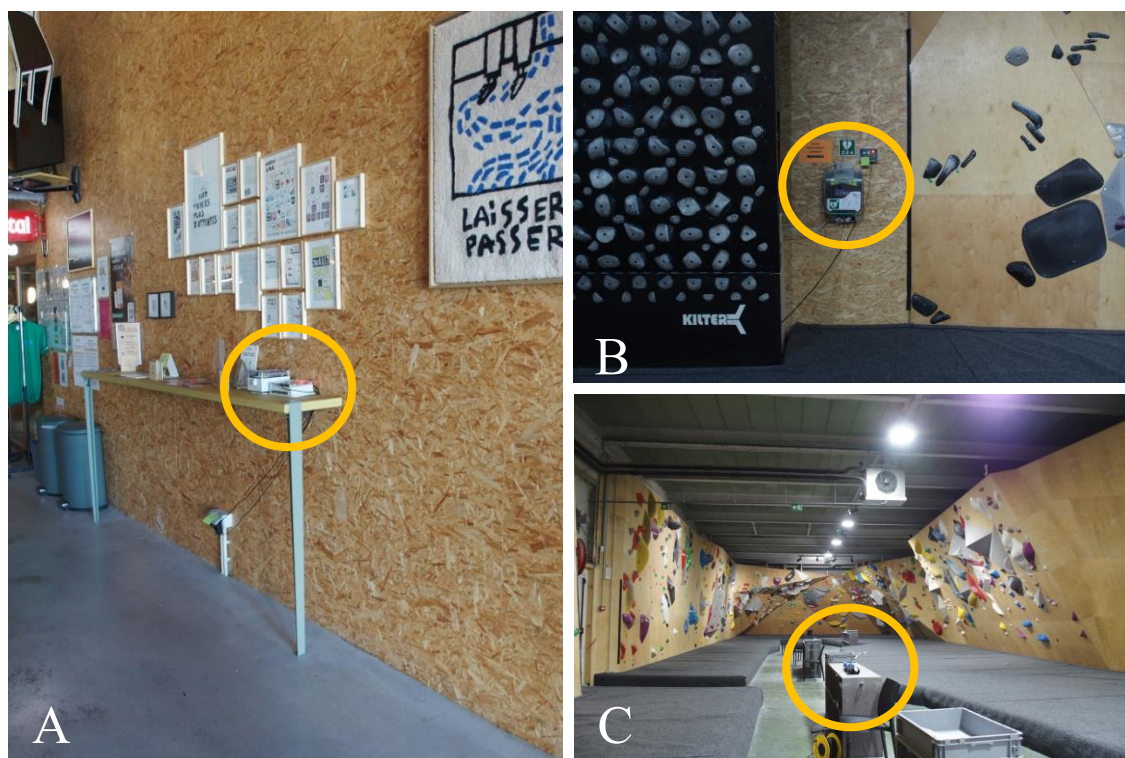


Figure 16 : Emplacements des mesures à la Salle C : (A) ECT et 3PM à l'accueil ;(B) Winsen et 3PM dans la salle ; (C) prélèvement formaldéhyde.

Dans la Salle A (Figures 17 et 18), l'ECT et le 3PM-2 ont été placés à la réception. Le Winsen et le 3PM-1 sont accrochés sur une poutre en hauteur, au milieu de la salle de bloc. Cet emplacement a été choisi puisqu'une prise était accessible de cet endroit et que les instruments ne gênaient pas les grimpeurs puisqu'ils n'étaient pas sur les murs.

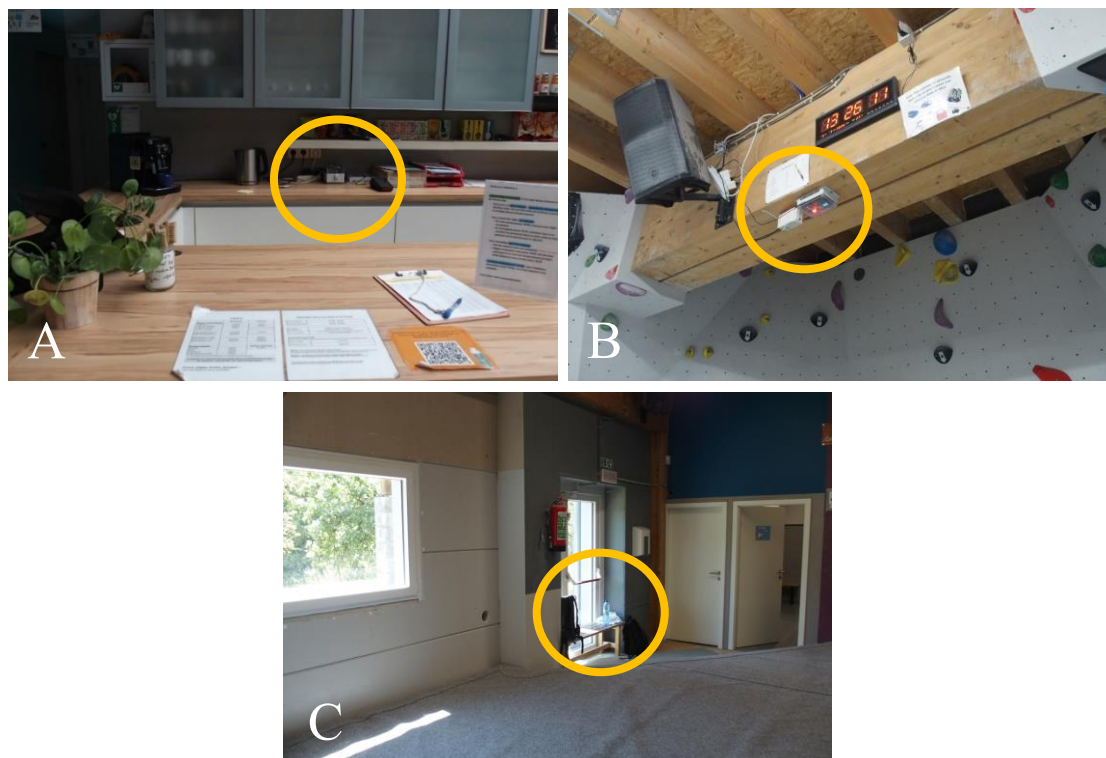


Figure 17 : Emplacements des mesures dans la Salle A : (A) ECT et 3PM à l'accueil ; (B) Winsen et 3PM dans la salle ; (C) prélèvement formaldéhyde.

Le formaldéhyde a été prélevé dans un des coins de la salle, sur un banc. C'était le seul endroit où il était possible de poser la pompe pendant 45 minutes sans gêner les grimpeurs.

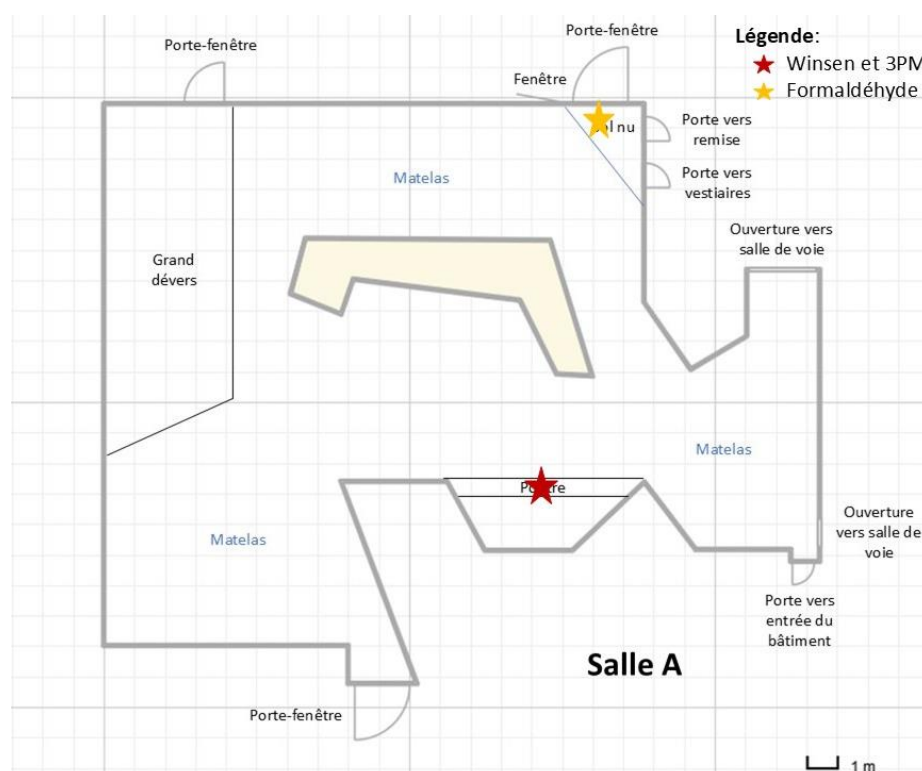


Figure 18 : Plan des mesures dans la Salle A

c) Déroulement de la campagne

La campagne de mesure a été menée du 8 juin au 16 juillet.

Périodes de mesure par salle pour le CO₂ et les PM

La première période de mesure a été organisée entre le 8 juin 2026 et le 16 juin dans la Salle A. Les instruments placés à l'accueil, l'ECT et le 3PM-2, ont fonctionné sans interruption. Par contre, les instruments placés dans la salle ont rencontré des problèmes d'enregistrement des données. Les données du Winsen sont enregistrées sur un cloud via le Wifi mais celui-ci se coupait tous les jours, en-dehors des heures de fréquentation. Le 3PM-1 n'a pas non plus enregistré toutes les données sur la carte SD.

Les piles du 3PM1 et du 3PM-3 ont été remplacées, puisqu'il était probable que le problème provienne du fait qu'elles soient déchargées.

Les appareils ont ensuite été placés dans la Salle B entre le 19 et le 23 juin. Malheureusement, suite à la canicule, la Salle B a dû fermer ses portes à partir du 20 juin en raison de la chaleur extrême. Le 3PM-3, qui avait été placé dans la salle de bloc a à nouveau dysfonctionné durant cette période. Il a été remplacé rapidement par le 3PM-2 et celui-ci a fonctionné.

Du 23 juin au 2 juillet, les instruments ont été déplacés à la Salle C. Le 3PM-2 a été placé dans la salle et le 3PM-1 à l'accueil. Tous les instruments ont fonctionné sur cette période.

Par la suite, les instruments ont été replacés dans la Salle B qui avait réouvert ses portes. Les instruments ont donc échantillonné pour la période du 2 au 9 juillet, sans rencontrer de problèmes. À nouveau, le 3PM-1 a été placé à l'accueil et le 3PM-2 dans la salle.

Étant donné les problèmes d'enregistrement lors de la première campagne dans la Salle A, il a été décidé de refaire une campagne entre le 9 et le 16 juillet. Le 3PM-2 placé dans la salle de bloc a dysfonctionné dès le premier jour, et les données du Winsen sont également incomplètes de façon périodique. Le 3PM-1 et l'ECT à l'accueil ont toutefois fonctionné.

Prélèvement du formaldéhyde par salle

Dans la Salle A, les prélèvements de formaldéhyde ont été effectués le 16 juin à l'ouverture à 12h25, et l'autre plus tard dans la journée, à 16h51 avec l'aide de Mme Delperdange, scientifique du laboratoire SAM. La Salle A modifie rarement les voies de bloc, il a été décidé de réaliser ces prélèvements sans attendre qu'un mur soit ouvert.

À la Salle C, le premier prélèvement a été réalisé le 2 juillet, date à laquelle un mur était ouvert. La mesure devait se dérouler avant l'arrivée des grimpeurs et avant que la ventilation ne soit allumée. Cependant, à la Salle C, la ventilation s'allume automatiquement entre 08h et 21h, et la salle n'ouvre qu'à 09h du matin. Ne pouvant rejoindre la salle avant 08h, le prélèvement a été planifié le soir après l'arrêt de la ventilation vers 22h mais, finalement, la ventilation était toujours en fonctionnement. Le lendemain, le 3 juillet, le deuxième échantillonnage a été réalisé à 17h30, avec une ventilation en fonctionnement depuis 08h du matin.

Les prélèvements dans la Salle B ont également été réalisés le 3 juillet, le lendemain de l'ouverture d'un mur. Le premier prélèvement a été lancé à 10h59, 1 heure avant l'ouverture de la salle. Bien que les portes d'entrée aient été ouvertes 30 minutes avant le début du prélèvement, il n'y avait pas eu de renouvellement d'air important dans la salle puisque les portes à l'arrière de la salle n'étaient pas ouvertes. La deuxième mesure s'est déroulée à 18h26, avec une ventilation en fonctionnement depuis 12h00.

Installation des appareils

À l'accueil

Dans les salles A et B, le comptoir était suffisamment grand et dégagé pour y placer les instruments sans gêner les employés, et des prises de courant étaient proches.

À la Salle C, les instruments ont dû être placés ailleurs qu'à la réception car le comptoir était assez chargé. Ils ont été placés au plus proche de la réception, là où ils pouvaient également être branchés à une prise de courant.

Dans la salle de bloc

Placer les instruments dans les salles de bloc s'est avéré plus compliqué (Figure 19).

Dans la Salle A, il a fallu visser les instruments sur le dessous d'une poutre, en équilibre sur une échelle. Dans la Salle B, les instruments ont été attachés à une sangle autour du pilier, mais c'est l'installation de la rallonge qui a été complexe puisqu'il a fallu l'accrocher tout au long d'une poutre au plafond. À la Salle C, la rallonge a dû être passée derrière la Kilter Board, nécessitant l'aide d'un employé, mais le placement des instruments fût plus simple.



Figure 19 : Installation des instruments : (A, B) Salle A ; (C) Salle B.

De plus, l'ECT et le Winsen ont dû être connectés au Wifi avant d'être installés. Sur le Winsen, le changement pouvait être effectué via le boîtier, mais l'ECT nécessitait d'être connecté à un ordinateur. Après l'installation des instruments, il fallait vérifier que les données étaient envoyées sur le serveur (Grafana).

Contraintes et limitations

De nombreuses limites peuvent être émises.

Idéalement, les capteurs auraient dû être placés au moins à 160 cm de hauteur, puisqu'il s'agit de la hauteur moyenne de respirabilité. Cela n'a pas pu être possible dans la Salle A. En effet, les instruments étaient situés à 276 cm de hauteur, ce qui n'était donc pas représentatif de ce que pouvaient inhaler les grimpeurs la majorité du temps.

De plus, les emplacements des instruments dans les salles de bloc ne reflètent pas la variabilité spatiale - c'est notamment le cas à la Salle C, dont la ventilation fonctionne en particulier pour une moitié de la salle. La deuxième moitié de la salle ne comporte aucune ouverture, et l'air est probablement moins bien renouvelé dans cette partie de la salle. Un employé a d'ailleurs mis en avant le fait qu'un nuage de particules était parfois visible dans le fond de la salle.

Par ailleurs, la première mesure de formaldéhyde à la Salle C aurait dû être réalisée le matin suivant, cela aurait été plus représentatif des concentrations à l'ouverture.

La fréquentation a été demandée aux gérants des salles et une fréquentation journalière a été obtenue, ce qui permet de déterminer si les jours où la fréquentation est plus élevée entraîne

également des concentrations plus élevées. Néanmoins, ces données ne donnent pas d'informations concernant le nombre de grimpeurs présents lors de pics de concentrations.

De plus, la ventilation étant majoritairement naturelle dans la Salle A et la Salle B, les données sur la ventilation lors des périodes de mesures ne sont pas connues. À la Salle C, la ventilation est principalement mécanique et elle est restée allumée la majorité de la période de mesure au vu des températures élevées.

Les conditions météorologiques ont principalement été très chaudes. En effet, les mois de juin et juillet ont vu des températures élevées, dont une canicule importante.

Finalement, la période de mesure n'est pas représentative de la variabilité saisonnière. En effet, l'été est une période où l'affluence est moindre et où les températures élevées entraînent une ventilation plus importante.

d) Tableaux récapitulatifs des campagnes de mesure

Tableau 2 : Campagne de mesure des PM et CO₂

Salle et instruments	Date début	Date fin	Hauteur (cm)	Commentaires
Salle A – Winsen et 3PM-1	8 juin – 16h10	16 juin – 17h40	276	Données incomplètes pour le CO ₂ , Wifi coupé périodiquement. Données incomplètes 3PM
Salle A – ECT et 3PM-2	8 juin – 15h10	16 juin – 17h30	105	
Salle B – Winsen et 3PM-3 puis 3PM-2	19 juin – 11h27	23 juin – 11h30	150	Canicule – fermeture de la salle à partir du 20 juin. Données des deux appareils, incomplètes.
Salle B – ECT et 3PM-1	19 juin – 11h32	23 juin – 11h30	100	Canicule – fermeture de la salle à partir du 20 juin.
Salle C – Winsen et 3PM-2	25 juin – 11h34	2 juillet – 09h15	150	
Salle C – ECT et 3PM-1	25 juin – 11h40	2 juillet – 09h15	110	
Salle B – Winsen et 3PM-2	2 juillet – 10h08	9 juillet – 09h00	150	
Salle B – ECT et 3PM-1	2 juillet – 10h00	9 juillet – 09h00	100	
Salle A – Winsen et 3PM-2	9 juillet – 12h20	16 juillet	276	Pas de données à partir du 9 juillet 22h30 pour le 3PM. Données incomplètes pour le CO ₂ , Wifi coupé périodiquement.
Salle A – ECT et 3PM-1	9 juillet – 12h20	16 juillet	105	

Tableau 3 : Conditions de prélèvement du formaldéhyde

Salle	Date	Heure de début	Température (°C)	Pression (hPa)	Heure de fin	Température (°C)	Pression (hPa)	Volume d'air filtré (L)	Hauteur (cm)	Commentaires
Salle A-1	16/06/2026	12h25	21,4	964,6	13h08	24,4	964,4	50,013	50	1 personne dans la salle. Fenêtres fermées.
Salle A-2	16/06/2026	16h51	25,8	964,0	17h34	23,7	964,9	50,007	50	17 personnes présentes ± 2. Fenêtre grande ouverte juste à côté de la pompe.
Salle C-1	02/07/2026	22h02	21,9	1013,8	22h43	27,4	1014,3	50,006	100	Dans la journée, ils ont dévissé tout un mur – mesure face à ce mur. Ventilation toujours allumée alors qu'elle devait être éteinte. 5 personnes dans la salle.
Salle C-2	03/07/2026	17h30	24,2	1016,5	18h13	26,0	1016,5	50,050	100	± 19 personnes dans la salle. Le mur a été remonté dans la journée. Ventilation allumée et portes ouvertes.
Salle B-1	03/07/2026	10h59	20,2	1017,7	11h42	26,7	1017,9	50,017	120	Portes d'entrée ouvertes depuis 30 minutes avant la mesure mais

										pas d'autres ouvertures. 2 personnes présentes. Ils ont ouvert un mur le jour avant.
Salle B-2	03/07/2026	18h26	26,4	1016,3	19h08	30,3	1015,9	50,036	120	Entre 15 et 20 personnes dans la salle. Portes ouvertes et ventilation allumée

II.III Questionnaire sur la perception des usagers

Un questionnaire a été créé pour évaluer la perception globale de la qualité de l'air dans les salles d'escalade en Wallonie. Ce questionnaire était destiné à toute personne fréquentant les salles d'escalade pour déterminer si, du point de vue des usagers, la qualité de l'air était effectivement un objet de préoccupation.

Le questionnaire est disponible en annexe de ce travail.

a) Élaboration du questionnaire

Le questionnaire a pour but de s'intéresser aux habitudes des pratiquants, à leur potentielle exposition aux polluants et à leur perception de la qualité de l'air.

La population visée par le questionnaire concerne toute personne majeure fréquentant des salles d'escalade en Wallonie, c'est-à-dire les grimpeurs, employés et accompagnants.

Le questionnaire n'est pas relatif à la campagne de mesure de polluants et ne se limite pas aux salles où les capteurs ont été placés, il s'agit plutôt d'une appréciation globale.

Le questionnaire est structuré en différentes parties :

- Données démographiques (âge, sexe, profil) ;
- Habitudes d'escalade (salle, fréquence, durée, type, magnésie, quantité de magnésie) ;
- Qualité de l'air en salle d'escalade (de mauvais à excellent, facteurs) ;
- Symptômes respiratoires liés à l'escalade (symptômes, gêne engendrée, disparition des symptômes) ;
- Antécédents médicaux (maladie respiratoire, tabagisme) ;
- Généralités sur l'air intérieur (conscience des risques, influence sur le choix de la salle, commentaires additionnels).

Les questions étaient en majorité des questions à choix multiples ou uniques. Ce choix était volontaire car de nombreuses réponses ouvertes auraient pu décourager les participants à répondre. Le questionnaire a été conçu pour être simple et rapide, pour inciter le plus d'usagers à y répondre. De plus, comme incitants, 3 tubes de magnésie liquide ont été offerts à l'issue d'un tirage au sort, pour ceux qui souhaitaient y participer.

Le nombre total de questions étaient de 18 questions à choix multiples et de 4 questions ouvertes. Les questions ouvertes ne nécessitaient pas obligatoirement de réponse.

Ainsi, la durée de réponse au questionnaire ne dépassait pas 5 minutes.

Les questions posées ont largement été inspirées d'un questionnaire soumis lors de l'étude de (Nicolici et al., 2026).

b) Administration

Le questionnaire est en accord avec le Règlement général sur la protection des données (RGPD – UE 2016/679) et avec la loi du 30 juillet 2018 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel. Sa conformité a été vérifiée par Justine Mandy, collaboratrice de la cellule à la protection des données de l'Université de Liège.

Le questionnaire a été créé sur la plateforme framaforms.org, plateforme conseillée par l'Université de Liège.

Le questionnaire a été envoyé par mail à toutes les salles d'escalade de Wallonie et diffusé par certaines de ces salles sur leurs réseaux sociaux. De plus, des codes QR renvoyant au questionnaire ont été placés dans les salles où les données ont été prises. Le questionnaire a été diffusé entre le 12 mai 2026 et le 5 août 2026.

Pour éviter tout risque de problème concernant l'anonymat des répondants, un deuxième formulaire concernant le tirage au sort a été créé pour récolter les adresses mails.



Figure 20 : Affiche utilisée pour la promotion du questionnaire

c) Limites

Après la diffusion du questionnaire, deux limites sont apparues mais il n'était plus possible de le modifier au risque de perdre des données.

D'une part, les mineurs ne pouvaient pas répondre au questionnaire. La tranche d'âge en-dessous de 18 ans avait été retirée dans un premier temps car, pour être conforme au Règlement général sur la protection des données (RGPD – UE 2016/679) et à la loi du 30 juillet 2018 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel, une option demandant le consentement des participants était nécessaire. Les mineurs ne pouvant donner leur consentement librement au regard de la loi, leur exclusion du questionnaire était la solution la plus cohérente. Après avoir reçu les conseils de Mme Mandy, il est apparu que le questionnaire ne nécessitait plus le consentement des participants, et cette option a donc été supprimée, sans pour autant ajouter la catégorie de personnes âgées de moins de 18 ans. Cette limite peut toutefois être justifiée puisque les grimpeurs mineurs sont généralement soumis aux choix de leurs parents.

D'autre part, si un participant au questionnaire était employé ou accompagnant, il devait toutefois répondre aux questions sur la pratique de l'escalade, sans nécessairement pratiquer celle-ci. Pour résoudre ce problème, les réponses correspondant à l'usage de magnésie n'ont pas été prises en compte pour les parents et accompagnateurs lors de l'analyse des résultats.

II.IV Législation

Pour approfondir la question de la législation, deux entretiens informels ont été réalisés.

a) Préparation des entretiens

Les deux personnes interrogées sont Mr. L. Raymond et Mr. M Degallier du SPF Santé Publique. Ils ont été conseillés par le Prof. A.-C. Romain, promotrice de ce mémoire, en raison de leur fonction professionnelle, de leur connaissance de la loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public, et de leur collaboration avec l'équipe SAM de l'Uliège.

Mr. M. Degallier est conseiller de la cellule de qualité d'air intérieur du SPF Santé Publique et a contribué à l'élaboration de la loi du 6 novembre 2022. Ainsi, les questions qui lui ont été posées concernaient spécifiquement cette loi.

Pour préparer l'entretien avec Mr. M. Degallier, les documents relatifs à la loi du 6 novembre 2022 ont été examinés et les questions ont été posées pour éclaircir certains points imprécis. Les échanges se sont déroulés par mail.

Mr. L. Raymond, quant à lui, directeur Ispira Benelux, est expert air et odeur. Il a donc pu apporter un avis d'expert sur la qualité d'air intérieur et sur la législation de celle-ci.

Il a été contacté par mail et un rendez-vous s'est organisé le 26 mai 2026 dans les bureaux de l'équipe SAM, sur le Campus d'Arlon de l'ULiège. Des questions se concentrant sur la loi du 6 novembre 2022 avaient également été préparées, mais l'entretien se voulait plus libre.

b) Questions posées

Questions posées par mail à Michel Degallier :

- Un des objectifs de la loi est d'encourager les exploitants à mener une réflexion sur la qualité de l'air. Concrètement, comment cela se passe ? Est-ce efficace ? Les exploitants ont-ils été mis au courant de l'existence de la plateforme ?
- Est-ce que des subventions ou des incitants pourraient être accordés ? Dans le cas de l'escalade, de nombreuses salles sont anciennes et/ou ont été construites dans des bâtiments qui n'étaient pas adaptés à cela. Ces salles n'ont pas forcément les moyens et/ou la possibilité d'installer de nouveaux systèmes de ventilation.
- Est-ce que le label existe déjà ? Est-ce qu'il a plusieurs catégories ? Est-ce qu'il s'agit des niveaux de références A et B ? Des sanctions pour les mauvais « scores » sont-elles prévues ?
- De ce que j'ai compris, les valeurs de référence pour les locaux de travail sont celles retrouvées dans l'AR du 8 mai 2014, mais, sauf erreur de ma part, il n'y a pas d'indication pour les seuils des PM (polluants principaux dans les salles d'escalade). Est-ce que vous savez quelles sont les valeurs applicables ? Est-ce que d'autres normes de références vont être formulées ?
- Est-ce qu'il y a des AR qui, à votre connaissance, vont être publiés pour déterminer des niveaux de références, exigences, instruments, ... pour les salles de sport ?
- Est-ce qu'il y a, à votre connaissance, des salles de sport voire d'escalade qui ont déjà mis en place la démarche volontaire ?
- Est-ce qu'il y a des guides pratiques qui vont être mis en place spécifiquement pour les salles de sport ?
- L'AR devant déterminer les lieux publics visés est-il déjà publié ?

Questions préparées pour l'entretien oral avec Loïc Raymond

- Concrètement, est-ce que vous pouvez m'expliquer cette loi ? Ce qu'elle amène au niveau de la législation, si vous trouvez que c'est pertinent et efficace, ce qu'il en est concrètement au niveau des exploitants, ...

- Un des objectifs de la loi est d'encourager les exploitants à mener une réflexion sur la qualité de l'air. Concrètement, comment cela se passe ? Est-ce efficace ? Les exploitants ont-ils été mis au courant de l'existence de la plateforme ?
- De ce que j'ai compris, les valeurs de référence pour les locaux de travail sont celles retrouvées dans l'AR du 8 mai 2014, mais, sauf erreur de ma part, il n'y a pas d'indication pour les seuils des PM (polluants principaux dans les salles d'escalade). Est-ce que vous savez quelles sont les valeurs applicables ? Est-ce que d'autres normes de références vont être formulées ?
- Est-ce qu'il y a des AR qui, à votre connaissance, vont être publiés pour déterminer des niveaux de références, exigences, instruments, ... pour les salles de sport ?
- Est-ce qu'il y a, à votre connaissance, des salles de sport voire d'escalade qui ont déjà mis en place la démarche volontaire ?

III. Analyse des données

Les données des polluants et du questionnaire ont d'abord étaient collectées puis traitées.

III.I Données recueillies

a) Polluants

Les données CO₂ de l'ECT et du Winsen sont disponibles et téléchargeables sur la plateforme Grafana. Les données des 3PM sont récupérées via la carte SD des instruments.

Les cartouches de formaldéhyde ont été analysées par HPLC (*high-performance liquid chromatography*) par Mme A. Delperdange du laboratoire SAM.

b) Questionnaire

La plateforme Framiform propose une première analyse des données. Les données sont également téléchargeables.

III.II Traitement des données

a) Polluants

Les données sont traitées sur Excel et R-Studio.

Les moyennes, médianes, maxima et minima seront calculés. Des séries temporelles indiquant les concentrations de polluants (PM et CO₂) seront réalisées et mises en comparaison avec le taux de fréquentation, sous forme de diagramme à barres. Des boîtes à moustaches seront également présentées, ainsi que l'écart-type des concentrations.

Les concentrations seront comparées aux seuils réglementaires. Différentes périodes de temps seront prises en compte : 24h, 8h, et les horaires d'ouverture.

b) Questionnaire

Les résultats seront décrits sous forme de données statistiques.

Les différentes statistiques seront entrecroisées : par exemple, est-ce que les personnes qui souffrent de symptômes respiratoires utilisent moins de magnésie que l'échantillon global ?

c) Entretiens

Les informations tirées de l'entretien de Mr. Loïc Raymond ont permis d'orienter les mesures réalisées dans le cadre du mémoire, en particulier concernant le formaldéhyde. Quant à celles de Mr. Michel Degallier, elles ont été prises en compte lors de la discussion concernant la législation.

Résultats

Les résultats des polluants seront traités dans un premier temps, puis les réponses au questionnaire et aux entretiens seront ensuite présentées.

I. Polluants

La première partie de cette section présente les résultats des mesures des PM et du CO₂, et la deuxième expose les résultats des prélèvements de formaldéhyde.

I.I Mesures des PM et du CO₂

Le Tableau 4 considère les données des PM sur 24h, pour les comparer aux seuils de l’OMS.

Le Tableau 5 considère les données du CO₂ sur 8h, pour les comparer aux seuils du Code du bien-être au travail.

Les mesures sont synthétisées dans le Tableau 6, présentant le minimum, la médiane, la moyenne et le maximum de chaque appareil dans chaque salle, ainsi que le pourcentage de valeurs qui a dépassé certaines valeurs seuils. Les données concernées par le Tableau 6 sont uniquement celles mesurées pendant les heures d’ouverture des salles d’escalade.

Pour les instruments 3PM, puisqu’il y a 3 mesures par capteur, la médiane des capteurs PM_{2,5} et des capteurs PM₁₀ a été calculée pour ne garder qu’une seule mesure.

Les valeurs aberrantes ont été retirées : par exemple, une concentration de 399 204 ppm pour le CO₂ à l’accueil de la Salle A-1, un pic jusqu’à 3121 ppm causé lors de l’installation de l’appareil dans la salle de bloc de la Salle C, ou encore des valeurs à 189 ppm à l’accueil de la Salle A, lors de la mise en route de l’appareil.

a) Statistiques descriptives et comparaison aux valeurs seuil

PM

La valeur la plus élevée dans les valeurs minima des PM_{2,5} et PM₁₀ est de 6 µg/m³ dans la salle de bloc de la Salle A, et les plus basses sont de 1 µg/m³ dans les trois salles.

Les concentrations les plus élevées de PM sont mesurées à l’accueil de la Salle A : 222 µg/m³ pour les PM_{2,5} et 407 µg/m³ pour les PM₁₀.

La médiane permet d'exclure les valeurs aberrantes et est donc plus représentative du jeu de données. On peut d'ailleurs remarquer dans le tableau de données que la moyenne est quasi systématiquement plus élevée que la médiane, reflétant l'influence de valeurs élevées.

Ainsi, la médiane la plus élevée est de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ et de $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} dans la salle de bloc de la Salle A.

La salle de bloc de la **Salle C** a elle aussi des médianes élevées pour les particules : $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ et $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} .

Concernant le dépassement des **seuils du Code du bien-être au travail**, bien que ceux-ci soient calculés sur une période de 8h et que nos résultats ne remplissent pas cette exigence, les valeurs de PM n'atteignent jamais des seuils aussi élevés, ce qui permet d'affirmer qu'ils ne sont jamais dépassés pour les PM.

Pour les **seuils de l'OMS**, le Tableau 4 indique que :

- La valeur journalière de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ est dépassée régulièrement par toutes les salles, jusqu'à 92,4% du temps dans la salle de bloc de la Salle C
- Le seuil annuel de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ de l'OMS est dépassé plus de la moitié du temps dans la salle de bloc de la Salle C, mais n'est dépassée que moins de 5% du temps dans la salle de bloc de la Salle B ;
- Pour les PM_{10} , la valeur annuelle de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'OMS est dépassée par toutes les salles de façon hétérogène : la Salle B ne dépasse pas plus de 7% du temps ce seuil, tandis que la Salle A le dépasse jusqu'à 46,98% du temps et la Salle C jusqu'à 65,96% du temps ;
- Quant au seuil de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} , il est dépassé moins de 1% du temps à la Salle B et jusqu'à 23,23% à la Salle A et 18,25% à la Salle C.
- La deuxième mesure de PM dans la salle de bloc de la Salle A n'a duré que 12 heures en raison d'un dysfonctionnement de l'instrument. Ainsi, ces mesures ne sont pas prises en compte.

Tableau 4 : Dépassement des seuils OMS des concentrations en PM des trois salles

Salle	Polluant	Dépassement OMS PM2,5 5µg	Dépassement OMS PM2,5 15µg	Dépassement OMS PM10 15µg	Dépassement OMS PM10 45µg
Salle A-1 Salle	PM2.5	67,30%	32,22%		
	PM10			46,98%	23,23%
Salle A-1 Accueil	PM2.5	62,29%	29,71%		
	PM10			47,46%	16,55%
Salle B-1 Salle	PM2.5	76,43%	1%		
	PM10			2,28%	0%
Salle B-1 Accueil	PM2.5	82,47%	4%		
	PM10			4%	0%
Salle C-1 Salle	PM2.5	92,40%	61,48%		
	PM10			65,96%	18,25%
Salle C-1 Accueil	PM2.5	70,04%	30,45%		
	PM10			31,99%	0,34%
Salle B-2 Salle	PM2.5	41,92%	4%		
	PM10			7,01%	0,32%
Salle B-2 Accueil	PM2.5	41,17%	2,36%		
	PM10			4,21%	0,23%
Salle A-2 Salle	PM2.5	100%	91,32%		
	PM10			95,23%	62,58%
Salle A-2 Accueil	PM2.5	54,03%	0,15%		
	PM10			0,70%	0,01%

CO₂

Les concentrations les plus basses pour le CO₂ sont de 400 ppm et ont été mesurées dans les trois salles par le Winsen.

Le CO₂ atteint 1569 ppm dans la salle de bloc de la Salle C. De plus, la médiane en CO₂ de la salle de bloc de la Salle C est la plus haute : 728 ppm.

Les seuils du Code du bien-être au travail pour le CO₂ sont comparés aux données de l'accueil des trois salles, puisque ce sont les lieux où les employés sont le plus souvent. Les seuils ne sont jamais dépassés à la Salle B. La Salle C dépasse le seuil de 900 ppm 8,45% du temps et la

Salle A jusqu'à 25,94% du temps. Quant au seuil de 1200 ppm, celui-ci est dépassé moins de 1% du temps à la Salle C et jusqu'à 3,21% du temps à la Salle A.

Tableau 5 : Dépassement des seuils du Code du bien-être au travail pour le CO2 dans les trois salles

Salle	Dépassement CBET 900 ppm	Dépassement CBET 1200 ppm
Salle A-1 Accueil	25,94%	3,21%
Salle B-1 Accueil	0%	0%
Salle C-1 Accueil	8,45%	0,58%
Salle B-2 Accueil	0%	0%
Salle C-2 Accueil	0%	0%

Globalement, les concentrations à la Salle B sont les plus basses, que ce soit pour les PM ou le CO₂.

Tableau 6 : Concentrations des polluants et dépassements des seuils réglementaires par salle

Salle	Polluant	Minimum	Médiane	Moyenne	Maximum	Dépassement OMS PM2,5 5µg	Dépassement OMS PM2,5 15µg	Dépassement CBET PM2,5 3mg	Dépassement OMS PM10 15µg	Dépassement OMS PM10 45µg	Dépassement CBET PM10 10mg	Dépassement CBET 900 ppm	Dépassement CBET 1200 ppm
Salle A-1 Salle	PM2.5	1	19	29	135	87,05%	55,22%	0%					
	PM10	2	35	55	273				69,99%	44,98%	0%		
	CO2	400	661	728	1549							18,90%	8,80%
Salle A-1 Accueil	PM2.5	1	11	17	73	70,09%	39,32%	0%					
	PM10	1	19	32	140				57,28%	23,45%	0%		
	CO2	505	638	710	1282							18,72%	2,32%
Salle B-1 Salle	PM2.5	3	6	7	14	76,54%	0%	0%					
	PM10	3	7	8	24				6,18%	0%	0%		
	CO2	400	460	461	541							0%	0%
Salle B-1 Accueil	PM2.5	3	5	6	11	60,57%	0%	0%					
	PM10	3	6	6	13				0%	0%	0%		
	CO2	511	543	551	827							0%	0%
Salle C-1 Salle	PM2.5	2	29	29	83	98,82%	82,57%	0%					
	PM10	2	37	41	158				88,74%	32,31%	0%		
	CO2	400	726	720	1569							18,02%	0,80%
Salle C-1 Accueil	PM2.5	1	8	10	80	60,38%	26,81%	0%					
	PM10	1	10	11	81				28,46%	0,10%	0%		
	CO2	523	647	671	1219							7,86%	0,36%
Salle B-2 Salle	PM2.5	1	5	6	49	44,68%	4%	0%					
	PM10	1	6	8	80				10,09%	0,51%	0%		
	CO2	403	493	503	796							0%	0%
Salle B-2 Accueil	PM2.5	1	4	5	88	39,55%	1,33%	0%					
	PM10	1	5	6	88				4,52%	0,35%	0%		
	CO2	519	550	556	634							0%	0%
Salle A-2 Salle	PM2.5	6	41	43	148	100%	91,32%	0%					
	PM10	6	67	73	277				95,23%	62,58%	0%		
	CO2	400	602	642	1492							7,24%	0,03%
Salle A-2 Accueil	PM2.5	2	6	6	222	59,53%	0,31%	0%					
	PM10	2	6	7	407				1,55%	0,02%	0%		
	CO2	499	533	540	683							0%	0%

b) Boîtes à moustaches

Des boîtes à moustaches (valeurs médianes) ont ensuite été réalisées pour comparer la distribution de chacun des polluants en fonction de la salle (*cf.* Figure 21). À nouveau, uniquement les heures d'ouverture ont été prises en compte et les médianes des capteurs PM2,5 et PM10 ont été calculées. Les 2 périodes de mesures des salles A et B ont été rassemblées.

Ces graphiques confirment que les concentrations de la Salle B sont les plus basses. La différence des concentrations entre la salle et l'accueil sont marquées pour la Salle A et la Salle C, notamment pour les PM2,5 et PM10. Ainsi, la séparation entre la salle de bloc et l'accueil (pour rappel, l'accueil de la Salle A se situe à l'étage supérieur et celui de la Salle C est séparé de la salle de bloc par une baie vitrée) entraîne une différence de concentrations.

À la Salle A, on peut remarquer quelques pics de concentrations pour les PM : jusqu'à plus de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2,5 et jusqu'à plus de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 (*cf.* Figure 21).

À la Salle B, la moitié des mesures ne dépassent pas 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2,5 et PM10.

De plus, les coefficients de variation montrent une dispersion importante des concentrations de PM2,5 et PM10, avec des valeurs atteignant 97% pour les PM2,5 et 105% pour les PM10, toutes deux à la Salle A (Tableau 7). Les concentrations de CO₂, quant à elles, sont plus homogènes, avec des coefficients de variation globalement plus faibles (Tableau 7).

La différence entre les moyennes en CO₂ des différentes salles n'est pas très marquée. Les concentrations les plus faibles sont observées dans la salle de bloc de la Salle B et les plus élevées dans la salle de bloc de la Salle C (Figure 21).

Tableau 7 : Coefficients de variation

		Coefficient de variation PM2,5	Coefficient de variation PM10	Coefficient de variation CO2
Salle A	Accueil 1	96,980057	104,880353	24,5788043
	Salle 1	90,7458564	94,6678799	35,9603677
	Accueil 2	94,2215088	147,20121	5,68790714
	Salle 2	53,7075537	61,0965698	22,4324409
Salle B	Accueil 1	23,885918	29,0423862	6,20711885
	Salle 1	27,9210926	44,7534766	8,03117808
	Accueil 2	89,1050584	82,9457364	3,52105159
	Salle 2	81,7875211	89,276808	12,6001949
Salle C	Accueil 1	74,7263682	69,1300281	18,448126
	Salle 1	44,6185998	57,0673077	26,2488029

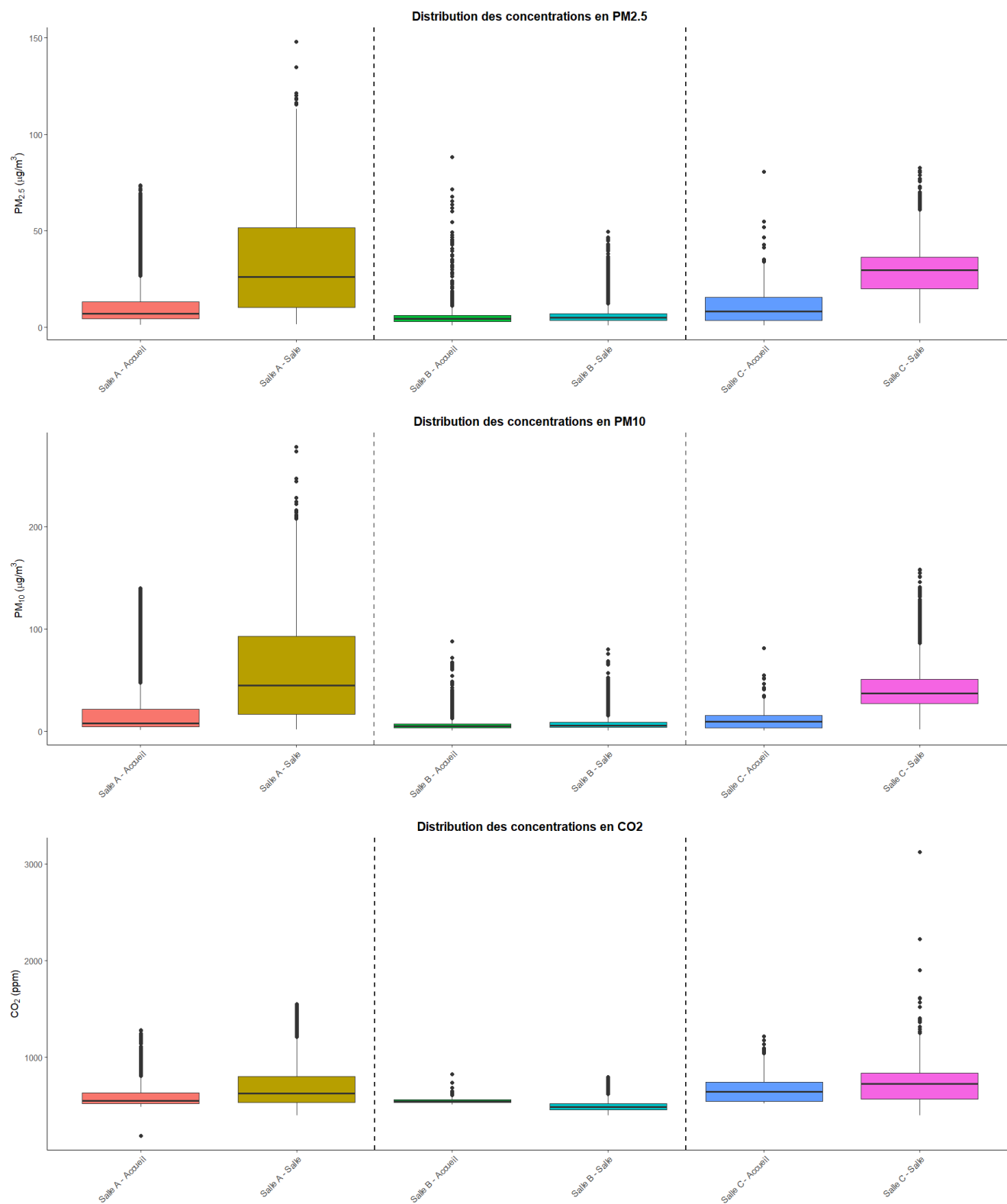


Figure 21 : Distribution des concentrations de PM_{2.5}, PM₁₀ et CO₂ selon la salle d'escalade et la zone (accueil et salle)

c) Séries temporelles

Les séries temporelles présentées ont 2 axes. L'axe principal (gauche) concerne les PM et l'axe secondaire (droite) le CO₂ (cf. Figures 22 et 23). Les trois salles sont représentées.

Pour la Salle A, la première série de mesures a été utilisée puisque c'était la plus complète dans le temps.

Pour la Salle B, c'est la deuxième série de mesures qui a été utilisée pour les mêmes raisons.

La Figure 22 représente les données des salles de bloc et la Figure 23 représente l'accueil des salles d'escalade.

Dans les deux figures (22 et 23), on remarque une évolution journalière récurrente. En effet, les concentrations des polluants augmentent durant les heures d'ouverture des salles et diminuent lors de la fermeture de celles-ci.

Dans la **salle de bloc de la Salle A** (cf. Figure 22), on remarque l'absence de données pour les PM, en raison du dysfonctionnement du 3PM. Ainsi, on peut seulement observer un pic de PM important le 12 juin en soirée, bien au-delà du seuil de l'OMS de 45 µg/m³. Ce pic diminue et descend en-dessous de ce seuil le 13. En comparant aux données de fréquentation, on constate que le 12 juin, la Salle A a une fréquentation plus importante que le 13 juin : 61 personnes contre 36.

Concernant le CO₂, la période entre le 9 juin et le 12 juin comporte des concentrations plus importantes que le reste de la semaine. En effet, le seuil de 900 ppm est dépassé ces 4 jours puis du 13 juin au 16 juin, le CO₂ ne dépasse plus ce seuil. La fréquentation de la salle ces jours-là n'a pas l'air corrélée aux concentrations.

Dans la **salle de bloc de la Salle B**, les pics journaliers sont beaucoup moins marqués. Les seuils de CO₂ ne sont jamais dépassés et le seuil de 45 µg/m³ pour les PM₁₀ n'est que très rarement dépassé. On observe un pic de concentration le 2 juillet en soirée, qui coïncide avec une affluence importante (109 personnes) ce jour-là. La fréquentation a l'air d'être corrélée aux concentrations du 2 juillet au 6 juillet mais le 7 juillet est un jour de grande affluence (127 personnes), sans que cela ne soit traduit dans les concentrations. De plus, le 8 juillet, les concentrations augmentent légèrement, bien que la fréquentation soit plus faible que le 7 juillet (83 personnes).

Dans la **salle de bloc de la Salle C**, on observe des concentrations de PM plus basses le 26 et 27 juin. Le 28, celles-ci augmentent et dépassent le seuil de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. On retrouve cette augmentation dans le diagramme de fréquentation : 51 personnes fréquentent la salle le 26 juin, 64 le 27 juin et 89 le 28 juin. Quant au CO_2 , l'inverse se produit puisqu'à partir du 27 juin, les concentrations ne dépassent plus le seuil de 900 ppm, dépassé les 25 et 26 juin. Ainsi, les données de fréquentation ne sont corrélées qu'aux concentrations de PM.

Finalement, la figure 22 représente clairement la différence de concentrations entre la salle de bloc de la Salle B et les salles de bloc des deux autres salles.

À l'**accueil de la Salle A** (cf. Figure 23), on remarque que les pics de PM et de CO_2 sont très marqués du 9 juin au 12 juin. Les seuils de l'OMS et du Code du bien-être au travail sont souvent dépassés et les PM10 atteignent les 4 jours des valeurs proches ou supérieures à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. À partir du 13 juin, les concentrations diminuent et ne dépassent que rarement les seuils réglementaires. Le diagramme de fréquentation indique qu'il y a effectivement beaucoup moins d'affluence le 13 juin (36 personnes), mais les autres jours n'ont pas l'air corrélés aux concentrations.

À l'**accueil de la Salle B**, la courbe de CO_2 est beaucoup plus linéaire, les pics sont moins marqués et le seuil de 900 ppm n'est jamais dépassé. Le 7 juillet, la fréquentation est la plus importante (127 personnes), et on observe un pic dans les PM en matinée, lorsque la salle est fermée. Le 2 et le 3 juillet, la fréquentation est également élevée (109 et 96 personnes), puis chute à 63 personnes le 4 juillet, ce qui se traduit dans les concentrations.

À l'**accueil de la Salle C**, le CO_2 excède le seuil de 900 ppm le 26 juin en soirée et le 27 en journée, bien que la fréquentation ne soit pas importante (64 et 89 personnes). Quant aux PM, ils suivent les mêmes courbes que le CO_2 , sans pour autant que les PM10 ne dépassent le seuil de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le 1^{er} juillet, on constate un pic important de PM, qui coïncide avec la journée la plus fréquentée (119 personnes), sans que le CO_2 ne présente de pic.

Finalement, on constate que les concentrations de la Salle B et de la Salle C sont plus basses que celles de la Salle A.

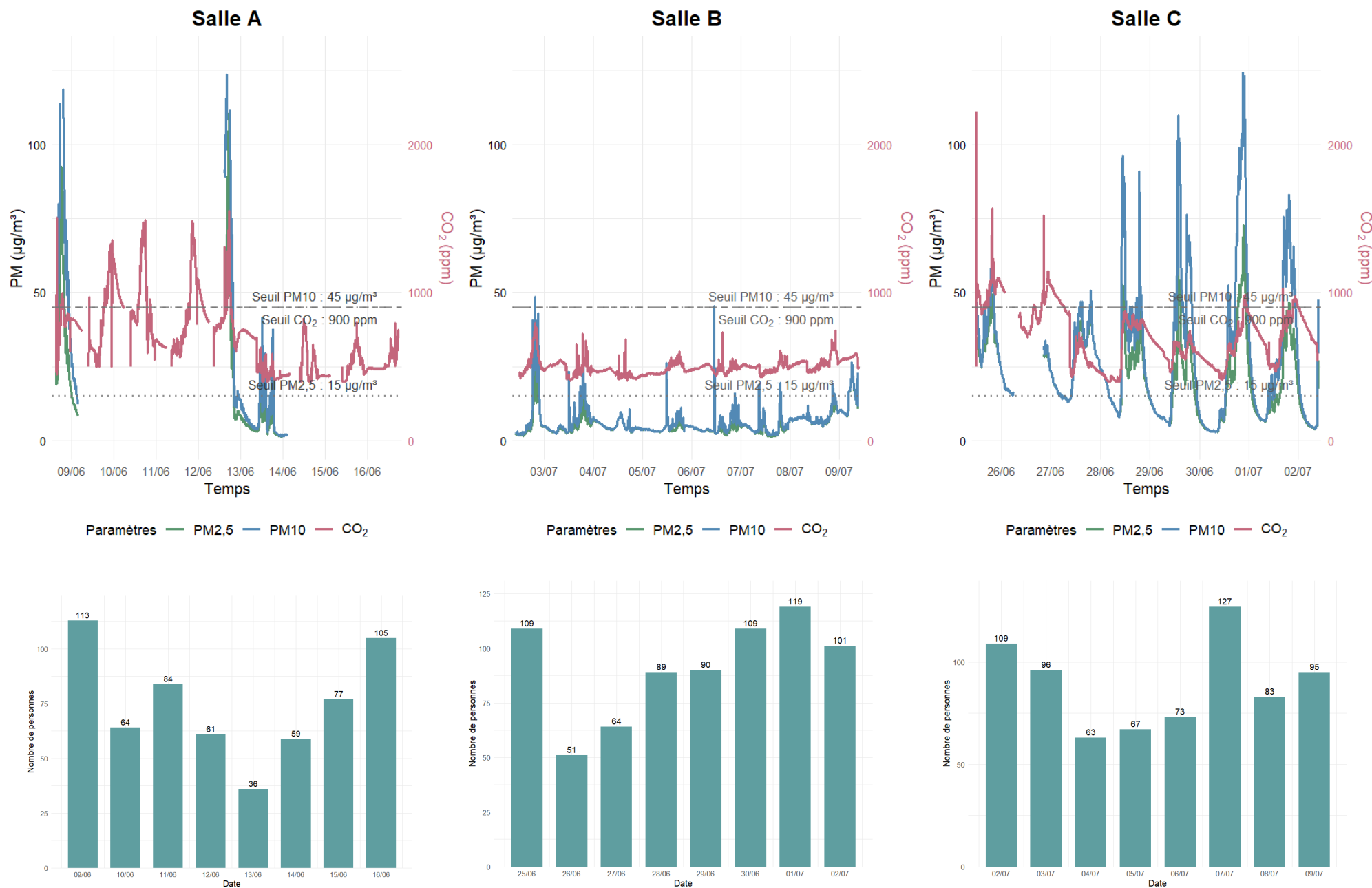


Figure 22 : Évolution temporelle des concentrations de PM2,5, PM10 et CO₂ et fréquentation journalières dans les 3 salles de bloc

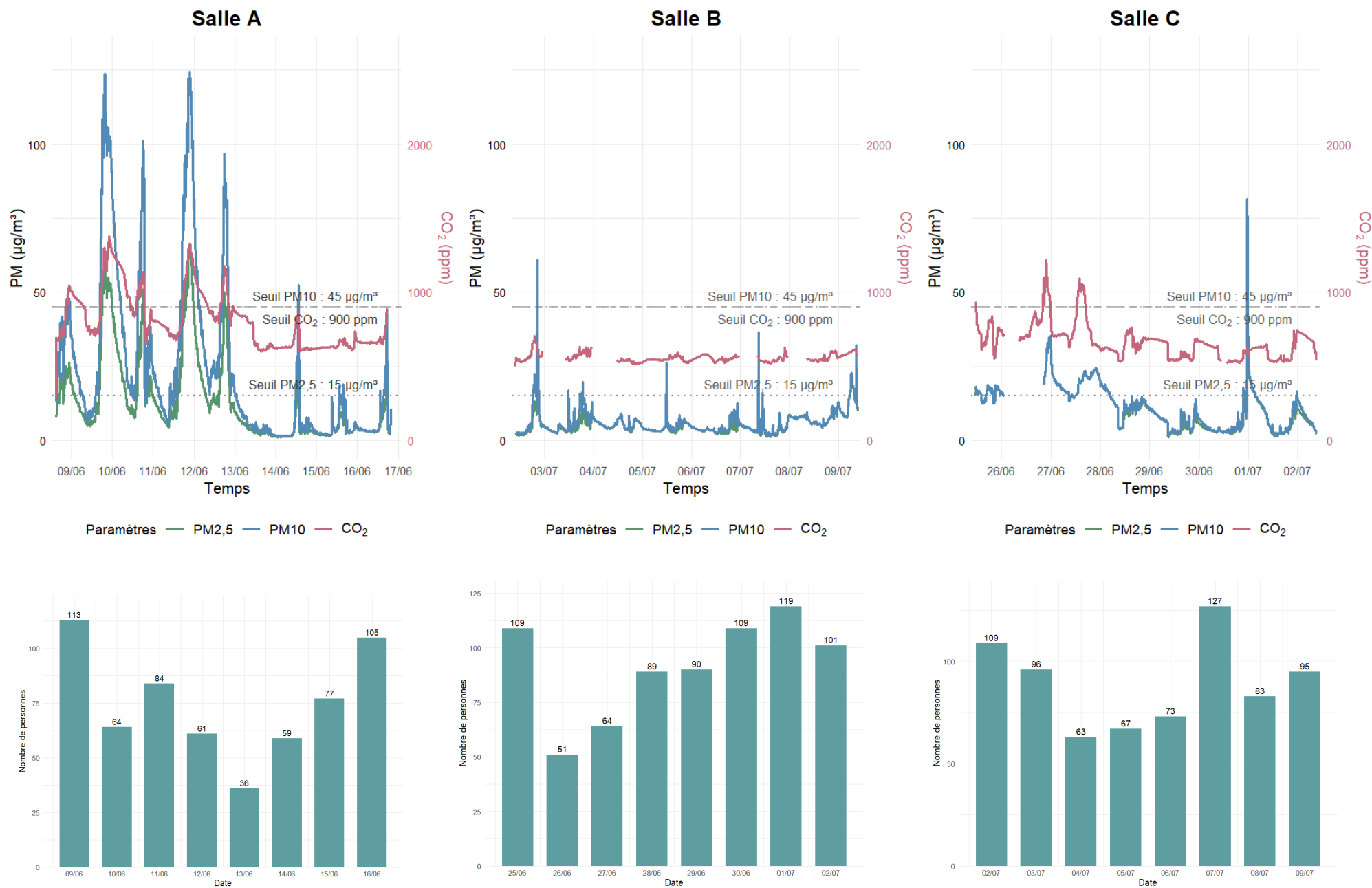


Figure 23 : Évolution temporelle des concentrations de PM2,5, PM10 et CO₂ et fréquentation journalière à l'accueil des 3 salles

I.II Mesures de formaldéhyde

Le tableau 5 représente les résultats des prélèvements de formaldéhyde.

La valeur la plus élevée est celle de la salle de bloc de la Salle C le 3 juillet à 17h30 (22,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), suivie des valeurs de la Salle A (18,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 18,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

La valeur la plus basse est celle de la salle de la Salle B le 3 juillet à 18h26 (6,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Nom de l'échantillon	Concentration en formaldéhyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Salle A-1	18,39
Salle A-2	18,15
Salle B-1	11,32
Salle B-2	6,49
Salle C-1	10,83
Salle C-2	22,2

Tableau 8 Résultats des mesures de formaldéhyde

Les valeurs de la Salle A sont très proches entre elles, contrairement à celles de la Salle C : on remarque une augmentation du double entre la première (10,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et la deuxième mesure (22,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Finalement, les mesures de la Salle B montrent également une évolution puisque la deuxième mesure (6,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) correspond à la moitié de la première (11,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

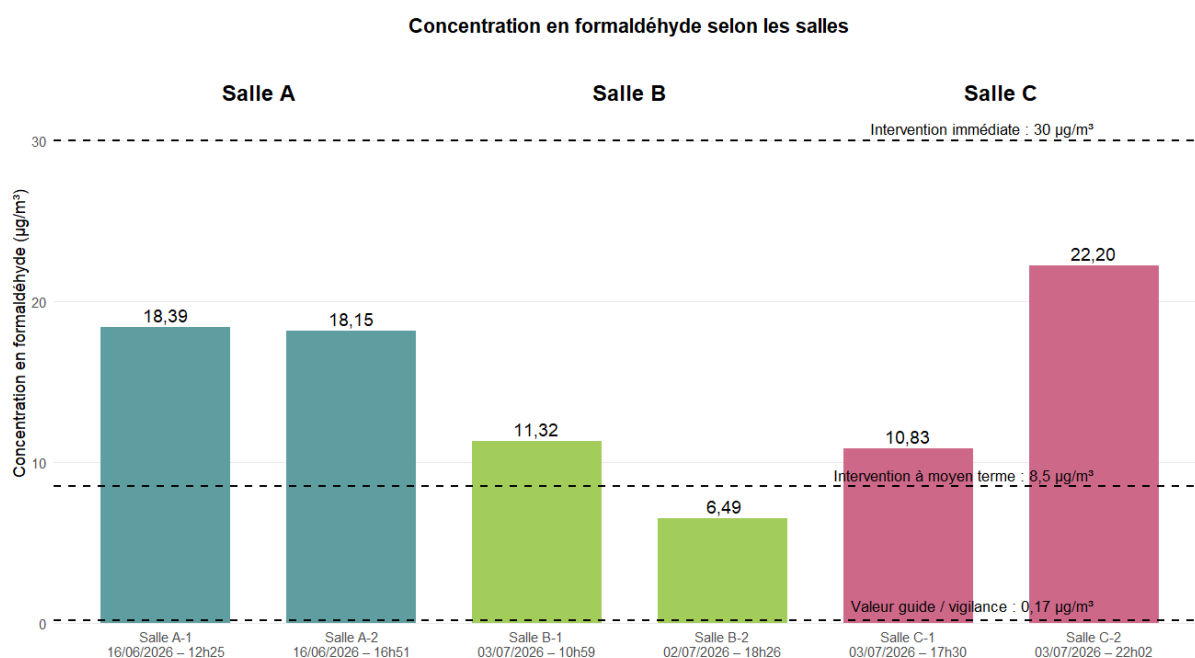


Figure 24 : Concentrations en formaldéhyde dans les salles

II. Questionnaire

Le questionnaire a été rempli par 124 participants. Les graphiques des réponses selon les questions du questionnaires sont disponibles en annexes de ce travail.

La majorité des répondants étaient des grimpeurs (88,7%, n = 110), contre 11 employés (8,9%) et 3 parents ou accompagnants (2,4%).

L'échantillon comprenait 27,4% de personnes (n=34) dans la **tranche d'âge** 18-24 ans, 41,1% (n=51) dans la tranche 25-34, 20,2% (n=25) dans la tranche 35-44 et 11,3% (n=14) de plus de 45 ans. 67 (54%).

Les participants étaient aussi bien des **hommes** (54%, n=67) que des **femmes** (45,2%, n=56). 1 (0,8%) personne n'a pas souhaité répondre.

Les salles les plus représentées parmi les participants sont l'Escale (25,8%, n=32), Roc Evasion Namur (15,3%, n=19) et Maniak Nivelles (13,7%, n=17). 18 salles étaient représentées parmi les 124 participants.

Concernant la fréquence, 53,2% (n=66) grimpent 1 à 2 fois par semaine, 26,6% (n=33) 3 à 4 fois par semaine, 13,7% (n=17) 1 à 2 fois par mois, 4,8% (n=6) grimpent 5 fois ou plus par semaine et 1,6% (n=2) moins d'une fois par mois.

La moitié des grimpeurs (54%, n=67) ont des sessions qui **durent** en général 2 à 3 heures. Pour le tiers des participants (32,3%, n=40), les sessions durent 1 à 2h et 12,9% (n=16) grimpent durant plus de 3 heures. Seulement 1 personne (0,8%) grimpe moins d'une heure.

41,9% des participants (n=52) **grimpent en voie et en bloc**, 33,1% (n=41) seulement en voie et 25% (n=31) en bloc.

54% des participants (n=67) utilisent de la **magnésie** en poudre, 11,3% (n=14) de la magnésie liquide, 24,2% (n=30) utilisent les deux et 10,5% (n=13) n'en utilisent pas. La moitié des répondants (47,6%, n=59) ont un usage fréquent de magnésie, 29,8% (n=37) en utilisent occasionnellement, 12,9% (n=16) en utilisent en quantité importante et 9,7% (n=12) n'en utilisent pas. Les hommes et les femmes ont un usage occasionnel et fréquent de magnésie dans les mêmes proportions pour les deux sexes. Par contre, 9% des femmes (n=5) utilisent de la magnésie en quantité importante contre 16% des hommes (n=11). De plus 14% des femmes (n=8) n'utilisent pas de magnésie contre seulement 5% des hommes (n=3), c'est-à-dire le tiers.

Concernant la **qualité de l'air dans leur salle d'escalade** (Figure 26), 43,5% (n=54) la trouvent neutre, 27,4% (n=34) la trouvent plutôt bonne, 21,8% (n=27) plutôt mauvaise, 4% (n=5) bonne et 3,2% (n=4) la trouvent mauvaise (Figure 25)

Pour les grimpeurs faisant uniquement de la voie, 39% (n=16) trouvent que la qualité de l'air est neutre dans leur salle de voie, 32% (n=13) la trouvent plutôt bonne, 24% (n=10) plutôt mauvaise et 5% (n=2) la trouvent bonne (Figure 26).

Pour les grimpeurs faisant uniquement du bloc, 48% (n=15) trouvent que la qualité de l'air dans leur salle de bloc est neutre, 29% (n=9) plutôt bonne, 16% (n=10) plutôt mauvaise et 7% (n=2) mauvaise (Figure 26).

Dans les employés, 6 considèrent la qualité de l'air neutre, 3 plutôt bonne, 1 personne qu'elle est bonne et 1 plutôt mauvaise.

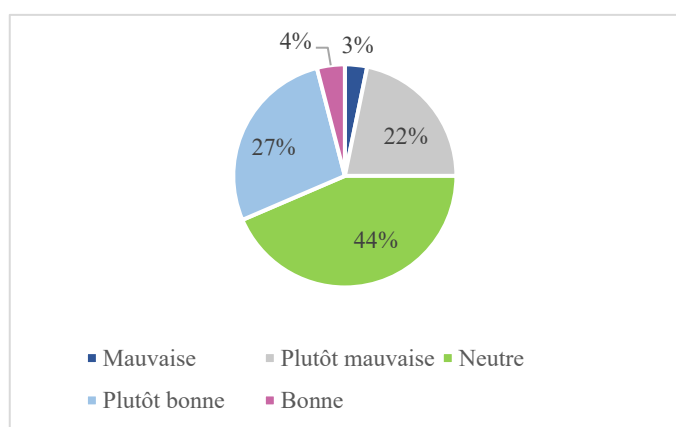


Figure 25 : Appréciation de la qualité de l'air dans les salles d'escalade

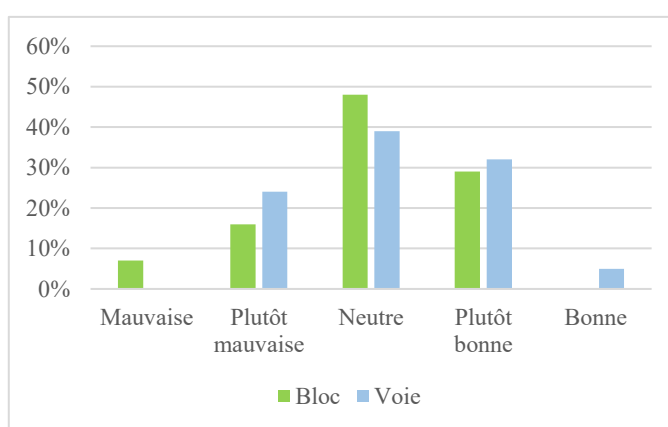


Figure 26 : Appréciation de la qualité de l'air dans les salles de bloc et de voie

Concernant les **salles étudiées** :

L'appréciation de la qualité de l'air est mauvaise à la Salle A pour 2 participants, plutôt mauvaise pour 12, neutre pour 9, plutôt bonne pour 7 et bonne pour 1 participant ;

À la Salle B, 1 participant considère que la qualité de l'air est mauvaise, 1 plutôt mauvaise, 5 neutre et 2 plutôt bonne ;

Finalement, 1 répondant au questionnaire considère que la qualité de l'air à la Salle C est neutre et 1 autre mauvaise.

L'appréciation de la qualité de l'air est liée aux **poussières** pour 98 personnes, à la **ventilation** pour 76, à l'**humidité** pour 16, la **température** pour 49, l'**odeur** pour 44, le **bruit** pour 6 et l'**éclairage** pour 15.

Dans les 4 participants trouvant l'air de la salle d'escalade mauvais, 2 utilisent de la magnésie de façon modérée, 1 de façon importante et 1 n'utilise aucune magnésie.

Dans les 27 participants trouvant l'air plutôt mauvais, 10 utilisent de la magnésie de façon légère, 10 de façon modérée, 5 de façon importante, et 2 n'en utilisent pas.

Un nombre de 75 personnes, soit 60,5% des participants, n'ont jamais ressenti de **symptômes respiratoires ou oculaires** pendant ou après une session d'escalade, 24 personnes ont subi des **éternuements**, 6 une **toux persistante**, 12 les **yeux qui pleurent et/ou qui grattent**, 12 la **gorge irritée et/ou qui démange**, 10 des **difficultés à respirer** et 6 **d'autres symptômes** (certaines personnes souffrent de plusieurs symptômes) (*cf.* Figure 27).

La **gêne engendrée par ces symptômes** est extrême pour 1 personne, modérée pour 13 et légère pour 34. La personne ayant ressenti une gêne extrême a précisé qu'elle souffrait d'une allergie à la magnésie qui entraînait de grosses crises à ne plus pouvoir respirer et à tomber par terre.

Les **symptômes disparaissent après avoir quitté la salle** pour 35 des participants. Pour 7 participants, les symptômes ne disparaissent pas en quittant la salle et 8 ne savent pas.

Sur l'entièreté des participants, 20 personnes souffrent d'allergies, 9 d'asthme, 1 d'une autre maladie respiratoire (certaines personnes souffrent de plusieurs maladies respiratoires) et 98 personnes, soit 79%, n'ont pas de **maladies respiratoires**.

11 des participants souffrant de maladies respiratoires ont des symptômes et 15 n'en ont pas. Sur les 9 asthmatiques, 3 ressentent des symptômes et 8 des 20 personnes allergiques aussi.

Dans les participants ressentant des symptômes, 16 utilisent de la magnésie de façon légère, 21 ont un usage modéré, 7 un usage important et 5 n'utilisent pas de magnésie.

Sur les participants ressentant des symptômes respiratoires ou oculaires, 3 estiment que la qualité de l'air dans leur salle d'escalade est mauvaise, 15 qu'elle est plutôt mauvaise, 22 qu'elle est neutre, 9 qu'elle est plutôt bonne et aucun ne pense qu'elle est bonne (*cf.* Figure 28).

Sur les participants asymptomatiques, 1 pense que la qualité de l'air est mauvaise, 12 plutôt mauvaise, 32 qu'elle est neutre, 25 qu'elle est plutôt bonne et 5 qu'elle est bonne (*cf.* Figure 28).

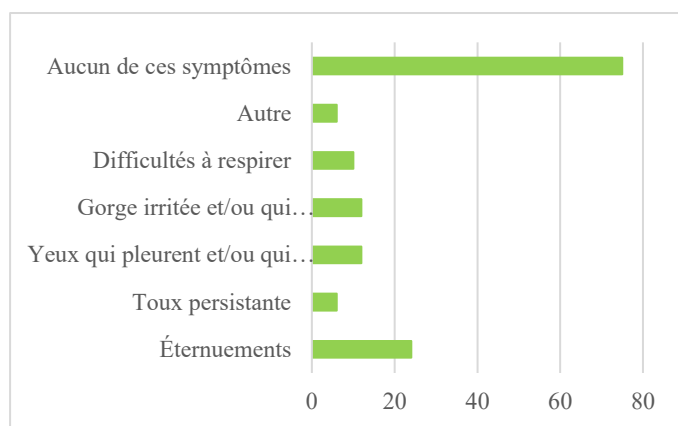


Figure 287 : Fréquence des symptômes respiratoires et oculaires

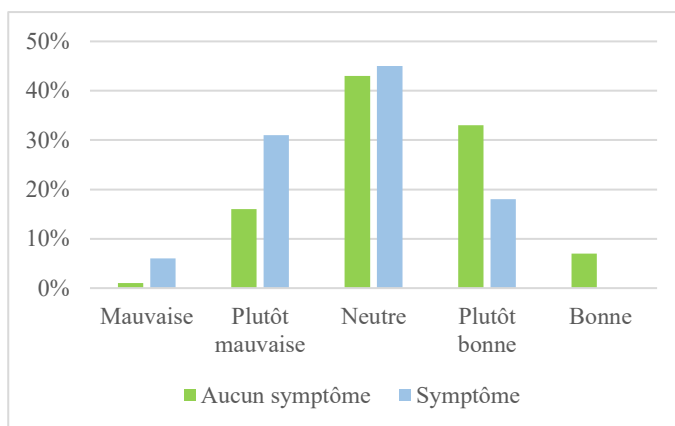


Figure 278 : Comparaison de l'appréciation de la qualité de l'air dans les salles d'escalade selon la présence de symptômes respiratoires et/ou oculaires

77,4% des répondants (n=96) n'ont jamais **fumé**, 13,7% (n=17) ne fument plus, 4,8% (n=6) fument occasionnellement et 4% (n=5) régulièrement. 46 des personnes ayant des symptômes sont non-fumeurs et seulement 3 fumeurs ressentent des symptômes.

La moitié des répondants (52,4%, n=65)) ont **conscience des risques** que pourraient induire une mauvaise qualité d'air dans les salles d'escalade, 24,2% (n=30) n'en ont pas conscience et 23,4% (n=29) ne savent pas. Dans les commentaires concernant les risques encourus, les maladies respiratoires et cancers reviennent beaucoup, réactions allergiques, asthme et silicose sont également mentionnés.

La sensation de **confort** offerte par la salle d'escalade (air frais, température, humidité, poussières, bruit et éclairage) influence le choix de la salle pour 40,3% des participants (n=50) et n'influencent pas le choix pour 43,5% (n=54) des participants. 16,2% (n=20) ne savent pas.

La plupart des **commentaires additionnels** concernent l'usage de la magnésie et autres, et les avis divergent :

- Certains estiment que la magnésie en poudre devrait être interdite dans les salles ;
- D'autres que la magnésie liquide n'est pas efficace et agréable ;
- Un autre préconise des bonnes pratiques à mettre en œuvre ;
- La ventilation est également abordée, considérée nécessaire pour une meilleure qualité de l'air, ainsi qu'un nettoyage régulier ;
- Deux personnes relient la fréquentation à la pollution de l'air, préférant grimper lorsque moins de personnes sont présentes dans la salle ;
- Le manque d'indication de la qualité de l'air dans les salles est évoqué ;
- La problématique de la gomme des chaussons est citée ;

- La dangerosité accrue pour les enfants est abordée ;
- L'influence de la lumière sur la perception des poussières ;
- Un commentaire compare la qualité de l'air de deux salles et estime qu'il est plus facile de respirer dans l'une que dans l'autre ;
- Finalement, un des participants pointe que les salles ont récemment fait des efforts après la sensibilisation du public autour de cette problématique.

III. Entretiens

III.I Réponse de Mr. M. Degallier

Ci-dessous, la réponse par mail de Mr. M. Degallier, qui a accepté que sa réponse apparaisse dans ce mémoire.

« Bonjour Madame Wysota,

Merci pour votre patience et pour la qualité de vos questions. Je vous réponds ci-dessous en me plaçant explicitement dans le cadre du dispositif fédéral prévu par la loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public, et en fonction de son état d'avancement actuel. Les éléments relevant du financement ou de développements juridiques futurs ne relèvent pas directement de ma décision propre. J'ai un peu réorganisé vos questions pour faciliter la mise en forme des réponses.

1. Objectif de sensibilisation et démarche des exploitants

L'un des objectifs centraux de la loi est effectivement d'amener l'ensemble des acteurs - administrations et secteurs, à s'approprier progressivement la question de la qualité de l'air intérieur. Concrètement, cela se traduit par une obligation d'information (label), la mise à disposition d'une plateforme fédérale, et l'encouragement à une démarche volontaire structurée (mesure, évaluation, amélioration continue). La démarche volontaire est à comprendre dans le cadre actuel de la loi (voir les dates d'entrées en vigueur fixées par la loi dispositions diverses du 18 juin 2024), qui prévoit un échelonnement de la mise en œuvre des obligations jusqu'en 2038.

Le dispositif étant encore récent, son efficacité doit être appréciée sur le moyen terme. À ce stade, il s'agit davantage d'un changement de culture et de pratiques en cours que de résultats consolidés permettant une évaluation chiffrée de son impact.

Durant cette législature, il est en effet envisagé de déterminer certaines catégories de lieux pour lesquels les obligations à charge des exploitants deviendraient pleinement opérationnelles. Cette évolution pourrait permettre, à terme, la mise en place d'un système de certification, mais il s'agit à ce stade d'une intention de développement du dispositif, et non d'une obligation juridiquement acquise.

2. Information des exploitants et plateforme

Les exploitants sont informés via différents canaux (communications institutionnelles, relais sectoriels, partenaires). La plateforme fédérale dédiée à la qualité de l'air intérieur est opérationnelle, mais son appropriation reste progressive et variable selon les secteurs. Cette phase d'appropriation est cohérente avec le caractère encore récent de la législation.

3. Subventions et incitants

La loi du 6 novembre 2022 ne prévoit pas, en tant que telle, de mécanisme de subvention ou d'incitant financier. Les difficultés que vous mentionnez pour les salles d'escalade – bâtiments anciens, contraintes techniques ou financières – sont bien identifiées, mais aucun dispositif spécifique fédéral n'est prévu à ce stade pour ce type d'infrastructure.

Par ailleurs, toute projection relative à de futurs mécanismes de financement au niveau fédéral serait à ce stade hasardeuse. D'éventuels incitants pourraient relever d'autres niveaux de pouvoir, mais cela sort du cadre de la loi fédérale sur la qualité de l'air intérieur.

4. Label et niveaux de référence

Le label de qualité de l'air intérieur est conçu comme un outil de transparence et de communication, visant à rendre visibles les démarches mises en œuvre par l'exploitant pour maîtriser et améliorer la qualité de l'air intérieur. Il s'appuie sur des niveaux de référence, notamment les niveaux A et B, définis dans le cadre réglementaire.

Dans l'état actuel du droit fédéral, aucune sanction n'est prévue en cas de non-respect des niveaux de référence. L'approche retenue est volontairement incitative et proactive, et non répressive.

5. Valeurs de référence pour les polluants, notamment les particules (PM)

Pour les locaux de travail, les valeurs de référence applicables sont bien celles prévues par l'arrêté royal du 8 mai 2014. En ce qui concerne les particules (PM), la situation est plus complexe : il n'existe pas encore, dans le cadre de la loi QAI, de seuils juridiquement contraignants harmonisés pour l'ensemble des lieux accessibles au public.

Des références issues d'autres cadres (Organisation mondiale de la santé, littérature scientifique) sont souvent mobilisées à titre indicatif, notamment dans les études et travaux préparatoires, mais elles ne constituent pas à ce stade des normes légalement opposables. Cette question dépasse d'ailleurs le seul cas des salles d'escalade et constitue un enjeu transversal du dispositif.

6. Arrêtés royaux sectoriels (salles de sport, escalade)

Il n'y a pas d'arrêté royal spécifique aux salles de sport ou d'escalade qui fixe des exigences détaillées (niveaux de référence, instruments de mesure, méthodologies). Ces éléments font partie des développements attendus du dispositif, mais le calendrier n'est pas encore déterminé.

7. Démarches volontaires déjà mises en œuvre

À ce stade, je n'ai pas connaissance d'initiatives volontaires structurées mises en œuvre par le secteur sportif au sens large dans le cadre du dispositif QAI. Nos études actuellement lancées visent à mieux caractériser les profils de pollution de l'air intérieur, y compris dans les salles de sport, mais il est encore trop tôt pour en tirer des conclusions ou identifier des démarches volontaires sectorielles abouties.

8. Guides pratiques sectoriels

Des guides pratiques généraux existent en matière de qualité de l'air intérieur, mais il n'existe pas encore de guide spécifiquement dédié aux salles de sport ou d'escalade. L'élaboration de guides sectoriels fait partie des axes de travail identifiés pour l'avenir, afin de mieux tenir compte des usages et contraintes spécifiques aux activités sportives.

9. Arrêté royal déterminant les lieux publics visés

L'arrêté royal visant à préciser les catégories de lieux fermés accessibles au public constitue un élément central du dispositif. À l'heure actuelle, il se situe encore au stade de réflexions et de travaux préparatoires, et je ne suis pas en mesure de confirmer sa date de publication. L'objectif est notamment de pouvoir articuler cet arrêté avec le futur mécanisme de certification.

J'espère que ces éléments pourront vous être utiles dans le cadre de votre mémoire. Si certains points méritent d'être approfondis ou clarifiés, nous pouvons bien entendu en discuter, y compris lors d'un échange téléphonique.

Bien cordialement, Michel Degailier »

III.II Entretien avec Mr. L. Raymond

L'entretien a été réalisé le 26 mai 2026 vers 11h00, dans les bureaux de l'équipe SAM sur le Campus d'Arlon de l'Université de Liège. L'entretien s'est déroulé sans enregistrement, les résultats consistent donc en la retranscription de la prise de notes lors de l'entretien :

- *La qualité de l'air intérieur est mieux réglementée en France, notamment dans les écoles.*
- *Les choses qui ont évoluées : le CO₂ et la qualité de l'air intérieur ne sont plus mises ensemble. Le CO₂ n'est qu'un indicateur du renouvellement d'air mais ne permet pas de dire si la qualité de l'air intérieur est bonne ou pas.*
- *La qualité de l'air intérieur est basée sur de multiples paramètres mais on ne peut pas la déterminer à 100% par capteurs. Il y a le microbiologique, mais avec ça, il y a aussi l'interprétation de données et c'est plus le rôle d'un médecin. Il y a également les microparticules : le CO₂, la température, l'humidité relative, les PM. Ces paramètres sont déterminables, idem pour le formaldéhyde. Mais il y a des choses qui ne marchent pas : les COV. Pour ça, il faudrait plutôt passer par un indice que du quantitatif.*
- *Concernant la loi du 6 novembre 2022, il faut que celle-ci soit complétée. C'est un premier pas dans la bonne direction, on a enfin quelque chose sur la qualité de l'air intérieur au niveau fédéral mais c'est uniquement basé sur le CO₂.*
- *Concernant les salles d'escalade, pour le CO₂, on peut se tromper. En termes de CO₂, on va être bon parce qu'il y a un grand volume, par contre tous les matériaux sont potentiellement très émissifs. Avec la loi du 6 novembre 2022, on va se concentrer sur le CO₂ alors que ce n'est pas du tout représentatif. Par exemple, on a eu le cas d'une salle de musique avec un revêtement spécifique qui avait énormément augmenté les émissions de polluants. Il n'y a pas de corrélation entre le CO₂ et ce qui peut être émis.*

Les produits de nettoyage aussi peuvent être émissifs. Donc, pour les salles d'escalade, la loi est plutôt contre-productive.

- Il serait intéressant de regarder le formaldéhyde et les COV dans les salles d'escalade. On a eu un cas où la ventilation tournait la nuit pour enlever les COV pour les premiers arrivés le matin.*
- Au niveau de la ventilation, il y a des guides des standards de construction qui ne sont pas similaires aux normes du SPF Santé. En effet, les débits de ventilation ne sont pas les mêmes.*
- Concernant le mémoire, mesurer le CO₂ est intéressant, les PM aussi mais ce serait intéressant de mesurer le formaldéhyde en complément en mesure passive (Radiello) ou active avant et après la remise en route de la ventilation. Le matin, il y aura sûrement beaucoup de formaldéhyde à l'arrivée des premiers grimpeurs et après ventilation, les concentrations devraient être plus basses.*
- Concernant la réglementation wallonne sur la qualité de l'air intérieur dans les lieux accueillant du public, il faudrait qu'elle soit revue. Elle est limitée car plutôt de l'ordre du fédéral. Ils ont défini des seuils avec une dizaine de paramètres – seuil d'alerte, de réaction, ... Les valeurs étaient assez bien construites, malheureusement c'est seulement pour les lieux privés.*
- Pour les salles d'escalade, on est sur le Code de bien-être au travail car il y a des employés dans les salles d'escalade. Il y a donc des seuils pour le formaldéhyde.*
- Il faut aller voir les valeurs guides de l'Europe, de l'OMS. Dans les matériaux, les poussières de bois et poussières de roches sont beaucoup plus problématiques.*
- Concernant les capteurs, il faut connaître les limites de ces équipements. Par exemple, pour les capteurs PM, est-ce que c'est juste des capteurs PM_{2,5} qui sont extrapolés pour calculer les PM₁₀ et les PM₁ ?*

Discussion

Tout comme la partie précédente, les résultats des polluants seront d'abord discutés, puis, dans un second temps, les réponses au questionnaire et aux entretiens seront examinées.

I. Polluants

Le PM et le CO₂ seront d'abord abordés, puis ce seront les résultats des prélèvements de formaldéhyde qui seront considérés.

I.I PM et CO₂

a) Limites

Les résultats présentent plusieurs limites qui doivent être prises en considération dans l'interprétation :

- Hauteur : Les instruments auraient dû être placés à environ 160 cm de hauteur, puisqu'il s'agit de la hauteur moyenne de respirabilité. Cela n'a pas été techniquement possible à la Salle A où les capteurs ont été installés à 276 cm de hauteur, ce qui n'était donc pas représentatif de ce que pouvaient inhaler les grimpeurs la majorité du temps. Les instruments placés à l'accueil étaient au niveau du « comptoir », c'est-à-dire plus bas de la hauteur de respirabilité (environ 105 cm de hauteur).
- Localisation : Par ailleurs, les emplacements des capteurs dans les salles de bloc ne traduisent pas la distribution spatiale de la pollution.

C'est notamment le cas à la Salle C, puisque les capteurs ont été placés à un endroit peu fréquenté, entre la kilter board et le mur d'escalade. Une bouche d'aération au plafond se trouvait à proximité des instruments. Le fond de la salle, en revanche, ne comporte aucune ventilation ou ouverture. Ainsi, l'air y est probablement moins bien renouvelé. Un employé a d'ailleurs mis en avant qu'un nuage de particules était parfois visible dans le fond de la salle. À l'accueil, contrairement aux deux autres salles, les instruments de mesure n'étaient pas placés sur le comptoir de l'accueil, et sont donc moins représentatifs des concentrations respirées par les employés.

À la Salle A, les instruments se trouvaient sur une poutre située au centre de la salle et ils n'étaient pas proches de fenêtres ou de porte. L'emplacement était donc idéal, outre la hauteur des instruments.

À la Salle B, les capteurs étaient placés dans la zone où les grimpeurs évoluent, sans être proches de la ventilation, ce qui constituait un bon emplacement.

Afin de considérer la distribution spatiale de la pollution, il aurait fallu réaliser des mesures en plusieurs endroits, idéalement au même moment pour pouvoir les comparer. Dans notre étude, les mesures ne sont réalisées qu'à un seul endroit dans la salle. Par exemple, le mercredi 8 juillet, un employé a indiqué qu'un mur avait été ouvert non loin des instruments et que cela avait créé beaucoup de poussières, mais que la ventilation avait envoyé ces poussières vers l'arrière de la salle et non vers les instruments.

- Il faut également évoquer l'influence de la variabilité saisonnière : les mesures ont été réalisées durant les mois de juin et de juillet, durant lesquels les températures étaient élevées et la ventilation plus importante. De plus, en été, l'affluence est moins importante que durant les autres saisons, en raison des vacances d'été et de l'arrêt des cours. Ainsi, en été, les concentrations en polluants sont possiblement moins importantes que durant les autres saisons, notamment en hiver où la ventilation est moins importante en raison du froid. Par exemple, dans la salle de bloc à la Salle A, les fenêtres ne sont ouvertes que lorsqu'il fait chaud, on peut donc imaginer que l'air est beaucoup moins renouvelé lorsque les températures baissent. À l'inverse, à la Salle B, qu'importe les températures, les portes sont ouvertes pour ventiler avant l'ouverture de la salle. Ainsi, la différence des concentrations de polluants entre les deux salles pourrait être plus importante en hiver.
- Une autre limite à ce travail est que l'environnement n'était pas contrôlé. D'une part, cela pouvait être contraignant, comme ne pas pouvoir choisir librement l'emplacement des instruments ou ne pas connaître le débit de ventilation. D'autre part, cela montre les conditions réelles d'exposition des grimpeurs et des employés.
- Finalement, la correction des valeurs de l'ECT n'est pas précise, ce qui peut également altérer les résultats.

b) CO₂

Concernant le CO₂, comme l'énonce l'article III.1-34.- § 3 du Code du bien-être au travail, le seuil de 900 ppm peut être dépassé 5% du temps, si la concentration est calculée sur une durée maximale de 8 heures, et en supposant une concentration extérieure de 400 ppm. Le seuil de 900 ppm peut être dépassé au profit du seuil de 1200 ppm sous deux conditions : « 1° l'employeur peut démontrer sur la base des résultats de l'analyse des risques que les travailleurs bénéficient d'un niveau équivalent ou meilleur de protection en ce qui concerne la qualité de l'air intérieur; du fait que les sources de pollution visées au § 2, 2° à 4° soient éliminées ou considérablement réduites, par exemple par l'utilisation de matériaux à faible émission; 2°

l'employeur a demandé l'avis préalable du conseiller en prévention compétent et du comité » (art. III.1-34.- § 3, Code du bien-être au travail). Les seuils peuvent aussi correspondre à des débits minimaux de ventilation ($40 \text{ m}^3/\text{h}$ et $25 \text{ m}^3/\text{h}$), mais ceux-ci n'ont pas été calculés dans le cadre de ce travail. De plus, les seuils ne s'appliquent qu'aux employés. Ainsi, les résultats du CO_2 doivent être nuancés.

À l'accueil de la Salle A, le seuil de 900 ppm est dépassé 25,94% du temps sur une période de 8h durant les heures d'ouverture lors de la première série de mesure, mais n'est jamais dépassé lors de la deuxième série de mesure. Les mesures, durant ces périodes, sont complètes.

À l'accueil de la Salle C, le seuil de 900 ppm est dépassé 8,45% du temps sur une période de 8h durant les heures d'ouverture, ce qui n'est pas très éloigné des 5%. Les données sur les heures d'ouverture sont incomplètes puisque l'ECT n'a pas mesuré pendant environ 3 heures le 30 juin.

À l'accueil de la Salle B, les concentrations ne dépassent jamais les 900 ppm. Les données, sur les heures d'ouverture, sont complètes.

Ainsi, puisque les horaires d'ouverture s'étendent sur des périodes plus longues que 8h (à part le week-end à la Salle B) et que certains jeux de données sont incomplets, on ne peut affirmer que les mesures sont contraires aux obligations du Code du bien-être au travail, mais cela nous permet d'avoir une indication. Ainsi, les mesures à l'accueil de la Salle B peuvent être considérées comme bonnes ainsi que celles de la Salle A lors de la deuxième mesure, et celles de la Salle C sont proches de la limite de 5%. Il n'y a que lors de la première mesure à la Salle A que les concentrations paraissent beaucoup plus importantes et pourraient constituer un problème. La différence entre la première et la deuxième mesure peut être expliquée par une différence de température extérieure. En effet, en juillet, lors de la deuxième mesure les températures ont été plus élevées et ont peut-être entrainer une ventilation plus importante.

De plus, les débits de ventilation prescrits par le Code du bien-être au travail sont peut-être respectés.

c) PM

L'OMS distingue deux types d'exposition : l'exposition journalière et l'exposition annuelle. L'exposition annuelle correspond à une exposition chronique, à long-terme, et de ce fait à un seuil plus bas que l'exposition journalière, qui correspond à une exposition à court-terme (WHO Global quality air guidelines, 2021). Il est donc plus pertinent de comparer l'exposition

journalière, c'est-à-dire le seuil de $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$ et le seuil de $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM_{10} . Il convient de rappeler que les valeurs de l'OMS sont des recommandations et non des obligations légales, et qu'elles concernent par ailleurs l'air extérieur et non l'air intérieur.

En ce qui concerne la salle de bloc de la Salle B, les seuils des $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} sont dépassés moins de 5% du temps. Cela peut être expliqué par la ventilation puisque, en été, les portes sont constamment ouvertes et les ventilateurs en fonctionnement.

Concernant les $\text{PM}_{2,5}$, la Salle A dépasse jusqu'à 91,32% du temps et la Salle C jusqu'à 82,57% du temps sur les horaires d'ouverture. Pour les PM_{10} , le seuil de $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassé jusqu'à 62,58% du temps à la Salle A et 32,31% à la Salle C, sur les heures d'ouverture.

Pour chacune des salles, les seuils du Code du bien-être au travail ne sont jamais dépassés.

Les pratiques de nettoyage et les règles de conduite autour de la magnésie sont assez similaires dans les trois salles. Le facteur qui diffère selon les salles est la ventilation. C'est vraisemblablement la raison qui explique les concentrations plus élevées de la Salle A. Pour rappel, il n'y a pas de ventilation, à part lorsque les usagers décident d'ouvrir les fenêtres lorsqu'il fait chaud. Les meilleurs résultats sont ceux de la Salle B, qui utilise principalement la ventilation naturelle.

On remarque également que les concentrations sont moins importantes à l'accueil des trois salles, ce qui est plutôt rassurant pour les employés.

d) Fréquentation

Finalement, la fréquentation sur les périodes de mesure (8 jours) est plutôt similaire entre la Salle B (713 personnes) et la Salle C (732 personnes). La Salle A est moins fréquentée (599 personnes) et les usagers de la salle ne grimpent pas nécessairement dans la salle de bloc puisqu'il y a également une salle de voie et une salle de fitness. La fréquentation à la Salle A est donc probablement plus faible que les chiffres indiqués. Ainsi, si on ne s'attarde que sur la fréquentation, c'est la salle la moins fréquentée qui présente les concentrations les plus importantes.

Concernant les concentrations en rapport avec la fréquentation, de nombreuses études ont démontré le lien entre la fréquentation et l'augmentation des concentrations (Almand-Hunter et al., 2014; Nicolici et al., 2026; Sherman et al., 2025; Weinbruch et al., 2008, 2012).

Dans ce travail, on constate effectivement que les concentrations de PM et de CO₂ diminuent dans chacune des salles après la fermeture de celles-ci et augmentent à leur réouverture. Les concentrations augmentent durant la journée et les pics de concentrations apparaissent régulièrement en fin de journée. Ainsi, en général, les concentrations sont plus faibles à l'ouverture des salles.

Néanmoins, nous ne possédons pas des données d'affluence en fonction des heures, ce qui entraîne que certains pics de concentrations ne coïncident pas avec les chiffres de fréquentation. Par exemple, le 7 juillet à la Salle B, deux pics de concentration sont visibles sur la série temporelle (figure 22). Un groupe de 30 personnes a effectivement grimpé en matinée, hors des heures d'ouverture au grand public, ce qui explique donc le premier pic. Ainsi, des données précises sur la fréquentation peuvent permettre d'expliquer les concentrations de polluants.

À l'accueil de la Salle C, on retrouve des pics de concentrations les 26 et 27 juin, sans que l'affluence ne soit spécialement importante ces jours-là (51 et 64 personnes). Cela peut être expliqué par le fait qu'il y ait un café dans la salle de l'accueil, et que des événements sont parfois organisés le week-end. Ainsi, le soir du 26 juin, un petit concert se déroulait à l'accueil de la salle, ce qui pourrait expliquer l'affluence faible dans la salle de bloc mais les concentrations élevées à l'accueil.

e) Conclusion

Finalement, on remarque que la différence entre les concentrations de CO₂ dans les différentes salles n'est pas très marquée, contrairement à celles des PM. Cela nous indique que le CO₂ n'est pas représentatif de la concentration d'autres polluants, comme Mr. Raymond l'avait fait remarquer. Par ailleurs, ces résultats concordent avec ceux de Nicolici et al. (2026), qui avait estimé que le CO₂ ne peut pas servir d'indicateur de l'exposition aux particules dans les salles d'escalade.

I.II Formaldéhyde

Les résultats relatifs au formaldéhyde doivent être interprétés avec prudence étant donné que :

- L'emplacement du deuxième prélèvement à la Salle A n'était pas optimal puisqu'il se situait proche d'une fenêtre grande ouverte ce qui a pu entraîner une sous-estimation de la concentration réelle ;

- À la Salle B, le prélèvement ne se situait pas face au mur qui venait d'être ouvert. De plus, la pompe n'était pas placée à hauteur de respirabilité mais plus bas (environ 105 cm de hauteur) ;
- Le premier prélèvement de formaldéhyde à la Salle C aurait dû être réalisé le matin suivant, après une nuit d'émission du formaldéhyde sans ventilation. Bien que la ventilation n'ait été allumée qu'une heure avant l'ouverture de la salle, la mesure aurait été plus représentative de la concentration respirée par les premiers arrivants dans la salle si celle-ci n'avait pas été active.

En ce qui concerne les seuils réglementaires, les concentrations sont faibles et ne dépassent que les seuils de l'arrêté royal du 30 mai 2024 (*cf.* Figure 24). Ainsi, les trois salles dépassent la valeur guide et de vigilance ($0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ainsi que la valeur d'intervention à moyen terme ($8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), à l'exception de la deuxième mesure de la Salle B. Cependant, comme cité précédemment (*cf.* Cadre réglementaire), les valeurs de l'AR du 30 mai 2024 sont exigeantes. Tous les autres seuils, dont celui de l'OMS et celui préconisé par l'Anses, sont loin d'être atteints. Il ne faut donc pas s'alarmer pour ces valeurs.

Les résultats ont permis de confirmer que la ventilation joue un rôle important.

Pour la salle de **la Salle B**, ventilée naturellement quasi constamment, les concentrations ont en effet diminué de moitié au cours de la journée.

À **la Salle C**, le premier prélèvement a été pris en fin de soirée (22h00) et indique une valeur de moitié moins importante que la deuxième, prise plus tôt dans la journée (17h30). N'ayant pas de données sur la fréquentation au cours de la journée, on peut supposer que la ventilation, ayant fonctionné toute la journée, a renouvelé suffisamment l'air à 22h00 pour faire baisser considérablement les concentrations de formaldéhyde, ce qui n'est pas le cas à 17h30. On peut imaginer qu'un prélèvement réalisé à l'ouverture de la salle aurait donné une valeur plus élevée.

À **la Salle A**, les deux mesures présentent des concentrations similaires, ce qui est d'autant plus étrange qu'une fenêtre était grande ouverte près de la pompe lors de la deuxième mesure.

Un mur avait été ouvert dans la salle de bloc de la Salle B et de la Salle C avant le prélèvement, ce qui pourrait entraîner une concentration plus élevée en formaldéhyde. Néanmoins, n'ayant pas réalisé de prélèvement lorsqu'aucun mur n'ait été ouvert la veille, nous ne pouvons pas confirmer que les concentrations soient plus élevées après que des prises aient été vissées et dévissées dans des panneaux de bois contreplaqué.

Les concentrations à la Salle B sont plus basses qu'à la Salle C et la Salle A, ce qui concorde avec les mesures de PM et de CO₂. Les pratiques de nettoyage et les règles de conduite autour de la magnésie étant similaires dans les trois salles, la ventilation pourrait donc être le facteur le plus important. Toutefois, la Salle C est une salle qui est récente (mars 2025) et la Salle A a été rénovée il y a un an (juin 2025). Cette différence de concentrations pourrait donc être expliquée par des matériaux neufs et plus émetteurs (Adamkiewicz & World Health Organization, 2010; Spiru & Simona, 2017).

Ainsi, les taux de formaldéhyde dans les trois salles ne sont pas alarmants. Toutefois, ce travail ne permet pas de considérer la variabilité spatiale et saisonnière vu que seulement deux prélèvements ont été réalisés. L'hypothèse de concentrations plus élevées en hiver, lorsque les ventilations naturelle et mécanique sont moins importantes et que la fréquentation est plus élevée, peut être avancée.

II. Questionnaire

Le questionnaire établit que 31,5% (n=39) des participants considèrent la qualité de l'air intérieur dans leur salle d'escalade plutôt bonne ou bonne, contre 25% (n=31) la trouvant plutôt mauvaise ou mauvaise. Ainsi, le **taux de satisfaction** est plus élevé que celui de dissatisfaction. Une majorité de répondants (43,5%, n=54) la trouvent neutre, ce qui pourrait également indiquer qu'une partie des répondants n'ont pas d'avis tranché sur le sujet.

La moitié des participants (54%, n=67) utilisent uniquement de la **magnésie** en poudre contre seulement 11,3% (n=14) pour la magnésie liquide. Cela illustre que la magnésie liquide n'est pas réellement démocratisée au sein des grimpeurs. Il faut toutefois noter que 41 répondants (n=33,1%) grimpent uniquement en voie et, de ce fait, ne peuvent utiliser de la magnésie liquide. De plus, 30 répondants (24,2%) utilisent les deux types de magnésie. Seulement 10,5% des participants n'utilisent pas de magnésie (n=13), ce qui témoigne de l'usage généralisé de la magnésie dans les salles d'escalade. De plus, on constate que les hommes sont plus nombreux à utiliser de la magnésie de façon importante (16%, n=11 pour les hommes ; 9%, n=5 pour les femmes) et que les femmes sont plus nombreuses à ne pas utiliser de magnésie (14%, n=8 pour les femmes ; 5%, n=3 pour les hommes). Ainsi, dans cet échantillon, les hommes ont davantage tendance que les femmes à avoir un comportement qui les expose à la pollution engendrée par la magnésie.

Les **grimpeurs en voie** sont plus nombreux à considérer que la **qualité de l'air** y est bonne. En effet, 37% (n=15) la considèrent plutôt bonne ou bonne contre 29% (n=9) des **grimpeurs de bloc**, dont aucun ne considère qu'elle soit bonne. Cela peut être lié au fait que les salles de voie sont aménagées dans des espaces beaucoup plus volumineux, ce qui entraîne une dilution plus importante des polluants (Weinbruch et al., 2008). Toutefois, il faut noter que l'échantillon n'est pas semblable : 31 grimpeurs (25%) pratiquent uniquement le bloc et 41 (33,1%) uniquement la voie.

Dans les **employés**, 6 (54,5%) considèrent que la **qualité de l'air** est neutre, 3 (27,3%) plutôt bonne, 1 (9,1%) qu'elle est bonne et 1 (9,1%) plutôt mauvaise. Néanmoins, l'échantillon est si faible (11 employés) qu'il serait complexe d'en tirer des conclusions, bien que les employés aient l'air plus satisfaits que l'inverse.

Dans l'échantillon des participants qui considèrent que la **qualité de l'air est mauvaise** ou plutôt mauvaise, 12 (38,7%) utilisent de la **magnésie** de façon modérée, 10 (32,2%) de façon légère, 6 (19,4%) ont un usage important et seulement 3 (9,7%) n'utilisent pas de magnésie. Ainsi, il apparaît qu'une mauvaise perception de la qualité de l'air n'entraîne pas un usage différent de la magnésie.

Concernant les **salles étudiées**, on constate qu'à la Salle A, 14 (43,7%) répondants sur 32 (100%) estiment que l'air est mauvais ou plutôt mauvais, soit près de la moitié. 11 (34,4%) répondants la considèrent bonne et 7 (21,9%) neutre. À la Salle B, 2 répondants (22,2%) estiment que la qualité de l'air est mauvaise ou plutôt mauvaise, 2 (22,2%) qu'elle est plutôt bonne et 5 (55,6%) neutre. À la Salle C, 1 répondant (50%) la trouve neutre et 1 autre mauvaise (50%). L'échantillon étant assez faible, on ne peut réellement tirer de conclusions.

Les poussières (n=98) et la ventilation (n=76) sont les éléments les plus liés à **l'appréciation de la qualité de l'air**, suivies de la température (n=49) et de l'odeur (n=44). Ces réponses paraissent cohérentes : les poussières sont le dépôt de particules sur les surfaces, et la ventilation permet effectivement de renouveler l'air (Almand-Hunter et al., 2014; Salonen et al., 2020; Weinbruch et al., 2012).

39,5% (n=49) des participants, soit plus du tiers, sont victimes de **symptômes respiratoires et/ou oculaires**, ce qui n'est pas négligeable. 42,3% des personnes souffrant de maladies respiratoires évoquent un symptôme, soit 11 personnes sur 26. Ces deux chiffres sont semblables, ce qui indique que les personnes souffrant de maladies respiratoires ne sont pas

nécessairement plus sensibles et plus à risque de subir des symptômes respiratoires et/ou oculaires.

Dans les participants ressentant des **symptômes**, 16 (33%) utilisent de la **magnésie** de façon légère, 21 (43%) ont un usage modéré, 7 (14%) un usage important et 5 (10%) n'utilisent pas de magnésie. Ainsi, les chiffres sont plutôt similaires à ceux de l'échantillon global, ce qui indique que ressentir un symptôme n'a pas d'influence sur l'usage de la magnésie.

Comme indiqué à la figure 28, les répondants ressentant des **symptômes** sont plus nombreux à considérer que la **qualité de l'air** est mauvaise ou plutôt mauvaise, et aucun n'a considéré qu'elle était bonne, ce qui indique que subir un symptôme peut influencer l'appréciation de la qualité de l'air.

Sur les 11 **fumeurs**, seulement 3 ressentent des **symptômes**, ce qui ne révèle pas qu'ils soient plus à risque que les non-fumeurs.

La moitié des participants (52,8% ; n=66) a quand même **conscience** qu'une mauvaise qualité de l'air pourrait induire des **problèmes de santé**, notamment des maladies respiratoires et cancers. Les maladies cardiaques ne sont, quant à elles, pas énoncées.

Seulement 40% (n=50) des répondants indiquent que la **sensation de confort influence le choix de la salle d'escalade**. Toutefois, certaines villes ne comptent qu'une salle d'escalade voire aucune, et chaque personne n'a pas la même accessibilité (voiture, transports en commun, ...) ce qui peut également influencer le choix de salle, outre la sensation de confort.

Les **commentaires additionnels** sont assez nombreux et révèlent que les participants sont **sensibilisés au sujet** de la qualité de l'air dans les salles d'escalade, bien que certaines questions telles que l'interdiction de la magnésie en poudre ne fassent pas l'unanimité.

Cependant, il faut noter que l'échantillon peut comporter certaines **limites** : puisque le formulaire a été diffusé dans et par les salles d'escalade, on peut imaginer que le public qui a répondu est constitué de pratiquants réguliers. Ainsi, les grimpeurs occasionnels sont peut-être moins représentés dans l'échantillon, dont des grimpeurs qui pratiqueraient moins l'escalade en raison d'une mauvaise qualité de l'environnement intérieur.

De plus, la représentativité des salles n'est pas équivalente. En effet, le formulaire a été diffusé sur les réseaux sociaux de certaines salles. Ainsi, cela explique que certaines salles soient plus représentées que d'autres. Par exemple, la Salle A a diffusé le formulaire via le groupe Facebook, tandis que la Salle B et la Salle C ne l'ont pas diffusé, ce qui se manifeste dans

l'échantillon du questionnaire : 32 participants grimpent à la Salle A contre 9 à la Salle B et 2 à la Salle C. Si l'échantillon contient effectivement des grimpeurs plus impliqués dans la pratique, cela peut expliquer qu'une grande partie de l'échantillon soit sensibilisée au sujet de la question de la qualité de l'air.

En conclusion, le taux de réponse a été relativement élevé, et de nombreux commentaires additionnels illustrent que le sujet de la qualité de l'air dans les salles d'escalade suscite l'intérêt de nombreux grimpeurs. Il est difficile de tirer des conclusions des réponses de ce questionnaire puisqu'aucune tendance ne se distingue ou peut être affirmée, et que l'échantillon (124 participants) reste infime à l'échelle du nombre de grimpeurs en Wallonie. Cependant, il apparaît qu'un tiers des répondants soient sujet à des symptômes respiratoires et/ou oculaires. Cela pourrait être lié à l'environnement de la salle d'escalade, mais cela pourrait également traduire la proportion générale de la population à ressentir des symptômes respiratoires et/ou oculaires dans des situations similaires (sport et/ou environnement intérieur).

III. Législation

La loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public se concentre sur le CO₂, qui n'est pas un polluant mais un indicateur. En effet, le CO₂ permet de rendre compte du renouvellement d'air dans l'environnement intérieur, mais ne traduit pas les concentrations en polluants. Il est prévu que la loi, qui n'est entrée en vigueur qu'en 2022, ne se limite pas au CO₂. Néanmoins, il faut signaler que cette loi est la première à traiter de la qualité de l'air intérieur au niveau fédéral en Belgique, et constitue donc un premier pas dans la bonne direction.

Mr. Degalliez souligne à plusieurs reprises que la loi est en cours de construction. Ainsi, l'appropriation de la question de la qualité de l'air par les acteurs concernés par la loi va se faire de façon progressive. Puisque les objectifs et l'implémentation de labels sont à long-terme (jusqu'à 2038), aucun résultat ne peut encore être communiqué. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'arrêté royal qui détermine les lieux visés par la loi et d'arrêtés royaux sectoriels ni de guides pratiques sectoriels concernant les salles de sport. De plus, aucun employé des salles d'escalade étudiées n'a mentionné leur connaissance de cette loi, ce qui concorde : l'appropriation des acteurs est progressive et variable selon les secteurs.

Actuellement, aucun incitant ou subvention ne sont prévus en Belgique et la loi ne se veut pas répressive.

Mr. Degalliez aborde également le manque de réglementations sur les PM en air intérieur. Effectivement, les seuils de l'OMS ou ceux de la littérature scientifique sont mobilisés sans constituer des normes obligatoires. De plus, les seuils de l'OMS pour les PM sont les seuils d'air extérieur et ne sont pas abordés pour les recommandations d'air intérieur.

En effet, l'étude bibliographique réalisé dans le cadre de ce mémoire met en avant l'absence de directive européenne sur la qualité de l'air intérieur dans les lieux publics. Bien que plusieurs pays européens aient des lois qui traitent de la qualité de l'air intérieur, il y a une absence d'harmonisation au niveau européen.

Rappelons que les seuils de l'arrêté royal du 30 mai 2024 sont très faibles en comparaison des recommandations de l'OMS et de l'Anses (*cf.* Cadre réglementaire).

Le Code du bien-être au travail propose des seuils pour de nombreux polluants, dont le CO₂ et les PM, mais ne concerne que les employés. Le seuil des PM est d'ailleurs très élevé en comparaison des recommandations « Air extérieur » de l'OMS, mais celles-ci ne poursuivent pas les mêmes objectifs. En effet, le Code du bien-être au travail impose des seuils obligatoires, tandis que l'OMS ne fait que recommander des seuils qui excluent tout danger sur la santé humaine. De plus, la période de référence n'est pas la même, ainsi il est plus complexe de comparer ces différentes valeurs entre elles.

Il n'existe donc pas de lois belges traitant des polluants présents dans les salles de sport et d'escalade. Néanmoins, la loi du 6 novembre 2022 promet, dans le futur, de les considérer.

Conclusions et perspectives

Ce travail avait pour objectifs (1) d'évaluer l'état de la qualité de l'air dans des salles d'escalade en bloc en Wallonie, (2) d'évaluer la perception de la qualité de l'air des usagers des salles d'escalade en Wallonie et, finalement (3), d'interroger la législation en place et les pratiques pouvant être mises en œuvre.

Concernant la qualité de l'air dans les salles d'escalade étudiées, ce travail nous a permis de constater que chaque salle, par ses particularités architecturales et ses différents équipements et pratiques, nécessite une évaluation propre. En effet, les trois salles que nous avons étudiées ne présentaient pas les mêmes résultats.

Au regard de la loi, les seuils de CO₂ ne sont dépassés que lors de la première mesure dans la Salle A. Les PM, quant à eux, sont loin des seuils obligatoires du Code du bien-être au travail dans les trois salles. Ce n'est qu'en comparaison aux seuils de l'OMS que les PM deviennent préoccupants pour les salles A et C. Néanmoins, les seuils de l'OMS ne sont que des recommandations et, de ce fait, n'ont pas de force obligatoire.

Quant au formaldéhyde, bien qu'il dépasse les seuils de l'AR du 30 mai 2024, les seuils préconisés par l'OMS et l'Anses sont loin d'être dépassés, ce qui indique que les concentrations retrouvées dans les salles ne constituent pas, en principe, un risque pour la santé des grimpeurs.

Ainsi, il apparaît que, globalement, la Salle B a les concentrations les plus faibles pour chaque polluant. En le mettant en relation aux différentes pratiques dans les salles, on constate que la ventilation est sûrement responsable de cette différence avec les autres salles. En effet, la Salle B ventile naturellement la salle de bloc, et le renouvellement d'air est important grâce à la position des portes qui sont ouvertes, puisqu'elles se situent de part et d'autre de la salle. La Salle C, quant à elle, a une ventilation mécanique, et bien que celle-ci soit régulièrement en fonctionnement, elle apparaît moins efficace que la ventilation naturelle de la Salle B. Finalement, la Salle A ne ventile presque pas, ce qui explique probablement ses concentrations plus élevées.

Les mesures ont également permis de mettre en évidence que les concentrations de CO₂ ne sont pas nécessairement liées à celles des PM. Ainsi, bien que d'autres études dont Nicolici et al. (2026) l'aient déjà démontré, nous pouvons réaffirmer que le CO₂ ne peut être qu'un indicateur du renouvellement d'air et non une source fiable concernant la présence d'autres polluants.

Ainsi, ce travail permet d'illustrer l'importance de la ventilation, ce qui est le principal conseil qui peut être donné aux salles d'escalade. Puisque les concentrations de polluants diminuent naturellement durant la nuit et que les concentrations de formaldéhyde ne sont pas élevées, la ventilation uniquement durant la journée est pertinente.

Toutefois, il faut garder à l'esprit toutes les limites qui ont été citées dans ce travail et qui nuancent les résultats.

Concernant le questionnaire, celui-ci a principalement permis de montrer l'intérêt que portent les grimpeurs à la problématique de qualité de l'air intérieur dans les salles d'escalade.

Quant à la législation, on constate qu'il n'existe, à ce jour, aucune loi spécifique à la qualité de l'air dans les salles d'escalade. Malgré cela, nous pouvons tout de même souligner que la loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public est une avancée pour la question de la qualité de l'air intérieur et que celle-ci promet d'être complétée.

Finalement, ces résultats posent de nouvelles questions. Il serait notamment intéressant de pouvoir étudier la variabilité saisonnière et spatiale dans les salles d'escalade. Les poussières de bois, émises lors de l'ouverture de nouvelles voies, sont également un contaminant qui pourrait être pertinent à évaluer. Finalement, le quotidien des employés pourrait être surveillé, pour permettre un état des lieux plus réaliste.

Note de transparence

Dans le cadre de ce travail, l'outil d'intelligence artificielle ChatGPT a été utilisé comme outil d'aide à la compréhension concernant certains sujets techniques, à la structuration de ce mémoire ainsi qu'à la programmation sur R-Studio.

Bibliographie

I. Législation

I.I Législation européenne

Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Journal officiel de l'Union européenne, L 152, 1-44.

Règlement (CE) n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH). Journal officiel de l'Union européenne.

Règlement (UE) n°305/2011 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil. Journal officiel de l'Union européenne, L 88, 5-43.

Règlement (UE) n°2024/3110 du Parlement européen et du Conseil du 27 novembre 2024 établissant des règles harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant le règlement (UE) n°305/2011. Journal officiel de l'Union européenne, 2024/3110.

Directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte). Journal officiel de l'Union européenne, 2024/1275.

I.II Législation belge

Code du bien-être au travail. Moniteur belge.

Loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public. Moniteur belge.

Arrêté royal du 8 mai 2014 établissant les niveaux seuils pour les émissions dans l'environnement intérieur de produits de construction pour certains usages prévus. Moniteur belge.

Arrêté royal du 7 février 2024 déterminant les conditions de la mise sur le marché de CO2 mètres portables et transportables dans le cadre du suivi de la qualité de l'air intérieur. Moniteur belge.

Arrêté royal du 9 février 2024 déterminant les conditions de la mise sur le marché de systèmes de purification de l'air dans le cadre de la lutte contre les virus en aérosol en dehors des usages médicaux. Moniteur belge.

Arrêté royal du 12 mai 2024 déterminant les modalités visées aux articles 3 et 4 de la loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public. Moniteur belge.

II. Ouvrages scientifiques

Adamová, T., Hradecký, J., & Pánek, M. (2020). Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wood and Wood-Based Panels : Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation. *Polymers*, 12(10), 2289. <https://doi.org/10.3390/polym12102289>

Almand-Hunter, B. B., Gordon, J., Masson, N., & Miller, S. L. (2014). Dust exposure in indoor climbing facilities. In *Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (pp. 233-239).

Amaral, S. S., De Carvalho, J. A., Costa, M. A. M., & Pinheiro, C. (2015). An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere*, 6(9), 1327-1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>

Amca, A., Vigouroux, L., Aritan, S., & Berton, E. (2012). The effect of chalk on the finger–hold friction coefficient in rock climbing. *Sports Biomechanics*, 11, 473-479. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.724700>

Atafar, Z., Sarkhoshkalat, M. M., & Manesh, M. B. (2025). 1 - Overview of air pollution : History, sources and effects. In A. Basile, D. Saloglu, & A. Cassano (Éds.), *Air Pollution, Air Quality, and Climate Change* (p. 1-21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23816-1.00005-7>

- Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., & Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments : A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*, 121, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>
- Baláš, J., Strejcová, B., Malý, T., Malá, L., & Martin, A. J. (2009). Changes in upper body strength and body composition after 8 weeks indoor climbing in youth. *Isokinetics and Exercise Science*, 17(3), 173-179. <https://doi.org/10.3233/IES-2009-0350>
- Becher, R., Øvrevik, J., Schwarze, P. E., Nilsen, S., Hongslo, J. K., & Bakke, J. V. (2018). Do Carpets Impair Indoor Air Quality and Cause Adverse Health Outcomes : A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 184. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020184>
- Beel, G., Langford, B., Carslaw, N., Shaw, D., & Cowan, N. (2023). Temperature driven variations in VOC emissions from plastic products and their fate indoors : A chamber experiment and modelling study. *Science of The Total Environment*, 881, 163497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163497>
- Carlisle, A. J., & Sharp, N. C. C. (2001). Exercise and outdoor ambient air pollution. *British Journal of Sports Medicine*, 35(4), 214-222. <https://doi.org/10.1136/bjism.35.4.214>
- Chiappini, L. (2007). *Mesure du formaldéhyde - Comparaison de différentes méthodes de prélèvement des aldéhydes, en présence d'ozone, en conditions réelles et simulées*. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air.
- Chung, P.-R., Tzeng, C.-T., Ke, M.-T., & Lee, C.-Y. (2013). Formaldehyde Gas Sensors : A Review. *Sensors*, 13(4), 4468-4484. <https://doi.org/10.3390/s130404468>
- Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017). Indoor Air Quality and Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>

- Cole, K. P., Richard L. Uhl, & Andrew J. Rosenbaum. (2020). *Comprehensive Review of Rock Climbing Injuries : Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*.
<https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-19-00575>
- Dagnelie, R., Hanoune, B., & Tran-thi, T. (2008). Méthodes de mesure du formaldéhyde dans l'atmosphère. *Air Pur*, 74, 14-21.
- Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1998). Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. *Indoor Air*, 8(2), 80-90.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x>
- González-Martín, J., Kraakman, N. J. R., Pérez, C., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2021). A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control. *Chemosphere*, 262, 128376. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128376>
- González-Rojas, S., Yáñez-Sepúlveda, R., Tuesta, M., Sánchez-Ureña, B., Trejos-Montoya, J., Olivares-Arancibia, J., López-Gil, J. F., & Rojas-Valverde, D. (2025). Air Pollution and Endurance Exercise : A Systematic Review of the Potential Effects on Cardiopulmonary Health. *Life*, 15(4), 595. <https://doi.org/10.3390/life15040595>
- Haines, S. R., Adams, R. I., Boor, B. E., Bruton, T. A., Downey, J., Ferro, A. R., Gall, E., Green, B. J., Hegarty, B., Horner, E., Jacobs, D. E., Lemieux, P., Misztal, P. K., Morrison, G., Perzanowski, M., Reponen, T., Rush, R. E., Virgo, T., Alkhayri, C., Dannemiller, K. C. (2020). Ten questions concerning the implications of carpet on indoor chemistry and microbiology. *Building and Environment*, 170, 106589.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106589>
- Hamanaka, R. B., & Mutlu, G. M. (2018). Particulate Matter Air Pollution : Effects on the Cardiovascular System. *Frontiers in Endocrinology*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00680>

- Jones, A. P. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33(28), 4535-4564. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00272-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00272-1)
- Karczewski, J. D., Białek, A., Sadok, A., Kubas, W., Niemcewicz, W. J., Ryń, K., Koźlicka, A., Klajda, J., Czerniakowski, M., & Gorczyca, Z. (2026). Clinical and Pathophysiological Effects of Inhalation Exposure to Magnesium Carbonate and Rubber-Derived Pollutants in Indoor Climbing Facilities : A Review. *Quality in Sport*, 54, 70342-70342. <https://doi.org/10.12775/QS.2026.54.70342>
- Karg, N., Dorscht, L., Kornhuber, J., & Luttenberger, K. (2020). Bouldering psychotherapy is more effective in the treatment of depression than physical exercise alone : Results of a multicentre randomised controlled intervention study. *BMC Psychiatry*, 20(1), 116. <https://doi.org/10.1186/s12888-020-02518-y>
- Kuschner, W. G., Wong, H., D'Alessandro, A., Quinlan, P., & Blanc, P. D. (1997). Human pulmonary responses to experimental inhalation of high concentration fine and ultrafine magnesium oxide particles. *Environmental Health Perspectives*, 105(11), 1234-1237. <https://doi.org/10.1289/ehp.971051234>
- Lang, I., Bruckner, T., & Triebig, G. (2008). Formaldehyde and chemosensory irritation in humans : A controlled human exposure study. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 50(1), 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.08.012>
- Langer, K., Simon, C., & Wiemeyer, J. (2023). Strength Training in Climbing : A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37(3), 751-767. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004286>
- Li, L., Ru, A., Liao, T., Zou, S., Niu, X. H., & Wang, Y. T. (2018). Effects of Rock Climbing Exercise on Physical Fitness among College Students : A Review Article and Meta-analysis. *Iranian Journal of Public Health*, 47(10), 1440-1452.

- Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Indoor Air Quality in Buildings : A Comprehensive Review on the Factors Influencing Air Pollution in Residential and Commercial Structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3276. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063276>
- Micallef, A., Caldwell, J., & Colls, J. J. (1998). The Influence of Human Activity on the Vertical Distribution of Airborne Particle Concentration in Confined Environments : Preliminary Results. *Indoor Air*, 8(2), 131-136. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-1-00008.x>
- Michiels, F., Vincent, R., Baril, M., Binet, S., Bisson, M., Chevalier, A., El-Ghissassi, F., El-Yamani, M., Emond, C., Fitzgerald, R., Garnier, R., Hoet, P., Iwatsubo, Y., Kairo, C., Lakhal, L., Lirussi, F., Maitre, A., Platel, A., Schroeder, H., ... Rousselle, C. (2020). *Elaboration de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par voie orale et respiratoire pour le 1,5-cyclooctadiène (CAS n°111-78-4) (Saisine n°2018-SA-0144; p. 39 p.)*. Anses. <https://anses.hal.science/anses-04510654>
- Moshhammer, H., Shahraki, S., Mondel, T., & Gebhart, P. (2016). Lung function and dust in climbing halls: Two pilot studies. *Reviews on Environmental Health*, 31. <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0024>
- Mosley, S. (2014). Environmental History of Air Pollution and Protection. In M. Agnoletti & S. Neri Seneri (Éds.), *The Basic Environmental History* (p. 143-169). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09180-8_5
- Nastasi, N., Renninger, N., Bope, A., Cochran, S. J., Greaves, J., Haines, S. R., Balasubrahmaniam, N., Stuart, K., Panescu, J., Bibby, K., Hull, N. M., & Dannemiller, K. C. (2022). Persistence of viable MS2 and Phi6 bacteriophages on carpet and dust. *Indoor Air*, 32(1), e12969. <https://doi.org/10.1111/ina.12969>

- Negrete-Carrillo, K., Salvador-Carlos, J., Valdez-Salas, B., Beltrán-Partida, E., Castillo-Saenz, J., & Gamboa-Becerra, R. (2026). Formaldehyde Emissions from Wood Materials and Their Impact on Indoor Air Quality. *Sustainability*, 18(14), 7176. <https://doi.org/10.3390/su18147176>
- Nicolici, V.-S., Ionel, I., & Bisorca, D. (2026). Indoor Air Quality in Climbing Gyms : Multi-Zone Assessment of Particulate Matter, CO2 Accumulation, and User Perception. *Applied Sciences*, 16(5), 2269. <https://doi.org/10.3390/app16052269>
- Noorian Najafabadi, S. A., Sugano, S., & Bluysen, P. M. (2022). Impact of Carpets on Indoor Air Quality. *Applied Sciences*, 12(24), 12989. <https://doi.org/10.3390/app122412989>
- Prajakta P. Shrimandilkar. (2013). Indoor Air Quality Monitoring for Human Health. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 3, 891-897.
- Reamer, J. (2017). *An Analysis of Visible Airborne Magnesium Carbonate Chalk Particulates in a Gymnastics Facility and the Risk of Respiratory Health Effects*. [Master's thesis, University of Wisconsin-Stout]. University of Wisconsin-Stout Digital Library.
- Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349(9057), 1013-1016. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)07220-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)07220-0)
- Rosołowska-Żak, S., Sambura, S., Paschke, P., Miczek, I., Pałuchowska, J., & Szymkowicz, A. (2024). The influence of sport climbing on depressive disorders. *Quality in Sport*, 16, 50572-50572. <https://doi.org/10.12775/QS.2024.16.003>
- Salem, M. Z. M., Böhm, M., Srba, J., & Beránková, J. (2012). Evaluation of formaldehyde emission from different types of wood-based panels and flooring materials using different standard test methods. *Building and Environment*, 49, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.011>
- Salonen, H., Salthammer, T., & Morawska, L. (2020). Human exposure to air contaminants in sports environments. *Indoor Air*, 30(6), 1109-1129. <https://doi.org/10.1111/ina.12718>

- Seltzer, J. (1997). *Sources, Concentrations, and Assessment of indoor pollution*. In E.J. Bardana, Jr. & A. Montanaro (Eds.), *Indoor air pollution and health*. Marcel Dekker.
- Sherman, A., Masset, T., Wimmer, L., Maruschka, L. K., Dailey, L. A., Hüffer, T., Breider, F., & Hofmann, T. (2025). The Invisible Footprint of Climbing Shoes : High Exposure to Rubber Additives in Indoor Facilities. *ACS ES&T Air*, 2(5), 930-942.
<https://doi.org/10.1021/acsestair.5c00017>
- Siegel, S. R., & Fryer, S. M. (2017). Rock Climbing for Promoting Physical Activity in Youth. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 11(3), 243-251.
<https://doi.org/10.1177/1559827615592345>
- Spiru, P., & Simona, P. L. (2017). A review on interactions between energy performance of the buildings, outdoor air pollution and the indoor air quality. *Energy Procedia, International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2017, 10-12 May 2017, Riga, Latvia*, 128, 179-186.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.039>
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14(s7), 51-58.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Tran, V. V., Park, D., & Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>
- Vagy, J., Marenzi, A., Shiou, B., Woollings, K., & Saric, K. (2026). Musculoskeletal injuries in rock climbing : A scoping review. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 12(1).
<https://doi.org/10.1136/bmjsem-2025-002830>
- Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F.-Y., Spliethoff, H., & Lang, W. (2017). A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive

- House buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1303-1319.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.039>
- Wanner, H. U. (1993). Sources of pollutants in indoor air. *IARC Scientific Publications*, (109), 19-30.
- Watts, P. B. (2004). Physiology of difficult rock climbing. *European Journal of Applied Physiology*, 91(4), 361-372. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-1036-7>
- Weinbruch, S., Dirsch, T., Ebert, M., Hofmann, H., & Kandler, K. (2008). Dust exposure in indoor climbing halls. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(5), 648-654.
<https://doi.org/10.1039/B719344K>
- Weinbruch, S., Dirsch, T., Kandler, K., Ebert, M., Heimburger, G., & Hohenwarter, F. (2012). Reducing dust exposure in indoor climbing gyms. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(8), 2114-2120. <https://doi.org/10.1039/C2EM30289F>
- Yang, Y., Hao, Y., Huang, L., Luo, Y., Chen, S., Xu, M., & Chen, W. (2024). Recent Advances in Electrochemical Sensors for Formaldehyde. *Molecules*, 29(2), 327.
<https://doi.org/10.3390/molecules29020327>
- Zajchowski, C. A. B., Rabinowitz, E., & Davis, J. K. (2020). Canaries at the Climbing Wall : A Comparative Study of Particulate Matter at Two University Climbing Walls. *Recreational Sports Journal*, 44(2), 81-88. <https://doi.org/10.1177/1558866120952772>
- Zhang, H., Arens, E., & Pasut, W. (2011). Air temperature thresholds for indoor comfort and perceived air quality. *Building Research & Information*, 39(2), 134-144.
<https://doi.org/10.1080/09613218.2011.552703>
- Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z., & Thyregod, C. (2017). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor Air*, 27(1), 47-64. <https://doi.org/10.1111/ina.12284>

Zundel, C. G., Ryan, P., Brokamp, C., Heeter, A., Huang, Y., Strawn, J. R., & Marusak, H. A. (2022). Air pollution, depressive and anxiety disorders, and brain effects : A systematic review. *Neurotoxicology*, 93, 272-300. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2022.10.011>

III. Littérature grise

Adamkiewicz, G. & World Health Organization (Éds.). (2010). *WHO guidelines for indoor air quality : Selected pollutants*. World Health Organization, Regional Office for Europe.

Air pollution. (s. d.). World Health Organization. Consulté le 29 mai 2026, à l'adresse <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

Air quality. (2023, juin 22). World Health Organization. <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/air-quality>

Air quality status in Europe 2026. (2026, avril 29). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2026>

Ambient (outdoor) air pollution. (2024). [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Anatomie de l'appareil respiratoire. (s. d.). [Microbiologie médicale]. Consulté le 14 août 2026, à l'adresse <https://microbiologiemedicale.fr/anatomie-appareil-respiratoire/>

Avis et rapport de l'Afsset relatifs à : Procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils (COV) par les matériaux de construction et produits de décoration. (2009, octobre 8). Anses. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lafsset-relatifs-procedure-de-qualification-des-emissions-de-composes>

Avis et rapport de l'Anses relatif à l'Evaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le formaldéhyde. (2018). Anses. <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-levaluation-des-effets-sur-la-sante-et-des-methodes-de-7>

Comment sont fabriquées les prises d'escalade ? (s. d.). Prises-Escalade.fr. Consulté 18 juillet 2026, à l'adresse <https://www.prises-escalade.fr/blog/conseils/en-quoi-sont-fabriques-les-prises-volumes-et-macros-d-escalade>

Committee for Health-related Evaluation of Building Products. (2026, juin 12). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/committee-for-health-related-evaluation-of-building>

Définition et causes de l'insuffisance cardiaque. (2025, août 29). Ameli.fr. <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/insuffisance-cardiaque/definition-causes>

Delbot, A. (2025, mai 6). *Les chaussons d'escalade libèrent des polluants dans l'air.* France Culture. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/avec-sciences/les-chaussons-d-escalade-liberent-des-polluants-dans-l-air-7795720>

Ducol, J. (2023, juillet 6). Une salle d'escalade dans une église à Bruxelles : On l'a visitée ! *Bruxelles Secrète.* <https://bruxellessecrete.com/maniak-padoue-salle-escalade-eglise/>

List of “Lowest Concentration of Interest” (LCI) values (2023). European Commission. Consulté 18 juillet 2026, à l'adresse https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/eu-lci-subgroup/eu-lci-values_en
<https://data.europa.eu/doi/10.2873/88989>

Exigences plus strictes concernant le formaldéhyde libéré par les panneaux de construction dans le cadre de la nouvelle restriction REACH. (2025, juin 21). Buildwise. <https://www.buildwise.be/fr/nouvelles/exigences-plus-strictes-concernant-le-formaldehyde-libere-par-les-panneaux-de-construction-dans-le-cadre-de-la-nouvelle-restriction-reach/>

Escalade [Fiche technique]. (2025). Service public de Wallonie. Infrasport. <https://infrastructures.wallonie.be/pouvoirs-locaux/nos-thematiques/infrastructures-locales/infrasports/expertiseboite-a-outils/fiches-techniques.html>

- Formaldéhyde et effets sur la santé. (2025, février 25). *Cancer Environnement*.
<https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/formaldehyde/>
- Galland, B., & Gérardin, K. (2022). Notes techniques : Mesure en temps réel du dioxyde de carbone dans les espaces de travail. *Hygiène et sécurité du travail*, 43-52.
- German Committee on Indoor Air Guide Values. (2026, juin 3). Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-air-guide-values>
- Harm to human health from air pollution in Europe : Burden of disease status, 2025*. (2025, novembre 30). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution-burden-of-disease-status-2025>
- Hodnik, T. (2024, septembre 5). Les avantages du revêtement en moquette dans les salles de bloc : Réduction des impacts des particules de caoutchouc et de magnésie sur la santé des grimpeurs. *Citywall.eu*. <https://citywall.eu/fr/the-benefits-of-carpet-cover-in-bouldering-gyms/>
- Household air pollution*. (2025, décembre 16). World Health Organization.
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- IFSC 2019 Annual Report : International Federation of Sport Climbing. (2020, mai 7). *Climbing Business Journal*. <https://climbingbusinessjournal.com/ifsc-releases-its-2019-annual-report/>
- Impact de la qualité de l'air intérieur sur votre santé*. (2026, avril 16). SPF Santé publique.
<https://www.health.belgium.be/fr/themes/sante/votre-sante/environnement-sante/impact-qualite-lair-interieur-votre-sante>
- Jourdain, P. (2020). *Histoire de l'escalade—Grimper Magazine*.
<https://www.grimper.com/histoire-escalade>

La qualité de l'air : Une attention de chaque instant. (2025, mai 4). *Climbing District*.

<https://climbingdistrict.com/blog/qualite-air/>

Ladouce, F., & Boever, E. (2025, mai 3). *Les salles d'escalade indoor polluée par des substances toxiques contenues dans les chaussures et la magnésie*. RTBF.

<https://www.rtb.be/article/les-salles-d-escalade-indoor-polluees-par-des-substances-toxiques-contenues-dans-les-chaussures-et-la-magnésie-11541748>

Les salles d'escalade au bord de la chute. (2020). Club Alpin Belge (Fédération).

<https://www.clubalpin.be/blog/news-1/post/les-salles-d-escalade-au-bord-de-la-chute-97>

Magnesium carbonate : Healthbased reassessment of administrative occupational exposure limits (2000/15OSH/2003; p. 10). (2003). Health Council of the Netherlands.

NWS, V. (2024, décembre 9). *Le plus grand centre d'escalade de Belgique ouvre à Gand : 1 200 mètres carrés de surface d'escalade* | VRT NWS: le site d'information de référence.

VRTNWS. https://www.vrt.be/vrtnws/fr/2024/12/09/le-plus-grand-centre-descalade-de-belgique-ouvre-a-gand-1-200/?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F&edge_id=cx:2uaajk9bprdc3iqo0eg2e66b1:3sx2pahbgdydqf&newUser=false/

Orientations stratégiques et scientifiques de l'OQEI. (2025). OQEI. <https://www.oqei.fr/fr/nos-missions>

Poussières. (2023, septembre 19). INRE. <https://www.inrs.fr/risques/poussieres/ce-qu-il-faut-retenir.html>

Reporterre. (2025, mai 2). *Les salles d'escalade sont aussi polluées que les bords d'une autoroute*. Reporterre, le média de l'écologie - Indépendant et en accès libre.

<https://reporterre.net/Les-salles-d-escalade-sont-aussi-polluees-que-les-bords-d-une-autoroute>

Romain, A.-Cl. (2025-2026). *Qualité de l'air intérieur (ENVT0170)*. Cours du Bloc 2 MSGE
ULiège

Sites Escalade Indoor. (s. d.). Club Alpin Belge (Fédération). Consulté 27 avril 2026, à
l'adresse <https://www.clubalpin.be/grimper-en-salle>

US EPA, O. (2014a, août 14). *Introduction to Indoor Air Quality* [Collections and Lists].
<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>

US EPA, O. (2014b, août 28). *The Inside Story : A Guide to Indoor Air Quality* [Overviews and
Factsheets]. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/inside-story-guide-indoor-air-quality>

*Vingt-huit sports inclus dans le programme initial axé sur les jeunes des Jeux de LA28—
Actualité Olympique*. (2022, février 3). Olympics.com.
<https://olympics.com/cio/news/vingt-huit-sports-inclus-dans-le-programme-initial-axe-sur-les-jeunes-des-jeux-de-la28>

*WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen
dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. (2021) Geneva: World Health
Organization; 2021.

WHO Guidelines on Physical Activity and Sedentary Behaviour (1st ed). (2020). World Health
Organization. Geneva.

World Climbing. (2020). <https://www.worldclimbing.com/olympics/tokyo-2020>

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire

Qualité de l'air dans les salles d'escalade en Wallonie

Qualité de l'air dans les salles d'escalade en Wallonie : 1 / 8

Cette étude a pour but d'évaluer la perception de la qualité de l'air dans les salles d'escalade en Wallonie. Cette étude sera menée, sauf prolongation, jusqu'à la fin de l'année académique 2025-2026.

Les réponses à ce formulaire sont anonymes et les données ne seront utilisées que dans le cadre de cette étude. La participation à cette étude est entièrement volontaire.

Responsables du projet de recherche

La promotrice de ce travail de fin d'étude est Anne-Claude ROMAIN (acromain@uliege.be).

L'étudiante réalisant ce travail de fin d'étude est Louison WYSOTA (louison.wysota@student.uliege.be), Master en Sciences et Gestion de l'Environnement.

Tirage au sort

Trois tubes de magnésie liquide sont à gagner à l'issue d'un tirage au sort. Pour participer, je vous donne rendez-vous à la fin du formulaire.

Données démographiques : 2 / 8

Vous êtes ...

- ☐ Grimpeur
- ☐ Employé
- ☐ Parent/accompagnant

Quel âge avez-vous? *

- ☐ 18-24
- ☐ 25-34
- ☐ 35-44
- ☐ >45

Quel est votre sexe? *

- ☐ Femme
- ☐ Homme
- ☐ Je ne préfère pas répondre

Habitudes d'escalade : 3 / 8

Dans quelle salle d'escalade grimpez-vous majoritairement? *

- ☐ Top Rock (Liège)
- ☐ Gecko Tank (Liège)
- ☐ Isatis (Liège)
- ☐ L'Éléphant (Liège)
- ☐ Area Escalade (Herstal)
- ☐ L'Escale (Arlon)
- ☐ Baudet Climbing (Bertrix)
- ☐ Tribe (Marche-en-Famenne)
- ☐ The Wall (Malmedy)
- ☐ The Wall (Verviers)
- ☐ Roc Evasion (Namur)
- ☐ BeBloc (Namur)
- ☐ Le Cabri (La Bruyère)
- ☐ Espace Grimpe (Charleroi)
- ☐ Maniak (Charleroi)
- ☐ Maniak (Nivelles)
- ☐ Maniak (Braine l'Alleud)
- ☐ Face Nord (Mons)
- ☐ Dock 79 (Saint-Ghislain)
- ☐ Entre Ciel et Terre (Louvain-la-Neuve)
- ☐ EskiLibre (Orp-Jauche)
- ☐ Autre

Si votre salle n'est pas indiquée, quelle est cette salle?

À quelle fréquence grimpez-vous dans cette salle? *

- ☐ Moins d'une fois par mois
- ☐ 1 à 2 fois par mois
- ☐ 1 à 2 fois par semaine
- ☐ 3 à 4 fois par semaine
- ☐ 5 fois ou plus par semaine

Combien de temps durent vos sessions en général? *

- ☐ Moins d'une heure
- ☐ 1 à 2 heures
- ☐ 2 à 3 heures
- ☐ Plus de 3 heures

Quel type d'escalade pratiquez-vous en général? *

- ☐ Bloc
- ☐ Voie
- ☐ Les deux

Quel type de magnésie utilisez-vous? *

- ☐ Magnésie liquide
- ☐ Magnésie en poudre
- ☐ Magnésie liquide et en poudre
- ☐ Je n'utilise pas de magnésie

Quelle quantité de magnésie utilisez-vous lors d'une session? *

- ☐ Aucune
- ☐ Légère (usage occasionnel)
- ☐ Modérée (usage fréquent)
- ☐ Importante (usage constant)

Qualité de l'air dans la salle d'escalade : 4 / 8

En général, comment décririez-vous la qualité de l'air dans votre salle d'escalade? *

- ☐ Mauvaise
- ☐ Plutôt mauvaise
- ☐ Neutre
- ☐ Plutôt bonne
- ☐ Bonne

À quoi liez-vous cette appréciation de la qualité de l'air? Plusieurs réponses sont possibles. *

- ☐ Poussières
- ☐ Ventilation
- ☐ Humidité
- ☐ Température
- ☐ Odeur
- ☐ Bruit
- ☐ Éclairage
- ☐ Autre

Symptômes respiratoires durant ou après la visite : 5 / 8

Avez-vous déjà ressenti les symptômes suivants pendant ou directement après une session? Plusieurs réponses sont possibles. *

- ☐ Éternuements
- ☐ Toux persistante
- ☐ Yeux qui pleurent et/ou qui grattent
- ☐ Gorge irritée et/ou qui démange
- ☐ Difficultés à respirer
- ☐ Autre
- ☐ Aucun de ces symptômes

Quelle est la gêne engendrée par ces symptômes? *

- ☐ Extrême
- ☐ Forte
- ☐ Modérée
- ☐ Légère
- ☐ Aucune

Est-ce que les symptômes disparaissent après avoir quitté la salle d'escalade? *

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Je ne sais pas
- ☐ Je n'ai aucun symptôme

Antécédents médicaux : 6 / 8

Souffrez-vous d'une maladie respiratoire? Plusieurs réponses sont possibles. *

- ☐ Asthme
- ☐ Allergies
- ☐ Autre maladie respiratoire
- ☐ Non

Fumez-vous (cigarette, vape, autres produits)? *

- ☐ Oui, régulièrement
- ☐ Oui, occasionnellement
- ☐ Non, mais j'ai fumé dans le passé
- ☐ Non, je n'ai jamais fumé

Air intérieur : généralités : 7 / 8

Êtes-vous conscients des risques que pourraient induire une mauvaise qualité d'air dans les salles d'escalade? *

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Je ne sais pas

Si oui, quels seraient les risques encourus selon vous?

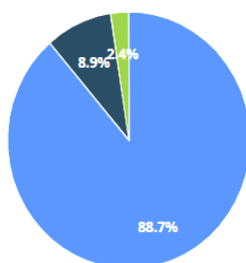
Est-ce que la sensation de confort offerte par la salle d'escalade (air frais, température, humidité, poussières, bruit et éclairage) influence votre choix de salle? *

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Je ne sais pas

Avez-vous des commentaires additionnels sur la qualité de l'air intérieur dans les salles d'escalade?

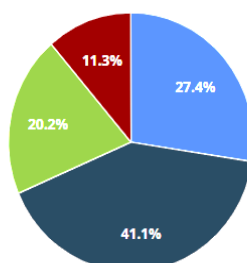
Annexe 2 : Réponses au questionnaire sous forme de graphiques

Vous êtes ...



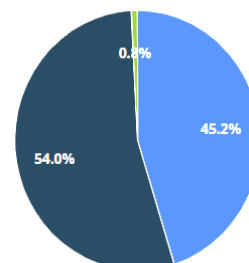
Grimpeur	110
Employé	11
Parent/accompagnant	3

Quel âge avez-vous?



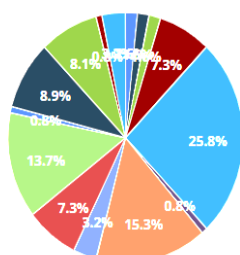
18-24	34
25-34	51
35-44	25
>45	14

Quel est votre sexe?



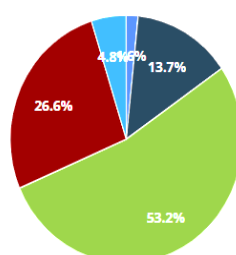
Femme	56
Homme	67
Je ne préfère pas répondre	1

Dans quelle salle grimpez-vous majoritairement?



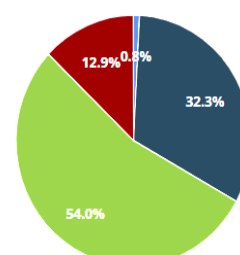
Top Rock (Liège)	2
Gecko Tank (Liège)	2
Isatis (Liège)	2
L'Éléphant (Liège)	9
L'Escale (Arlon)	32
Tribe (Marche-en-Famenne)	1
Roc Evasion (Namur)	19
BeBloc (Namur)	4
Maniak (Charleroi)	9
Maniak (Nivelles)	17
Maniak (Braine l'Alleud)	1
Face Nord (Mons)	11
Dock 79 (Saint-Ghislain)	10
Entre Ciel et Terre (Louvain-la-Neuve)	1
Autre	4

À quelle fréquence grimpez-vous dans cette salle?



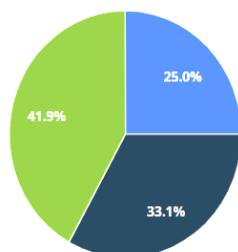
Moins d'une fois par mois	2
1 à 2 fois par mois	17
1 à 2 fois par semaine	66
3 à 4 fois par semaine	33
5 fois ou plus par semaine	6

Combien de temps durent vos sessions en général?



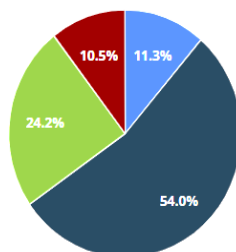
Moins d'une heure	1
1 à 2 heures	40
2 à 3 heures	67
Plus de 3 heures	16

Quel type d'escalade pratiquez-vous en général?



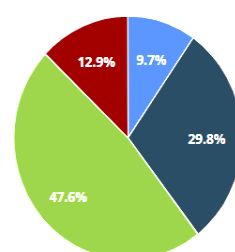
Bloc	31
Voie	41
Les deux	52

Quel type de magnésie utilisez-vous?



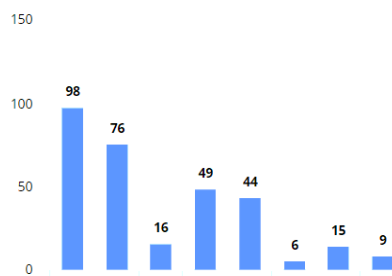
Magnésie liquide	14
Magnésie en poudre	67
Magnésie liquide et en poudre	30
Je n'utilise pas de magnésie	13

Quelle quantité de magnésie utilisez-vous lors d'une session?



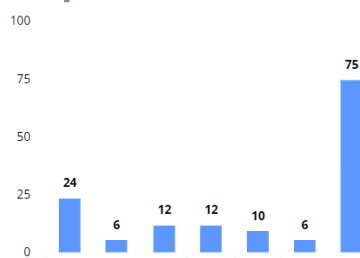
Aucune	12
Légère (usage occasionnel)	37
Modérée (usage fréquent)	59
Importante (usage constant)	16

À quoi liez-vous cette appréciation de la qualité de l'air? Plusieurs réponses sont possibles.



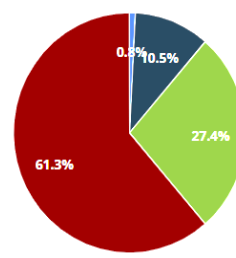
Poussières	98
Ventilation	76
Humidité	16
Température	49
Odeur	44
Bruit	6
Éclairage	15
Autre	9

Avez-vous déjà ressenti les symptômes suivants pendant ou directement après une session? Plusieurs réponses sont possibles.



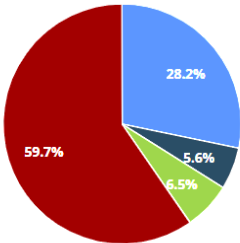
Éternuements	24
Toux persistante	6
Yeux qui pleurent et/ou qui grattent	12
Gorge irritée et/ou qui démange	12
Difficultés à respirer	10
Autre	6
Aucun de ces symptômes	75

Quelle est la gêne engendrée par ces symptômes?



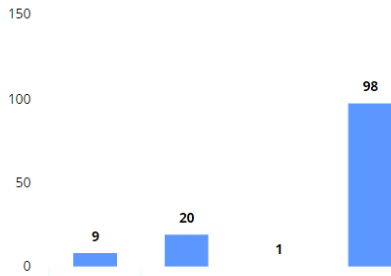
Extrême	1
Modérée	13
Légère	34
Aucune	76

Est-ce que les symptômes disparaissent après avoir quitté la salle d'escalade?



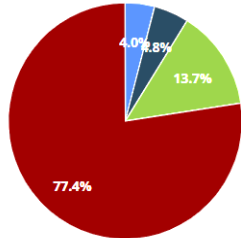
Oui	35
Non	7
Je ne sais pas	8
Je n'ai aucun symptôme	74

Souffrez-vous d'une maladie respiratoire? Plusieurs réponses sont possibles.



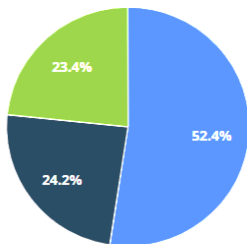
Asthme	9
Allergies	20
Autre maladie respiratoire	1
Non	98

Fumez-vous (cigarette, vape, autres produits)?



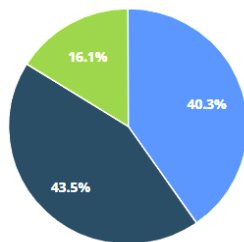
Oui, régulièrement	5
Oui, occasionnellement	6
Non, mais j'ai fumé dans le passé	17
Non, je n'ai jamais fumé	96

Êtes-vous conscients des risques que pourraient induire une mauvaise qualité d'air dans les salles d'escalade?



Oui	65
Non	30
Je ne sais pas	29

Est-ce que la sensation de confort offerte par la salle d'escalade (air frais, température, humidité, poussières, bruit et éclairage) influence votre choix de salle?



Oui	50
Non	54
Je ne sais pas	20

Résumé

La présence de polluants dans l'air n'est pas une problématique contemporaine. Toutefois, ces dernières décennies, la qualité de l'air intérieur est devenue une préoccupation sanitaire, notamment en raison du temps important passé dans les bâtiments, où l'air est parfois plus pollué qu'en extérieur. En parallèle, la pratique de l'escalade est devenue très populaire ces dernières années, la Belgique ne faisant pas exception. Des craintes autour de la qualité de l'air dans ces salles ont récemment émergées en raison de l'usage de la magnésie et de la friction entraînant la suspension des matériaux des chaussons. Ce travail vise à (1) caractériser la qualité de l'air dans trois salles d'escalade en bloc en Wallonie en mesurant les concentrations de PM, de formaldéhyde et de CO₂, (2) à évaluer la perception de la qualité de l'air des usagers grâce à un questionnaire, et finalement (3), à interroger la législation en place. Les résultats montrent des différences entre les trois salles étudiées. Les concentrations maximales de PM_{2,5} et PM₁₀ atteignent respectivement 148 µg/m³ et 277 µg/m³, et le CO₂ atteint des concentrations maximales de l'ordre de 1500 ppm. Le formaldéhyde, quant à lui, présente des concentrations faibles dans chacune des salles étudiées. Ces résultats mettent en évidence que la ventilation est le facteur le plus important concernant les concentrations de polluants, et que l'usage de CO₂-mètres est insuffisant pour indiquer les concentrations d'autres polluants.

Abstract

The presence of pollutants in the air is not a modern-day issue. However, in recent decades, indoor air quality has become a public health concern, particularly because of the significant amount of time people spend indoors, where the air is sometimes more polluted than outdoors. At the same time, rock climbing has become very popular in recent years, and Belgium is no exception. Concerns about air quality in these facilities have recently emerged due to the use of chalk and the friction that causes particles from climbing shoes to become airborne. This study aims to (1) characterize air quality in three bouldering gyms in Wallonia by measuring concentrations of PM, formaldehyde, and CO₂, (2) assess users' perception of air quality through a questionnaire, and finally (3) examine the existing legislation. The results show differences among the three facilities studied. Maximum concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ reached 148 µg/m³ and 277 µg/m³, respectively, and CO₂ reached maximum concentrations of approximately 1,500 ppm. Formaldehyde, on the other hand, was found at low concentrations in each of the facilities studied. These results highlight that ventilation is the most important factor affecting pollutant concentrations, and that the use of CO₂ monitors is insufficient for indicating the concentrations of other pollutants.