

Mémoire

Auteur : Signorato, Estelle

Promoteur(s) : Romain, Anne-Claude; Falzone, Claudia

Faculté : Faculté des Sciences

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

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13180>

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.

Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Année académique 2020-2021

Paramétrage d'une méthodologie pour l'étude de l'impact de murs végétaux in situ



Mémoire présenté par Estelle Signorato

en vue de l'obtention du grade de Master en Sciences et gestion de l'environnement – finalité Monitoring
environnemental

Rédigé sous la direction de Claudia Falzone et Anne-Claude Romain

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier Claudia Falzone, ma promotrice, pour sa disponibilité et sa bienveillance tout au long du mémoire.

Je voudrais également remercier Anne-Claude Romain, co-promotrice et titulaire principale de la finalité *Monitoring environnemental*, pour son dynamisme, son implication et son écoute tout au long de mes études.

Un merci particulier à l'équipe SAM pour tous leurs conseils précieux dans la rédaction de mon travail.

J'adresse également mes remerciements à Madame Morne et Madame Sfretz pour leur réactivité quant à la fourniture d'informations précieuses

Merci à Malika Pailhès, Francis Schwall et Ralph Baden pour leurs aide précieuse.

Enfin, un merci particulier à toute ma famille pour leur aide précieuse, leur soutien pendant mes études et leurs nombreuses relectures.

Table des matières

Introduction	6
Partie 1	8
1. La qualité de l'air intérieur.....	8
1.1. Impact sur la santé.....	9
1.2. Matériaux de construction	11
1.2.1. Murs et plafonds.....	11
1.2.2. Sol	11
1.3. Température et humidité relative.....	11
1.3.1. PMV	12
1.4. Ventilation.....	13
1.4.1. Taux de ventilation.....	13
2. Phytoremédiation	13
2.1. Mécanisme dépolluant des plantes	14
2.2. Histoire de la recherche sur la phytoremédiation	14
2.3. Effets adverses	15
2.3.1. COV.....	15
2.3.2. CO ₂	16
2.4. Moisissures.....	16
2.5. Emissions de COV	17
3. Techniques de mesure de la qualité de l'air intérieur.....	17
3.1. Les COV.....	18
3.2. PM _{2.5} /CO/ CO ₂ / Temperature/Humidity/Dew Point	20
3.3. Les aldéhydes	20
3.4. Les moisissures	20
3.5. La désorption thermique et la chromatographie GC/MS.....	21
4. Projet MAI	22
Partie 2	23
1. Description du site.....	23
1.1. Contexte extérieur	23
1.2. Contexte intérieur.....	24
1.2.1 Matériaux	25
1.2.2. Ventilation et chauffage	27
1.2.3. Entretien	27
1.3. Les salles de prélèvement.....	28
1.3.1. Etage +1	28
1.3.2. Etage +2.....	29
1.3.3. Etage +3.....	31
1.3.4. Extérieur	32



2. Murs végétaux.....	32
3. Métrologie.....	36
3.1. Polluants considérés	36
3.2. Instruments utilisés.....	36
3.3. ICP	37
4. Campagne de mesure	37
4.1. Points de prélèvement	37
4.2. Les prélèvements.....	40
4.3. L'analyse des résultats	47
5. Questionnaire de bien-être	47
Partie 3	48
1. Résultats	48
1.1. Les prélèvements.....	48
1.1.1. Les polluants détectés par le GC/MS	48
1.1.2. Concentrations en PM.....	48
1.2. Questionnaire de bien-être et PMV	49
2. Discussion	50
2.1. Choix méthodologique	50
2.1.1. Prélèvements	50
2.1.2. Questionnaire de bien-être.....	51
2.2. Qualité de l'air intérieur	51
2.2.1. COV en temps réel	51
2.2.2. PM.....	53
2.2.3. Alternatives	53
2.3. Bien-être	54
Conclusion.....	56
Bibliographie	58
Annexes.....	64
Annexe 1 : Temps de prélèvement tubes Radiello®.....	64
Annexe 2 : Volume de perçage.....	66
Annexe 3 : Nombre de jours de dépassement pour l'ozone	66
Annexe 4 : Concentrations annuelles en SO ₂	67
Annexe 5 : Concentrations en PM _{2,5} -PM ₁₀	68
Annexe 6 : Plans de l'Administration	69
Annexe 7 : Ventilation au 2 ^{ième} étage.....	72
Annexe 8 : Ventilation au 3 ^{ième} étage.....	73
Annexe 9 : Evolution des 5 murs végétaux au fil des semaines	74
Annexe 10 : Emplacements des ICP DAS	77
Annexe 11 : Ebauche de questionnaire de bien-être	80
Annexe 12 : Polluants détectés par le GC/MS (par dates et par pièces)	83

Annexe 13 : Chromatogrammes des échantillons réalisés à l'Administration communale de Wiltz.....	86
--	----

Table des figures

Figure 1: Tube radiello® (Sigmaaldrich).....	18
Figure 2: Cartouches type Tenax® (Sigmaaldrich).....	19
Figure 3: ICP DAS CL-200 series.....	20
Figure 4: Cartouche DNPH.....	20
Figure 5: Moisissures en croissance dans une boîte de Petri contenant un milieu gélosé (Michel Legris – inspq.qc.ca)	20
Figure 6: Plan schématique d'un GC/MS	21
Figure 7: Administration communale de Wiltz	23
Figure 8: Commune de Wiltz	23
Figure 9: Répartition des stations de mesure fixes pour le NO ₂	24
Figure 10: Matériaux de construction de l'Administration communale de Wiltz.....	25
Figure 11: Moquette master®	26
Figure 12: Profil élargi de la moquette Desso Airmaster	26
Figure 13: Concentrations de poussières fines sol dur- moquette Airmaster et moquette standard (Tests GUI) ..	26
Figure 14: Radiateur à vannes thermostatiques.....	27
Figure 15: Couloir mur végétal - Etage 1 + cage d'escalier	28
Figure 16: Côté gauche de la cage d'escalier et côté droit de la cage d'escalier - rez-de-chaussée	29
Figure 17: Couloir du mur avec guichet – 2 ^{ième} étage	30
Figure 18: Hall adjacent au couloir du mur végétal- 2 ^{ième} étage	30
Figure 19: Verrière- vue ouest à gauche et vue est à droite - 3 ^{ième} étage	31
Figure 20: Matériau en jeans Recyclés	31
Figure 21: Salle de réunion - 3 ^{ième} étage	31
Figure 22: Lieu de prélèvement extérieur - façade arrière de l'Administration Communale	32
Figure 23: Sphaigne	32
Figure 24: Coupe latérale d'un mur végétal intérieur avec substrat sphaigne	33
Figure 25: Murs végétaux de l'Administration communale de Wiltz.....	34
Figure 26: Espèces de plantes utilisées sur les murs végétaux	35
Figure 27: Polluants considérés.....	36
Figure 28: Instruments utilisés lors de la campagne de mesure	36
Figure 29: Points de prélèvement- Etage 1	38
Figure 30: Points de prélèvements- Etage 2.....	39
Figure 31: Points de prélèvement- Etage 3	40
Figure 32: Chromatogrammes du mur végétal- 2 ^{ième} étage- 28/06- Zoom RT 31.68	52
Figure 33: Chromatogramme du prélèvement du 28/06 au 2 ^{ième} étage - Mur végétal. Zoom sur le RT 29.82 ...	54

Table des tableaux

Tableau 1: Polluants et valeurs d'exposition (Goodsite et al., s. d.)	9
Tableau 2: Polluants intérieurs, sources et effets sur la santé	10
Tableau 3: Récapitulatif des COV émis par l'environnement intérieur et par les plantes	17
Tableau 4: Tableau récapitulatif des prélèvements	46
Tableau 5: Concentrations en PM ₁ , PM _{2,5} et PM ₁₀ en µg/m ³	49

Introduction

« L'air pur trouve sa voie vers celui qui sait le respirer »

Ce n'est plus un secret pour personne : l'air que l'on respire chaque jour est pollué. On associe généralement la pollution à la Révolution industrielle et à tout ce qui s'en suit. Certes, mais pas que. La pollution de l'air n'est pas du tout un phénomène récent. Au temps des Romains, par exemple, des activités minières semblent avoir créé une pollution aux métaux. Des analyses au Carbone 14 réalisées dans le Massif du Mont Blanc ont pu mettre en évidence une pollution au plomb ou à l'antimoine, témoignage de la production de plomb ou d'argent¹(Susanne Preunkert et al., 2019). Sénèque, à la même époque, se plaignait de l'air pollué de Rome ; plus tard, la royauté londonienne interdit l'utilisation de charbon ; un édit de Charles VI les émissions de fumées « nauséabondes et malodorantes » ; fin 17^{ième}, un écrivain anglais, publie un traité sur la pollution de l'air², etc. (environnement.wallonie, 1998; FONTAN, 2020). Enfin, la Révolution industrielle démarre et tout s'accélère.

Au fil du temps, la pollution devient un problème public majeur. Les événements de pollution de l'air font l'objet d'une attention particulière : le smog et les fumées noires, les phénomènes d'inversion thermique ou encore les accidents industriels tels que Seveso. A la fin du 20^{ième}, une prise de conscience accrue permet d'initier une réglementation assurant un air plus sain afin de restreindre les effets néfastes sur la santé.

L'Homme a de tout temps cherché à s'abriter pour se protéger de l'environnement naturellement hostile dans lequel il vivait. On considère d'ailleurs que l'Homme, devenant de plus en plus sédentaire, passe environ 90% de son temps dans un environnement bâti. Il n'est dès lors pas étonnant que la qualité de l'air intérieur, longtemps occultée par la mauvaise qualité de l'air ambiant, fasse reparler d'elle aujourd'hui. Dès les années 60, des premières études tendent à montrer les effets respiratoires nocifs causés par la cigarette. Dans les années 70, les impacts du dioxyde d'azote, du formaldéhyde ou encore du radon commencent également à être mis en avant.

Bien qu'encore très peu médiatisée, la qualité de l'air intérieur prend aujourd'hui de l'importance.

La réglementation, si mince soit elle s'appuie sur des recommandations. Or, les effets d'un mauvais air intérieur ne sont plus à démontrer. Nos habitudes de consommation, nos activités, les matériaux que l'on choisit pour sa maison, les produits de nettoyage, tout ce qui nous entoure émet des polluants. Les COV, les particules, le formaldéhyde, les HAP, etc. nous sommes quotidiennement soumis à un mix de polluants tout aussi nocifs les uns que les autres. Ainsi ont commencé à poindre des techniques de mitigation. Des guides de bonnes pratiques, des normes quant à la ventilation ou l'étanchéité des bâtiments ou quant à l'émissivité des matériaux existent pour assainir l'air intérieur.

En parallèle, se développe tout doucement la mitigation par le végétal. D'abord employée en milieu extérieur et principalement urbain, la végétation est aujourd'hui étudiée pour purifier l'air et diminuer les émissions de polluants. En ville, les murs végétaux sont surtout utilisés pour leur qualité d'isolation thermique et phonique. En intérieur, ils ont d'abord été conçus dans un but esthétique. Les premières études de phytoremédiation se focalisent donc dans un premier temps sur les plantes en pot. Au vu du développement des murs végétaux au sein des bâtiments, les chercheurs ont élargi leurs champs de recherches aux murs végétaux. Le problème principal est que ces études prennent place en laboratoire, dans des chambres où toutes les conditions ambiantes sont contrôlées. On est donc loin des conditions réelles et fluctuantes. En conséquence, même si des études montrent des effets positifs des plantes sur les concentrations en polluants, il n'en reste pas moins que les résultats sont difficilement applicables à des bâtiments en conditions ambiantes. La recherche doit donc s'orienter vers des études *in-situ* pour vérifier si les murs végétaux, outre leurs impacts sur le bien-être moral et le visuel, peuvent réellement assainir l'air intérieur. Ce mémoire et le projet dans lequel il s'inscrit sont une étude parmi d'autres visant à étudier l'impact de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur au sein d'une Administration Communale.

¹ Pour plus d'informations, consulter l'article suivant: Lead and antimony in basal ice from Col du Dome (French 1 Alps) dated with radiocarbon: A record of pollution during Antiquity. Susanne Preunkert, Joseph R. McConnell, Helene Hoffmann, Michel Legrand, Andrew Wilson, Sabine Eckhardt, Andreas Stohl, Nathan Chellman, Monica Arienzo, Ronny Friedrich, *Geophysical Research Letters*, 7 mai 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL082641>

² John Evelyn- Fumifugium



La première partie n'aura d'autres objectifs que de fournir au lecteur toutes les informations nécessaires pour comprendre la qualité de l'air intérieur et les impacts sur la santé ainsi que le fonctionnement des murs végétaux et de la phytoremédiation. Une description des techniques de mesure employées pour monitorer l'air intérieur clôturera cette partie.

La partie 2 est un matériel et méthode, permettant de fixer le contexte précis de l'étude en cours : description du site (extérieur et intérieur), installation des murs végétaux, campagne de mesure. Cette partie sera également l'occasion de présenter le contexte du projet dans lequel ce mémoire s'inscrit.

Enfin, la partie 3 se concentrera sur les résultats et les ajustements envisageables pour la suite de l'étude.

Avant d'en arriver là, commençons d'abord par nous plonger dans l'univers des polluants émis dans nos bâtiments.



Partie 1

Pour commencer, je vais explorer tout élément qui, en rapport avec la qualité de l'air intérieur ou les murs végétaux, permet une compréhension plus aisée de la problématique.

Plus concrètement, il s'agit de comprendre de quoi découle la qualité de l'air intérieur, ce qui l'influence et quelles sont les implications positives ou négatives sur la santé humaine. Quant aux murs végétaux, il s'agit de comprendre quel est le lien entre les polluants et les plantes et comment les uns peuvent interagir sur les autres.

Enfin, je placerai ce mémoire dans son contexte et dans le projet dans lequel il s'inscrit.

1. La qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air intérieur est un enjeu très important. On estime en effet que l'on passe entre 80 et 90% de notre temps en intérieur. Nos bâtiments, principalement clos et de plus en plus isolés, favorisent l'accumulation de substances. Il en résulte donc que l'air que l'on respire a des conséquences non négligeables sur la santé et le bien-être des occupants. Il semble même que la qualité de l'air intérieur ambiant se soit détériorée ces dernières années. On remarque par ailleurs un manque important de surveillance (Suarez-Caceres et al., 2021). Or, il est admis que la qualité de l'air peut avoir une influence sur la productivité et la performance ainsi que sur le bien-être et la santé des occupants (Armijos Moya et al., 2019).

La première cause de dégradation de l'air ambiant intérieur sont les contaminants chimiques, d'origine naturelle ou anthropique. Ils sont nombreux et proviennent de sources variées. On peut citer : le monoxyde de carbone (CO) provenant généralement d'installations de chauffage vétustes ou mal entretenues, les métaux que l'on retrouve notamment dans des peintures ou des fongicides ainsi que les particules (PM) émises par les activités de combustion (bougies, feu, cuisine etc.) ou la cigarette. Le contribuant majeur reste toutefois les composés organiques volatiles (COV). Ces composés, très diversifiés peuvent provenir de la peinture, des solvants, des isolants, des bougies, des produits de nettoyage, des activités de combustion etc. Ils incluent notamment le formaldéhyde, utilisé dans les colles, les solvants de polymérisation, les désinfectants ou les peintures, mais aussi les hydrocarbures aromatiques principalement émis par les activités de combustion. Ceux-ci regroupent entre autres, le benzène, molécule mutagène et cancérigène, les HAP (hydrocarbures aromatiques polycyclique) dont le naphthalène qui est potentiellement cancérigène ou encore le benzo- α -pyrène, composé de la fumée de cigarette qui est très cancérigène. D'autres COV préoccupants sont aussi présents dans l'air intérieur comme les phtalates que l'on retrouve dans les plastifiants, les colles ou les parfums, ou encore le phénol également présent dans les plastifiants, les isolants, les cosmétiques ou les adhésifs. Une étude a montré qu'avec ou sans plantes, la concentration de COV totaux était plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur suggérant que beaucoup de COV sont émis par les matériaux, meubles et nos modes de vie (Wood et al., 2006).

Outre les polluants chimiques on peut aussi retrouver des polluants physiques comme le radon, un gaz radioactif naturel.

Enfin, il existe des polluants biologiques tels que les moisissures qui sont également très problématiques dans la qualité de l'air intérieur. Les moisissures sont des champignons visibles à l'œil nu dont les différents constituants ne sont visibles que par une analyse au microscope. Ces micro-organismes produisent des spores, des mycotoxines et des COV microbiens (MVOC). Ces champignons se développent principalement dans les endroits humides (entre 70 et 90% d'humidité relative), sombres et mal ventilés, dans une gamme de températures comprises entre 5 et 25°C. Ces micro-organismes se nourrissent du milieu dans lequel ils se développent tel que le bois, la colle, la peinture, le PVC, etc. Les plantes sont également un support propice à leur développement. Elles peuvent de ce fait être représentatives d'un problème d'humidité dans le bâtiment ou de mauvaise ventilation. Les moisissures libèrent leurs spores que l'on retrouve alors en suspension dans l'air.

La pollution interne peut aussi provenir des occupants eux-mêmes, de la ventilation, du mobilier, des matériaux de construction ou encore de l'air extérieur. En effet, entre 20 et 100% de la pollution extérieure pénètrent le bâtiment par le biais d'ouverture de porte ou fenêtre mais également par le manque d'étanchéité de certains bâtiments. Ainsi, la combinaison des émissions externes et internes induit que l'exposition à la pollution intérieure est supérieure à celle de l'air extérieur (Pettit et al., 2017).

Plus spécifiquement, dans les locaux de travail on peut considérer 6 groupes de facteurs pouvant influencer la qualité de l'air intérieur :

- La ventilation, soit la quantité d'air neuf apporté dans la pièce par personne ;
- La pollution par les personnes, par la respiration ou les parfums par exemple ;
- La pollution des matériaux et appareils (photocopieurs e.g.) ;
- La pollution produite par l'entretien des locaux ;
- La pollution provenant du système de ventilation ou de chauffage ;
- La qualité de l'alimentation en air neuf extérieur (Service public fédéral Emploi, Travail et concertation sociale, 2019).

1.1. Impact sur la santé

La qualité de l'air intérieur est de plus en plus considérée comme un enjeu majeur de santé publique. Au vu du temps considérable que l'on passe dans les espaces intérieurs, la qualité de l'air intérieur a, depuis quelques décennies, pris une place considérable dans les débats scientifiques et politiques. On ne peut aujourd'hui plus nier que celle-ci a un impact majeur sur la santé et le bien-être des populations. Les impacts sont d'ailleurs, pour beaucoup de personnes, bien plus importants que ceux de la qualité de l'air extérieur. Comme souvent, les enfants, les personnes âgées ou les personnes sensibles constituent des groupes vulnérables.

Les effets sur la santé sont vastes : asthmes, maladies respiratoires, allergies, cancers, problèmes cardiovasculaires etc. Malheureusement, vu le nombre important de polluants différents, il est souvent difficile de faire le lien direct avec un problème de santé. De plus, on est rarement exposé à un seul composé mais à un mélange de polluants. Les substances chimiques peuvent ainsi réagir entre elles, voire s'accumuler.

Les effets peuvent survenir au moment de l'exposition ou même des années après, suite à une exposition chronique. Les effets immédiats concernent des irritations des yeux et des muqueuses, des maux de tête, de la fatigue ou des vertiges par exemple. Beaucoup de ces symptômes sont similaires à des symptômes viraux, ce qui rend difficile le diagnostic d'une mauvaise qualité de l'air intérieur. Des effets à plus long terme peuvent engendrer des maladies respiratoires, cardio-vasculaires ou même des cancers (US EPA, 2014).

Le Tableau 1 montre les valeurs limites d'exposition. On retrouve, dans le Tableau 2 les effets que peuvent avoir les principaux polluants intérieurs sur la santé.

Pollutant	Exposure limit	Exposure limit	Explosion limit (% v/v)	Reference
PM _{2.5}	1 year	25 µg/m ³		EC ^a
PM ₁₀	24 h	50 µg/m ³		EC ^a
	1 year	40 µg/m ³		
SO ₂	1 h	134 ppb		EC ^a
	24 h	48 ppb		
NO ₂	1 h	106 ppb		EC ^a
	1 year	21 ppb		
CO	8 h	0.0087 ppb	12.5–74 [21]	EC ^a
O ₃	8 h	61 ppb		EC ^a
H ₂ S	8 h	5 ppm	4.3–4.6 [4]	EC ^b
CO ₂	24 h	1000 ppm ^c		BR ^d
CH ₄	8 h	1000 ppm	4.5–15 [4]	NIOSH ^e
N ₂ O	8 h	25 ppm		NIOSH ^e
As	1 year	0.002 ppb		EC ^a
Cd	1 year	0.001 ppb		EC ^a
Ni	1 year	0.008 ppb		EC ^a
Pb	1 year	5 ppb		EC ^a
Formaldehyde, CH ₂ O	8 h	40 ppb	7.0–73 [4]	WHO ^b
	1 h	100 ppb		
Toluene, C ₇ H ₈	24 h	0.6 ppm		WHO ^b
	8 h	4.0 ppm		
Naphthalene, C ₁₀ H ₈	24 h	1.9 ppb		WHO ^b
Benzene, C ₆ H ₆	1 year	1.6 ppb		EC ^a

^aEuropean Commission [22, 23]

^bWorld Health Organization [24, 108]

^cNote that CO₂ itself is not hazardous at these levels, but rather it is used as an indicator of poor ventilation

^dByggningsreglementet, the Danish Building Code, Denmark [25]

^eThe National Institute for Occupational Safety and Health, USA [21]

Tableau 1: Polluants et valeurs d'exposition (Goodsite et al., s. d.)

	Sources principales	Effets
CO	➤ Poêle à bois ➤ Cigarette	➤ Maux de tête ➤ Vertiges ➤ Asphyxie ➤ Intoxication ➤ Mort
Phtalates	➤ Plastifiant ➤ Colle ➤ Parfum	➤ Perturbateur endocrinien ➤ Possiblement cancérigène
Formaldéhyde	➤ Colle ➤ Adhésif ➤ Peinture ➤ Bougie ➤ Cigarette	➤ Allergie/asthme ➤ Irritation des muqueuses ➤ Troubles de la concentration/ pertes de mémoire
Phénol	➤ Plastifiant ➤ Adhésif ➤ Papier ➤ Cosmétique ➤ Durcisseur	➤ Brûlures ➤ Effets sur le système nerveux central ➤ Maux de tête
PM	➤ Chauffage ➤ Cuisson ➤ Cigarette	➤ Crise cardiaque ➤ Asthme ➤ Maladie cardiovasculaire ➤ Maladie respiratoire
HAP	➤ Poêle à bois ➤ Bougie ➤ Alimentation ➤ Peinture ➤ Colle	➤ Lésions des voies respiratoires ➤ Benzo-a-pyrène est un cancérigène avéré ➤ 3 HAP cancérigènes
Benzène	➤ Produits ménagers ➤ Colle ➤ Peinture	➤ Cancérigène ➤ Mutagène ➤ Troubles digestifs ➤ Irritation de la peau
Toluène/Xylène	➤ Peinture ➤ Adhésif ➤ Produits	➤ Irritation des yeux, du nez et de la gorge ➤ Maux de tête ➤ Sensation d'ivresse

Tableau 2: Polluants intérieurs, sources et effets sur la santé

Les moisissures peuvent quant à elle causer des problèmes respiratoires, des irritations du nez et des yeux, des allergies et de la toux voire même des migraines ou de la fatigue.

1.2. Matériaux de construction

Comme déjà mentionné, les matériaux de construction jouent un rôle très important dans la qualité de l'air. Les colles, les adhésifs, les revêtements, les peintures et presque tous les matériaux émettent des quantités plus ou moins importantes de polluants.

1.2.1. Murs et plafonds

Les **plaques de plâtre**, souvent utilisées dans les bâtiments, ne font pas l'objet d'une déclaration obligatoire de sécurité comme le demande le règlement REACH pour les substances dangereuses (Placo Saint-Gobain, 2014). Néanmoins, le gypse, composant principal du gyproc, est susceptible d'émettre du radon.

Les **peintures** sont quant à elles composées de 4 éléments pouvant, distinctement, émettre des polluants, principalement des COV :

- ✓ Les pigments qui colorent,
- ✓ Les liants qui unissent les différents composants,
- ✓ Les additifs qui améliorent les propriétés des peintures,
- ✓ Les solvants qui assurent la fluidité (CST, 2017).

Les pigments et les liants ont une contribution limitée aux COV. C'est dans les additifs et les solvants que l'on retrouve la contribution la plus importante. On limite toutefois les solvants à l'intérieur. Les pigments peuvent également contenir des métaux lourds. Les additifs, quant à eux, peuvent être très variés : plastifiants, biocides, agents anti-peau, émulsifiants etc. Il existe donc une quantité potentiellement importante d'émissions de COV (CST, 2017).

De manière générale, on retrouve dans les peintures des cétones, des hydrocarbures aromatiques, des aldéhydes, des esters ou encore des phtalates (CST, 2017).

Les peintures minérales sont généralement considérées comme plus écologiques puisqu'elles ne contiennent ni pigments, ni solvants, ni plastifiants. Les liants et les solvants sont en effet naturels (Blanc, 2020; *Peintures, environnement et santé*, 2014). Les enduits colorés, comme l'argile colorée, sont également une bonne alternative aux peintures traditionnelles puisqu'ils ne contiennent pas de solvants (*Peintures, environnement et santé*, 2014).

1.2.2. Sol

Les **moquettes et tapis** sont émettrices de bon nombre de composés chimiques dangereux pour la santé. On y retrouve entre autres, du Bisphénol A, des phtalates, des composés perfluorés, des retardateurs de flammes bromés ou phosphorés, des isocyanates (utilisés dans la fabrication de polyuréthanes) mais aussi des composés organiques volatiles (Changing Markets Foundation, 2018).

Le **parquet en chêne** peut quant à lui émettre plus ou moins de composants selon qu'il soit massif, contreplaqué ou stratifié. Le bois massif est un matériau excellent en termes de qualité de l'air intérieur. Toutefois, les nombreuses colles utilisées pour le collage régulier des plaques de bois en font un matériau émetteur de formaldéhyde ou de terpènes. De plus, les vernis sont susceptibles d'émettre eux aussi des aldéhydes ainsi que des alcanes et du benzène.

1.3. Température et humidité relative

La température et l'humidité ont une influence sur la perception de l'odeur et de ce fait sur la manière dont nous percevons la qualité de l'air intérieur. Selon Fang et al., il y aurait d'ailleurs une relation linéaire entre l'acceptabilité et la température/humidité, celle-ci diminuant lorsque la température/humidité augmente. La durée d'exposition affecte également la perception puisque le corps s'acclimate à la température et à l'humidité ambiante. Selon Gunnarsen et al., la perception serait moins bonne au moment où on rentre dans la pièce. Après quelques minutes, un phénomène d'adaptation la rend plus acceptable. À noter toutefois que cette adaptation est plus importante pour la fumée de tabac mais est moins significative pour les polluants émanant de matériaux de construction (Fang et al., 1998). Une étude réalisée par Peder Wolkoff via un FLEC (Field Laboratory Emission Cell) a néanmoins montré que certaines émissions de COV étaient fortement influencées par la température et/ou l'humidité relative. Les effets les plus flagrants étaient toutefois visibles aux alentours de 60 degrés, température

que n'atteignent pas les milieux intérieurs. De plus, selon la source d'émissions (carpettes, sols, etc.) et selon le type de composés, les effets sont fortement variables (Wolkoff, 1998). Aussi, après plusieurs semaines de ventilation, Wolkoff et Bluyssen et al. ont remarqué que les émissions de COV étaient indépendantes du taux d'humidité et de la température (Fang et al., 1999).

Selon Fang et al., la perception de la qualité de l'air peut d'ailleurs être améliorée simplement en diminuant la température ou le taux d'humidité plutôt qu'en accroissant le taux de ventilation (Fang et al., 1998). Il est d'ailleurs important de noter que puisque la température et l'humidité relative ont un impact sur la qualité de l'air, il est important de prendre en compte ces deux facteurs lors de l'évaluation du besoin en ventilation au sein d'un bâtiment (Fang et al., 1999). Il est néanmoins important de constater que ces considérations ne concernent souvent que la *perception* de la qualité de l'air et non son aspect quantitatif.

A noter que pour assurer un confort hygrothermique aux occupants d'un bâtiment, la température doit idéalement se situer entre 18 et 25°C et l'humidité entre 40 et 65%. En effet, ce confort évite un assèchement des muqueuses ou une suffocation due à un excès d'humidité dans l'air. Un excès d'humidité ou de chaleur peut également accroître la formation de moisissures. Il est donc important, au niveau de la qualité de l'air, de surveiller ces deux paramètres, indépendamment des émissions de polluants.

1.3.1. PMV

Le Predicted Mean Vote (PMV) est l'indice de confort thermique généralement utilisé pour apprécier le confort hygrothermique des occupants. Il s'agit en fait d'un indice de satisfaction des individus vis-à-vis des conditions ambiantes dans lesquelles ils se trouvent. Le confort apparaît lorsque les personnes ne souhaitent avoir ni plus, ni moins chaud. La situation confortable assure des effets moindres sur la santé et sur la performance des individus. Cette appréciation personnelle peut être évaluée via l'indice PMV qui calcule « la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes sur l'échelle de la sensation thermique ». Cette échelle va de +3 (très chaud) à -3 (très froid) 0, étant l'état de ni chaud ni froid (*Indice PMV – PPD de confort thermique*, 2016).

Cet indice est calculé, outre les valeurs de température et d'humidité, via le métabolisme humain, le taux de travail et la tenue vestimentaire. Pour un travail de bureau, on considère une valeur de métabolisme de 100 W/m², un taux de travail de 0 et une tenue de travail ou d'intérieur de 1 clo³.

La formule empirique du PMV, défini par la norme ISO 7730 est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0,303 \exp - 0,036 M + 0,028) \\ & [(M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \{5733 - 6,99(M - W) - P_{aH_2O}\} \\ & - 0,42 \{(M - W) - 58,15\} - 1,7 \times 10^{-5} M (5867 - P_{aH_2O}) \\ & - 0,0014 M (34 - T_a) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} (T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) \\ & - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)] \end{aligned}$$

Avec M, la dépense énergétique (activité) en W ;

W, le travail fourni à l'extérieur de l'organisme en W ;

P_{aH₂O}, la pression partielle de vapeur d'eau ambiante en kPa ;

T_a, la température de l'air en °C ou en K ;

f_{cl}, le rapport de la surface externe d'échange de l'Homme vêtu sur celle de l'Homme nu ;

T_{cl}, température de la surface externe du vêtement en °C ou K ;

T_r, la température moyenne de rayonnement du milieu environnant en °C ou K ;

H_c, le coefficient d'échange de chaleur par convection en m² K/W (Candas, 2000).

Toutefois, vu la complexité de la formule et le manque d'équipement de mesure adapté pour disposer de toutes les valeurs nécessaires, le PMV sera calculé en ligne via le lien suivant : https://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html.

³ Unité considérée dans le PMV et qui correspond à l'isolation thermique due aux vêtements (clothing).

1.4. Ventilation

La ventilation est l'élément clé pour améliorer la qualité de l'air au sein d'un bâtiment. En effet, l'apport régulier d'air neuf permet d'éliminer les polluants présents dans le local. Idéalement, dès qu'une activité a lieu dans un local (bricolage, nettoyage, utilisation de bougies etc.) il est recommandé d'aérer la pièce. Malheureusement, la ventilation est souvent prise à la légère, voire, négligée.

Lorsqu'il s'agit de ventilation mécanique, les débits sont généralement trop faibles pour assurer un bon renouvellement de l'air. L'augmentation des débits de ventilation va souvent de pair avec une diminution de la performance énergétique et une augmentation du coût du bâtiment, c'est pourquoi cette option n'est souvent pas envisagée. Lorsque la ventilation est naturelle, via l'ouverture de fenêtres par exemple, sans système de ventilation mécanique contrôlée, elle est souvent insuffisante. Ce système est d'ailleurs interdit depuis 1969 dans les bâtiments neufs. Celui-ci n'est pas régulier et ne permet pas de contrôler l'air neuf effectivement apporté. De plus, à cause du froid ou de la gêne sonore, les utilisateurs ont tendance à laisser les fenêtres fermées (*Quels sont les différents systèmes de ventilation ?*, s. d.).

L'installation pose aussi parfois des problèmes. En effet, l'air extérieur, pompé pour alimenter le système peut aussi être contaminé. La présence proche d'une industrie, de rejets de pots d'échappement, de conteneurs à déchets, etc. peut amener des polluants via l'air insufflé. Plus techniquement, si les gaines ont été mal placées, si elles sont composées de nombreux coudes ou enroulées par exemple, cela va diminuer l'efficacité du système de ventilation.

Enfin, un autre problème majeur reste l'entretien ou plutôt le mauvais entretien des installations. L'Observatoire français de la qualité de l'air intérieur (Oqai) souligne d'ailleurs que cela n'a « aucun sens de mesurer la qualité de l'air intérieur si les installations de ventilation ne sont pas correctement entretenues ». Le manque d'entretien peut amener un encrassement des conduits amenant une perte de charge et donc à des débits encore plus faibles ou bien à la création d'une nouvelle source de polluants au sein même des conduits. Un nettoyage annuel est d'ailleurs recommandé par la Fédération française du bâtiment pour toute installation de ventilation (FFB, 2018). Les systèmes mécaniques et spécifiquement double flux sont généralement composés de filtres permettant la récupération d'un certain nombre de polluants comme les particules ou les poussières par le système de ventilation. Là encore, l'efficacité dépend de l'entretien et du renouvellement régulier des filtres.

1.4.1. Taux de ventilation

Bien souvent, la ventilation mécanique est trop faible puisqu'elle utilise un taux de renouvellement d'air minimum basé sur le nombre d'occupants sans tenir compte des sources de polluants (Armijos Moya et al., 2019). En effet, le *reference minimum ventilation rate* est de 15m³/h par personne. Ce taux n'est suffisant que si on ne considère que le CO₂ comme polluant. Or, nous l'avons vu, en air intérieur, les polluants peuvent être nombreux. Pour être relativement efficace et assurer une qualité d'air moyenne, le taux de renouvellement devrait être de 45m³/h par personne, soit 3 fois plus que le minimum obligatoire. Si on veut encore pousser et assurer une très bonne qualité de l'air intérieur, ce taux devrait grimper à 70m³/h par personne.

On le voit donc, une solution pratique à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments serait d'augmenter la ventilation. Or, cette augmentation entraînerait une augmentation de la consommation d'énergie du bâtiment, ce qui est, à l'aube du développement durable, à proscrire. La phytoremédiation est de ce fait parfois proposée comme une solution éco-friendly (Han & Ruan, 2020).

2. Phytoremédiation

Au vu de ces considérations, il y a, depuis plusieurs années, un élan de recherches visant à améliorer la qualité de l'air intérieur. De l'aération à la ventilation, en passant par des réglementations sur les matériaux de construction, on passe petit à petit au crible fin les solutions disponibles. Dans cette lignée, il existe à présent des recherches axées sur le pouvoir dépolluant des plantes. Ce sujet est pourtant toujours débattu et il ne semble pas y avoir de consensus ou de preuves probantes que les plantes peuvent effectivement assainir l'air de nos maisons.

2.1. Mécanisme dépolluant des plantes

La biofiltration peut se faire via le substrat ou via les plantes elles-mêmes. L'air de la pièce est aspiré par le substrat végétal, généralement riche en micro-organismes, où il est dépollué. Les micro-organismes jouent d'ailleurs un rôle très important dans l'élimination des polluants, notamment dans l'élimination des COV. L'air intérieur, biofiltré est ensuite restitué dans l'espace (Irga et al., 2017). Les polluants sont en majorité dégradés sous forme d'eau et de CO₂ (APPA Nord-Pas de Calais, 2010). D'autres plantes épurent par absorption sur leurs feuilles, les stomates ou par sorption sur les milieux de croissance (Suarez-Caceres et al., 2021). En effet, la plupart des plantes respirent par leurs stomates et c'est lors de ce processus qu'elles peuvent absorber les polluants (Song et al., 2007). Plus une plante respire, plus son taux d'élimination est important (Gong et al., 2019). Ce processus concerne majoritairement les polluants gazeux qu'ils soient organiques ou non mais pas les métaux, les poussières ou les radiations (APPA Nord-Pas de Calais, 2010).

L'efficacité de la biofiltration de l'air par les plantes semble dépendre de nombreux facteurs environnants. C'est le cas notamment de la luminosité qui est un facteur important. Des études attestent une plus grande efficacité de la dépollution par les plantes en journée et en zone ensoleillée que de nuit et à l'ombre (Song et al., 2007). Cela s'explique notamment par l'ouverture des stomates en journée, à l'inverse de la nuit. On sait aussi par exemple que le stress hydrique a un impact négatif sur la phytoremédiation (Gong et al., 2019). Néanmoins, on ne connaît pas encore tous les mécanismes ou facteurs qui peuvent affecter positivement ou négativement la capacité épuratrice des plantes.

2.2. Histoire de la recherche sur la phytoremédiation

La NASA, dans les années 1980, a été la première à se pencher sur la question de la réduction de la pollution de l'air intérieur par des plantes (Jeong-Eun Song et al., 2011). Les scientifiques (dont les travaux de Wolverton servent de référence) ont en effet découvert, via l'analyse d'un chromatographe en phase gazeuse, la présence de plus de 300 COV dans un vaisseau, alertant sur la dangerosité de la qualité de l'air intérieur pour la santé (Jeong-Eun Song et al., 2011). Wolverton a ainsi étudié la capacité d'épuration d'une cinquantaine de plantes via les feuilles (APPA Nord-Pas de Calais, 2010). Toutefois, ces travaux initiaux manquent de validation scientifique. L'effet quantitatif n'a d'ailleurs pas encore été prouvé scientifiquement. Les conclusions sont partiellement vérifiées, montrant que les plantes peuvent notamment éliminer certains COV, mais les études menées sont expérimentales. Les conditions en chambre sont donc incompatibles avec les conditions réelles, leur volume étant par exemple bien inférieur aux volumes des habitations dans la vraie vie. De plus, les paramètres en chambre sont tout à fait ou fortement contrôlés alors que les conditions réelles évoluent sans cesse. Sans compter que les bâtiments ont une capacité d'échange important avec l'air extérieur, pouvant modifier les concentrations en polluants. Ce paramètre est omis dans les chambres (E. Cummings & S. Waring, 2020).

Deux chercheurs de l'Université de Taiwan ont réalisé une revue dans laquelle ils regroupent des études empiriques déjà menées sur l'effet des plantes sur la qualité de l'air. Leur objectif était de synthétiser les données afin d'obtenir une vision plus claire de la situation. Il est intéressant de noter que sur 2883 études prises en compte, seules 18% menaient à des expérimentations sur terrain, en conditions réelles (Han & Ruan, 2020). Cette revue systématique montre d'autant plus l'importance de confirmer les expériences labo en situations réelles.

Les recherches se poursuivent néanmoins. C'est le cas en France par exemple, où différents partenaires se sont associés et ont créé en 2004 le programme de recherche PHYTAIR dans le but de poursuivre les travaux sur la capacité épurative des plantes concernant trois polluants : le benzène, le formaldéhyde et le monoxyde de carbone. Il en est ressorti des capacités d'épuration variables selon le polluant et les concentrations initiales. Ils ont, après avoir fait des tests en laboratoire et en enceinte, commencé les recherches en conditions réelles. Il en est ressorti que l'efficacité des plantes quant à la diminution des polluants n'était pas mise en évidence et pas probante (Cuny et al., 2012). Les études menées par Wood et al. dans des maisons n'ont pas non plus pu montrer de réduction significative de COV par les plantes puisque les concentrations étaient trop faibles (Gong et al., 2019).

Les recherches en laboratoire et en chambre d'essai continuent également, démontrant la capacité des plantes à réduire les polluants suivant des conditions expérimentales spécifiques et contrôlées. Les taux de réduction sont extrêmement variables d'un cas à l'autre, rendant difficile un consensus scientifique clair. De plus, beaucoup d'études se focalisent sur les COV et peu analysent le taux de réduction d'autres polluants tels que les PM par exemple (Pettit et al., 2017).

Suite aux plantes dépolluantes en pots, a fleuri le concept de « murs vivants » en milieu intérieur, implantés dans les locaux d'entreprises ou les maisons. Ce type de murs étaient au départ destiné aux milieux extérieurs, fleurissant par exemple sur les façades des murs. Le marché des murs végétaux intérieurs est d'ailleurs en expansion. Ceux-ci, visuellement appréciables, sont aussi conçus dans un objectif d'amélioration de la qualité de l'air intérieur.

2.3. Effets adverses

2.3.1. COV

Plusieurs effets adverses peuvent néanmoins survenir. En effet, toutes les plantes ou tissus végétaux émettent des composés organiques volatiles. D'ailleurs, la plupart des COV émis dans l'atmosphère proviennent de la végétation elle-même. Ces émissions ont d'ailleurs un impact important sur le climat. Les isoprènes, COV principal émis par les plantes, contribuent au relargage dans l'atmosphère de près de 600 millions de tonnes de carbone chaque année, davantage que les émissions combinées émises par les sources de méthane (Materić et al., 2015).

Globalement, toutes les plantes émettent donc des composés organiques volatiles photogéniques tels que des alcanes, des alcènes, des aldéhydes, des acides carboxyliques etc. Certaines plantes émettent aussi des terpènes volatiles qui repoussent et donc les protègent de certains animaux ou permettent d'attirer les insectes pour la pollinisation (Stapleton & Ruiz-Rudolph, 2018). Ces émissions sont le fruit d'interactions écologiques complexes des plantes avec des facteurs abiotiques ou biotiques. L'émission de COV peut ainsi permettre de se défendre contre les insectes, d'attirer les pollinisateurs, de communiquer ou encore de permettre une tolérance thermique (Vivaldo et al., 2017). L'objectif principal de ces émissions semble donc être la défense ou la protection contre des agressions diverses ou conditions extrêmes (Penuelas & Llusia, 2004). L'interaction des polluants avec les plantes peut également créer des changements de comportements et peut modifier les réponses psychologiques des plantes (Armijos Moya et al., 2019).

Les COV principaux émis par les plantes sont généralement les suivants :

- ✓ Les terpènes majoritairement dont des monoterpènes, diterpènes, tétraterpènes etc.
- ✓ Les *green leaf volatiles* (GLV) composés de 6 carbones, et qui incluent des alcools, des esters ou des aldéhydes (Kegge et al., 2013).

Les plantes ornementales et plantes d'intérieur peuvent également émettre des COV. Une étude publiée dans la revue HortSciences de la société américaine pour la science horticole a montré qu'une grande quantité de COV pouvait être émise par les plantes d'intérieur. Quatre espèces (*Spathiphyllum wallissi* Regel, *Sansevieria trifasciata* Prain, *Ficus Benjamina* L. et *Chrysalydocarpus lutescens* Wendl.) ont ainsi montré des émissions de terpènes, d'alcool, de cétones et d'esters, soit, les mêmes familles que les plantes extérieures. Les terpènes sont globalement la famille de COV la plus émise par ces plantes. Les émissions étaient très variables d'une espèce à l'autre et différaient selon le stade de développement de la plante mais des composés tels que le butyl butyrate, le méthyl salicylate ou l'isopropyl myristate étaient émis par les quatre espèces (Yang et al., 2009).

Malheureusement, les COV émis par les plantes sont difficilement mesurables et sont instables (Materić et al., 2015). Ainsi, peu d'études se concentrent sur les niveaux de COV émis directement par les plantes à l'intérieur ; elles analysent globalement le potentiel de réduction des COV par les végétaux (Stapleton & Ruiz-Rudolph, 2018). Quelques publications ont toutefois tenté d'analyser la question. Sik Yank et Kays ont étudié les COV potentiellement émis par des plantes ornementales et ont tiré les conclusions suivantes :

- ✓ Les émissions dépendent du stade de développement de la plante et de l'espèce considérée ;
- ✓ Le taux d'émanation est réduit la nuit, induisant un effet important de la biosynthèse ;
- ✓ Certains COV émis par les plantes ont des propriétés sanitaires intéressantes (c'est par exemple le cas de la curcumine, émis par le curcuma, qui a des propriétés anti-inflammatoires) ;
- ✓ Les micro-organismes sont importants pour l'élimination des polluants mais ils émettent, au même titre que les pots en plastique, des COV (Yang et al., 2009).

Une autre étude suggère également qu'une augmentation de température ou un stress peut influencer les émissions de COV des plantes (Stapleton & Ruiz-Rudolph, 2018).

D'autres scientifiques comme Niinemets et ses collègues ont, quant à eux, émis l'hypothèse que les taux d'émissions de COV par les plantes n'étaient pas dus aux mécanismes physiologiques des plantes tels que les taux de synthèses mais aux caractéristiques physico-chimiques des composés émis comme la solubilité, la volatilité ou la diffusion. Des différences physico-chimiques expliqueraient ainsi la réduction ou l'augmentation des taux d'émissions. Selon leur hypothèse, les émissions sont inévitables puisque les COV sont volatiles. Il semblerait d'ailleurs que les plantes émettent dans l'atmosphère à peu près 10% du carbone assimilé sous forme de COV, représentant plus de 30 000 composés dont principalement l'isoprène. Ces émissions de composés volatiles végétaux dépasseraient d'ailleurs grandement les émissions anthropologiques à l'échelle mondiale (Penuelas & Llusia, 2004).

De manière générale, il n'existe pas d'études ayant complètement examiné les effets des plantes sur la qualité de l'air intérieur (Han & Ruan, 2020).

2.3.2. CO₂

Le CO₂ est émis naturellement par le métabolisme humain et plus particulièrement lors de la respiration. Il est donc logique de penser que plus on reste dans une pièce sans aération, plus elle sera polluée. Le CO₂ représente environ 0,04% de l'air extérieur ou, 400 ppm⁴. En intérieur, il est émis par les humains mais aussi par les appareils électroniques, les animaux domestiques ou encore par les cigarettes. Il n'est donc pas étonnant que les concentrations de CO₂ soient plus élevées dans les environnements intérieurs. On peut d'ailleurs atteindre des valeurs de 1000 voire 2500 ppm. Des concentrations élevées en CO₂ peuvent entraîner des maux de tête, des palpitations, des vertiges, des troubles visuels ou dans les pires cas, un arrêt de la respiration. Toutefois, le CO₂ n'est généralement pas considéré comme un polluant intérieur en tant que tel mais comme le meilleur indicateur de la pollution de l'air intérieur (Anses, 2016). En effet, sa concentration est directement liée à l'occupation humaine et au renouvellement d'air dans la pièce. Il est dès lors généralement mesuré afin d'évaluer le bon fonctionnement des systèmes de ventilation.

Il n'en reste pas moins que les plantes, qu'elles soient d'intérieur ou non nécessitent une quantité importante de CO₂ pour réaliser la photosynthèse. On considère qu'une concentration aux alentours de 330 ppm de CO₂ est idéale pour assurer la bonne croissance et le bon développement des plantes. En deçà, la santé globale de la plante est menacée (Freddy F, s. d.). Le phénomène de photosynthèse n'a lieu que durant la journée puisqu'il nécessite un apport de lumière. Ainsi, pendant la nuit, la plante continue à respirer mais ne réalise plus la photosynthèse. Elle n'absorbe donc plus de CO₂ mais en rejette. Toutefois, ce dégagement est généralement en faible quantité. Entre la journée et la nuit, le rejet et l'absorption de CO₂ tendent donc à s'équilibrer.

Dans une pièce contenant des murs végétaux, soit une quantité de plantes plus importante que dans une pièce normale, il est toutefois intéressant de surveiller les concentrations en CO₂ afin de surveiller l'évolution du mur au fil du temps. Un dépérissement des plantes peut par exemple être expliqué par une concentration en CO₂ non adaptée à leur bon développement.

2.4. Moisissures

Bien que le marché des murs végétaux dans les espaces fermés soit en croissance, des inquiétudes existent quant aux potentielles émissions fongiques causées par ces murs. Ces derniers pourraient en effet représenter un milieu favorable à la prolifération de bioaérosols (moisissures) (Fleck et al., 2020; Irga et al., 2017). Peu d'études ont réellement exploré la problématique. Les seules existantes sur la question, celles de Darlington et al. (2000) et de Mallany et al. (2002), ont montré que les systèmes étudiés n'entraînaient pas une augmentation des concentrations en bioaérosols (Irga et al., 2017). Irga et al, a, en 2017, complété la connaissance en confirmant que le nombre de colonies étudiées dans ces échantillons était faible. Les murs végétaux ne semblent donc pas générer une quantité de moisissures dans les bâtiments susceptible d'endommager la santé des occupants. Une autre étude réalisée en 2020 montre toutefois dans ses résultats des densités fongiques plus importantes sur les sites avec murs végétaux (actifs ou passifs⁵) que sur les sites de référence bien que les concentrations restent en dessous des valeurs guides de l'OMS. De plus, les espèces de champignons microscopiques observées n'étaient ni pathogènes ou allergisantes, ni dangereuses (Fleck et al., 2020). Il n'en reste toutefois pas moins que la quantité d'études sur la

⁴ Partie par million

⁵ Voir 2. Murs végétaux

question est très faible et qu'il serait intéressant de réaliser d'autres expérimentations pour pouvoir affirmer clairement que les murs végétaux ont ou non un impact sur la création de moisissures.

2.5. Emissions de COV

Le Tableau 3 émet une liste non exhaustive des COV que l'on peut retrouver en air intérieur. Ils sont classés entre les COV spécifiquement émis par les plantes et ceux émis par le reste de l'environnement intérieur, à savoir, les matériaux, les occupants et leurs habitudes etc. Ceci permet de cibler un peu plus l'origine des émissions de COV que l'on peut analyser dans un espace. Cette liste a été établie à partir d'une liste fournie par le SPF Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement et par l'entreprise Picbleu⁶ (Picbleu, 2021; SPF Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement, 2016). Pour les plantes, il est plus difficile d'émettre une liste précise puisque peu d'études analysent le sujet. Les COV présentés ici sont ceux fournis par une étude de Yang et al. portant sur 4 espèces précises. Il ne s'agit donc pas d'une liste générale mais elle fournit une idée de composés pouvant être émis par les plantes (Yang et al., 2009).

COV émis dans l'environnement intérieur	COV émis par les plantes
1,4- dichlorobenzène 1,1,1 – trichloroéthane 1,2,4- triméthylbenzène 1-méthoxy-2-propanol 2-butoxyéthanol 2-éthoxyéthanol 2-éthoxyéthyl acétate 2-éthyl-1-hexanol - alpha-pinène - Benzène - Butyl-acétate - Cyclohexane - Décane - Éthylbenzène - Formaldéhyde - Isopropyl acétate - Isopropylbenzene - Limonène - m/p/a/o-xylene - Naphtalène - Styrène - Tétrachloroéthylène - Trichloroéthylène - Toluène - Undécane	1-hexanol 1-ethyl-3,5-dimethylbenzene 1-tetradecanol 1-octanol 2-nonanone 2-undecanone 2-heptanone 3-hydroxy-2-butanone 3,4-dimethyl-2-hexanone 3,3,5-trimethylcyclohexanol 4-hydroxy-4-methyl-2-pentanone - Butyl butyrate - Copaene - Caryophyllene - D-limonene - Farnesal - Isopropyl Myristate - Linalool - Methyl salicylate - Methyl-4-tert-butylbenzoate - Sesqui rosefuran - Santalol - Tetradecyloxirane

Tableau 3: Récapitulatif des COV émis par l'environnement intérieur et par les plantes

3. Techniques de mesure de la qualité de l'air intérieur

Une analyse de la qualité de l'air nécessite des modes et des types de prélèvements ainsi que des instruments différents selon les besoins de l'étude.

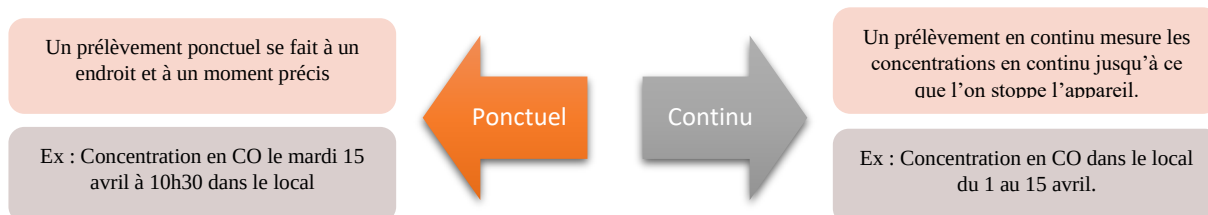
Globalement, on distingue pour l'analyse de l'air, deux modes de prélèvement :

⁶ « www.picbleu.fr a pour activité la gestion d'une plateforme digitale écoresponsable portant à la connaissance des internautes une base de données encyclopédique de l'environnement et de l'habitat durable »



Là où le prélèvement actif sert à une analyse quantitative, le prélèvement passif permet de fournir une tendance moyenne et d'éviter les fluctuations ponctuelles de concentration en polluants. C'est d'ailleurs ce dernier qui est considéré comme la technique de choix pour les mesures en air intérieur.

Ensuite, on distingue deux types de prélèvements :



La qualité de l'air peut être mesurée via de nombreux instruments. Chacun est adapté à une famille ou à un polluant spécifique. Il est de ce fait important de cibler, avant le prélèvement à réaliser, la/les familles de polluants que l'on souhaite analyser. Seuls les instruments utilisés dans le projet MAI seront développés.

3.1. Les COV

Un prélèvement passif des COV peut être réalisé via des **tubes Radiello®** (Figure 1). Ces tubes, laissés plusieurs semaines dans les locaux choisis, permettent d'obtenir une information sur l'ambiance générale moyenne. Ils sont composés d'un corps diffusif radial (surface de diffusion 3D), composé de polypropylène poreux, dans lequel est insérée une cartouche adsorbante (remplie de Tenax® TA). Les analytes peuvent ainsi s'adsorber par diffusion sur le matériau. Ces tubes, de par leur conception radiale, permettent des échantillonnages de l'ordre du ppbv (Sigmaaldrich, s. d.-c). L'air va ainsi se diffuser à travers la membrane du corps diffusif et s'adsorber sur la cartouche adsorbante. La diffusion se fait par un gradient de concentration entre l'extérieur du capteur (zone de forte concentration) et la surface de la cartouche (l'adsorption induit une concentration constante proche de 0 faisant de cette zone la zone de faible concentration) (Marlet et al., 2011). La quantité de molécule piégée dans la cartouche est donc proportionnelle à la concentration de la substance dans l'air (Robin, 2017).

Le tube RAD145 est particulièrement adapté au prélèvement des COV. D'un diamètre de 4,8 mm, il se compose d'un cylindre en acier inoxydable dont les mailles ont une ouverture de 3x8 µm. Il est emballé dans du charbon graphité de 350+- 10 mg (Istituti Clinici Scientifici Maugeri, s. d.).



Figure 1: Tube radiello® (Sigmaaldrich)

Lorsque les particules gazeuses entrent en contact avec l'adsorbant solide, on considère que la masse adsorbée correspond à

$$\frac{x}{m} = k \times C^{\frac{1}{n}}$$

Dont x représente la masse du composé gazeux, m la masse de l'adsorbant, C la concentration du composé gazeux à l'équilibre en phase gazeuse et k et n , des coefficients dépendants de la température et du couple adsorbant-milieu gazeux.

Le rendement de récupération est d'autant meilleur que ces deux coefficients sont petits. Néanmoins, cela compromet l'efficacité de l'échantillonnage puisque les composés fortement adsorbés ne seront pas entièrement récupérés par la désorption. Ce phénomène est expliqué par l'isotherme de Freundlich (Sigmaaldrich, s. d.-b).

Lors de l'adsorption d'un gaz sur un solide, un équilibre se crée entre sa pression et sa quantité effectivement absorbée par unité de solide. Un adsorbat gazeux, souvent considéré comme un gaz parfait, se forme ainsi sur une surface suivant un système considéré comme un équilibre chimique (uqac, 2020). En échantillonnage diffusif, lorsque les températures sont basses, le rapport x/m est presque totalement dépendant de la concentration dans l'air (Sigmaaldrich, s. d.-b).

La concentration moyenne, calculée sur toute la durée du prélèvement est déterminée par cette équation (loi de Fick) :

$$C (\mu g/m^3) = \frac{m (\mu g)}{Q_k (ml/min) \cdot t (min)} \times 1000000$$

Dont m représente la masse de l'analyte, t le temps d'exposition et Q_k le taux d'échantillonnage à une température k (298 K de référence).

Selon le composé à analyser, le temps de prélèvement varie généralement entre 7 et 14 jours (Sigmaaldrich, s. d.-b). Les temps de prélèvements des COV les plus courants sont présentés à l'Annexe 1 : Temps de prélèvement tubes Radiello®.

Ces tubes sont remplacés par des tubes propres après avoir été collectés. Ils sont particulièrement bien adaptés à la désorption thermique, l'analyse GC/MS et présentent de faibles interférences.

Des mesures ponctuelles sont réalisables via des **tubes adsorbants de type Tenax®** (Figure 2). Ils permettent aux molécules d'être piégées sur le matériau absorbant solide pendant toute la durée de l'échantillonnage. Le Tenax est un polymère semi-cristallin macroporeux utile pour échantillonner les COV dans des atmosphères peu concentrées (Maret, 2013). Ces tubes seront analysés au laboratoire ULiège.

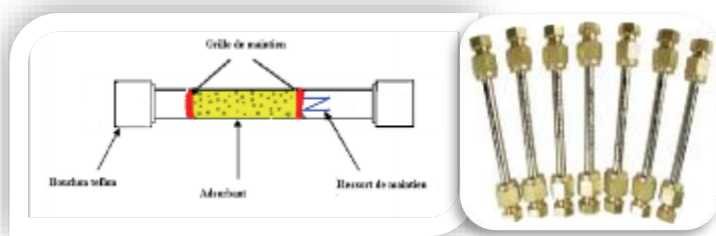


Figure 2: Cartouches type Tenax® (Sigmaaldrich)

La concentration dans l'air peut être calculée via la formule suivante :

$$C = \frac{m}{V}$$

Avec C représentant la concentration massique dans l'air ($\mu g/m^3$), m la masse de l'analyte en μg et V le volume prélevé en m^3 (Maret, 2013).

Afin de s'assurer que la totalité des molécules pompées soit adsorbée sur le support, il est important de surveiller le volume prélevé. En effet, si les polluants saturant la cartouche, ils ne s'adsorberont plus et il ne sera donc plus possible de réaliser une analyse quantitative. Il est dès lors nécessaire de connaître le volume de perçage, c'est-à-dire le volume à partir duquel apparaît ce phénomène de perçage. Il correspond en quelque sorte à une limite d'adsorption (INRS, 2021). Le volume de prélèvement doit généralement être inférieur au volume de perçage. En mettant 2 cartouches en série, on peut vérifier la présence ou non de perçage. En effet, si le 2^{ème} tube est absent de tout composé, il n'y a pas eu de perçage et toutes les molécules ont été adsorbées dans la première cartouche (Maret, 2013). L'Annexe 2 : Volume de perçage, montre le volume de perçage de quelques COV.

Enfin, un capteur **PID** (PhotoIonisation Detector) assure un suivi des COV totaux en temps réel permettant ainsi de suivre la totalité des COV au cours du temps. Ces prélèvements ne sont donc pas destinés à une identification en laboratoire.

Un PID mesure les COV totaux par ionisation. Une lampe UV irradie l'air et ionise les molécules. Des charges vont ainsi être créées, générant un courant électrique entre une cathode et une anode. Celui-ci est proportionnel à la concentration d'ions créés et donc à la concentration en COV.

3.2. PM_{2.5}/CO/ CO₂/ Temperature/Humidity/Dew Point

Tous ces paramètres peuvent être mesurés via un module de surveillance connecté. Ces instruments, tels que les **ICP DAS**, permettent, via une connexion WIFI ou PoE, de consulter les données mesurées en temps réel. Elles sont enregistrées sur réseau et visibles sur un PC ou sur un smartphone.

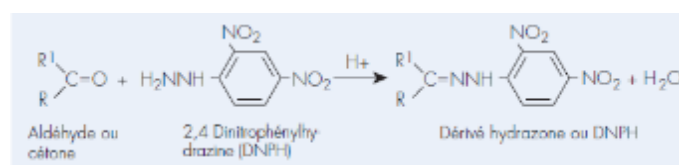
La série CL-200 (Figure 3) est spécifiquement adaptée à la mesure des PM_{2.5}, du CO, du CO₂, de la température, de l'humidité et du point de rosée.



Figure 3: ICP DAS CL-200 series

3.3. Les aldéhydes

Les aldéhydes et carbonyles, dont principalement le formaldéhyde, sont souvent mesurés avec des **cartouches DNPH** (Figure 4). L'air est aspiré via une pompe et entraîné vers les cartouches de DNPH où les carbonyles sont piégés via cette réaction :



(Waters, 2007)

La cartouche en polyéthylène qui contient de la silice et de la 2,4-dinitrophénylhydrazine convertit les composés carbonyles en dérivés hydrazones. Ils sont ensuite élués grâce à de l'acétonitrile avant d'être analysés par chromatographie en phase liquide (HPLC⁷) (Sigmaaldrich, s. d.-a; Waters, 2007).



Figure 4: Cartouche DNPH

3.4. Les moisissures⁸

Les moisissures peuvent être collectées par collage, par frottis ou par impaction. Cette dernière est la méthode choisie dans le cadre du projet MAI. Cette méthode active est celle de référence la plus communément utilisée. Elle permet de quantifier et qualifier les contaminations (Conidair, 2015). À l'aide d'un impacteur, on aspire l'air qui est ensuite « projeté » sur les boîtes de Petri. Ces boîtes rondes en plastique ou en verre permettent de mettre en culture des cellules ou des micro-organismes. On installe dans ces boîtes un milieu de culture (généralement gélosé) permettant aux spores de se développer.

Plus concrètement, la pompe de l'impacteur aspire l'air et passe par un tamis troué (les trous correspondent aux diamètres des spores) pour aller s'impacter sur le milieu nutritif choisi. Les spores vont alors pouvoir, lors d'une phase d'incubation de 3 à 7 jours, se développer pour former des colonies visibles à l'œil nu (Figure 5). On est dès lors à même de pouvoir identifier et dénombrer les espèces. On obtient alors des UFC/m³ soit, des unités formées par colonie.



Figure 5: Moisissures en croissance dans une boîte de Petri contenant un milieu gélosé (Michel Legris – inspq.qc.ca)

Deux milieux de culture ont été sélectionnés : Malt Agar et DG 18. L'extrait de Malt Agar est utilisé pour la détection de levure ou moisissures. Ce milieu est en effet très acide et riche en glucides, ce qui en fait un environnement favorable. Le maltose sert de source d'énergie pour la croissance des moisissures (Precision Laboratories, 2016). Le DG 18, dichloran glycerol, est un autre milieu gélosé utile au dénombrement des moisissures. En effet, le dichloran, un agent antifongique, permet de limiter le développement

⁷ High performance liquid chromatography

⁸ Sauf sources mentionnées, les explications sur la méthode de prélèvement ont été fournies par Ralph Baden.

des champignons mucoracées et restreint la taille des colonies d'autres genres. Cette sélectivité accroît la facilité de comptage des colonies (Neogen, s. d.).

Le premier milieu permet donc aux moisissures plus lentes de pousser, sans quoi, seules celles à croissance rapide seraient visibles. En effet, si le milieu est surchargé, la compétition est trop forte et elle empêche les moisissures plus lentes de se développer. Les résultats risqueraient donc d'être faussés. C'est pour cette raison qu'on privilégie l'utilisation de deux milieux de culture différents.

La vitesse à laquelle l'air est aspiré doit correspondre à une vitesse idéale, pour permettre aux spores de se coller sur le support choisi sans pour autant amener une accumulation excessive. Le volume prélevé est généralement de 100 litres. On peut l'adapter en fonction de la contamination de la pièce : si la pièce est fortement contaminée, on diminue par exemple le volume. On cherche globalement à obtenir un nombre de colonies de 5 à 500 spores sur le milieu à incuber.

3.5. La désorption thermique et la chromatographie GC/MS

La désorption thermique des molécules, aussi appelée thermodésorption, est une technique adaptée aussi bien au prélèvement actif que passif. Cette désorption est souvent couplée à une chromatographie en phase gazeuse et à un spectromètre de masse. Elle se base sur le chauffage des molécules dans l'objectif de les faire repasser en phase gazeuse et de permettre leur transfert sur un support envoyé à la GC/MS. La désorption se fait toujours à contre-flux du flux d'échantillonnage pour éviter que les molécules ne restent coincées sur les adsorbants.

Les cartouches sont d'abord chauffées une première fois pour permettre la séparation des molécules. Ces composés migrent ensuite sur un piège froid (jusqu'à -10°C). Cette étape évite une saturation de la colonne du chromatographe. De plus, grâce à la condensation des molécules, on élimine des gaz indésirables.

Ce piège froid est ensuite chauffé (jusqu'à 300 degrés) avant que les molécules ne soient envoyées dans la colonne pour la séparation et vers le spectromètre de masse pour la détection. La chromatographie en phase gazeuse (« gaz chromatography », GC) est une technique d'analyse basée sur la séparation de différents composés via le chromatographe, analysés via le spectromètre de masse.

Les molécules vont d'abord migrer, à différentes vitesses, à travers un substrat, la phase stationnaire. Cette phase stationnaire est un élément solide sur les parois de la colonne capillaire. Le flux de gaz, la phase mobile gazeuse, passe au centre de la colonne. Ces deux phases sont ainsi en interaction et permettent, via des jeux de température, de faire volatiliser les analytes et les faire migrer. Une fois la migration réalisée, les molécules sont détectées et identifiées via le détecteur, le spectromètre de masse.

Le spectromètre de masse (MS) est, comme son nom l'indique un détecteur qui identifie et analyse les molécules en mesurant leur masse. Elles sont bombardées et se fragmentent en différents morceaux. Une molécule ionisée donne toujours le même type de fragments et c'est grâce à ce rapport masse/charge que l'on peut identifier les molécules.

Les différentes parties constituant d'un GC/MS sont visibles sur le plan schématique à la Figure 6.

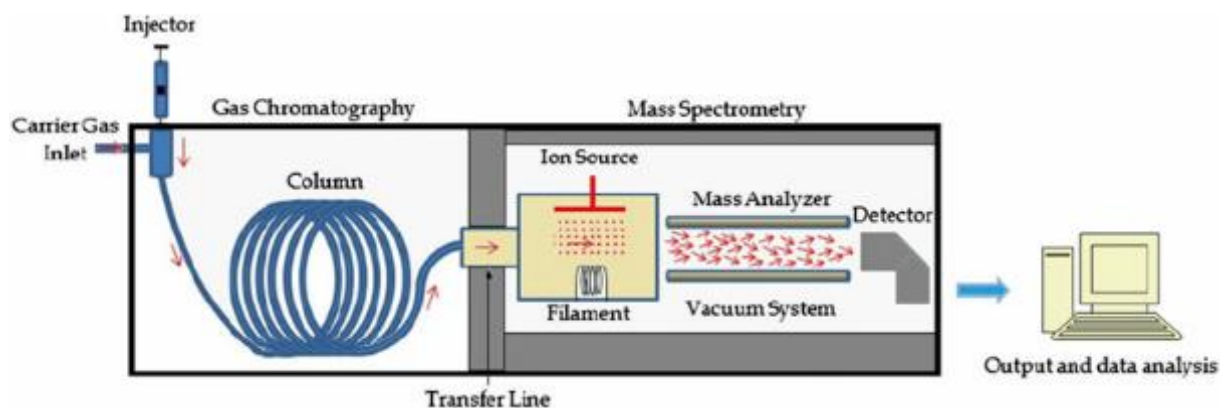


Figure 6: Plan schématique d'un GC/MS

4. Projet MAI

On l'a vu, très peu d'études expérimentent la phytoremédiation sur le terrain. Lorsque c'est le cas, les variables sont contrôlées et les pièces sont inoccupées voire plus petites que des pièces réelles. Les conclusions tirées dans les études ne sont donc pas vraiment applicables à des cas en situation réelle, où la ventilation et l'humidité ne sont pas contrôlées et où l'homme apporte une contribution non négligeable. En effet, hors des expérimentations en laboratoire, les occupants amènent avec eux toutes sortes de perturbations à la qualité de l'air comme le parfum ou les pratiques de nettoyage. De plus, la plupart des expérimentations étudient des plantes en pot mais l'impact des murs végétaux n'est encore que peu expérimenté.

Dans cette optique, des partenaires belgo-luxembourgeois se sont unis pour créer le projet MAI (impact de Murs végétaux sur la qualité de l'Air Intérieur). Il a pour objectif d'étudier, *en conditions réelles*, les impacts de l'implantation de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur. La commune de Wiltz a fourni les locaux nécessaires à l'expérimentation.

Ce projet est porté et coordonné par Neobuild s.a., le pôle d'innovation technologique de la construction durable. Quatre partenaires participent également au projet :

- ✓ L'Université de Liège, qui gère l'étude scientifique, la prise de mesures ainsi que l'analyse des résultats ;
- ✓ Le Ministère de l'Energie et de l'Aménagement du Territoire qui apporte son expertise sur la qualité de l'air et l'analyse des résultats moisissures ;
- ✓ La Commune de Wiltz, qui met à disposition les locaux et coordonne les chercheurs ainsi que le personnel de la Commune ;
- ✓ Sound Ecology Sàrl, qui implante les murs végétaux et fournit des informations sur ceux-ci.

Une potentielle efficacité des murs végétaux en intérieur a déjà été étudiée en laboratoire dans le cadre d'un mémoire au sein de l'Université de Liège, via des enceintes en verre dont la température et l'humidité étaient contrôlées. Les particules fines (PM_{2,5}) et les composés organiques volatiles (COV) ont pu être analysés, laissant penser à une potentielle efficacité des murs végétaux pour les premières. Le projet MAI vise donc à développer la connaissance sur l'impact potentiel de murs végétaux via des mesures *in situ*.

C'est dans le cadre de ce projet que ce mémoire prend place. En effet, le premier objectif est d'initier les premières mesures de COV via les cartouches Tenax® afin de contrôler et de sélectionner les paramètres adéquats de la méthodologie d'analyse. Il est ainsi question de tester si le volume à échantillonner est adapté ou si la méthode d'analyse du GC permet de faire correctement apparaître les polluants mais également d'orienter les analyses pour la suite des mesures, via notamment la mise en avant de polluants à surveiller ou de pics chromatographiques à privilégier.

Puisque ce type d'expérimentation, en conditions réelles, *in situ*, est innovant, il est important d'établir, de tester et d'adapter clairement une méthodologie appropriée aux polluants caractéristiques de l'air intérieur et en accord avec la présence de végétaux. Les variables d'influence et tout ce qui peut, d'une manière ou d'une autre, biaiser les mesures seront mises en avant. Une première comparaison entre les pièces contenant un mur végétal et les pièces témoins sera ébauchée. Il est néanmoins important de préciser que le peu de temps mis à disposition ne permettra pas d'établir de conclusion claire sur les résultats obtenus.

Cette méthode d'analyse des COV pose ainsi les prémisses d'un suivi des polluants en conditions réelles et en présence d'occupants. Dans ce projet, l'effet concret de l'installation de 5 murs végétaux sera donc étudié en tenant compte des spécificités floristiques des murs et des spécificités architecturales du bâtiment. Ce mémoire constitue dès lors une base sur laquelle les acteurs en charge de l'analyse scientifique du projet MAI s'appuieront pour analyser l'impact des murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur au sein d'une administration communale.

Le second objectif de ce mémoire est axé sur le ressenti des occupants. En effet, il est question d'élaborer un questionnaire qui sera délivré aux occupants afin d'évaluer leur ressenti face à la présence de murs végétaux au sein de leur lieu de travail. L'analyse des réponses obtenues ne sera pas abordée dans ce mémoire mais sera réalisée dans le cadre du projet MAI.

Partie 2

Cette deuxième partie est consacrée aux matériels et méthodes utilisés pour analyser la qualité de l'air intérieur au sein de l'Administration Communale de Wiltz. Une première section se focalisera sur la description du site tandis que la suite se concentrera sur les murs végétaux et les instruments spécifiques utilisés.

1. Description du site

1.1. Contexte extérieur

Le projet expérimental a été mis en place au sein de l'administration communale de Wiltz, récemment rénovée afin d'implanter les murs végétaux. La Mairie de Wiltz se situe dans la vallée de Wiltz et culmine à 385 m sur le versant sud. La façade principale (Figure 7) est orientée sud-est.

La Commune de Wiltz est située dans le nord-ouest du Grand-Duché du Luxembourg. Wiltz est le chef-lieu du canton de Wiltz (en rouge sur la Figure 8). Le climat est de type océanique tempéré (CFB) selon la classification de Koppen, caractérisé par des hivers doux et pluvieux et des étés plus frais et humides que les climats subtropicaux. Les précipitations y sont importantes, même pour les mois les plus secs (en.climate-data.org, s. d.).



Figure 7: Administration communale de Wiltz



Figure 8: Commune de Wiltz

La pollution atmosphérique luxembourgeoise est davantage anthropique (trafic routier, activités industrielles et agriculture). Les polluants principaux retrouvés au Luxembourg sont :

- ✓ Les No_x ,
- ✓ L'ozone
- ✓ Les particules fines (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$) (Portail de l'environnement, 2021).

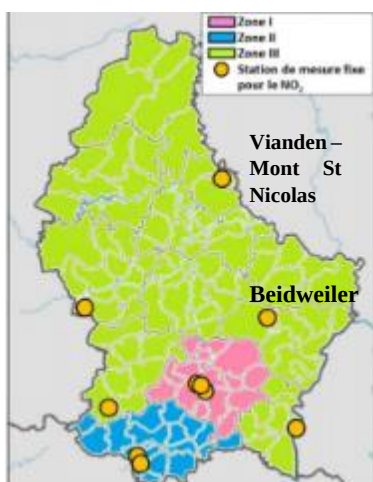


Figure 9: Répartition des stations de mesure fixes pour le NO₂

Comme on peut le voir à la Figure 9, le Luxembourg dispose de 3 zones de qualité de l'air ainsi répartie :

- ✓ Zone I couvrant le canton de Luxembourg (zone LCPU)
- ✓ Zone II couvrant le canton d'Esch-sur-Alzette (zone CES)
- ✓ Zone III couvrant les cantons restants du Grand-Duché de Luxembourg (Capellen, Clervaux, Diekirch, Echternach, Grevenmacher, Mersch, Redange, Remich, Vianden et **Wiltz**) - zone rurale (RAL) (Administration de l'Environnement, 2020).

La station de Vianden (Vianden Mont St-Nicolas) est la station la plus proche de Wiltz. Il s'agit d'une station permanente de type rural de fond.

Au niveau du NO₂, un dépassement de la valeur limite annuelle (200 µg/m³ en moyenne horaire à ne pas dépasser pendant plus de 18 fois par année civile - 40 µg/m³ en moyenne annuelle⁹) a été confirmé dans les 3 zones pour l'année 2018. Dès lors, le Grand- Duché du Luxembourg a établi un plan national de la qualité de l'air (PNQA) (Administration de l'Environnement, 2020).

Les métaux lourds sont mesurés via 4 stations dont celles de Vianden- Mont St-Nicolas qui est la dernière station mesurant la pollution de fond, loin des grandes sources d'émissions (Administration de l'Environnement, s. d.).

La station de Vianden-Mont St-Nicolas est également une des 5 stations du réseau automatique de télécontrôle de la qualité de l'air dont dispose le pays. Ces 5 stations sont également équipées de station météo permettant de comprendre l'influence du climat sur les teneurs en polluants. La station de Vianden mesure ainsi le SO₂, les Nox, l'ozone et le CO₂ (Administration de l'Environnement, s. d.).

Au niveau de l'ozone, la station de Vianden est la seule à subir un dépassement des 25 jours de dépassement de la valeur cible de 120 µg/m³ autorisés (Annexe 3 : Nombre de jours de dépassement pour l'ozone) et ce, depuis 2007. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en zone rurale, les destructeurs de l'ozone sont moins présents (Portail de l'environnement, 2020).

Pour le SO₂, la station de Vianden ne fournit plus de données depuis 2011. Toutefois, de manière générale, les concentrations de SO₂ restent bien en dessous des valeurs limites sur tout le territoire luxembourgeois (Annexe 4 : Concentrations annuelles en SO₂) (Portail de l'environnement, 2019b).

Quant aux particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}), la station de Beidweiler est représentative du type rural. Les concentrations en PM₁₀ sont bien inférieures à la valeur limite des 40 µg/m³ à respecter. La valeur de cette station est encore inférieure aux autres stations du fait de la densité plus faible de trafic dans les zones rurales. La situation est la même pour les PM_{2,5} avec une valeur limite fixée à 25 µg/m³ (Annexe 5 : Concentrations en PM_{2,5}-PM₁₀) (Portail de l'environnement, 2019a).

Toutefois, puisque la commune de Wiltz a une population de 6 866 habitants, légèrement supérieure aux autres communes rurales du nord (STATEC, 2019), on pourrait s'attendre à ce que les valeurs de qualité de l'air soient supérieures aux valeurs mesurées par les stations rurales de fond. Cette information est néanmoins difficile à confirmer dans la mesure où il n'y a pas de stations à proximité directe de la ville de Wiltz.

1.2. Contexte intérieur

Le bâtiment est composé d'un rez-de-chaussée et de 3 étages. Le projet n'a lieu que dans les étages supérieurs et ne prend donc pas en compte le rez-de-chaussée. Le premier et le dernier étage sont des espaces ouverts tandis que le deuxième est fermé.

⁹ Fixée par L'annexe XI du « règlement grand-ducal du 29 avril 2011 portant application de la 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 » (RGD).

Le premier étage est composé de :

- ✓ 4 bureaux-secrétariats de 21,03 m² ; 22,82 m² ; 35,12 m² et 31,45 m².
- ✓ 2 salles des séances de 32,93 m² et 59,72 m² ;
- ✓ 1 kitchenette de 19,82 m² ;
- ✓ 1 couloir d'une surface totale de 65,93 m² ;
- ✓ Sanitaires d'une surface totale de 12,14 m² ;
- ✓ 2 cages d'escalier.

Le deuxième étage est composé de :

- ✓ 7 bureaux de 21,03 m² ; 22,82 m² ; 35,12 m² ; 36,01 m² ; 17,24 m² ; 23,26 m² et 51,53 m² ;
- ✓ 1 local imprimante de 12,36 m² ;
- ✓ 1 couloir- hall d'une surface totale de 59,81 m² ;
- ✓ Sanitaires d'une surface totale de 17,79 m² ;
- ✓ 1 cage d'escalier.

Le dernier étage est composé de :

- ✓ 1 espace ouvert de 83,36 m² ;
- ✓ 1 salle de réunion de 31,98 m².

Les plans de ces trois étages sont visibles à l'Annexe 6 : Plans de l'Administration.

1.2.1 Matériaux

La Commune a souhaité entreprendre une rénovation tenant compte du bien-être des occupants et de la qualité de l'air intérieur. Les matériaux et le mobilier ont donc été choisis avec soin.

Tous les matériaux utilisés lors de la rénovation des 3 étages sont présentés à la Figure 10. Certains matériaux, comme les plafonds en plâtre ont été gardés d'origine.

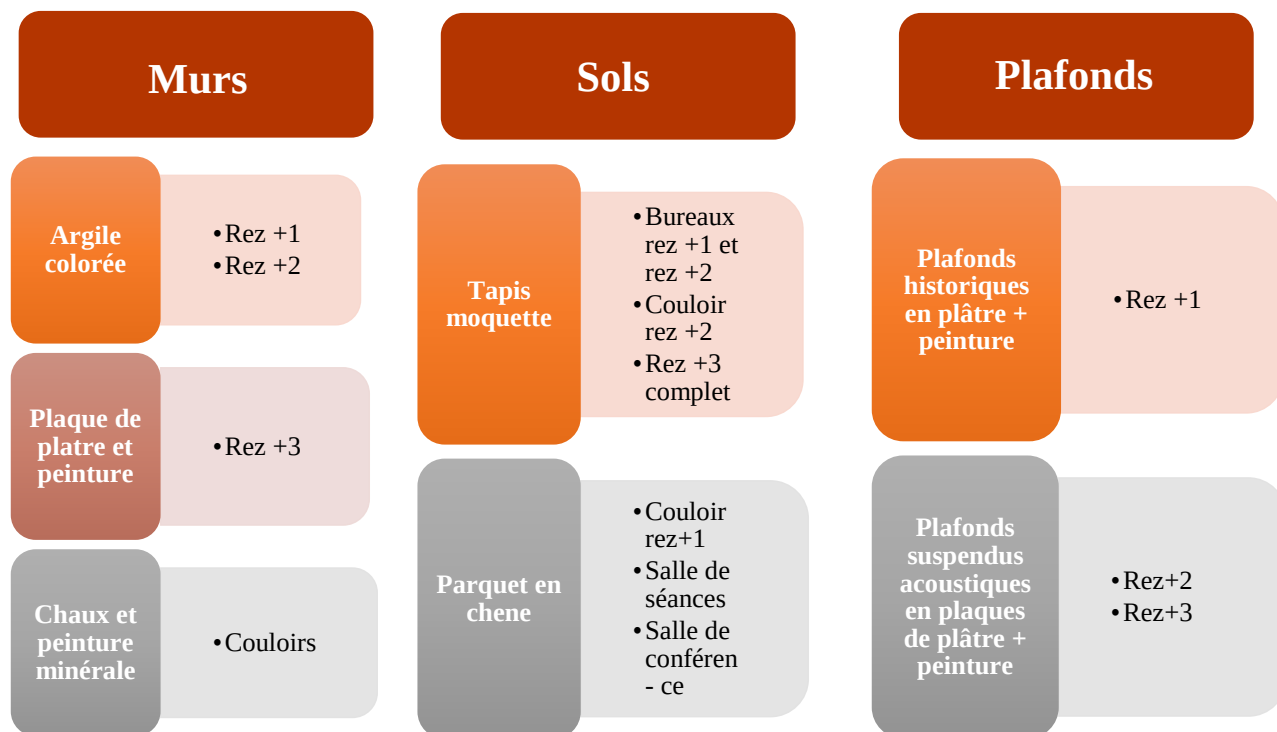


Figure 10: Matériaux de construction de l'Administration communale de Wiltz

a. Les murs

Les murs d'**argile** sont de plus en plus réinvestis dans les constructions écologiques. Il s'agit généralement d'un mélange d'argile, de limon, de sable ou de gravier auxquels peuvent s'ajouter du chanvre, du lin ou de la cellulose.

De par sa composition, l'argile a la réputation d'être sans impact pour l'environnement ni sur la santé et de ne pas émettre de COV (« Les avantages de l'enduit à l'argile pour une construction écologique », s. d.).

Les murs à la **chaux** sont utilisés comme alternative aux murs en plâtre ou en ciment. Ce matériau traditionnel est composé de carbonate de calcium auquel on ajoute du sable et de l'eau pour obtenir un mortier. Les enduits à la chaux ont la propriété d'empêcher la formation de moisissures puisqu'ils retiennent l'humidité, et d'éviter la condensation (« Pourquoi appliquer un enduit à la chaux sur un mur intérieur ? », 2019).

Les **peintures minérales**, contrairement aux peintures classiques qui utilisent des liants organiques, contiennent des liants minéraux (du silicate ou de la chaux). Selon la norme AFNOR NFT 30808 spécifique aux revêtements de façade à composantes minérales, les peintures minérales sont celles dont la part organique est de moins de 5%. Ces peintures ont l'avantage de se lier plus durablement avec leur support et n'adhèrent pas seulement par collage comme les peintures organiques (*Peinture minérale*, s. d.).

b. Le sol

Le **tapis** est une moquette particulière, de la marque Desso Air master®. Ce nouveau type de moquette est conçu afin d'améliorer la qualité de l'air. En effet, cette technologie a été mise au point pour capturer un maximum de poussières et de composés volatiles et ainsi éviter que les particules capturées ne se volatilisent dans l'air de la pièce. Selon la labellisation *GUI Gold Plus label*¹⁰, ce type de moquette serait huit fois plus efficace pour retenir la poussière que d'autres alternatives de sols lisses. Des tests laboratoires ont accrédités le label. Comme on peut le voir sur la Figure 12, les plus fines particules sont capturées dans les fils fins alors que les particules plus grosses (>10 µm) sont capturées via les fils plus épais. La conception est telle qu'elle permet de facilement libérer la poussière lors du nettoyage et ainsi d'éviter une accumulation ou un transfert vers l'air ambiant (Tarkett, 2018). La Figure 11 illustre l'aspect de cette moquette particulière.



Figure 11: Moquette master®

Cette carpeete est composée de BCF (« bulk continuous filament ») PA6 (<20%), c'est-à-dire de fils en polyamide et d'Econyl®, un nylon régénéré à base de déchets de nylon (Desso, s. d.). De la chaux (du carbonate de calcium) provenant des déchets de l'industrie de l'eau potable hollandaise est utilisée (+/- 40%) comme matière première dans toutes les carpettes DESSO EcoBase (Tarkett, 2018). On retrouve également de l'aluminium trihydraté (<20%). Les moquettes DESSO Airmaster peuvent être teintées.

Certains matériaux sélectionnés pour le projet, comme cette moquette, ont été spécialement choisis pour leurs faibles émissions.

Le tapis DESSO Airmaster a une certification cradle-to-cradle Platinum signifiant que le matériau évalué jusqu'à 100 ppm est défini positivement. Plus spécifiquement, cela signifie qu'aucun risque écotoxicologique ou sur la santé n'est attendu lors de l'utilisation. D'ailleurs, selon l'*environmental product declaration* de l'International EPD System, les émissions de COV sont plus faibles que les exigences (EPD International AB, 2019).

Au niveau des particules, on peut par exemple voir sur la Figure 13 les résultats des tests réalisés par le GUI sur la moquette Airmaster, comparée à un sol dur et à une moquette

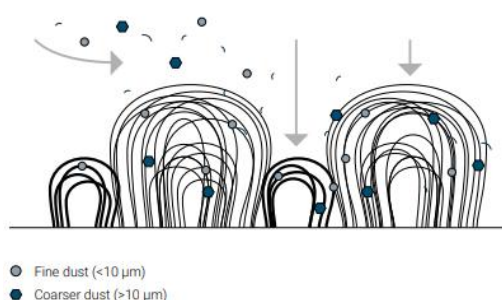


Figure 12: Profil élargi de la moquette Desso Airmaster (desso-airmaster.com)

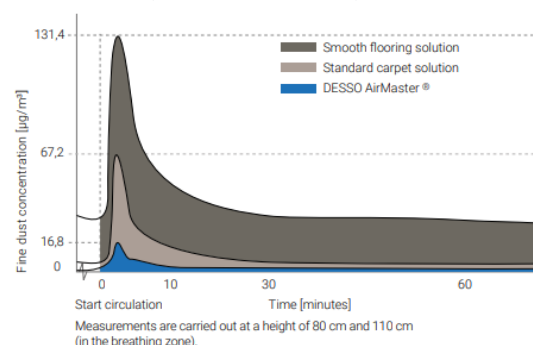


Figure 13: Concentrations de poussières fines sur moquette Airmaster et moquette standard (Tests GUI)

¹⁰ Cette accréditation est décernée par Gesellschaft für Umwelt- und Innenraumanalytik (GUI), le principal organisme indépendant allemand en charge du contrôle de la qualité de l'air. Ce label *plus* est l'accréditation la plus élevée. Desso Airmaster est le premier produit à l'avoir obtenu (Tarkett, 2018).

standard (Tarkett, 2018). Ces résultats semblent confirmer l'efficacité de cette moquette en termes de capture de particules fines.

Le **parquet en chêne** est quant à lui un parquet semi-massif (contrecollé) de la marque Tarkett. Les parquets massifs, contrairement aux parquets stratifiés, sont composés de couches de bois, généralement une couche d'usure en bois noble et une couche porteuse (il existe parfois une troisième couche). Le parquet Tarkett est vernis et séché par UV. Il est, selon la norme EN 14342 relative aux sols en bois et aux parquets, classé E1, ce qui signifie qu'il émet moins de 0,124 mg/m³ de formaldéhyde, soit 8mg/100g de matériaux (*Chêne ESSENCE PLANK XT 1 Strip Shade Parquets*, s. d.).

c. Le plafond

Les **plaques de plâtre** des plafonds sont des plaques de GyplatTM de Gyproc®. Ces plaques, fixées à une structure en bois ou en métal, sont constituées de carton qui leur permet d'être recouvertes de plâtre Gyproc®. Ces plâtres sont fabriqués à partir de Gypse naturel (sulfate de calcium) auquel on a adjoint de l'eau (*Plafond Gyplat*, 2020).

1.2.2. Ventilation et chauffage

Seul le premier étage ne dispose pas de ventilation mécanique. Pour les autres étages, il s'agit d'une ventilation double flux avec un débit de 380 m³/h. La cage d'escalier dispose d'un débit plus important de 450 m³/h. Ce système est régi par une centrale de traitement d'air, dans lequel l'air est pompé, traité dans la centrale (chauffage, refroidissement ou humidification) et insufflé dans le local. Dans un système double flux, la centrale assure une reprise d'une partie ou de tout l'air du local (« Système tout air, à débit constant, mono-gaine », 2007). Ainsi, les ventilations double flux sont entièrement mécanisées. Plus concrètement, l'air est extrait à l'extérieur et insufflé dans le bâtiment via des conduits menant aux pièces de vie. L'air est ensuite extrait des pièces (on extrait généralement dans les pièces humides) et rejeté à l'extérieur. La chaleur présente dans l'air extrait est utilisée pour préchauffer l'air insufflé et ainsi réduire la consommation de chauffage nécessaire à ce système. Toutefois, avec la crise sanitaire, le système a été réduit à un système simple flux, l'air est tiré de l'extérieur et arrive naturellement dans les pièces où il sera rejeté. L'air aspiré passe dans un filtre et dans un échangeur de chaleur.



Figure 14: Radiateur à vannes thermostatiques

Le chauffage se fait via des radiateurs traditionnels à vannes thermostatiques, similaires à la Figure 14, aux premier et troisième étages et via les murs au deuxième. Le système de chauffage par les murs est similaire à un chauffage par le sol, avec un circuit d'eau qui chauffe. Chaque bureau a un thermostat propre.

1.2.3. Entretien¹¹

Les produits ménagers sont également des émetteurs de polluants. Ceux sélectionnés par l'Administration communale sont des produits fournis par le groupe Werner & Mertz. Cette entreprise a développé deux marques européennes de produits professionnels *Tana PROFESSIONAL* et *green care PROFESSIONAL* dont sont issus les produits utilisés à l'administration. Ces deux marques ont des origines durables et sont certifiées cradle-to-cradle, EU ecolabel, die umweltberatung¹². La marque *green care* contient des ingrédients reconnus sains pour l'humain et les cycles biologiques.

4 produits sont spécifiquement utilisés pour l'entretien de l'administration :

- ✓ Tana interior quick&easy, un nettoyeur de surfaces
- ✓ Tanet SR 15, un nettoyeur sol et surfaces
- ✓ Glass cleaner, un nettoyeur vitres

¹¹ Toutes les informations de ce paragraphe proviennent du site internet de Werner & Mertz : www.wmprof.com/en

¹² Die umweltberatung est une organisation d'experts autrichienne qui conseille les entreprises dans l'implémentation de solutions écoresponsables. https://wmprof.com/en/int/about_us_6/certificates_7/die_umweltberatung_7/die_umweltberatung.html

- ✓ Sanet daily quick&easy, un nettoyant pour sanitaires

Ces produits sont déclarés sans ingrédients toxiques ou dangereux mais peuvent provoquer une irritation des yeux ou de la peau. En effet, la plupart contiennent des SLS (sodium laureth sulfates) qui se dégradent rapidement dans l'environnement.

Quant aux fréquences de nettoyage, il est prévu de nettoyer les sols 3x/semaine à savoir les lundis, mercredis et vendredis. Les surfaces de bureaux sont quant à elles prévues les mardis et jeudis. Ainsi, un nettoyage est prévu tous les jours.

L'administration communale de Wiltz a donc fait des choix éco-responsables pour les matériaux de rénovation et le mobilier mais également pour les produits d'entretien. Ceci devrait limiter les perturbations et les émissions de polluants dans l'air intérieur mais seuls les prélèvements pourront l'affirmer.

1.3. Les salles de prélèvement

Afin d'évaluer l'impact des murs végétaux sur la qualité de l'air, 6 pièces seront analysées. Les caractéristiques spécifiques propres à chacune d'entre-elles sont reprises ci-après. Les plans des étages à l'Annexe 6 : Plans de l'Administration, consultés en regard de cette partie, permettent de mieux comprendre l'agencement des emplacements.

1.3.1. Etage +1

La ventilation au 1^{er} étage se fait naturellement, via les fenêtres.

Mur - Couloir cage d'escalier

L'espace contenant le mur végétal est très vaste. En effet, il est situé en face d'une grande cage d'escalier menant au rez-de-chaussée. La surface au sol est de 19,07m² et la hauteur sous plafond de 3,95m. Toutefois, si on tient compte de la cage d'escalier, le volume est bien plus important mais difficile à évaluer. Les photos de la Figure 15 illustrent ces agencements.

Dans cet espace, les murs sont en chaux, le plafond en plâtre et le sol en parquet.

Cet espace est tellement vaste que l'influence du mur végétal sera très difficile à mettre en lumière. En effet, la cage d'escalier crée une circulation d'air très importante.

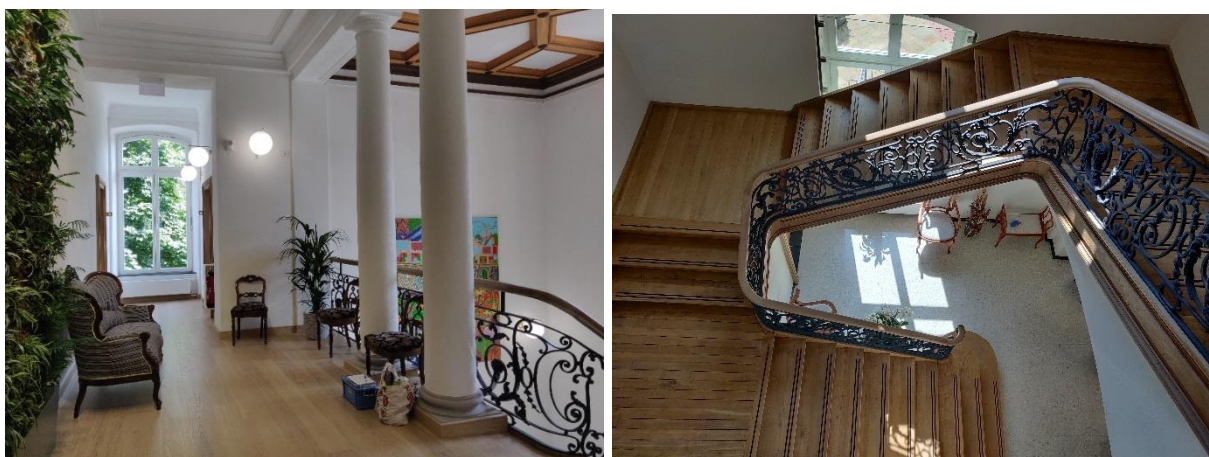


Figure 15: Couloir mur végétal - Etage 1 + cage d'escalier

Témoign - Rez-de-chaussée

La pièce témoin du 1^{er} étage a été sélectionnée au rez-de-chaussée. En effet, les autres pièces du premier étage ne sont en rien similaires à cet espace ouvert. Les bureaux, même s'ils contiennent les mêmes matériaux de construction, ne sont pas représentatifs des échanges d'air créés par la cage d'escalier. Il a donc été décidé de réaliser les prélèvements témoins à l'étage inférieur, au bas de la cage d'escalier, là où le même air circule.

Cet espace représente, dans sa globalité, l'accueil de l'Administration. Il est composé de boiseries et de chaux aux murs, de mosaïques au sol et de faux plafonds. Son volume, hors cage d'escalier est de 259,79m³ soit 59,86 m² x 4,34 m.

Deux radiateurs se trouvent de part et d'autre de la cage d'escalier. Les prélèvements sont réalisés à droite des escaliers lorsqu'on les regarde de face. En effet, il existe un meuble à gauche, à une hauteur plus proche de la hauteur adéquate des 1,5m. Toutefois, des plantes, pouvant biaiser les analyses sont posées dessus, comme on peut le voir à la Figure 16. A droite par contre, entre les 2 sièges, il s'agit de plantes artificielles.

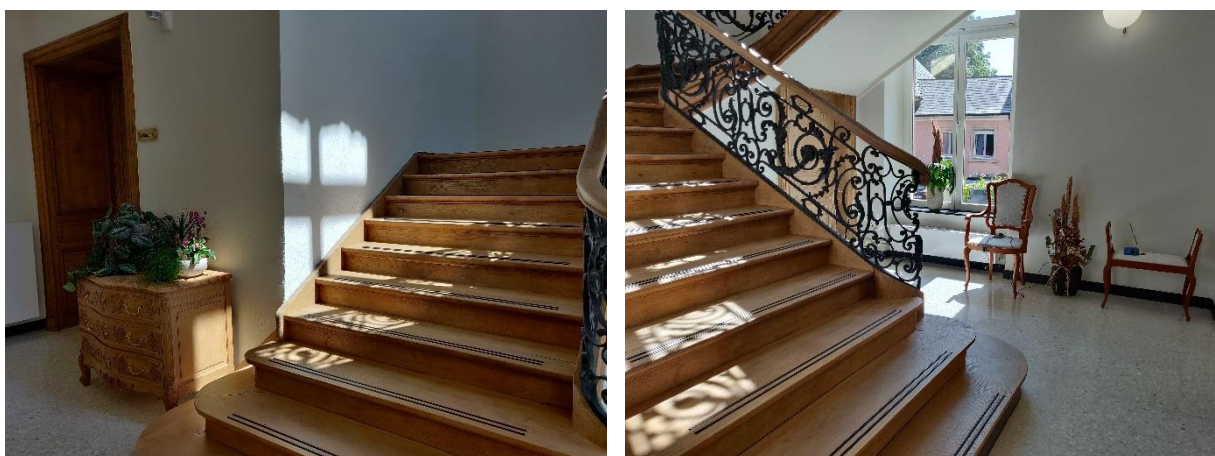


Figure 16: Côté gauche de la cage d'escalier et côté droit de la cage d'escalier - rez-de-chaussée

1.3.2. Etage +2

Mur - Couloir du mur

Ce petit couloir est fermé par deux portes vitrées coupe-feu. Ces portes sont laissées ouvertes la majorité du temps, créant ainsi un courant d'air avec la cage d'escalier. En effet, bien que celles-ci doivent normalement rester fermées, les employés les laissent ouvertes par facilité. Il est dès lors prévu qu'elles soient automatisées.

Une porte à gauche du mur mène à des sanitaires. En face, se situe un guichet ouvert sur le couloir. Suite à la situation sanitaire, ce guichet a dû être fermé avec un plexiglass. Les deux photos de la Figure 17 illustrent ce couloir. Le volume total de cet espace est de 24,48m³ soit, 9,79 m² x 2,5 de hauteur sous faux plafond acoustique.

Dans cet espace, les murs sont en chaux et peinture, le sol est composé de moquette et le plafond est en plaques de plâtre. Il n'est pas ventilé. En effet, la ventilation se fait dans le bureau situé derrière le guichet ouvert. Le couloir où se situe le mur végétal est ainsi normalement ventilé puisque l'air circule du bureau vers le mur. Or, étant donné que le guichet est fermé avec un plexiglass, le flux d'air n'est pas assuré. Pour combler cette lacune, les employés ferment les portes coupe-feu en fin de journée et laissent la porte des sanitaires ouverte permettant un renouvellement d'air par la fenêtre également laissée ouverte.

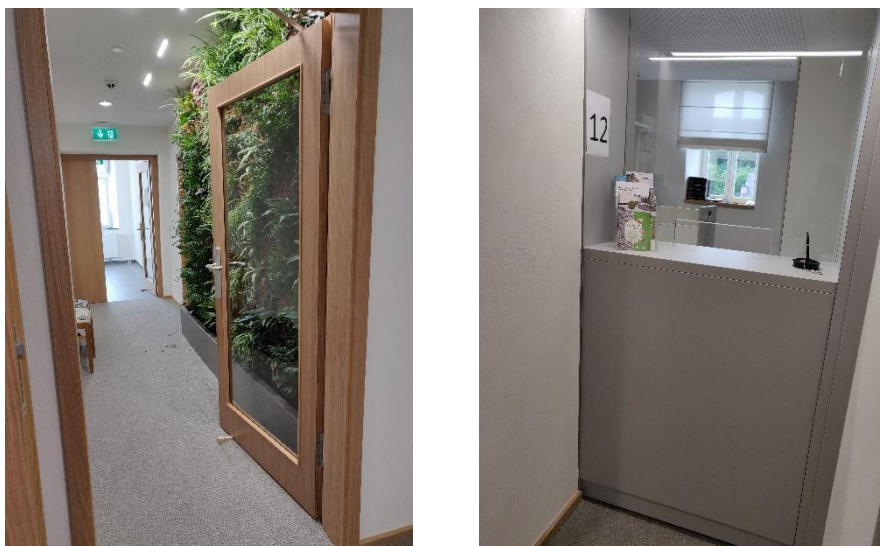


Figure 17: Couloir du mur avec guichet – 2^{ème} étage

Témoin - Hall

L'espace témoin, sans mur végétal, servant à la comparaison est un hall adjacent à l'espace contenant le mur végétal. Le volume de cet espace n'a pas pu être déterminé. En effet, la hauteur sous la verrière est telle qu'il faudrait un appareil à rayon laser pour la mesurer. Les plans fournis par les architectes ne précisent pas non plus cette hauteur.

Quatre portes vitrées avec un film sablé collé ouvrent sur un local photocopieuse et des bureaux. Un escalier en bois permet d'accéder au troisième étage. Les photos de la Figure 18 illustrent ces agencements.

Le sol et le plafond sont les mêmes que dans le couloir du mur végétal. Les murs sont par contre en argile. L'escalier en bois n'est pas verni.

Le chauffage est réalisé via un mur. Les flux exacts de ventilation sont présentés à l'Annexe 7 : Ventilation au 2^{ème}.

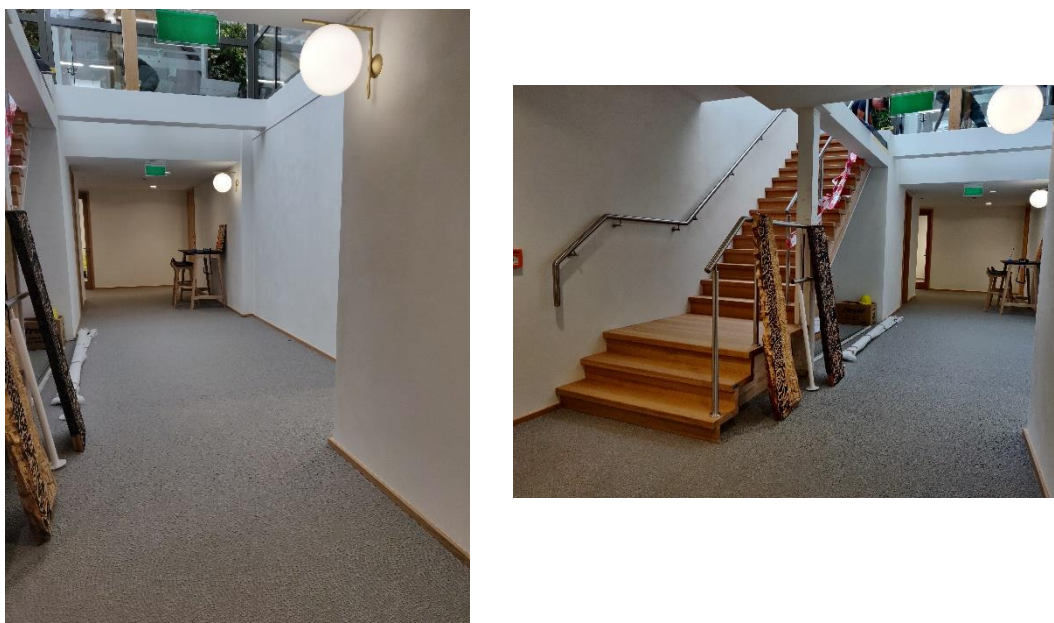


Figure 18: Hall adjacent au couloir du mur végétal- 2^{ème} étage

1.3.3. Etage +3

Dans tout le 3^{ème} étage, la ventilation est mécanique et continue, via des grilles, mais diminue légèrement pendant la nuit. Bien que cet espace ne soit pas occupé en permanence, la ventilation fonctionne sans arrêt pour compenser la mauvaise isolation des murs extérieurs. Les flux de ventilation sont visibles à l'Annexe 8 : Ventilation au 3^{ème}. Cet étage est également équipé d'une climatisation manuelle. Les employés choisissent le moment de démarrage et le système fonctionne pendant 2h avant de se couper automatiquement.

Les volumes de ces espaces n'ont pas non plus pu être mesurés pour des raisons similaires au 2^{ème} étage.

Mur – Open-space

L'espace ouvert contient 3 murs végétaux. Il est actuellement utilisé sporadiquement et n'est donc pas occupé de manière permanente. L'espace est normalement conçu pour 5 bureaux. Il contient également une petite kitchenette avec un évier et un frigo. En son centre, trône une verrière donnant sur le deuxième étage en contre-bas. Les photos de la Figure 19 illustrent cette verrière. A l'avenir, une machine à café pourrait prendre place dans cet espace.

Les murs sont en plaques de plâtre recouvertes de peinture tout comme le plafond. Le sol est recouvert de moquette. Des poutres de la structure du bâtiment sont apparentes.

L'espace est composé de 3 radiateurs traditionnels et de deux systèmes de climatisation.



Figure 19: Verrière- vue ouest à gauche et vue est à droite - 3^{ème} étage

Témoignage - Salle de réunion

La salle de réunion est adjacente à l'open-space et est séparée de celui-ci par des baies vitrées. Les matériaux sont exactement les mêmes que dans l'open-space. Des poutres sont également apparentes.

La pièce comprend 4 fenêtres et 2 radiateurs.

Au centre trône une grande table et des chaises en jeans recyclés. On y trouve également un écran sur pied et 2 radiateurs traditionnels.

La Figure 21 illustre cette salle de réunion.

Il est intéressant de noter que le mobilier du local a été réalisé via des vieux jeans recyclés dont les fibres sont collées (Figure 20). Planqtextile est le fabricant ayant développé ce processus.



Figure 20: Matériau en jeans Recyclés



Figure 21: Salle de réunion - 3^{ème} étage

1.3.4. Extérieur

Le prélèvement extérieur a été réalisé à l'arrière de l'Administration communale, du côté où l'aspiration d'air pour la ventilation est réalisée. Ainsi, on peut avoir un bon aperçu du bruit de fond. Avoir une idée de l'air extérieur permet d'expliquer ou de comprendre la présence de certains polluants dans l'environnement intérieur.

L'idéal est de réaliser les prélèvements extérieurs à même hauteur qu'à l'intérieur. Il est aisé d'imaginer qu'il est impossible de réaliser ce type d'échantillonnage en étage. Il n'a pas non plus été possible de réaliser un prélèvement à hauteur des voies respiratoires. Ils ont donc été réalisés au-dessus des escaliers. En effet, cette hauteur permet une plus grande représentativité de l'air respiré puisque l'air au sol a une moins grande circulation. Les prélèvements ont été réalisés sur un petit muret à une quarantaine de cm du sol, à quelques mètres d'un parterre de plantes. Cet emplacement est loin d'être idéal mais il est le meilleur compromis trouvé. Si l'ouverture de la salle des séances le permet, il pourrait être intéressant de réaliser les prélèvements extérieurs sur la terrasse, visible à la Figure 22, à hauteur plus similaire aux prélèvements intérieurs.



Figure 22: Lieu de prélèvement extérieur - façade arrière de l'Administration Communale

2. Murs végétaux

Il existe des murs végétaux actifs ou passifs. Les murs actifs utilisent un système mécanique d'insufflation d'air tandis que les murs passifs utilisent la convection naturelle de l'air. Les murs implantés à l'administration communale de Wiltz font partie de ces derniers.

Ils sont dits « modulaires » puisqu'ils se composent d'un substrat dans lequel les plantes sont enracinées. On retrouve aussi des murs végétalisés dont les plantes grimpent directement sur un mur ou un treillis. Un système d'irrigation permet d'assouvir les besoins en eau des plantes.

Le substrat dans lequel les plantes s'enracinent est, dans le cas présent, la sphaigne (*Sphagnum*). Cette mousse végétale, visible à la Figure 23, est la partie vivante et supérieure des tourbières. Elle a notamment la particularité d'avoir une capacité d'absorption plus importante que le terreau conventionnel (Experts Ooreka, s. d.).



Figure 23: Sphaigne

Ce substrat est placé dans des paniers en acier galvanisé fixés à la façade. Le mur est recouvert d'une bâche afin d'éviter toute humidification de celui-ci.

On peut voir sur la Figure 24 un schéma de coupe latérale d'un mur végétal intérieur similaire à ceux utilisés ainsi qu'une image de ces aménagements.

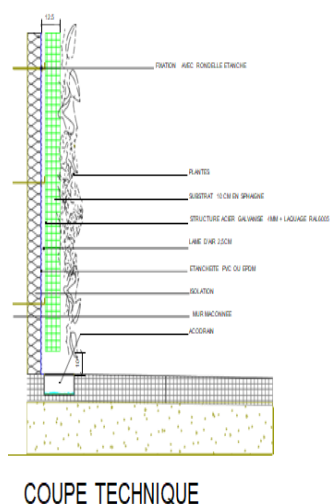


Figure 24: Coupe latérale d'un mur végétal intérieur avec substrat sphaigne

Deux types de plantes ont été utilisés, des plantes dépolluantes et des plantes ornementales. Elles ont, pour chaque mur, été réparties en proportions similaires : 80% de plantes dépolluantes et 20% de plantes ornementales.

Au total, 5 murs végétaux ont été installés dans l'administration et répartis sur les 3 étages supérieurs. La Figure 25 illustre les murs végétaux et leurs caractéristiques propres. Au premier et au deuxième étage, les murs végétaux se situent dans le couloir. Le troisième étage est un open-space dans lequel sont répartis 3 murs. Les emplacements exacts de ces murs végétaux dans le bâtiment sont présentés à l'Annexe 6 : Plans de l'Administration. Ils sont visibles en vert. Les espèces utilisées sont quant à elles présentées à la Figure 26.

1er étage



Il a une surface de 8 m² (2,64 x 3,03 m). Il est composé de 220 plantes, 176 dépolluantes et 44 ornementales (22 unités de chaque espèce).

2ième étage



Il a une surface de 6,3 m² (2,93 x 2,15m). Il se compose de 100 plantes, 80 dépolluantes (8 unités de chaque espèce) et 20 ornementales (10 unités de chaque espèce).

3ième étage-A



Il se compose de 100 plantes, réparties similairement au deuxième mur et couvre une surface de 5 m² (2,2 x 2m).

3ième étage-B



Les 2 murs sont similaires. Leur surface vaut 2,76 m² (1,2 x 2,3m). 60 plantes couvrent chaque mur, 48 dépolluantes et 12 ornementales (6 unités de chaque espèce)

3ième étage-C



Figure 25: Murs végétaux de l'Administration communale de Wiltz



Figure 26: Espèces de plantes utilisées sur les murs végétaux

On privilégie souvent, que ce soit pour les murs végétaux ou pour les plantes en pots, une diversité d'espèces pour accroître l'efficacité de la biofiltration (Yang et al., 2009).

Les plantes sélectionnées pour les murs végétaux de l'administration ont, pour la plupart, été étudiées dans des expériences scientifiques. Les résultats varient d'une espèce et d'une étude à l'autre. Les conditions ambiantes sont également un facteur important. Il est presque impossible de généraliser les résultats obtenus dans les différentes études puisqu'elles sont expérimentées en chambre et non en conditions réelles. La durée des tests a aussi un impact. Suarez-Caceres et al. a par exemple remarqué que les réductions de COV dues à la présence de plantes étaient plus importantes si le test était plus long (Suarez-Caceres et al., 2021)

Nephrolepis est une espèce adaptée à la culture en intérieur, elle est de ce fait souvent utilisée dans les murs végétaux (Suarez-Caceres et al., 2021).

Chamaedora et *chlorophytum* ont montré un potentiel de réduction pour les particules ultrafines (Stapleton & Ruiz-Rudolph, 2018).

Aglaonema a montré une meilleure efficacité pour le toluène, le benzène, le xylène et le formaldéhyde. Comme beaucoup d'études, plus de plantes étaient plantées, meilleure est la réduction de polluants (Song et al., 2007). De plus, la capacité épuratrice semble varier selon la saison, comme le montre une étude traitant des effets des saisons sur la capacité épuratrice des plantes. En été, cette plante est par exemple plus efficace pour réduire le formaldéhyde alors qu'en hiver elle élimine davantage le benzène (Jeong-Eun Song et al., 2011).

Epipremnum a quant à elle pu montrer des taux d'absorption intéressants pour le benzène (Gong et al., 2019).

L'arrosage est programmé comme suit :

- Le lundi à 17h pour une durée de 3h pour les murs végétaux du 3^{ème} étage uniquement
- Le mardi à 17h pour une durée de 3h pour les murs végétaux des 1^{er} et 2^{ème} étage
- Le vendredi à 17h pendant une heure pour les murs des 2^{ème} et 3^{ème} étage.

Une évolution visuelle des murs au fil des semaines est présentée à l'Annexe 9 : Evolution des 5 murs végétaux au fil des semaines.

3. Métrologie

3.1. Polluants considérés

Dans le projet MAI, il est prévu de mesurer les polluants présents à la Figure 27 ainsi que la température et l'humidité relative.

Ces polluants sont en effet les plus problématiques dans les environnements intérieurs. L'humidité relative et la température permettent quant à elles de surveiller le confort hygrothermique, également nécessaire au bien-être des occupants.

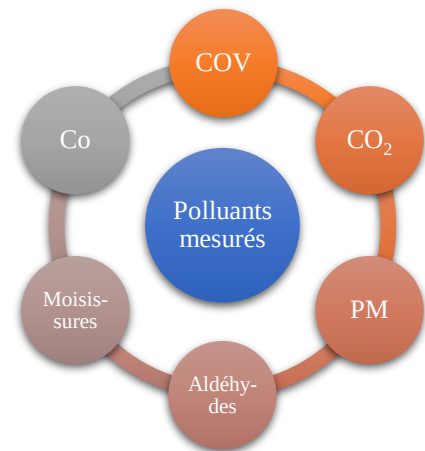


Figure 27: Polluants considérés

3.2. Instruments utilisés

Les polluants ciblés seront analysés via les instruments de la Figure 28.

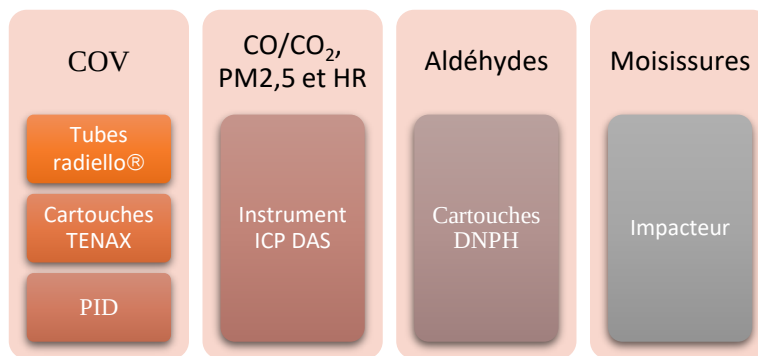


Figure 28: Instruments utilisés lors de la campagne de mesure

- ✓ Les tubes radiello® sont les tubes RAD145, spécifiques aux COV
- ✓ Les tubes Tenax® sont des tubes des marques Markes et CAMSCO.
- ✓ Le capteur DrägerSensor® Smart PID-83 19 100 est installé dans un Dräger X-am 7000 qui permet la détection simultanée et en continu de 5 gaz maximum. Ce Dräger est donc prévu pour contenir 5 capteurs maximum (3 capteurs électrochimiques et 2 capteurs catalytiques ou infrarouges) ou un PID. Une pompe aspire le gaz à mesurer par un tuyau. Celle-ci peut être enlevée afin de permettre un flux passif. Les données collectées par le Dräger sont enregistrées et peuvent être transférées sur un PC pour analyse. Les données seront enregistrées toutes les 10 minutes et moyennées. Le PID utilisé a une gamme de concentration entre 0 et 2000 ppm et est calibré avec de l'isobutylène.
- ✓ Le module de surveillance connecté est un appareil de la marque ICP DAS de la série CL-200. Il s'agit spécifiquement de l'ICP DAS CL-213-E. Le CO et le CO₂ sont mesurés en ppm, les particules en µg/m³, la température en degré Celsius et l'humidité relative en %.
- ✓ Les moisissures sont mesurées grâce à un impacteur MBASS de la marque Holbach.
- ✓ Le GC/MS utilise un désorbeur automatique thermique de la marque Markes international. Il s'agit spécifiquement du TD100-xr. Cet instrument permet l'analyse des COV de C3 à C44. Le GC est quant à lui le Thermo Electron Trace GC ultra avec un Trace DSQ II MS. Le four a été programmé sur 40 minutes de la manière suivante : 50°C les 5 premières minutes avec une augmentation de 5°C par minute pour atteindre 200°C à 35 minutes.

La colonne est quant à elle une colonne Rxi- 624Sil MS en silice fondue de 60m, 0.25 mmID et 1.4 µm.

Dans le cadre de ce mémoire, seules les cartouches Tenax® et le GC/MS ont été utilisés. Les autres analyses seront réalisées par la suite et réparties entre les différents partenaires.

Un blanc de chaque cartouche a été réalisé afin d'éliminer le bruit de fond de la cartouche. Les prélèvements ont été réalisés via une pompe Gilair Plus de Sensidyne®.

3.3. ICP

Huit capteurs à particules ICP seront mis en place sur le site de l'Administration communale de Wiltz dont 6 avec wifi/câble internet et 2 avec prises électriques. Leurs emplacements ont été sélectionnés en fonction de leur pertinence mais également en fonction des prises disponibles dans les pièces.

La répartition des 8 capteurs est la suivante :

- ✓ 2 au 1^{ier} étage
- ✓ 2 au 2^{ième} étage
- ✓ 3 au 3^{ième} étage
- ✓ 1 à l'extérieur.

Les emplacements exacts de ces capteurs sont visibles à l'Annexe 10 : Emplacements des ICP DAS. Comme pour tous les prélèvements qui seront réalisés lors du projet, un appareil sera installé dans l'ambiance directe du mur végétal et un autre dans une pièce témoin.

4. Campagne de mesure

Le projet MAI est prévu pour une durée d'un an. Tous les polluants mentionnés seront donc mesurés. Toutefois, pour ce mémoire, seuls les COV ont été analysés.

4.1. Points de prélèvement

Des prélèvements ont été réalisés aux trois étages (2 par étage) ainsi qu'à l'extérieur. Sept points de prélèvements ont donc été déterminés.

Pour chaque étage, un prélèvement a été réalisé dans l'ambiance directe du mur (à proximité) et un autre dans une pièce témoin, sans mur, (à hauteur de la zone de travail, en position assise), dans une ambiance similaire afin de comparer les émissions présentes avec ou sans mur végétal. Comme indiqué dans la description des salles de prélèvements, les échantillonnages ont été réalisés dans la cage d'escalier au premier étage, au bas de la cage d'escalier au rez-de-chaussée, dans le couloir contenant le mur, dans le hall adjacent au deuxième étage, dans l'open-space et dans la salle de réunion au troisième étage.

L'air extérieur (1,5m) a également été échantillonné afin de connaître le bruit de fond. Les prélèvements ont été réalisés au nord-est, du côté où se trouve la prise d'air pour la ventilation. Réaliser les prélèvements de ce côté permet donc de comparer l'air aspiré à l'extérieur et l'air intérieur.

La Figure 29 montre, via des croix rouges, les deux emplacements prévus pour les prélèvements au premier étage. Le mur est représenté en vert. Les Figure 30 et Figure 31 font de même pour les étages 2 et 3 respectivement.

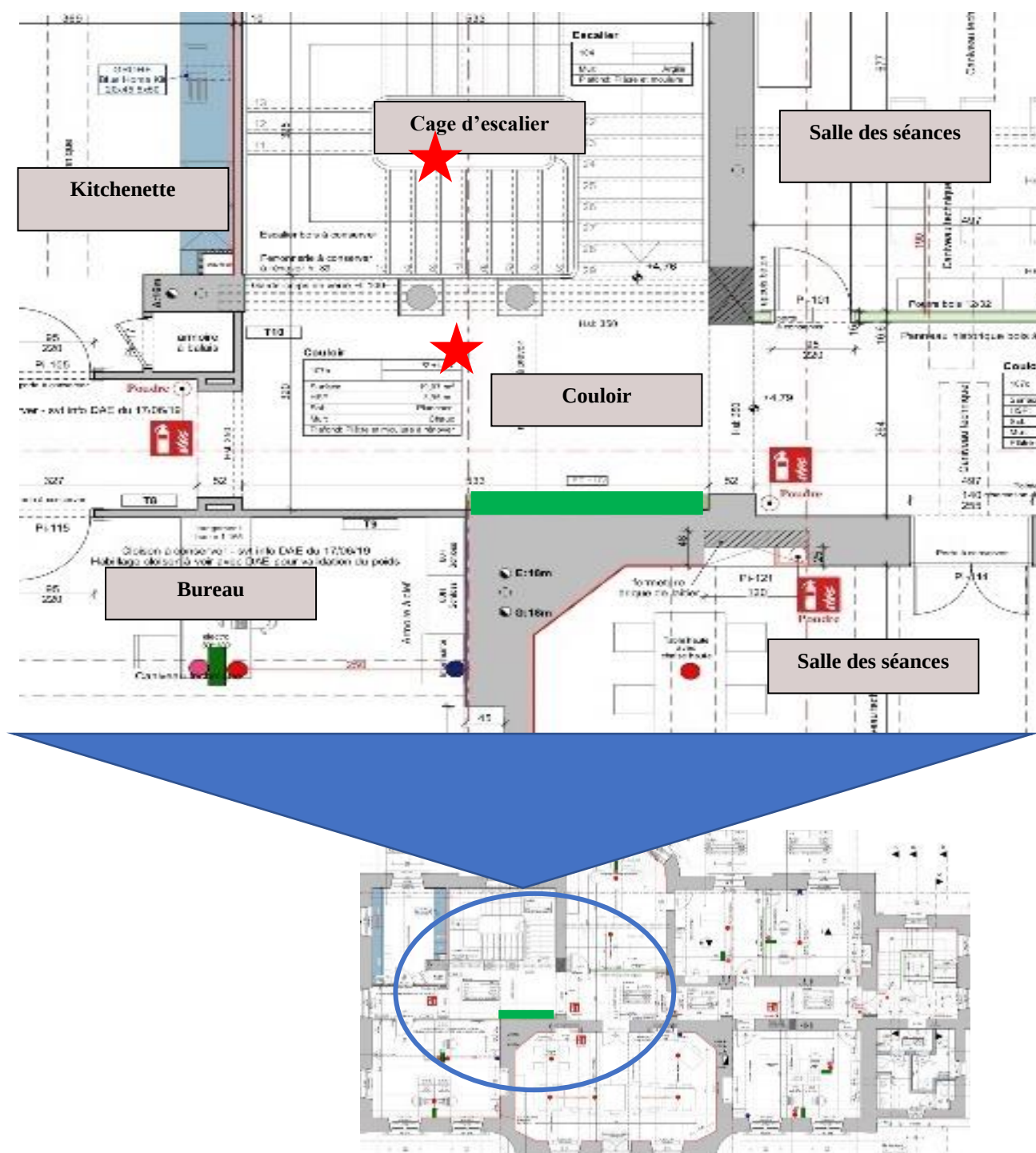


Figure 29: Points de prélèvement- Etage 1

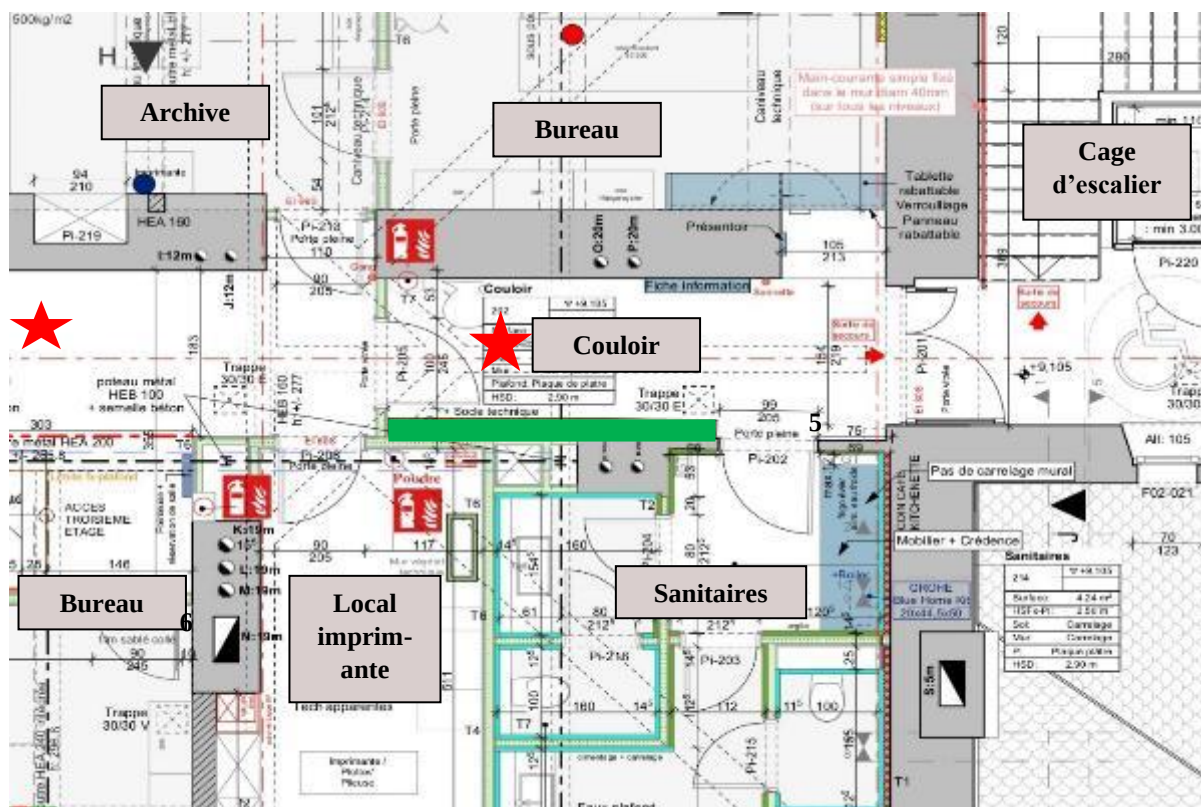


Figure 30: Points de prélèvements- Etage 2

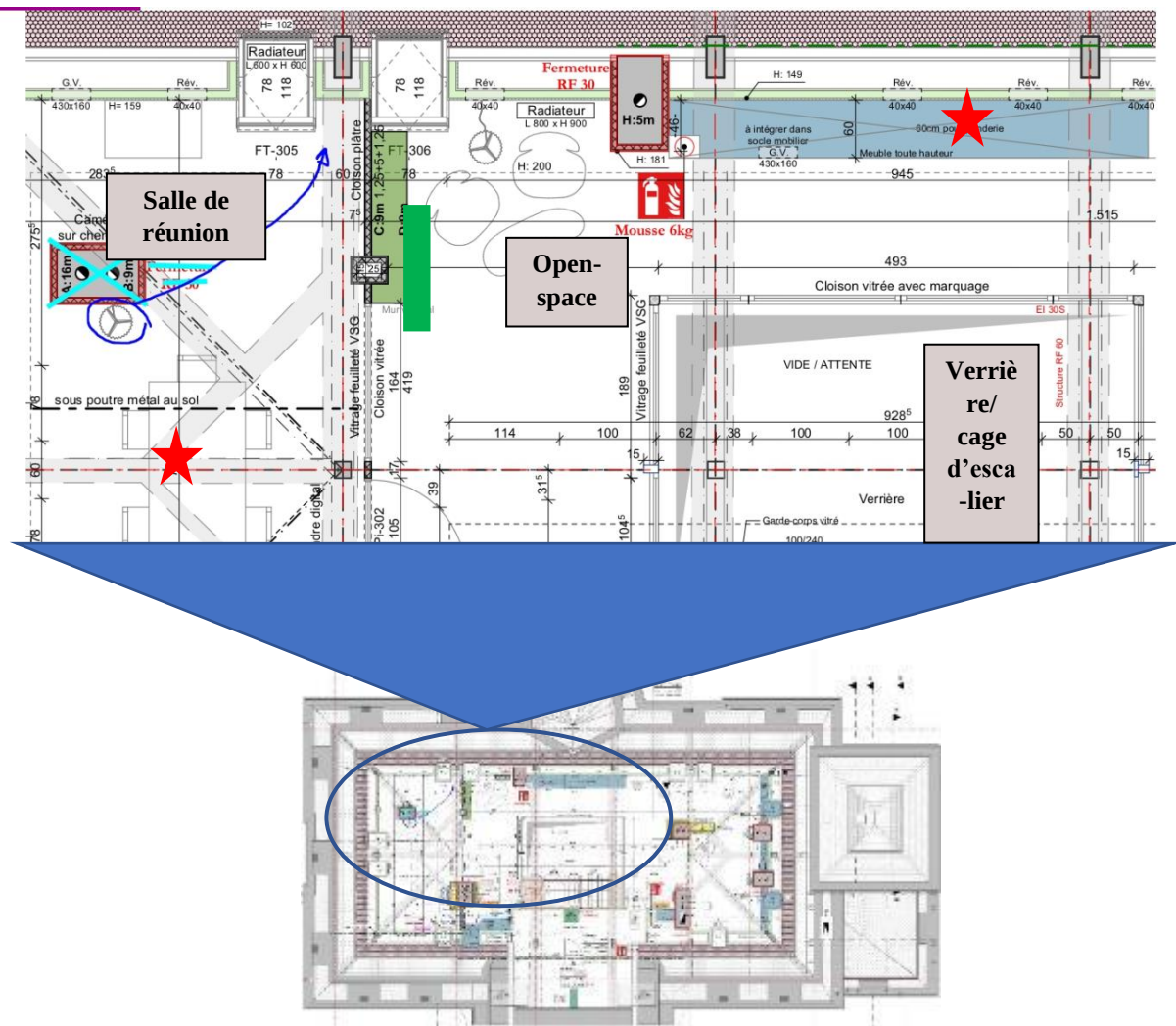


Figure 31: Points de prélèvement- Etage 3

4.2. Les prélèvements

Quatre prélèvements ont été réalisés : le 28/06, le 06/07, le 21/07 et le 30/07. Ils ont été planifiés pour mettre en place la méthode de prélèvement. Un débit de 200mL par minute pendant 30 minutes a été établi comme base pour le prélèvement du 28/06. Le suivant a été planifié au même débit mais pendant une durée plus longue, 40 minutes. Les deux derniers ont été réalisés pendant 30 minutes également. Les cartouches Tenax® ont été mises en série afin de réaliser un perçage. Les pièces exactes échantillonnées lors de chaque date sont visibles au Tableau 4.

Bien qu'une méthodologie d'échantillonnage soit établie avant tout prélèvement, il n'en reste pas moins que chaque échantillonnage peut varier selon les conditions dans lesquelles il a été réalisé. Le Tableau 4 reprend spécifiquement les indications précises de chaque échantillonnage, permettant, au besoin, d'identifier des moments particuliers pouvant impacter les résultats et les concentrations de polluants.

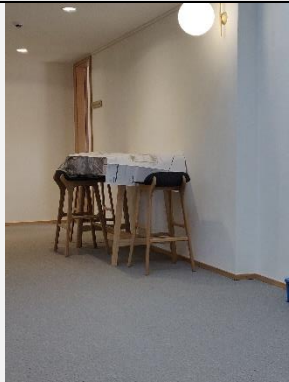
Pour chaque jour de prélèvement, le lieu de prélèvement indique la pièce dans laquelle il a été réalisé. Elle correspond à une des salles vues au paragraphe 1.3. Les colonnes suivantes indiquent les heures de début et de fin du prélèvement ainsi que le volume exactement prélevé. Les commentaires mentionnent les conditions de prélèvement particulières du jour ou tout événement ponctuel. Enfin, des photos illustrent les emplacements des instruments ou les conditions particulières mentionnées. L'emplacement des instruments au sein de chaque pièce a été conservé à chaque fois.

Date	Lieu de prélèvement	Heure de début	Heure de fin	Volume d'air prélevé	Température et humidité relative	Commentaires	Photos
28/06	2 ^{ième} – Mur	10h31	11h01	6,135 L	23,9°C 63% RH	▪ Odeur de neuf ▪ Portes ouvertes vers le hall et vers la cage d'escalier adjacents ▪ Courant d'air important (fenêtre ouverte dans la cage d'escalier adjacente) ▪ Passage d'ouvriers et de plusieurs personnes pendant le prélèvement	 Emplacement de la pompe
	2 ^{ième} – Témoin – Hall	10h33	11h04	6,093 L		▪ Des ouvriers bricolent au-dessus de l'escalier (nettoyage de vitres, utilisation de colle et présence d'emballages de matériaux avec scotch) ▪ Odeur de neuf ▪ Passage de plusieurs personnes dont certaines amènent des effluves de parfum ▪ Portes d'un bureau et du local photocopieuse ouvertes ▪ Prise de température et de RH dans le local photocopieuse adjacent dont la fenêtre et la porte étaient ouvertes	 Prise de température et RH dans le local photocopieuse

							 Emplacement de la pompe sur la table
	3 ^{ème} – Mur – Open-space	11h08	11h37	6,214 L	25,9 °C 56% RH	- Porte des escaliers entrebâillée avec des ouvriers travaillant de l'autre côté de celle-ci - Présence de beaucoup de matériel de travail - Fenêtres fermées - Un ouvrier a nettoyé des vitres juste avant le prélèvement avec un produit contenant 15% d'hydrocarbures aliphatiques et 5% de parfum dont du limonène - Forte odeur de neuf	 Porte entrebâillée + présence de matériel  Nettoyant vitre

	3 ^{ème} – témoin – salle de réunion	11h08	11h37	6,224 L	27 °C 52% RH	2 fenêtres sur 4 ouvertes (une pelouse est tondue à proximité) - Ecran allumé - Forte odeur de neuf	 Emplacement de la pompe au centre de la table
6/07	2 ^{ème} - Mur	12h15	12h56	8L050	24,8 °C 50% RH	NA	
	2 ^{ème} – Témoin - Hall	11h02	11h37	7L161	23,8 °C 50% RH	- Un employé s’est assis sur la table où est réalisé le prélèvement pendant l’échantillonnage - Prise de température/RH dans le hall et non plus dans le local photocopie	
	3 ^{ème} – Mur – Open-space	10h59	11h39	7L976	25°C 53% RH	Du personnel est présent dans l’open-space pendant le prélèvement	 Emplacement de la pompe

							
							Prise de température et HR
	Extérieur	12h19	12h50	5L920	NA	NA	 
							Emplacement de la pompe

21/07	2 ^{ème} – Mur	10h21	10h51	5L717	23 °C 48 % RH	- Un peu de passage (moins que les autres jours) - Porte donnant sur la cage d'escalier ouverte	
	2 ^{ème} – Témoin – Hall	10h26	10h56	5L934		3 portes de bureau ouvertes+ local photocopieuse - Grande feuille sur la table, le prélèvement a donc été réalisé sur la chaise à côté	 Grande feuille sur la table
	3 ^{ème} – Témoin – Salle de réunion	11h00	11h30	5L886	25,2 °C 45 % RH	NA	
	3 ^{ème} – Mur – Open-space	10h54	11h26	6L359	24,8 °C 45 % RH	NA	
	1 ^{ier} – Mur	11h39	12H09	5L916	23,6 °C 50 % RH	- Une dame s'est arrêtée devant la pompe pour l'observer - Quelques personnes sont passées dans le couloir - Présence d'une plante en pot, kentia palm, en face du mur	 Emplacement pompe

	1 ^{ier} – témoin – rez-de-chaussée	11h40	12h10	6L008	24,1 °C 47 % RH	Plantes à gauche de la cage d'escalier et sur l'appui de fenêtre	 Emplacement instruments + plantes sur l'appui de fenêtre  Plantes à gauche de la cage d'escalier
	Extérieur	12h15	12h45	5L920	NA	NA	

Tableau 4: Tableau récapitulatif des prélèvements

4.3. L'analyse des résultats

Chaque cartouche, après être passée dans le GC, a été analysée de la sorte via les programmes Xcalibur et AMDIS35 :

- Le blanc de la cartouche a été déduit de la cartouche de prélèvement via l'outil *Background Substract*.
- Les pics chromatographiques ont été classés dans l'ordre décroissant d'aire des pics. Les 20 pics les plus importants ont été sélectionnés.
- Une vérification de l'analyse automatique des pics a été réalisée en comparant les propositions de polluants via Xcalibur et AMDIS35. Les substances sont identifiées grâce au programme NIST qui compare automatiquement les spectres de masse et évalue la fiabilité de l'identification.
- L'aire des pics a été ajustée au besoin.
- Une liste des temps de rétention et des polluants correspondants a été réalisée.
- L'analyse quantitative des pics chromatographiques n'a pas été prise en compte. Seul un ordre de grandeur a été retenu.

5. Questionnaire de bien-être

En plus d'une analyse scientifique de la qualité de l'air, une analyse sociologique a été envisagée via la rédaction d'une ébauche de questionnaire à distribuer aux employés. L'objectif de ce questionnaire est d'évaluer le bien-être des occupants suite à l'implantation de murs végétaux. Cette étude sociologique peut être mise en regard de l'analyse scientifique afin d'avoir une vision complète de l'influence des murs végétaux sur la qualité de l'air au sein de l'Administration communale de Wiltz.

Le questionnaire sera soumis à tous les étages mais le choix est laissé aux employés de répondre ou non. La fréquence d'administration du questionnaire n'a pas été déterminée précisément mais il pourrait être administré toutes les 2 semaines, soit à la même fréquence que les prélèvements effectués. Cette fréquence assure également une facilité pratique puisqu'elle permet au questionnaire d'être récupéré par l'opérateur réalisant les prélèvements et évite ainsi un déplacement supplémentaire. Il est également prévu que le questionnaire soit anonyme. Ainsi, les résultats seront basés sur une interprétation en pourcentage mais ne permettront pas de suivre l'évolution du bien-être d'une personne au cours du temps. Ce questionnaire sera également mis en rapport avec le calcul du PMV.

La fréquentation des lieux est la suivante :

- Rez+1 : 12 personnes + 4 personnes supplémentaires 2x par semaine
- Rez+2 : 15 personnes
- Rez+3 : 6 personnes + - dans la salle de réunion + 2 personnes 2x par semaine dans l'open-space approximativement.

Une quarantaine de personnes est donc susceptible de participer à l'enquête.

L'ébauche de questionnaire est visible à l'Annexe 11 : Ebauche de questionnaire de bien-être.

Partie 3

Dans cette dernière partie, il sera question d'exposer les résultats obtenus ainsi que les enseignements que l'on peut en tirer pour la suite du projet.

1. Résultats

1.1. Les prélèvements

De nombreux problèmes techniques sont survenus durant l'expérimentation :

- Faute de temps, le premier étage n'a pas pu être échantillonné le 28/06.
- Des blancs n'ont pu être utilisés pour les prélèvements du 6/07 suite à un problème technique du GC.
- L'échantillon de l'open-space au 3^{ième} étage du 6/07 a été mal désorbé et n'a pu être analysé.
- Des pertes de charge non expliquées ont empêché le prélèvement avec cartouche de perçage le 6/07.
- Les prélèvements du 21/07 ont été réalisés sans encombre et correctement analysés par le GC/MS. Toutefois, un problème de synchronisation entre le TD et le programme informatique a empêché l'ouverture des fichiers. Il a donc été impossible d'analyser les résultats de ces prélèvements.
- Une nouvelle journée de prélèvements était prévue pour réaliser une analyse complète de tous les étages et combler les lacunes précédentes. Toutefois, une maintenance sur le TD a été nécessaire, empêchant des échantillonnages dans le temps imparti pour ce mémoire.

Ainsi, il n'existe pas de prélèvements pour tous les étages et pour toutes les pièces, comme initialement prévu.

De plus, le PID installé dans les locaux le premier jour de prélèvement n'a rien détecté. Il ne semble pas être assez sensible pour détecter les faibles émissions présentes à l'Administration communale. Ainsi, l'utilisation de ce PID pour le suivi des COV totaux a été abandonnée.

1.1.1. Les polluants détectés par le GC/MS

Les pics au temps de rétention suivants représentent une contamination due au « trap » et ne sont donc pas à prendre en compte :

- 20.27 : Cyclotrisiloxane, hexamethyl-
- 27.23 : Cyclotetrasiloxane, octamethyl-

L'Annexe 12 : Polluants détectés par le GC/MS (par dates et par pièces) reprend, pour chaque pièce, la liste des principaux polluants et des temps de rétention (RT) associés ainsi que l'aire sous la courbe. Ils sont classés par ordre décroissant. La pièce contenant le mur végétal et l'espace témoin sont présentés en regard.

Les pics pour lesquels les polluants n'ont pu être identifiés avec une quasi-certitude ne sont pas présentés.

Les chromatogrammes précis des échantillons sont visibles à l'Annexe 13 : Chromatogrammes des échantillons réalisés à l'Administration communale de Wiltz.

Ceux-ci seront discutés dans la partie suivante.

1.1.2. Concentrations en PM

Le capteur utilisé pour la mesure de la température et de l'humidité relative était aussi équipé d'un capteur de particules fines. Des mesures ponctuelles ont ainsi été réalisées.

Les concentrations moyennes sur la durée du prélèvement, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sont présentées dans le Tableau 5. Pour les emplacements du capteur, voir le Tableau 4, à la page 46.

28/06					
2 ^{ème} étage			3 ^{ème} étage		
PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
8,76	9,29	9,31	8,86	9,35	9,35
06/07					
2 ^{ème} étage			3 ^{ème} étage		
PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
1,45	1,62	1,62	1,48	1,61	1,62
21/07					
2 ^{ème} étage			3 ^{ème} étage – open-space* 3 ^{ème} étage – espace témoin		
PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
9,55	10,18	10,19	11,85* 12,17	12,74* 13,09	12,93* 13,30
1 ^{er} étage			1 ^{er} étage - témoin		
PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_{10}
9,87	10,52	10,65	10,18	10,84	10,85

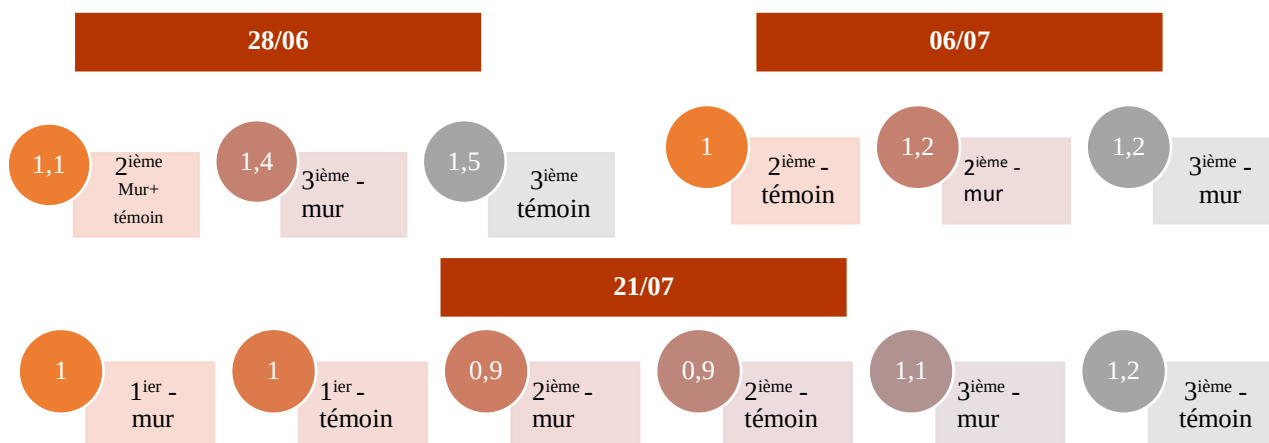
Tableau 5: Concentrations en PM_1 , $PM_{2,5}$ et PM_{10} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

1.2. Questionnaire de bien-être et PMV

Le questionnaire proposé dans le cadre de ce mémoire est une ébauche et n'a donc pas été proposé aux travailleurs de l'Administration. Il n'y a donc pas de résultats pour cette partie. Néanmoins, il est déjà possible de calculer un PMV pour les jours de prélèvements réalisés. Ceci peut fournir une première idée du confort hygrothermique des occupants. Ces résultats pourront être corroborés, par la suite, lorsque le questionnaire aura été présenté aux employés.

Pour ce PMV, les valeurs de température ambiante et d'humidité relative mesurées pendant les échantillonnages ont été utilisées. La température radiante n'ayant pas pu être mesurée, on considère une valeur cohérente similaire à la température ambiante. La vitesse de l'air, inconnue également, est généralement comprise entre 0,05 m/s, pour un air calme, et 0,5 pour un air agité en intérieur (E. Davin, communication personnelle, 9 juillet 2021).

Les PMV obtenus sont les suivants :



2. Discussion

Au vu de la faible quantité de résultats, il est impossible de tirer des affirmations claires et définitives. Les éléments ici discutés doivent donc être vus comme une prémisse et une base de réflexion à l'élaboration d'une méthodologie définitive pour réaliser l'étude des COV dans le cadre du projet MAI. Les prélèvements réalisés ont en effet servi de test permettant une première idée générale de la situation au sein de l'Administration communale de Wiltz.

2.1. Choix méthodologique

2.1.1. Prélèvements

Instrumentation

Un débit de 200mL/ min pendant 30 minutes a été défini pour le premier prélèvement. En effet, puisque tout dans l'Administration a été prévu pour être le moins émissif possible, il était préférable d'optimiser les chances de détecter des polluants. Puisque ce premier prélèvement n'a pas fourni des chromatogrammes très développés, il a été décidé d'augmenter le temps de prélèvement et de passer à 40 minutes pour le suivant. Le débit de 200mL n'a quant à lui pas été augmenté. En effet, il est déconseillé de dépasser cette limite au risque que les molécules n'aient pas le temps de s'adsorber correctement sur la cartouche. Un débit de pompage trop élevé fait circuler trop rapidement les molécules, empêchant une interaction avec le Tenax®. Il est davantage conseillé de jouer sur les temps que sur les volumes.

Les chromatogrammes obtenus avec un temps de prélèvement de 40 minutes étaient semblables à ceux du premier prélèvement. Pour le troisième prélèvement, il a donc été décidé de conserver le temps de prélèvement de 30 minutes puisque l'augmenter ne semble pas apporter d'amélioration significative.

Salles de prélèvement

Les salles de prélèvement ont été choisies le plus judicieusement possible. En effet, lorsque c'était possible, le même type de pièce que celle contenant le mur végétal a été sélectionné pour le témoin. Ainsi, au premier étage, la salle des séances, initialement sélectionnée comme pièce témoin, a été mise de côté. Après une visite sur place, il s'est avéré qu'elle était dans une ambiance trop différente de l'espace ouvert, à proximité de la cage d'escalier, contenant le mur végétal. Pour cette raison, bien que ce soit à un étage différent et avec plus de passage, la zone d'accueil au rez-de-chaussée a été privilégiée. Elle est plus représentative, plus ouverte et profite de la même circulation d'air provenant de la cage d'escalier.

Au deuxième, il a également été décidé de privilégier le hall comme espace témoin à un bureau. En effet, comparer le petit couloir du mur végétal à un espace fermé tel qu'un bureau n'aurait pas de sens. Bien que le hall soit une pièce dont le volume est beaucoup plus important, il est davantage représentatif d'un couloir, avec son passage fréquent. Il est toutefois extrêmement important, pour tous les résultats à venir, de tenir compte du fait que l'on compare deux espaces de volume tout à fait différent. Ainsi, les polluants peuvent être beaucoup plus dilués dans le hall que dans le petit couloir du mur végétal.

Enfin au troisième étage, le choix s'est imposé par l'organisation des pièces. En effet, il n'existe que deux espaces à cet étage : un grand open-space contenant les murs végétaux et une salle de réunion. Ces deux espaces sont similaires dans leur fonction, à savoir des espaces de travail temporaires mais différents par leur volume. Il est encore une fois important de tenir compte de cette différence, principalement dans une approche quantitative des résultats.

Comme on le voit, aucune pièce témoin n'est la parfaite représentante de l'espace contenant le mur végétal. C'est là que réside toute la difficulté et toute la différence par rapport aux analyses de l'influence des murs végétaux en laboratoire : on ne contrôle pas les paramètres et on s'adapte à l'environnement dans lequel on est pour trouver les meilleurs compromis possibles.

Enfin, le prélèvement extérieur a été réalisé sur la place adjacente, à proximité du sol. Pour les prochains prélèvements, il serait intéressant de les réaliser sur la terrasse du premier étage pour être à une hauteur similaire aux prélèvements *indoor*. La circulation de l'air, et donc la répartition des polluants, varie fortement selon que

l'instrument soit au sol ou plus en altitude. Par ailleurs, le prélèvement est réalisé à proximité de la route bien que son influence soit limitée en raison de la situation actuelle (restrictions liées au Covid et période de vacances). Nous ne sommes donc pas à 100% du trafic, ceci peut expliquer les faibles émissions de polluants au niveau de l'air extérieur.

2.1.2. Questionnaire de bien-être

Vu les conditions strictes imposées par le Ministère de la Santé au Luxembourg, il n'a pas été possible de questionner les occupants sur des symptômes cliniques ou des aspects liés à leur santé et à la vie privée.

Les questions proposées fournissent donc une vision générale du bien-être des employés. Les occupants peuvent ainsi fournir leur appréciation vis-à-vis de leur ambiance de travail, une idée du confort dans lequel ils se situent et leur ressenti quant à la présence de murs végétaux. A chaque question, il est laissé au répondant la possibilité de ne pas répondre. Il était très important, afin de ne pas déranger les occupants et de ne pas empiéter sur leur vie privée de leur laisser libre choix quant aux réponses proposées. C'est pour cette raison que des questions davantage ouvertes ont été privilégiées.

Les questions se focalisent principalement sur le confort hygrothermique des occupants, à savoir leur ressenti de la température, de l'humidité mais aussi sur la ventilation, leurs habitudes au sein du bâtiment ou encore leur appréciation des murs végétaux. Bien que la notion de confort englobe également le confort acoustique et visuel, ils n'ont pas été pris en compte dans le questionnaire puisque les réponses fournies par les occupants risqueraient de mettre en position délicate l'Administration communale. En effet, si le confort visuel, par exemple, est insatisfaisant, elle devrait mettre en place des mesures curatives, remettant en compte l'architecture du bâtiment et les travaux de rénovation exécutés.

L'idée est de fournir une idée générale de la manière dont les occupants se sentent dans leur environnement de travail : s'ils se sentent incommodés par la présence de murs végétaux ou si, au contraire, cet aspect rend leur lieu de travail plus agréable.

Au niveau de la fréquence, il semble, à l'heure actuelle, que d'un point de vue théorique, une administration tous les 15 jours soit le plus approprié. En effet, cela permet une concordance pratique et analytique avec les prélèvements d'air réalisés toutes les deux semaines. Pour ce qui est de l'aspect pratique, cela permet à l'opérateur de récupérer les questionnaires remplis lorsqu'il vient faire un prélèvement et de laisser des questionnaires vierges pour les deux semaines à venir. Cela lui permet également de fournir un rappel via sa présence sans quoi les employés pourraient oublier son existence. D'un point de vue analytique, cette fréquence d'administration permet d'avoir, pour chaque prélèvement, une comparaison entre les mesures objectives et la perception du bien-être. Bien que les prélèvements soient ponctuels, on peut supposer qu'ils soient représentatifs de l'environnement général de la semaine. Ceci pourra être corroboré par les analyses non ponctuelles.

Cependant, il se peut que cette fréquence assez élevée pèse sur les occupants et qu'au fur et à mesure du projet, le taux de réponses diminue. C'est aussi pour cette raison que le questionnaire ne contient que neuf questions afin d'éviter de surcharger les répondants. Il est important que répondre au questionnaire prenne peu de temps.

Si lors du projet, il apparaît que répondre au questionnaire toutes les deux semaines est trop lourd, il est possible d'espacer la fréquence (une fois par mois par exemple).

2.2. Qualité de l'air intérieur

2.2.1. COV en temps réel

Les polluants détectés sont des composés classiques de la qualité de l'air intérieur : (ethyl)benzène, toluène, alpha-pyrène, xylène, propanol, haxanol etc.

Bien qu'une analyse quantitative soit absente, on peut néanmoins, via une analyse visuelle des chromatogrammes, voir que les pics n'ont pas des aires significatives¹³ (10^9 ou 10^{10}). Les chromatogrammes et les résultats ne révèlent pas ou peu d'informations déterminantes. On peut supposer que les choix stratégiques des matériaux et des produits d'entretiens de l'Administration communale de Wiltz portent leurs fruits.

¹³ La concentration du composé est proportionnelle à l'aire sous la courbe du pic chromatographique.

Il est également difficile de réaliser une comparaison entre les deux jours de prélèvement dans la mesure où les volumes de prélèvement ne sont pas similaires (environ 6 litres pour le 28/06 et 8 litres pour le 06/07). L'air extérieur semble également être étonnamment « propre ».

Quelques petites particularités sont néanmoins à mentionner.

1. Des diethyls phtalates (RT : 31.48/31.68) sont visibles au deuxième étage, dans le couloir du mur végétal, le 28/06. Ce composé n'est présent dans aucune autre pièce. La particularité de ce polluant réside dans le fait qu'il est davantage présent dans la cartouche de perçage que dans la première cartouche, comme on peut le voir à la Figure 32 (perçage en rouge).

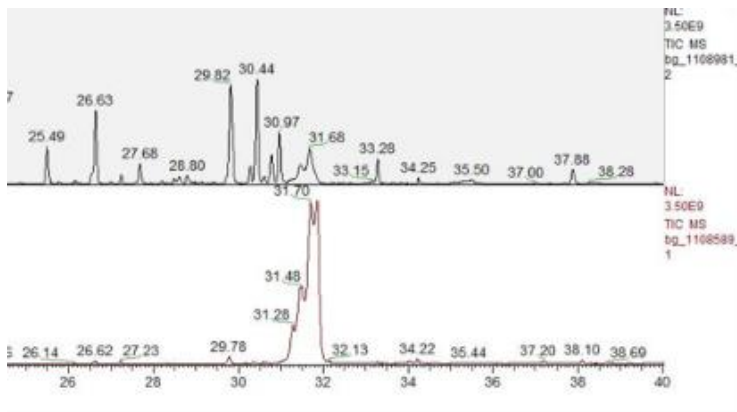


Figure 32: Chromatogrammes du mur végétal- 2ième étage- 28/06- Zoom RT 31.68

de perçage n'a pas été expliquée. La mise en cause des tubes utilisés entre la première cartouche et celle de perçage a été envisagée. Cette hypothèse a toutefois été rejetée puisque ce composé n'est présent dans aucune autre pièce.

Les diethyls phtalates sont utilisés dans les plastifiants, dans plus de 67 cosmétiques, produits de maquillage, vernis à ongles ou parfums ou encore dans les sprays insecticides (Sekizawa & International Programme on Chemical Safety, 2003). Leur présence est donc souvent liée à l'Homme mais la quantité semble trop importante pour être issus d'un parfum ou d'un cosmétique.

Comme des diethyls phtalates n'ont pas été détectés lors du deuxième prélèvement, il semble donc que ce composé soit un événement ponctuel non expliqué et non une pollution générale de l'Administration communale. Il est toutefois intéressant de noter que ce composé a été retrouvé à l'extérieur lors du prélèvement du 06/07. Il est possible que ces composés (pouvant exister dans l'atmosphère sous forme de vapeur) proviennent d'une pollution par l'air extérieur, d'autant que les portes et les fenêtres étaient grandes ouvertes le 28/06, créant un grand courant d'air dans le couloir. Malheureusement seul un prélèvement extérieur le 28/06 aurait pu confirmer cette hypothèse.

2. Du caprolactame a été retrouvé dans le prélèvement témoin au deuxième étage le 28/06. Ce composé n'est pas couramment étudié dans l'air intérieur. Il est utilisé dans la composition de fibres synthétiques, principalement dans le nylon 6 mais aussi dans les poils de brosse, les raidisseurs textiles ou les plastiques (EPA, 2000). Toutefois, comme les diethyls phtalates, ce composé n'est pas présent lors du deuxième prélèvement. Il est donc probable qu'il provienne d'une pollution ponctuelle.
3. Bien que la différence ne soit pas flagrante, on remarque des pics chromatographiques un peu plus grands lors du prélèvement du 06/07, comparativement à celui du 28/06. Cela peut s'expliquer par le temps de prélèvement plus élevé, permettant aux molécules de mieux s'adsorber. Il est toutefois très délicat de comparer les deux prélèvements dans la mesure où il n'y a pas eu de blancs réalisés pour les cartouches du second. Ainsi, la présence de pics plus importants peut aussi s'expliquer par l'absence de blanc. De plus, cette constatation n'est valable que pour le deuxième étage où on dispose de deux prélèvements à deux dates différentes. Par conséquent, on ne peut pas conclure que c'est le temps de prélèvement qui est en cause. Les résultats du 21/07 auraient pu permettre un éclaircissement sur cette question.
4. Quant aux comparaisons entre les espaces contenant les murs végétaux et les espaces témoins, elles ne montrent pas non plus de différences significativement visuelles bien qu'il en existe. On a vu dans la première partie que certaines plantes sélectionnées pouvaient montrer des réductions de toluène ou de xylène.

Les aires des pics pour le toluène et le p-xylène sont, par exemple, généralement plus petites dans l'environnement du mur végétal que pour l'espace témoin :

- 1,29E+09 dans l'espace témoin au 2^{ième} étage contre 8,95E+08 dans l'espace du mur végétal pour le toluène le 28/06 ;
- 4,40E+09 dans l'espace témoin au 3^{ième} étage contre 2,30E+09 dans l'espace du mur végétal pour le toluène le 28/06 ;
- 9,39E+09 dans l'espace témoin au 2^{ième} étage contre 6,76E+08 dans l'espace du mur végétal pour le p-xylène le 06/07 ;
- 2,85E+09 dans l'espace témoin au 3^{ième} étage contre 1,45E+09 dans l'espace du mur végétal pour le toluène le 06/07.

Même sans réaliser d'analyse quantitative, en suivant la relation aires du pics - concentration en polluant, on peut admettre que l'ambiance directe des murs végétaux est moins concentrée en toluène et en p-xylène que les espaces témoins. Il est cependant difficile, à ce stade, de mettre en cause le potentiel dépolluant des plantes. Des analyses plus détaillées et plus nombreuses devront permettre d'affirmer ou non cette observation sur le long terme.

2.2.2. PM

Il n'existe pas de valeurs guides pour l'air intérieur mais bien pour l'air ambiant :

- ✓ Pour les PM_{2,5} :
 - 10 µg/m³ moyenne annuelle
 - 25 µg/m³ moyenne sur 24 heures
- ✓ Pour les PM₁₀ :
 - 20 µg/m³ moyenne annuelle
 - 50 µg/m³ moyenne sur 24 heures.

On peut penser que pour l'air intérieur, ces recommandations de l'OMS (OMS, 2018) soient plus faibles puisque les polluants sont moins dilués que dans l'air extérieur.

Les valeurs générales des PM mesurées lors des prélèvements se trouvent autour de 10 µg/m³¹⁴ sauf le 6/07 où elles sont plus proches de 0. Une hypothèse se situe dans l'influence de l'air extérieur. Bien qu'il n'existe pas de station à proximité de Wiltz, la station de Sainte-Ode (en Belgique) à caractère rurale peut être utilisée pour avoir une idée des concentrations en PM à l'extérieur. Pour le 6/07, les concentrations horaires en PM₁₀ et PM_{2,5} aux heures de prélèvements se situent entre 0 et 2 µg/ m³ alors qu'elles varient entre 15 et 18 µg/ m³ pour les PM₁₀ et entre 8 et 11 µg/ m³ pour les PM_{2,5} le 21/07. On peut donc, même si l'air de Wiltz n'est pas celui de Sainte-Ode, émettre l'hypothèse que la différence de concentrations mesurées au sein de l'administration entre 6/07 et le 21/07 provient d'une influence de l'air extérieur.

Les concentrations extérieures le 28/06 étaient faibles (de 0 à 4 µg/ m³), similairement au 6/7 mais, la présence d'ouvriers et le contexte de travaux au sein du bâtiment peut expliquer que les concentrations intérieures en PM étaient plus élevées le 28/06 que le 6/07.

L'ICP DAS, qui assurera une mesure en continu des PM, pourra fournir plus précisément des concentrations moyennes dans le bâtiment.

2.2.3. Alternatives

- Un essai de prélèvement à 150mL pendant plus longtemps (1h par exemple) pourrait être envisagé. On l'a vu, on évite généralement de dépasser la barre des 200mL pour le débit. Il est préférable de jouer sur le temps. Toutefois, une heure de prise par pièce demande une ressource humaine importante et coûteuse, probablement à éviter dans le cadre du projet.

¹⁴ Les concentrations proviennent de l'historique du site *Wallonair* géré par l'ISSEP et l'AWAC

- Bien que le perçage n'ait pas été significatif, il est préférable de le conserver pour les prochains prélèvements. En effet, il est souvent conseillé de réaliser un perçage afin de s'assurer que les cartouches ne saturent pas.
 - Des phénomènes de co-élution semblent être présents dans la méthode d'analyse ainsi créée. Ce phénomène se produit lorsque plusieurs composés ne se séparent pas bien. Cela peut se produire lorsque les temps de rétention de ces composés sont plus proches que la résolution de la méthode. Il est généralement nécessaire d'ajuster la méthode pour la rendre plus sélective et efficace. On peut par exemple modifier la longueur de la colonne, les températures de chauffe ou encore les phases mobile et stationnaire (Dworkin, 2011). Toutefois, au vu du coût élevé d'une colonne, il est préférable et plus facile d'adapter les températures, n'engendrant pas de coût supplémentaire.
- La Figure 33 montre un exemple de ce problème. Le pic de rétention à 29.82 ne permet pas d'identifier clairement le composé. En utilisant la fonction *subtract spectra*, le programme NIST montre la présence de 2 ou 3 composés possibles mais dont les probabilités sont faibles. Il est dans ce cas impossible d'établir clairement l'identité du composé.

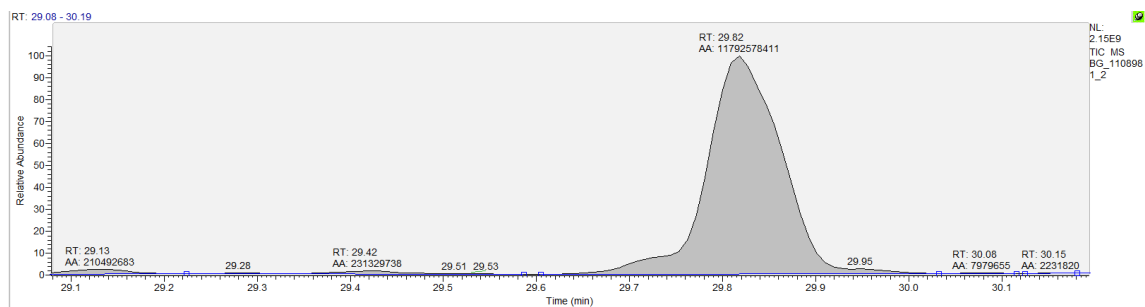


Figure 33: Chromatogramme du prélèvement du 28/06 au 2^{ème} étage - Mur végétal. Zoom sur le RT 29.82

- Pour assurer un suivi des COV totaux, le PID devrait disposer d'un capteur plus précis avec une gamme de concentration plus sensible. La gamme de 0 à 2000 ppm prévue dans le Dräger n'est pas adaptée à l'Administration communale. Il existe par exemple un PID DrägerSensor® ayant une gamme de concentration de 0.025 à 10 ppm. Ce capteur est toutefois compatible avec l'appareil Dräger X-am® 8000 et non Dräger X-am® 7000.

2.3. Bien-être

L'échelle de résultats PMV est la suivante :

- +3 très chaud
- +2 chaud
- +1 légèrement chaud
- 0 ni chaud, ni froid
- -1 légèrement froid
- -2 froid
- -3 très froid

L'idéal est d'obtenir un PMV de 0, indiquant un confort optimal. Toutefois, on considère que la zone de confort s'étale de -1 à +1. Les PMV ici calculés semblent donc montrer un confort correct quoique légèrement trop chaud, surtout au 3^{ème} étage.

Une température comprise entre 19 et 24°C est généralement conseillée pour assurer de bonnes conditions de travail. Toutefois, on remarque, dans certaines pièces, et surtout au 3^{ème} étage, des températures plus élevées allant jusqu'à 27°C. Aux autres étages, les températures sont également assez élevées, entre 23 et 25°C. Bien que correctes, elles sont dans une tranche élevée. Il serait donc intéressant de vérifier cet aspect grâce au questionnaire de bien-être et voir si la température est un facteur dérangerant pour les occupants ou s'ils s'en accommodent.

Il est possible qu'aucune gêne hygrothermique ne soit ressentie d'autant que ce calcul de PMV est simplifié. Les valeurs sont approximatives et ne fournissent qu'une idée du confort hygrothermique et non une information tout à fait exacte. Le PMV est à conserver comme un indicateur et à corrélérer avec les résultats du questionnaire.

Conclusion

« La véritable science enseigne par-dessus tout à douter et à être ignorant. »

Cette citation de Miguel de Unamuno semble taillée sur mesure pour la qualité de l'air intérieur.

En effet, la qualité de l'air intérieur est un savant mélange de sources d'émissions variées, d'instruments de mesure trop peu sensibles, d'incertitudes quant aux polluants détectés, d'influences des conditions ambiantes et d'interactions diverses. Ce sont autant de paramètres amenant le chercheur à émettre des hypothèses et à proposer un diagnostic parfois fébrile.

Dans un premier temps, je me suis attelée à démontrer en quoi la qualité de l'air intérieur pouvait impacter notre santé, d'où provenaient les polluants qui nous entourent et quelles étaient leurs caractéristiques. Il en ressort que notre quotidien est baigné dans un cocktail de polluants. Tout autour de nous émet des composés plus ou moins toxiques : les meubles, les produits d'entretien, les journaux, les modes de cuisson, de chauffage ou encore nos cosmétiques. On est alors en contact constant avec des particules fines, conséquences des activités de combustion, des métaux, des composants des peintures ou des COV, ces composés organiques volatiles (formaldéhyde, phthalates, HAP, benzène etc.) aux origines variables : peintures, solvants, activités de combustion, etc. Ces polluants peuvent créer des problèmes respiratoires et/ou cardiovasculaires, des cancers, de l'asthme, des irritations de la peau ou encore des dérèglements du système nerveux.

Ainsi, pour assainir un tant soit peu notre air, des techniques de phytoremédiation (via des plantes en pot ou des murs végétaux) ont été étudiées : d'abord dans des chambres contrôlées en laboratoire et, petit à petit, dans des environnements aux conditions plus proches de la réalité. Des essais tendent à démontrer que certaines plantes peuvent avoir un effet dépolluant en réduisant les concentrations de toluène, de xylène ou de formaldéhyde par exemple. Le projet MAI, mis en place au sein de l'Administration communale de Wiltz a pour objectif d'étudier, en conditions réelles, l'impact de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur.

Pour ce faire, une méthodologie a été développée ciblant certains polluants : aldéhydes, COV et moisissures principalement. Les circonstances actuelles n'ont permis d'expérimenter, dans le cadre de ce mémoire, que les analyses de COV. Trois jours d'échantillonnage ont ainsi pu être réalisés, testant les conditions optimales pour le prélèvement sur cartouches Tenax®. En parallèle, des mesures ponctuelles de température, d'humidité relative et de PM (PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀) ont été effectuées. Pour chaque étage de l'Administration, un prélèvement a été réalisé dans l'ambiance directe du mur et un autre dans un espace témoin, aux conditions similaires.

Les résultats ont montré la présence de polluants couramment rencontrés en air intérieur : xylène, alpha-pinène, ethylbenzène, toluène, propanol etc. Toutefois, l'absence d'analyse quantitative rend impossible d'émettre des conclusions quant aux concentrations rencontrées. On a néanmoins pu constater qu'il existait peu de différences visibles entre l'espace témoin et l'ambiance du mur végétal. On semble généralement retrouver les mêmes polluants dans les deux espaces, et même aux différents étages, bien que les aires des pics chromatographiques varient légèrement. Des aires légèrement plus petites sont visibles dans l'espace du mur végétal au 2^{ème} étage pour le toluène et le xylène, comparativement à l'espace témoin. Seules des analyses ultérieures et plus nombreuses permettront de confirmer et de généraliser cette observation.

En ce qui concerne la méthodologie, les quelques prélèvements ont permis de tirer les enseignements suivants :

- L'utilisation des cartouches de perçage est conseillée, offrant une sécurité quant à la totale absorption des polluants. L'analyse de ces cartouches ne demandent pas un travail supplémentaire considérable et permet de pallier à la saturation de la cartouche de base pour certains polluants. En effet, chaque polluant a un volume de perçage différent, il est donc difficile d'avoir un débit et un volume de prélèvement parfait pour tous les polluants.
- Le volume de prélèvement variant entre 6 et 8L est potentiellement trop faible puisque les chromatogrammes ne montrent pas des pics considérables. Pour éviter de dépasser la limite des 200 mL par minute généralement conseillée, je propose de réaliser quelques tests complémentaires à un débit plus faible mais pendant une période plus longue. Lors des tests un débit de 200mL a été utilisé pendant 30 et 40 minutes. Il serait intéressant de tester 150 mL pendant 1h par exemple. Toutefois, cet allongement du temps de prélèvement risque de compliquer les échantillonnages et de consommer trop de temps pour le projet.

- Vu les probables problèmes de co-élution présents dans la méthode d'analyse du GC/MS, il serait intéressant de modifier les températures de chauffe du four pour assurer une meilleure séparation des composés. On constate par exemple l'absence de polluants (or interférents) avant 12 minutes. Il pourrait donc être intéressant de chauffer plus rapidement par exemple.

En parallèle de ces prélèvements, un questionnaire de bien-être a été ébauché. Il est destiné aux occupants du bâtiment afin d'analyser leur ressenti par rapport aux murs végétaux et aux conditions ambiantes de leur lieu de travail. Il serait idéal de tester ce questionnaire auprès des employés, de récolter leurs avis avant de proposer une version définitive à administrer toutes les deux semaines. Cette fréquence d'administration pourra être ajustée en fonction du retour des occupants pour éviter que le questionnaire ne pèse et ne soit plus utilisable.

Nous l'avons vu, l'Administration communale de Wiltz a émis des choix réfléchis quant à la manière de rénover son bâtiment : matériaux de construction peu émissifs et produits d'entretien à faibles émissions de COV. Ces choix, intéressants d'un point de vue sanitaires, rendent l'analyse de l'impact des murs végétaux difficile. Des technologies de pointe pourraient permettre d'obtenir des résultats plus précis et de mettre en place une méthodologie plus sensible pour des bâtiments à faibles émissions. Les analyses sont néanmoins réalisées dans le budget et dans les moyens mis à disposition pour le projet MAI. Ce mémoire a donc initié les prélèvements et les analyses de COV mais seule la suite du projet MAI permettra de tirer des conclusions sur l'Administration communale de Wiltz.

Bibliographie

- Administration de l'Environnement. (s. d.). *RÉSEAUX DE MESURE DE LA QUALITÉ DE L'AIR AU LUXEMBOURG*.
- Administration de l'Environnement. (2020). *PROJET DE PLAN NATIONAL DE LA QUALITÉ DE L'AIR VISANT À ATTEINDRE LES VALEURS LIMITES POUR LE DIOXYDE D'AZOTE DANS L'AIR AMBIANT*.
- Anses. (2016). *Dioxyde de carbone (CO2) dans l'air intérieur* | Anses—Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. <https://www.anses.fr/fr/content/dioxyde-de-carbone-co2-dans-l%E2%80%99air-int%C3%A9rieur>
- APPA Nord-Pas de Calais. (2010). *Plantes & qualité de l'air intérieur : Les apports du Programme PHYTAIR*.
- Armijos Moya, T., van den Dobbelsteen, A., & Ottelé, M. (2019). A review of green systems within the indoor environment. *Indoor and Built Environment*, 28(3), 298-309.
- Blanc, E. (2020, novembre 18). *Maison écolo : Comment rénover son intérieur en limitant les polluants ?* Santé Magazine. <https://www.santemagazine.fr/sante/sante-environnementale/quels-materiaux-ecologiques-pour-renover-son-interieur-en-respectant-sa-sante-872484>
- Candas, V. (2000). *Confort thermique*.
- Changing Markets Foundation. (2018). *A la recherche des toxiques*.
- Chêne ESSENCE PLANK XT 1 Strip Shade Parquets. (s. d.). Tarkett.com. Consulté 30 mars 2021, à l'adresse https://particuliers.tarkett.be/fr_BE/collection-C000243-shade/chene-essence-plank-xt-1-strip
- Conidair. (2015, septembre 1). *Quels prélèvements d'air choisir ? conidair*. <https://conidair.fr/quels-prelevements-dair-choisir/>
- CST. (2017). *Séance d'information : Les émissions de COV par les matériaux de finition intérieure*.
- Cuny, D., Hanoune, B., Bulteau, G., Guilhot, J., & Nicolas, M. (2012). *EPURATION ET BIOSURVEILLANCE PAR LES PLANTES DES POLLUANTS DE L'AIR INTÉRIEUR - Projet PHYTAIR phase 3*.
- Davin, E. (2021, juillet 9). *PMV* [Communication personnelle].
- Desso. (s. d.). *AirMaster® EcoBase™ SoundMaster—Fiche technique du produit*.
- Dworkin, J. P. (2011). Chromatographic Co-elution. In M. Gargaud, R. Amils, J. C. Quintanilla, H. J. (Jim) Cleaves, W. M. Irvine, D. L. Pinti, & M. Viso (Éds.), *Encyclopedia of Astrobiology* (p. 302-302). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_289

- E. Cummings, B., & S. Waring, M. (2020). Potted plants do not improve indoor air quality : A review and analysis of reported VOC removal efficiencies. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 30, 253-261.
- en.climate-data.org. (s. d.). *Wiltz climate : Average Temperature, weather by month, Wiltz weather averages—Climate-Data.org*. Consulté 5 avril 2021, à l'adresse <https://en.climate-data.org/europe/luxembourg/district-diekirch/wiltz-19475/>
- environnement.wallonie. (1998). 1.6. *Impacts de la pollution atmosphérique*. http://environnement.wallonie.be/rapports/dppgss/air1998/intro/1_6.htm
- EPA. (2000). *Caprolactam—Fact sheet*.
- EPD International AB. (2019). *DESSO AirMaster® Gold collection TARKETT (S-P-01506)*.
- Experts Ooreka. (s. d.). *Sphaigne au jardin*. Ooreka.fr. Consulté 18 février 2021, à l'adresse <https://jardinage.ooreka.fr/astuce/voir/308098/sphaigne-au-jardin>
- Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1998). Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures. *Indoor Air*, 8(4), 276-284. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.00008.x>
- Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1999). Impact of Temperature and Humidity on Chemical and Sensory Emissions from Building Materials. *Indoor Air*, 9(3), 193-201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t01-1-00006.x>
- FFB. (2018). *QAI - Guide pratique—Enjeux et bonnes pratiques pour les métiers du bâtiment*.
- Fleck, R., Gill, R. L., Pettit, T., Irga, P. J., Williams, N. L. R., Seymour, J. R., & Torpy, F. R. (2020). Characterisation of fungal and bacterial dynamics in an active green wall used for indoor air pollutant removal. *Building and Environment*, 179, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106987>
- FONTAN, J. (2020, avril 28). Les pollutions de l'air. *Encyclopédie de l'environnement*. <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/les-pollutions-de-lair/>
- Freddy F. (s. d.). *Application de dioxyde de carbone (CO2) en culture Intérieure | CANNA CANADA*. Consulté 25 juillet 2021, à l'adresse https://www.canna.ca/fr-ca/application_de_dioxyde_de_carbone_co2_en_culture_interieure
- Gong, Y., Zhou, T., & Wang, P. (2019). Fundamentals of Ornamental Plants in Removing Benzene in Indoor Air. *Atmosphere*, 10(4), 221.

- Han, K.-T. H., & Ruan, L.-W. (2020). Effects of indoor plants on air quality : A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 16019-16051.
- Indice PMV – PPD de confort thermique. (2016, janvier 6). Beswic. <https://www.beswic.be/fr/themes/agents-physiques/ambiances-thermiques/indices-de-confort-et-de-contrainte-thermique/indice-pmv-ppd-de-confort-thermique>
- INRS. (2021). *Prélèvement actif des gaz, vapeurs et aérosols semi-volatils*.
- Irga, P. J., Abdo, P., Zavattaro, M., & Torpy, F. R. (2017). An assessment of the potential fungal bioaerosol production from an active living wall. *Building and Environment*, 111, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.004>
- Istituti Clinici Scientifici Maugeri. (s. d.). *Volatile organic compounds (VOCs) thermally desorbed*.
- Jeong-Eun Song, Yong-Shik Kim, & Jang-Yeul Sohn. (2011). A Study on the Seasonal Effects of Plant Quantity on the Reduction of VOCs and Formaldehyde. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 10(1), 241-246.
- Kegge, W., Gankema, P., & Pierik, R. (2013). *Plant-produced volatile organic compounds*. McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.YB133331>
- Les avantages de l'enduit à l'argile pour une construction écologique. (s. d.). *Energie-renouvelable.tv - Alcove Media*. Consulté 27 mars 2021, à l'adresse <https://www.energie-renouvelable.tv/les-avantages-de-lenduit-a-largile-pour-une-construction-ecologique/>
- Maret, L. (2013). *Application de la technique de thermodésorption pour l'analyse de 93 COV et le screening des COV dans l'air des lieux de travail*.
- Marlet, C., Plaisance, H., Brostaux, Y., & Lognay, G. (2011). *Évaluation d'une méthode d'échantillonnage passif pour la mesure des monoterpènes dans l'air intérieur Evaluation of a passive sampling method for the measurement of monoterpenes in indoor air*. 12.
- Materić, D., Bruhn, D., Turner, C., Morgan, G., Mason, N., & Gauci, V. (2015). Methods in plant foliar volatile organic compounds research. *Applications in Plant Sciences*, 3(12), 1500044. <https://doi.org/10.3732/apps.1500044>
- Neogen. (s. d.). *Dichloran Glycerol (DG-18) Agar Base*. <https://www.neogen.com>. Consulté 15 mai 2021, à l'adresse https://www.neogen.com/categories/microbiology/dichloran-glycerol-agar-base/?utm_medium=SocialShare

OMS. (2018). *Qualité de l'air ambiant et santé*. [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Peinture minérale : Caractéristiques, application et prix - Ooreka. (s. d.). Ooreka.fr. Consulté 27 mars 2021, à l'adresse [//peinture.ooreka.fr/astuce/voir/545519/peinture-minerale](http://peinture.ooreka.fr/astuce/voir/545519/peinture-minerale)

Peintures, environnement et santé. (2014, avril 14). écoconso. <https://www.ecoconso.be/fr/Peintures-environnement-et-sante>

Penuelas, J., & Llusia, J. (2004). Plant VOC emissions : Making use of the unavoidable. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 19(8).

Petit, T., Irga, P. J., & Abdo, P. (2017). Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter? *Building and Environment*, 125(15), 299-307.

Picbleu. (2021, mai 6). *Quels sont les principaux polluants de l'air de votre maison ?* <https://www.picbleu.fr/page/quels-sont-les-principaux-polluants-dans-air-votre-maison#Les%20polluants%20de%20l'air%20int%C3%A9rieur>

Placo Saint-Gobain. (2014). *Déclaration volontaire de données de sécurité- plaque de plâtre*.

Plafond Gyplat : Une adhérence parfaite pour le plâtre. (2020, octobre 20). parachevementshop.com. <https://www.parachevementshop.be/conseils-bricolage/plafonds/plafond-gyplat>

Portail de l'environnement. (2019a, juin 5). *Historique des valeurs mesurées pour les PM*. http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/PM/historique-PM.html

Portail de l'environnement. (2019b, juin 6). *Historique des valeurs mesurées pour le SO2*. environnement.public.lu. http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/les_oxydes_de_soufre_SOx/historique-SO2.html

Portail de l'environnement. (2020, août 31). *Historique des valeurs mesurées pour l'ozone (O3)*. http://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/ozone/historique-O3.html

Portail de l'environnement. (2021). *Air*. environnement.public.lu. <http://environnement.public.lu/fr/loft/air.html>

Pourquoi appliquer un enduit à la chaux sur un mur intérieur ? (2019, juin 15). *Bio Construct*. <https://www.bio-construct.ch/pourquoi-appliquer-un-enduit-a-la-chaux-sur-un-mur-interieur/>

Precision Laboratories. (2016, décembre 26). A Closer Look : Malt Extract Agar | Precision Laboratories Test Strips. *Precision Laboratories*. <https://www.preclaboratories.com/closer-look-malt-extract-agar/>

- Quels sont les différents systèmes de ventilation ?* (s. d.). Consulté 30 mars 2021, à l'adresse <https://www.oqai.fr/fr/faqs/quels-sont-les-differents-systemes-de-ventilation>
- Robin, D. (2017). 1. Méthodologie de prélèvement. *Airpaca*, 60.
- Sekizawa, J., & International Programme on Chemical Safety (Éds.). (2003). *Diethyl phthalate*. World Health Organization.
- Service public fédéral Emploi, Travail et concertation sociale. (2019). *Directive pratique « Qualité de l'air intérieur dans les locaux de travail »*.
- Sigmaaldrich. (s. d.-a). *LpDNPH Cartridges—Solvent Desorption Tubes & Cartridges*. Sigma-Aldrich. Consulté 23 avril 2021, à l'adresse <https://www.sigmaaldrich.com/analytical-chromatography/analytical-products.html?TablePage=9645754>
- Sigmaaldrich. (s. d.-b). *radiello® Diffusive Air Sampling Application—VOCs Thermally Desorbed*. Sigma-Aldrich. Consulté 20 mars 2021, à l'adresse <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/analytical/radiello-air-sampler/vocs-thermally-desorbed-applications.html>
- Sigmaaldrich. (s. d.-c). *What is radiello® diffusive sampling?* Sigma-Aldrich. Consulté 8 mars 2021, à l'adresse <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/analytical/radiello-air-sampler/diffusive-sampling-system.html>
- Song, J.-E., Sohn, J.-Y., & Kim, Y.-S. (2007). The Impact of Plants on the Reduction of Volatile Organic Compounds in a Small Space. *Journal of physiological anthropology*, 26, 599-603.
- SPF Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire et Environnement,. (2016). *COV- les composés organiques volatiles*.
- Stapleton, E., & Ruiz-Rudolph, P. (2018). The potential for indoor ultrafine particle reduction using vegetation under laboratory conditions. *Indoor and Built Environment*, 27(1), 70-83.
- STATEC. (2019). *ATLAS DÉMOGRAPHIQUE DU LUXEMBOURG*.
- Suarez-Caceres, G. P., Fernandez-Canero, R., Fernandez-Espinosa, A. J., & Rossini-Oliva, S. (2021). Volatile organic compounds removal by means of a felt-based living wall to improve indoor air quality. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 177-182.
- Susanne Preunkert et al. (2019, mai 9). *Les glaces du Mont-Blanc ont gardé les traces de la pollution de l'époque Romaine* | CNRS. <https://www.cnrs.fr/fr/les-glaces-du-mont-blanc-ont-garde-les-traces-de-la-pollution-de-lepoque-romaine>

- Système tout air, à débit constant, mono-gaine. (2007, septembre 25). *Energie Plus Le Site*. <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/systemes-d-emission-de-froid/systemes-sur-l-air/systeme-tout-air-a-debit-constant-mono-gaine/>
- Tarkett. (2018). *DESSO Airmaster Brochure Finale*.
- uqac. (2020, novembre 6). *CHAPITRE XII: LA CINÉTIQUE EN PHASE HÉTÉROGÈNE*. http://uqac.ca/chimie_ens/Cinetique_chimique/CHAP_12.html
- US EPA, O. (2014, août 14). *Introduction to Indoor Air Quality* [Collections and Lists]. US EPA. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>
- Vivaldo, G., Masi, E., Taiti, C., Caldarelli, G., & Mancuso, S. (2017). The network of plants volatile organic compounds. *Scientific Reports*, 7(1), 11050. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10975-x>
- Waters. (2007). *Détermination du formaldéhyde dans l'air*. [Www.waters.com](http://www.waters.com)
- Wolkoff, P. (1998). Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term voc emissions from building products. *Atmospheric Environment*, 32(14), 2659-2668. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00402-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00402-0)
- Wood, R. A., Burchett, M. D., Alquezar, R., Orwell, R. L., Tarran, J., & Torpy, F. (2006). The Potted-Plant Microcosm Substantially Reduces Indoor Air VOC Pollution : I. Office Field-Study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 175(1-4), 163-180. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9124-z>
- Yang, D. S., Son, K.-C., & Kays, S. J. (2009). Volatile Organic Compounds Emanating from Indoor Ornamental Plants. *American Society for Horticultural Science*, 44, 396-400. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.396>

Annexes

Annexe 1 : Temps de prélèvement tubes Radiello®

Compound	Q ₂₉₈ ml·min ⁻¹	exposure time upper limit (days)	linear up to µg·m ⁻³ ·min	uncertainty (2σ) %	limit of detection ¹ µg·m ⁻³
benzene	27.8	7	410,000	8.3	0.05
benzene	26.8	14	410,000 ²	7.5	0.05
butyl acetate	24.5	14	580,000	12.4	0.05
2-butoxyethanol	19.4	14	550,000	9.7	0.1
cyclohexane	27.6	7	470,000	14.7	0.1
n-decane	22.3	14	450,000	22.4	0.1
1,4-dichlorobenzene	22.0	14	650,000	9.5	0.1
dimethyl disulfide	23.7	7	500,000	9.1	0.04
n-heptane	25.3	14	420,000	7.6	0.05
n-hexane	25.5	7	420,000	10.9	0.05
ethylbenzene	25.7	14	550,000	9.1	0.01
2-ethyl-1-hexanol	14.3	14	550,000	17.4	0.07
2-ethoxyethanol	26.0	14	570,000	7.7	0.05
2-ethoxyethyl acetate	20.9	14	600,000	8.0	0.05
isopropyl acetate	25.8	7	540,000	9.6	0.1

limonene	12.8	14	550,000	24.8	0.2
2-methoxyethanol	4.0	7	1,000,000	--	1.0
2-methoxyethyl acetate	21.0	7	1,000,000	--	0.1
1-methoxy-2-propanol	26.6	7	600,000	11.6	0.2
n-nonane	21.0	14	440,000	11.8	0.07
n-octane	24.1	14	440,000	13.4	0.07
α-pinene	6.4	14	550,000	29.5	0.2
styrene	27.1	14	550,000	24.0	0.01
tetrachloroethylene	25.4	7	1,000,000	8.9	0.02
toluene	30.0	14	550,000	8.3	0.01
1,1,1-trichloroethane	20.0	7	300,000	13.0	0.1
trichloroethylene	27.1	7	800,000	9.5	0.02
1,2,4-trimethylbenzene	21.9	14	550,000	9.6	0.05
n-undecane	12.0	14	520,000	32.7	0.05
m-xylene	26.6	14	550,000	11.3	0.01
o-xylene	24.6	14	550,000	9.1	0.01
p-xylene	26.6	14	550,000	11.3	0.01
¹ after 7 days exposure and with MS detection; analytical conditions as described in the Analysis paragraph					
² for overall VOCs concentrations not exceeding 500 µg·m ⁻³					
Sampling Rate Values Q at 25 °C (298 K)					

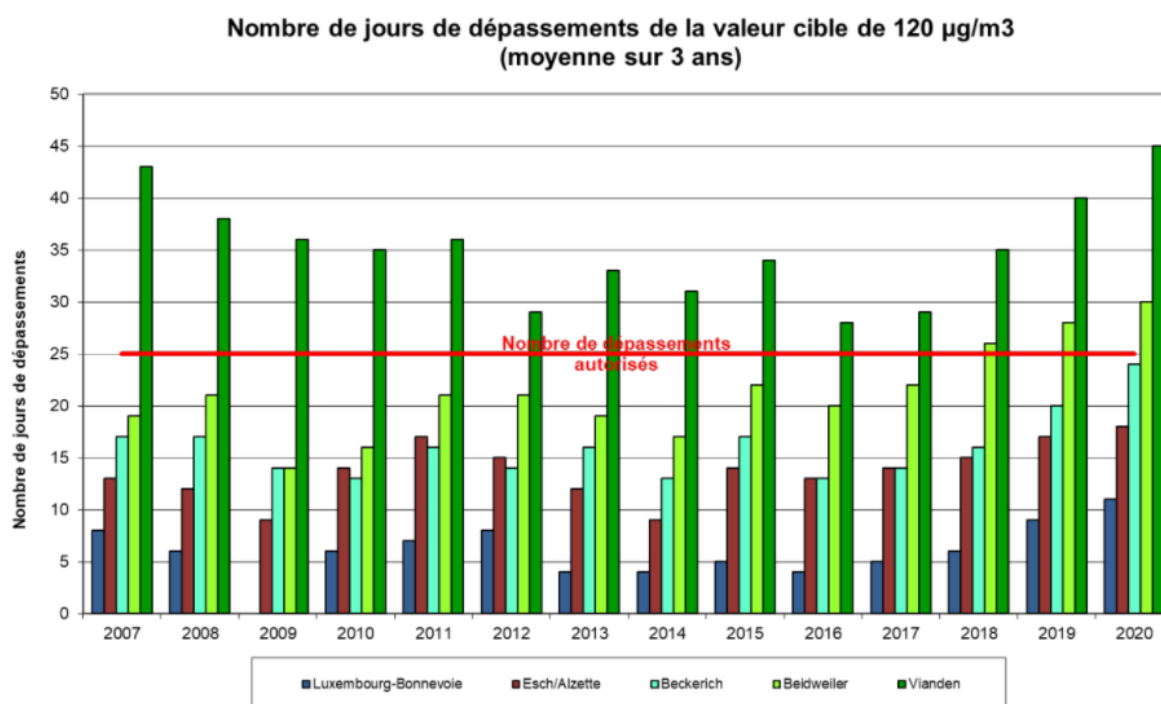
Source : <https://www.sigmaaldrich.com/FR/fr/technical-documents/protocol/environmental-testing-and-industrial-hygiene/air-testing/vocs-thermally-desorbed-applications>

Annexe 2 : Volume de perçage

COV	Tenax TA	Carbotrap C	Carboxen 569	Carbosieve SIII
<i>pentane</i>	5	0,25	200	600
<i>n-hexane</i>	31,6	1,30	2600	5000
<i>Méthanol</i>	0,21	0,006	0,95	7,50
<i>Ethanol</i>	1,8	0,013	3,30	55
<i>Ethyl acétate</i>	34			
<i>Acetone</i>	6		7,00	
<i>Méthyl Ethyl Cétone</i>	40		4,00	
<i>Chloroforme</i>	19	0,03	240	
<i>Chlorobenzène</i>	390	5	20000	
<i>Benzène</i>	70		85	
<i>Toluène</i>	400		2700	

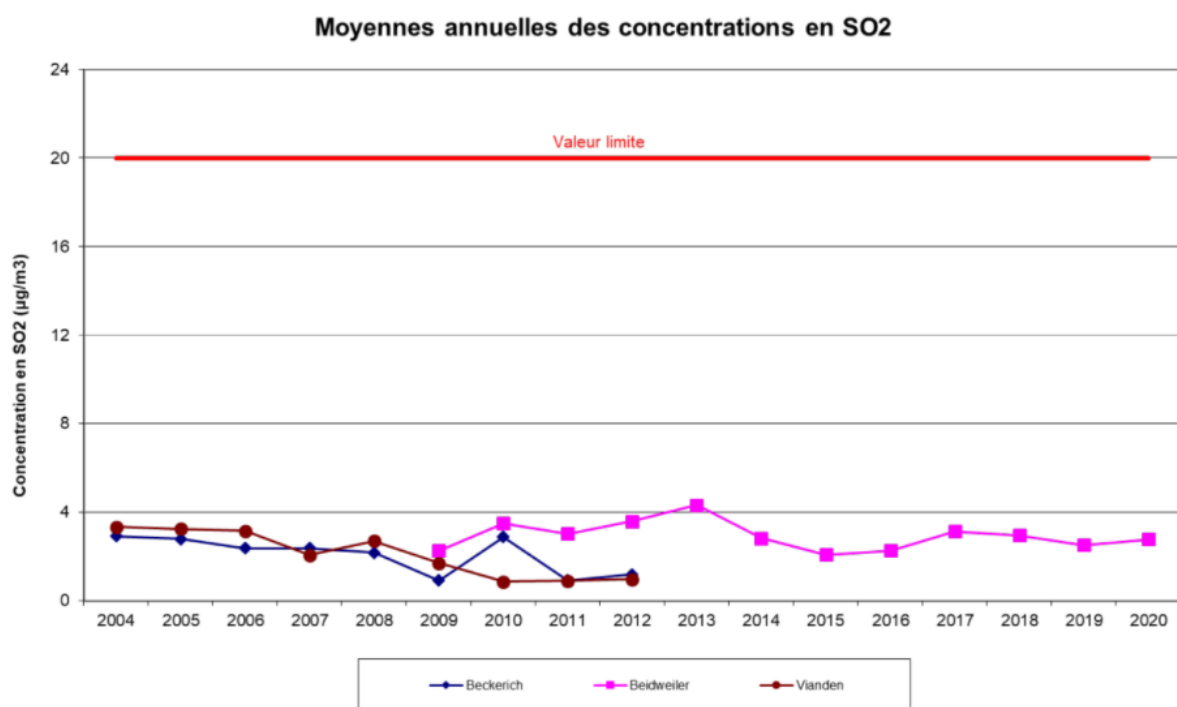
Source : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01070680/document>

Annexe 3 : Nombre de jours de dépassement pour l'ozone



Source : https://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/ozone/historique-O3.html

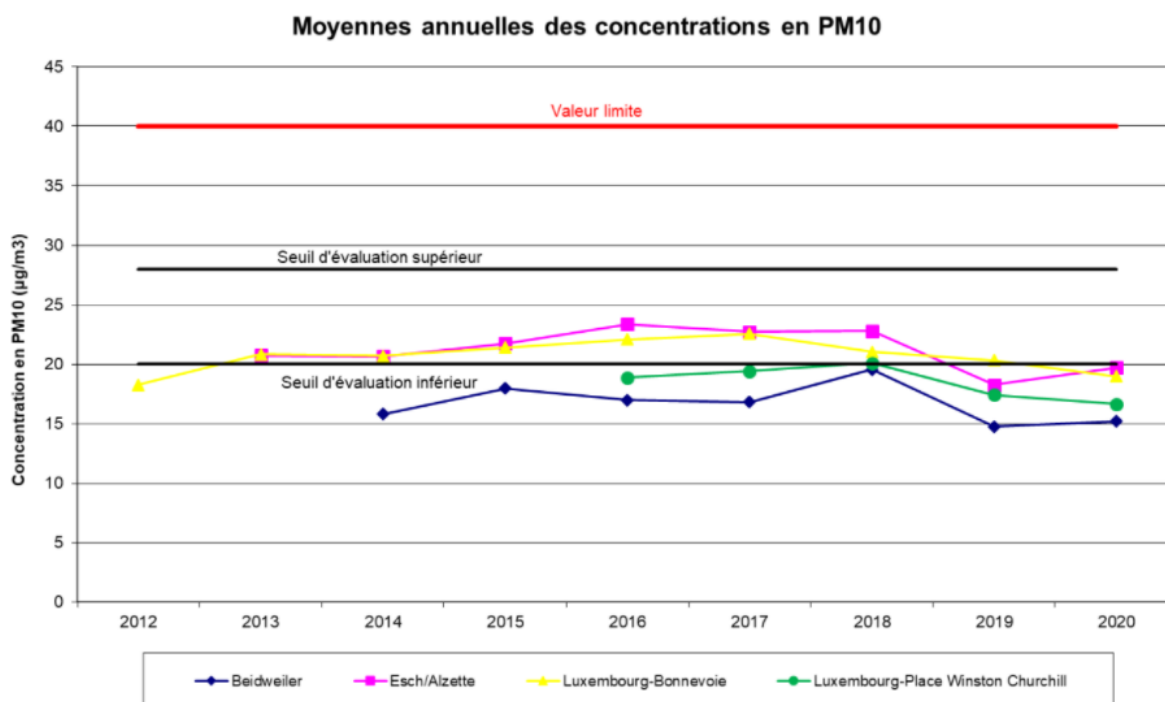
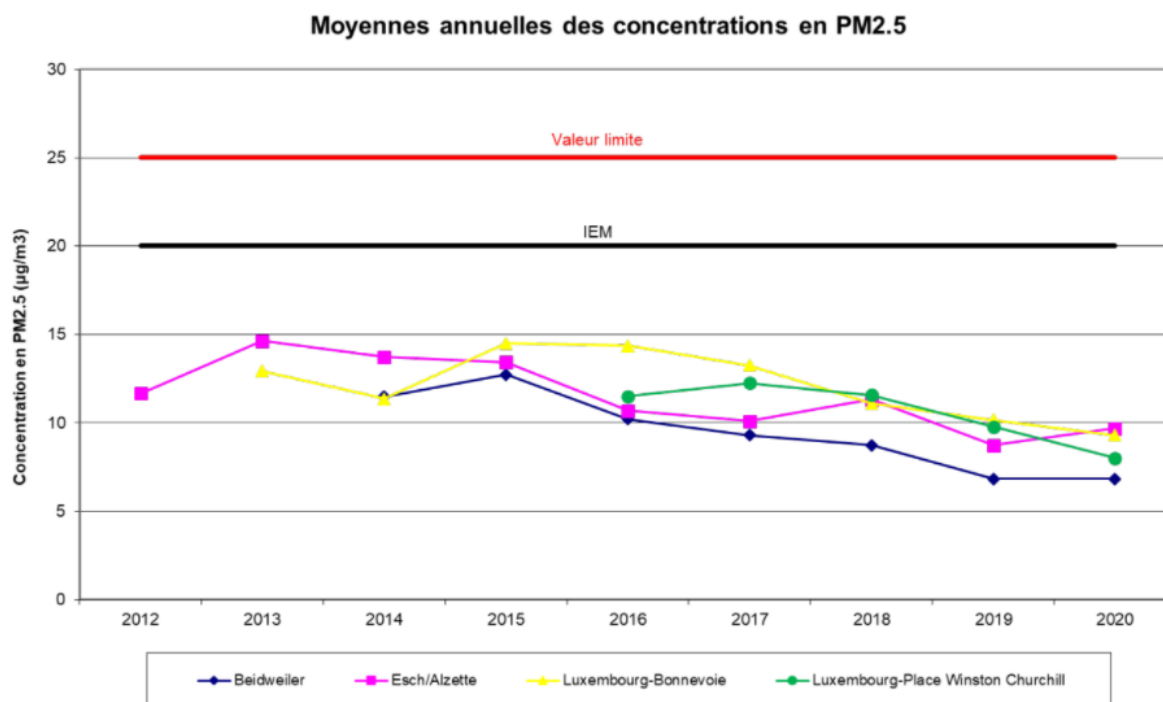
Annexe 4 : Concentrations annuelles en SO₂



Source :

https://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/les_oxydes_de_soufre_SOx/historique-SO2.html

Annexe 5 : Concentrations en PM_{2,5}-PM₁₀



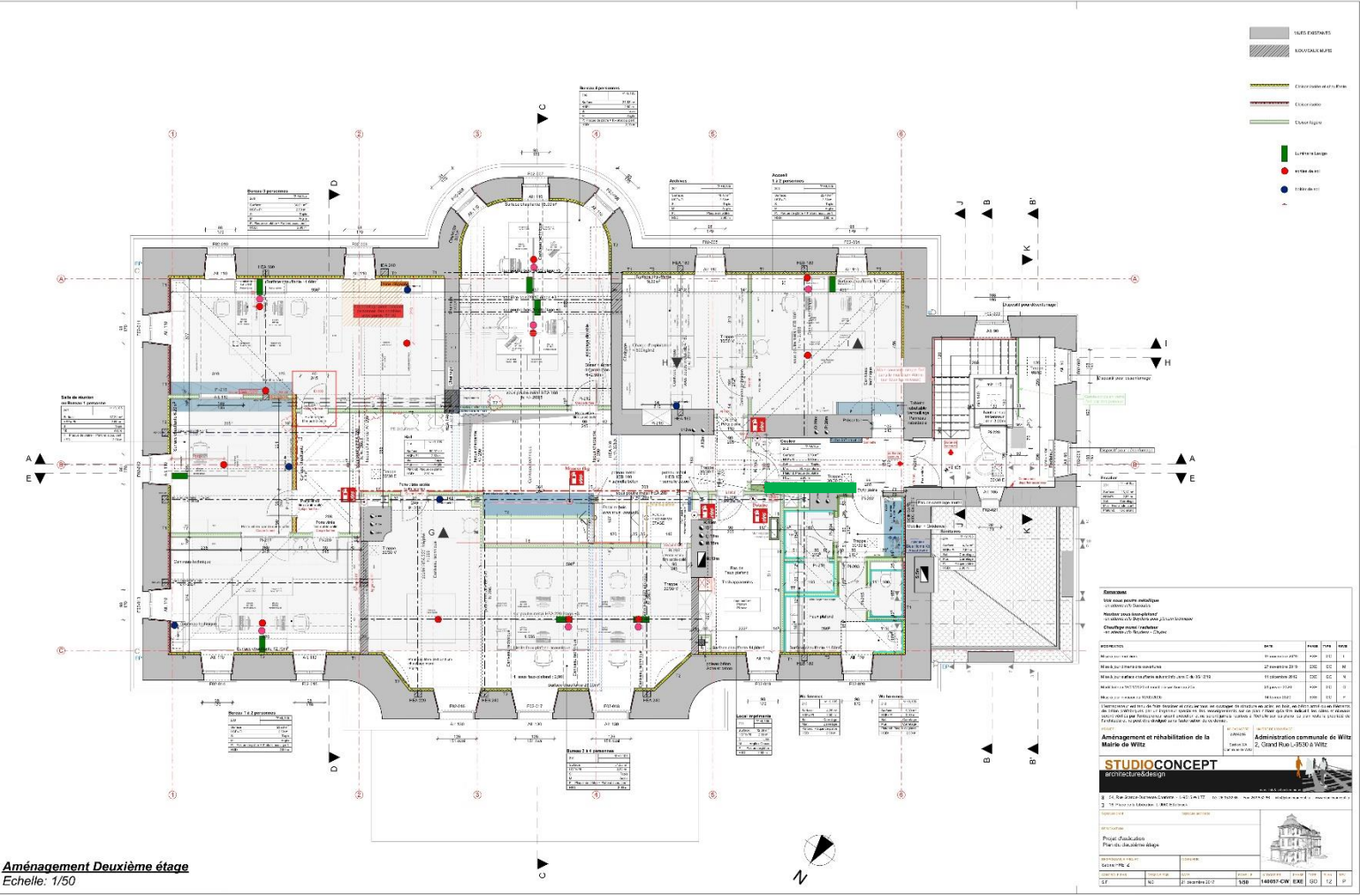
Source : https://environnement.public.lu/fr/loft/air/Polluants_atmospheriques/PM/historique-PM.html

Annexe 6 : Plans de l'Administration

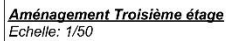
Etage 1



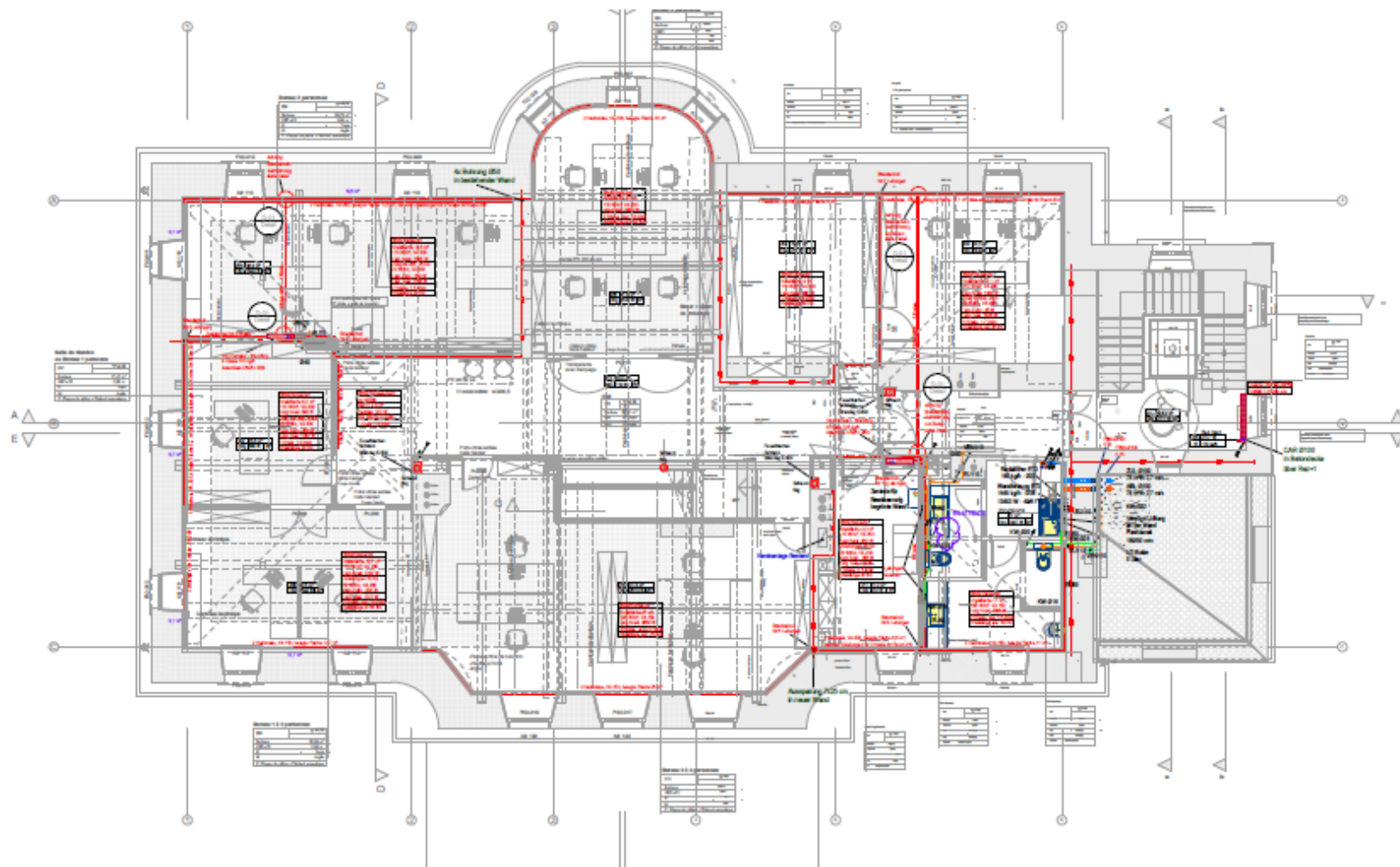
Etage 2



Etage 3



Annexe 7 : Ventilation au 2^{ème} étage

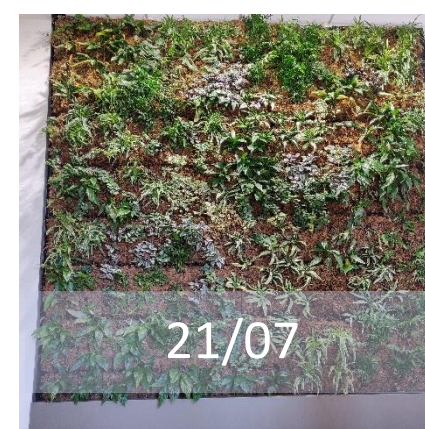
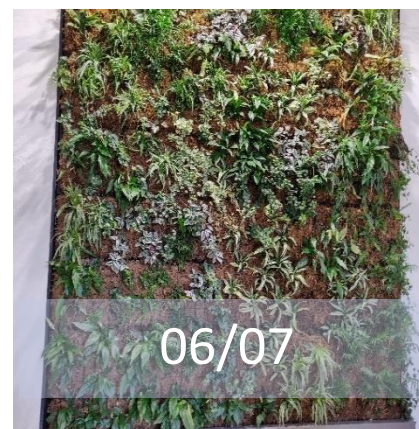
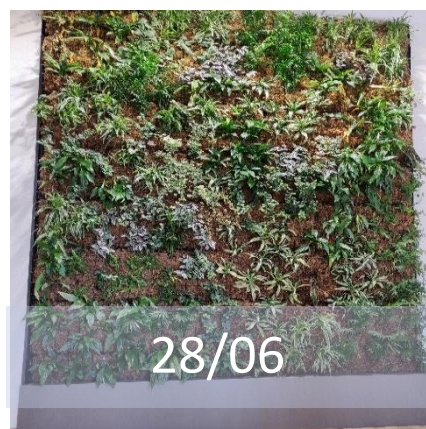
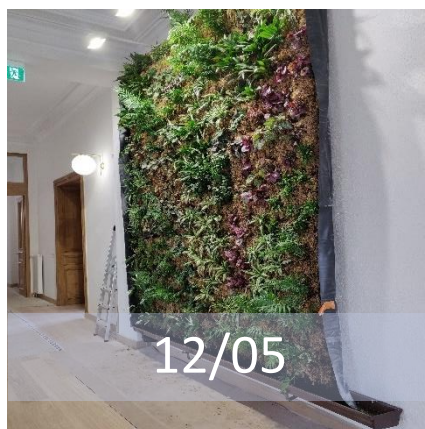




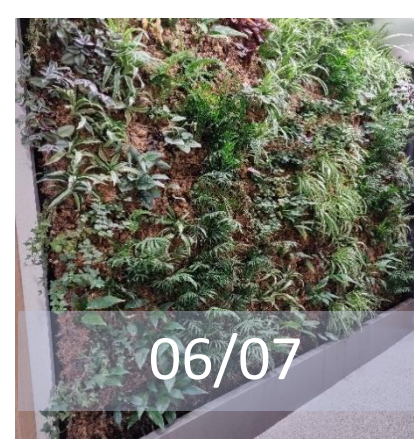
Annexe 9 : Evolution des 5 murs végétaux au fil des semaines

Les images datant du 12 mai ont été prises lors d'une visite préalable, quelques jours après l'installation des murs.

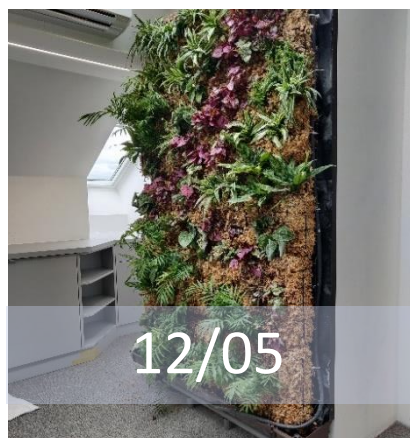
Mur 1- Etage 1



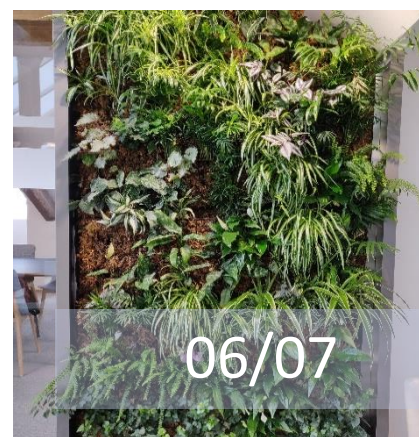
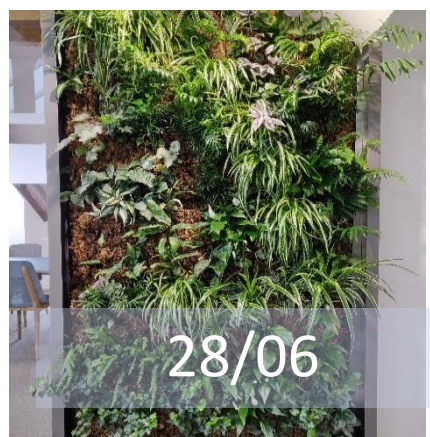
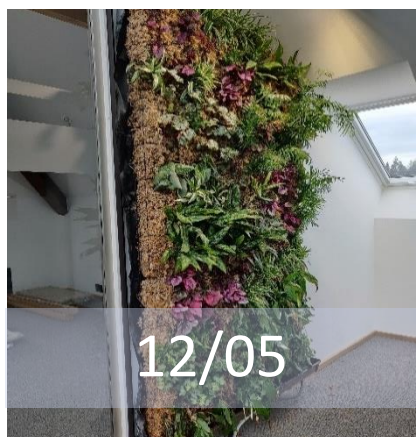
Mur 2- Etage 2



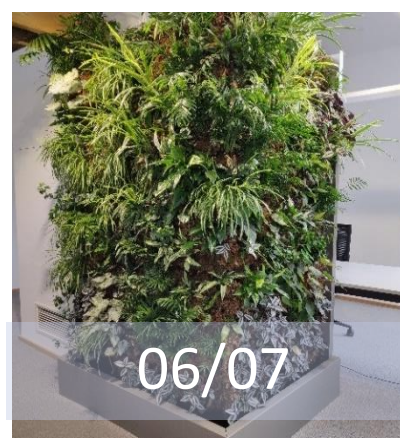
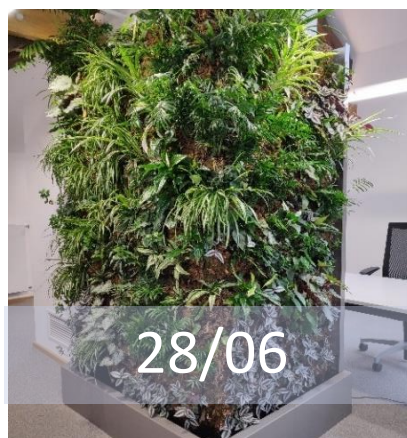
Mur 3- Etage 3 gauche



Mur 4 – Etage 3 droite



Mur 5- Etage 3 coin



Annexe 10 : Emplacements des ICP DAS

	
1^{er} étage- mur végétal Le capteur sera placé sur les piliers, le long de la rampe d'escalier, en face du mur végétal.	Rez-de-chaussée – témoin Le rez-de-chaussée a également été choisi comme pièce témoin du 1^{er} étage pour conserver une ambiance similaire à l'ambiance de l'étage supérieur. L'espace est très ouvert et puisqu'il s'agit de l'entrée de l'Administration, un passage important de personnes est prévu mais c'est le seul endroit permettant une comparaison avec le 1^{er} étage. Il faudra toutefois prévoir d'enlever les plantes dans l'entrée pour éviter un biais.
	
Extérieur L'ICP sera placé sur la terrasse de la salle des séances au 1^{er} étage. Une prise permet cet emplacement idéal, du côté de la prise d'air pour la ventilation.	



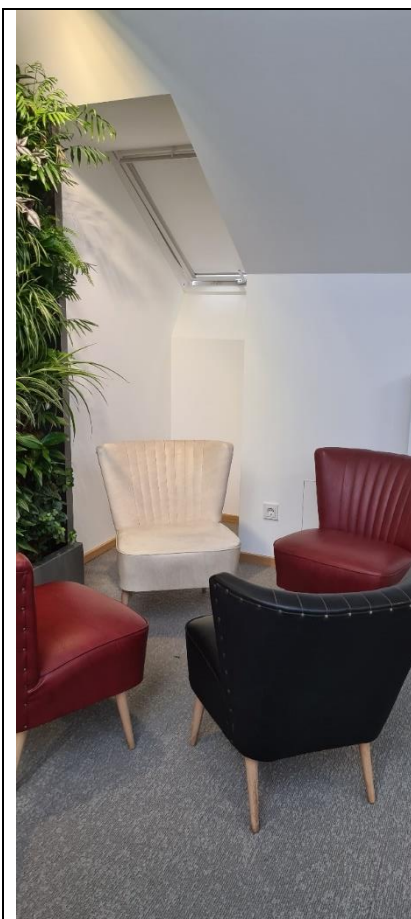
2^{ème} étage – mur végétal

Pour des questions d'alimentation en électricité, le capteur sera placé sur le guichet -, près du présentoir à brochure. Cet emplacement n'est pas tout à fait représentatif du mur végétal et les résultats seront donc à analyser en conséquence.



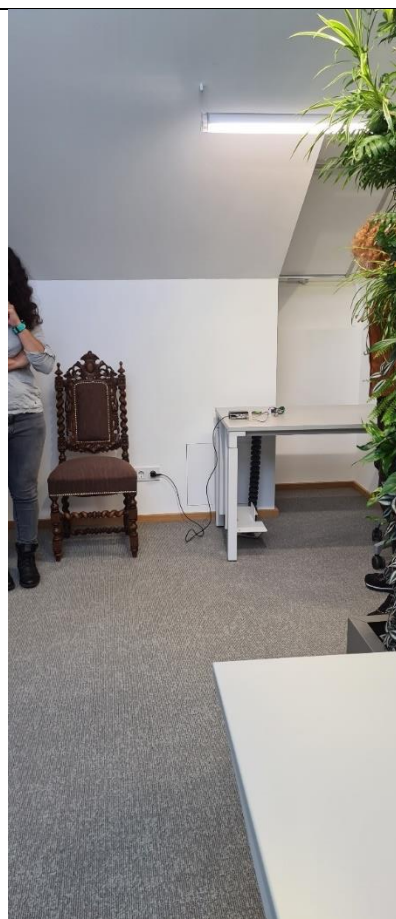
2^{ème} étage – archive

Contrairement aux autres prélèvements témoins réalisés dans le hall, l'emplacement de l'IPC se fera dans la salle d'archive à côté du bureau « guichet ». En effet, le hall est beaucoup trop grand et l'effet de dilution trop important. Le bureau des archives n'est pas non plus un emplacement idéal puisqu'un porte manteau suggère la présence de vêtements de travail. Si les ouvriers reviennent de chantier, ils peuvent amener avec eux des particules.



3^{ème} étage – murs végétaux similaires

Un capteur sera positionné dans le coin repos près du mur végétal droit. Il est prévu d'installer une petite table afin d'être à une hauteur représentative. Cet emplacement, au plus près du mur permet de réellement voir son influence. Il faut néanmoins faire attention au radiateur juste à côté qui peut, lorsqu'il démarre, remettre des particules en suspension.



3^{ème} étage – mur végétal en coin

Un 2^{ème} capteur sera positionné près du mur végétal en coin puisqu'il s'agit d'un mur différent des deux autres. Il sera installé sur un bureau, à hauteur parfaite des employés.



3^{ème} étage - témoin

Un 3^{ème} capteur sera exposé dans la salle de réunion à gauche, derrière le grand écran.

Annexe 11 : Ebauche de questionnaire de bien-être

L'Université de Liège, en partenariat avec Sound Ecology, Neobuild et le Ministère de l'Energie et de l'Aménagement du Territoire a mis en place le projet MAI, Impact de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur, au sein de l'Administration Communale de Wiltz. La pollution de l'air extérieur et intérieur peut causer de graves effets sur la santé (asthme, migraine etc.) et parfois impacter la productivité. Le recours aux plantes est un moyen proposé pour purifier l'air, en extérieur comme en intérieur. L'ambition du projet MAI est d'étudier l'effet de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur (QAI).

Outre des prélèvements d'air réalisés plusieurs fois par mois, il est prévu d'évaluer le ressenti des occupants. Pour ce faire, nous réquisitionnons votre aide. L'objectif de ce questionnaire **anonyme** est d'évaluer le bien-être des occupants au sein du bâtiment et en présence des murs végétaux.

Sexe :

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

A quel étage principal travaillez-vous ?

- ☐ 1^{er} étage
- ☐ 2^{ème} étage
- ☐ 3^{ème} étage
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

Combien d'heures en moyenne par semaine travaillez-vous à votre poste de travail ?

1) Comment vous sentez vous dans votre environnement de travail ?

2) De manière générale, la température ambiante est-elle satisfaisante, ni trop chaude, ni trop froide ?

- ☐ Non j'ai trop froid
- ☐ Non j'ai trop chaud
- ☐ Oui, je n'ai ni trop chaud ni trop froid
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

3) De manière générale, l'air est-il satisfaisant, ni trop sec, ni trop humide ?

- ☐ Non, il est trop sec
- ☐ Non, il est trop humide
- ☐ Oui, ni trop sec ni trop humide
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

4) Avez-vous l'impression de manquer d'air ?

- ☐ Jamais
- ☐ Moins d'une fois par mois
- ☐ Plusieurs fois par mois
- ☐ Plusieurs fois par semaine
- ☐ Tous les jours
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

5) Des odeurs désagréables sont-elles présentes ?

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

Si oui, précisez (quel jour, à quelle fréquence, à quel moment de la journée, combien de temps cela dure-t-il, etc.)

6) De la poussière est-elle présente de manière inhabituelle ?

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

7) Ouvrez-vous les fenêtres de votre bureau ?

- ☐ Oui
- ☐ Non
- ☐ Je n'ai pas de fenêtre
- ☐ Je ne souhaite pas répondre

Si oui, pour quelles raisons ?

- ☐ Je remarque de mauvaises odeurs
- ☐ Je manque d'air
- ☐ J'ai trop chaud

- Autre, précisez :

- 8) Appréciez-vous la présence des murs végétaux ? Précisez :

- 9) Avez des commentaires ?

Annexe 12 : Polluants détectés par le GC/MS (par dates et par pièces)

28/06					
2 ^{ième} – Mur végétal			2 ^{ième} - Témoin		
RT	Polluants	Aire	RT	Polluants	Aire
24.27	o-Xylene	8,95E+09	24.27	p-Xylene	8,16E+09
31.68	Diethyl Phthalate	7,45E+09	26.63	à-Pinene	7,09E+09
26.64	à-Pinene	7,25E+09	30.97	2-Propanol, 1-(2-methoxypropoxy)-	4,32E+09
30.97	2-Propanol, 1-(2-methoxypropoxy)-	4,42E+09	30.77	Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-	3,51E+09
25.49	Xylene	3,52E+09	13.87	Acetic acid	3,41E+09
30.78	Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-	2,56E+09	33.28	p-Trimethylsilyloxyphenyl-bis(trimethylsilyloxy)ethane	2,73E+09
27.68	2-Propanol, 1-butoxy-	2,00E+09	12.30	2-Butanone	2,66E+09
23.90	Ethylbenzene	1,84E+09	27.67	2-Propanol, 1-butoxy-	2,09E+09
12.31	2-Butanone	1,75E+09	34.22	Nonanal	1,86E+09
21.57	Hexanal	1,56E+09	23.89	Ethylbenzene	1,65E+09
14.72	Triethylamine	1,37E+09	15.62	1-Butanol	1,36E+09
15.63	1-Butanol	1,22E+09	19.50	Toluene	1,29E+09
19.52	Toluene	8,95E+08	14.73	Triethylamine	1,22E+09
			29.48	Caprolactam	9,53E+08
3 ^{ième} – Mur végétal			3 ^{ième} - Témoin		
RT	Polluants	Aire	RT	Polluants	Aire
26.63	à-Pinene	1,12E+10	26.58	Ethanol, 2-butoxy-	1,94E+10
14.00	Acetic acid	9,78E+09	24.27	a-Xylene	1,11E+10
30.44	Tri(1,2-propyleneglyco	7,51E+09	13.96	Acetic acid	8,16E+09

	l), monomethyl ether				
21.59	Hexanal	4,46E+09	19.51	Toluene	4,40E+09
33.29	p-Trimethylsilyloxyphenyl-bis(trimethylsilyloxy)ethane	4,13E+09	25.49	o-Xylene	4,19E+09
16.43	2-Pentanone	3,86E+09	30.97	2-Propanol, 1-(2-methoxypropoxy)-	3,59E+09
25.50	p-Xylene	3,21E+09	33.28	p-Trimethylsilyloxyphenyl-bis(trimethylsilyloxy)ethane	3,47E+09
30.97	2-Propanol, 1-(2-methoxypropoxy)-	2,65E+09	16.42	2-Pentanone	2,88E+09
34.23	Nonanal	2,47E+09	32.89	2-Propenoic acid, 2-methyl-, 2-hydroxypropyl ester	2,78E+09
30.26	Hexanoic acid	2,33E+09	12.32	2-Butanone	2,69E+09
19.51	Toluene	2,30E+09	30.77	Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-	2,59E+09
27.68	2-Propanol, 1-butoxy-	2,22E+09	27.68	2-Propanol, 1-butoxy-	2,47E+09
31.45	1-Hexanol, 2-ethyl-	1,84E+09	34.62	Diethyl Phthalate	2,31E+09
30.78	Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-	1,47E+09	34.23	Nonanal	2,12E+09
28.19	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	1,39E+09	31.44	1-Hexanol, 2-ethyl-	1,85E+09
23.90	Ethylbenzene	1,25E+09	31.44	1-Hexanol, 2-ethyl-	1,85E+09
16.75	Pentanal	1,19E+09	23.90	Ethylbenzene	1,83E+09
32.89	2-Propenoic acid, 2-methyl-, 2-hydroxypropyl ester	1,16E+09	28.80	b-Pinene	1,62E+09

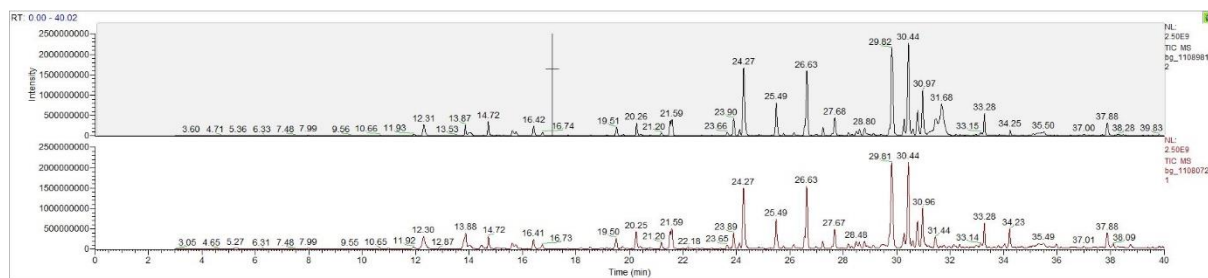
15.65	1-Butanol	9,00E+08	28.19	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	1,30E+09
14.47	Benzene	8,27E+08	16.74	Pentanal	1,21E+09
06/07					
2^{ième} – Mur végétal			2^{ième} - Témoin		
RT	Polluants	Aire	RT	Polluants	Aire
26.64	à-Pinene	1,04E+10	13.99	Acetic acid	1,20E+10
21.60	Hexanal	6,78E+09	26.65	à-Pinene	1,10E+10
24.28	p-Xylene	6,76E+09	24.29	p-Xylene	9,39E+09
33.29	p-Trimethylsilyloxyphenyl-bis(trimethylsilyloxy)ethane	5,69E+09	33.30	p-Trimethylsilyloxyphenyl-bis(trimethylsilyloxy)ethane	5,02E+09
30.98	2-Propanol, 1-(2-methoxypropoxy)-	4,01E+09	14.51	Benzene	4,50E+09
27.69	2-Propanol, 1-butoxy-	3,66E+09	30.99	2-Propanol, 1-(2-methoxypropoxy)-	4,34E+09
34.23	Nonanal	3,42E+09	27.70	2-Propanol, 1-butoxy-	3,90E+09
14.03	1-Propanol, 2-methyl-	2,36E+09	34.25	Nonanal	3,81E+09
30.78	Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-	2,11E+09	30.79	Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-	3,06E+09
31.45	1-Hexanol, 2-ethyl-	2,06E+09	19.53	Toluene	2,85E+09
21.23	Propylene Glycol	1,75E+09	31.47	1-Hexanol, 2-ethyl-	2,20E+09
24.87	2-Hexanone oxime	1,74E+09	32.16	Phenol	2,00E+09
15.65	1-Butanol	1,59E+09	28.52	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	1,99E+09
16.44	2-Pentanone	1,48E+09	23.91	Ethylbenzene	1,75E+09
19.52	Toluene	1,45E+09	12.93	Benzene, 1,2-difluoro-4-(trifluoromethyl)-	1,73E+09

23.91	Ethylbenzene	1,38E+09	16.44	2-Pentanone	1,63E+09
28.20	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	1,23E+09	15.65	1-Butanol	1,45E+09
16.76	Pentanal	1,15E+09	16.76	Pentanal	1,30E+09
Extérieur					
RT	Polluant		Aire		
34.70	Diethyl Phthalate		3,59E+09		
29.80	Benzaldehyde		1,59E+09		
13.82	Acetic acid		1,47E+09		
14.49	Benzene		9,93E+08		
33.30	p-Trimethylsilyloxyphenyl-bis(trimethylsilyloxy)ethane		9,23E+08		
32.22	Nonanal		8,84E+08		
32.15	Phenol		6,65E+08		
34.06	Acetophenone		5,97E+08		
19.51	Toluene		5,46E+08		
12.90	Benzene, 1,2-difluoro-4-(trifluoromethyl)-		4,26E+08		
5.27	Silane, difluorodimethyl-		4,18E+08		

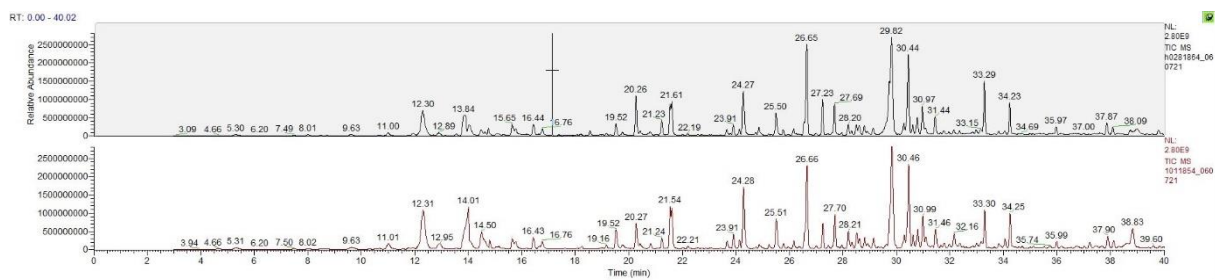
Annexe 13 : Chromatogrammes des échantillons réalisés à l'Administration communale de Wiltz

2^{ème} étage : Mur végétal (noir) + témoin (rouge)

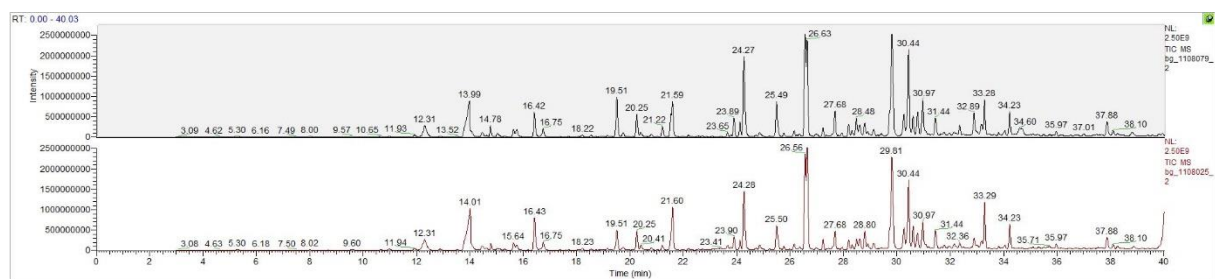
28/06



06/07

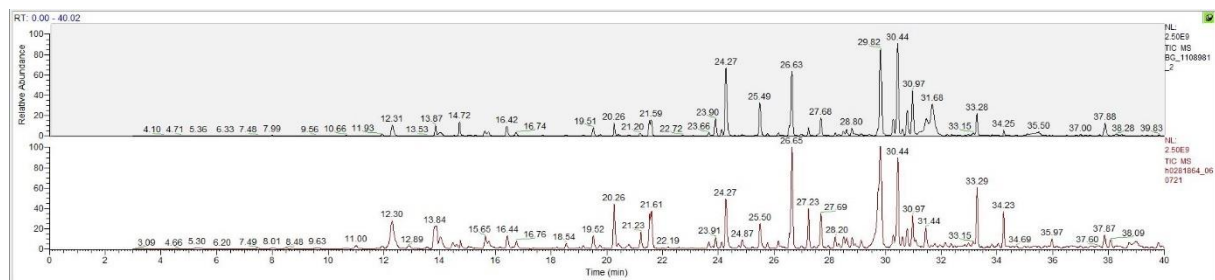


3^{ème} étage : Mur végétal (rouge) + témoin (noir)

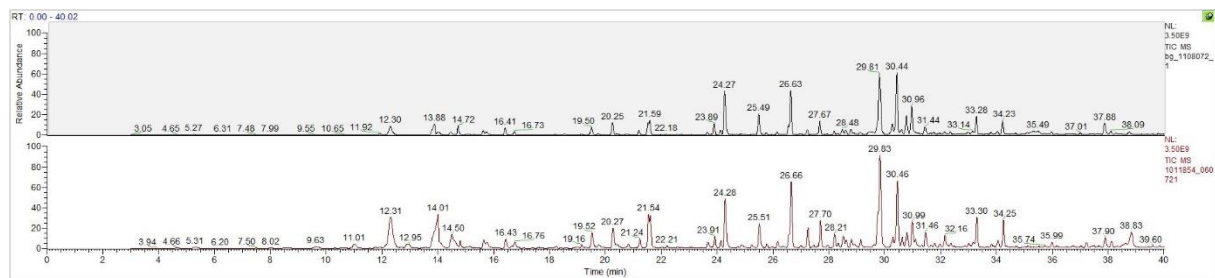


28/06 (noir) vs 06/07 (rouge)

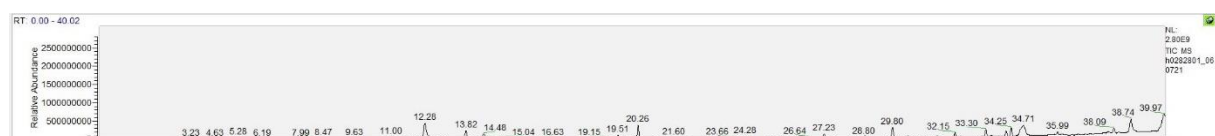
2^{ème} étage : Mur végétal



2^{ème} étage : Témoin



Air extérieur – 06/07



RESUME

Selon l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, l'air intérieur serait 5 à 10 fois plus pollué que l'air extérieur. La phytoremédiation est ainsi étudiée pour analyser la capacité des plantes à purifier l'air et à diminuer les concentrations de certains polluants. Malheureusement, les études sont généralement réalisées en laboratoire avec des conditions ambiantes contrôlées. On est alors loin des conditions réelles.

Le projet MAI dans lequel est inscrit ce mémoire a pour objectif d'étudier l'impact de murs végétaux sur la qualité de l'air intérieur en conditions réelles. L'étude prend place au sein de l'Administration Communale de Wiltz.

Dans le cadre de ce mémoire, les COV ont été étudiés bien qu'il soit prévu d'analyser les COV totaux, les aldéhydes, les moisissures et les PM et des paramètres ambiants tels que le CO₂ par la suite. Des prélèvements ont été réalisés sur cartouches Tenax® et analysés par GC/MS.

Un questionnaire de bien-être à destination des occupants a aussi été ébauché. Il sera administré pendant toute la durée du projet pour étudier le ressenti des employés vis-à-vis de la présence de murs végétaux.