



**CARACTERISATION DE LA QUALITE DE L’AIR DANS  
30 IMMEUBLES DE BUREAUX : RECHERCHE DE  
SUBSTANCES EMERGENTES  
PROJET POEME « POLLUANTS EMERGENTS »**

**Rapport final**

Laeticia MALINGRE, Fiona PELLETIER, Jordan LITAUD,  
Gaëlle UZU, Patrice BLONDEAU, Corinne MANDIN

**Septembre 2020  
Rapport CSTB-DSC/2020-103**

*Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation des auteurs est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).*

© 2021

## **FINANCEMENT**

---

Le projet POEME a bénéficié des financements d'ATMO Nouvelle-Aquitaine, de La Rochelle Université et du programme de recherche du CSTB.

## **REMERCIEMENTS**

---

Les auteurs remercient l'ensemble des gestionnaires des immeubles de bureaux qui ont accepté de participer au projet POEME. Ils remercient également les laboratoires associés à l'étude : la plateforme TIPEE (Jérôme NICOLLE), le laboratoire LERES de l'École des hautes études en santé publique (Delphine PELLE), le laboratoire POLLEM du CSTB (Mélanie NICOLAS) et Laboratoire IGE (UMR5001 / UR 252), CNRS, Grenoble (Gaëlle UZU).

## RÉSUMÉ

---

Les espaces de bureaux sont fréquentés quotidiennement par une large proportion de la population d'actifs. Parallèlement, la qualité de l'air intérieur dans ces lieux est moins étudiée que celle des logements ou des écoles. Entre 2013 et 2017, l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) a mené la première campagne nationale de mesure de la qualité de l'air intérieur dans un échantillon de bâtiments de bureaux tirés au sort ou volontaires, et répartis dans toute la France. Cette campagne a permis de fournir un état des lieux de la pollution intérieure au regard de composés gazeux et particulaires « classiques ».

Aussi, dans l'objectif de compléter les connaissances sur la qualité de l'air intérieur dans ces espaces, le projet POEME a été initié afin de documenter 1/ de nouveaux composés organiques volatils et aldéhydes jamais recherchés dans l'air des bureaux mais pouvant possiblement être émis ; 2/ un nouveau paramètre d'intérêt qu'est le potentiel oxydant, à savoir le potentiel inflammatoire des particules en suspension et 3/ les concentrations en composés organiques semi-volatils (COSV), qui n'avaient pas pu être recherchés lors de la campagne nationale de l'OQAI car leur mesure nécessite un prélèvement d'une longue durée (1 semaine) qui n'était pas possible lors de cette dernière campagne. Les COSV comptent de nombreuses substances avérées ou suspectées d'être des perturbateurs endocriniens.

Les mesures ont été réalisées dans 30 immeubles de bureaux de la région Nouvelle-Aquitaine entre septembre 2018 et juin 2019 pendant 4,5 jours dans chaque bâtiment. Des questionnaires descriptifs de ces derniers ont permis de mettre en perspective les concentrations intérieures mesurées avec les caractéristiques des bâtiments, leur environnement et leur occupation.

Les concentrations en aldéhydes sont globalement faibles, avec des concentrations cependant élevées en propionaldéhyde dont les sources n'ont pas été identifiées.

Les concentrations en composés organiques volatils (COV) sont globalement faibles, la médiane la plus élevée étant observée pour le limonène ( $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les concentrations les plus élevées sont observées pour les terpènes, notamment le limonène et l' $\alpha$ -pinène, et les siloxanes. Parmi les COV « émergents », environ 1/3 ne sont jamais détectés ; 1/3 sont détectés dans moins de la moitié des bureaux et 1/3 détectés dans plus de la moitié des bureaux. Par ailleurs, on observe, d'une part, le dépassement de la valeur réglementaire de qualité de l'air intérieur pour le benzène dans 9 immeubles et, d'autre part, la présence de deux composés chlorés sont détectés dans l'air des bureaux alors qu'ils sont classés cancérigènes probables chez l'Homme. Il s'agit du 1,2,3-trichloropropane (détecté dans 8 % des espaces de bureaux) et du dichlorométhane (détecté dans 86 % des espaces de bureaux). Ces deux composés chlorés font partie de la liste des substances que l'Anses a retenu prioritaires dans le cadre d'un étiquetage des meubles.

Les concentrations en COSV sont les plus élevées pour les phtalates, les muscs de synthèse et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), ce qui est également observé dans les logements et les écoles. En revanche, elles sont globalement inférieures à celles mesurées dans ces autres lieux. Le lindane, insecticide organochloré interdit, est quantifié dans 73 % des bureaux.

Les concentrations en  $\text{PM}_{2,5}$  restent plutôt faibles, avec une médiane égale à  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les concentrations intérieures en métaux montrent principalement l'influence de sources extérieures. Des dépassements des valeurs réglementaires pour la qualité de l'air extérieur sont observés pour l'arsenic et le cadmium, dans un unique espace de bureau pour chacun (deux bâtiments différents).

Le potentiel oxydant a été mesuré selon trois méthodes, ce qui fournit des informations tout à fait originales s'agissant d'air intérieur. Des associations sont observées entre le potentiel oxydant et les concentrations en HAP, notamment le pyrène et le fluoranthène.

La recherche de typologies de pollution intérieure vis-à-vis des COV et aldéhydes et la mise en perspective avec les caractéristiques des bâtiments et des activités ont fait apparaître 4 groupes de bureaux, l'un de ces groupes représentant les bureaux peu pollués et rassemblant 30 % des pièces instrumentées. Les déterminants des concentrations intérieures plus élevées sont i) la pollution de l'air extérieur, les systèmes de ventilation mécanique ne permettant pas de limiter son transfert vers l'intérieur des bâtiments dans la majorité des cas (filtres à particules uniquement dans les caissons de ventilation double-flux et les centrales de traitement d'air, filtres moléculaires très rarement présents), ii) la date de construction du bâtiment, les bâtiments plus anciens ou construits récemment présentant des pollutions différentes, iii) les sources intérieures du type parking souterrain, dégât des eaux ou revêtement de sol plastifié.

# SOMMAIRE

---

RÉSUMÉ .....	4
SOMMAIRE .....	6
LISTE DES TABLEAUX .....	8
LISTE DES FIGURES .....	10
ABRÉVIATIONS .....	11
<b>1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS .....</b>	<b>12</b>
<b>2 STRATEGIE D'ENQUETE ET PARAMETRES MESURES .....</b>	<b>14</b>
2.1 SELECTION DES IMMEUBLES .....	14
2.2 SELECTION DES PIECES INSTRUMENTEES ET ORGANISATION GLOBALE DE CHAQUE ENQUETE .....	16
2.3 PRELEVEMENTS ET ANALYSES .....	16
2.3.1 <i>Aldéhydes</i> .....	16
2.3.2 <i>Composés organiques volatils (COV)</i> .....	18
2.3.3 <i>Composés organiques semi-volatils (COSV)</i> .....	20
2.3.4 <i>Particules fines (PM<sub>2,5</sub>)</i> .....	22
2.3.5 <i>Métaux sur les particules en suspension</i> .....	23
2.3.6 <i>Potentiel oxydant (PO)</i> .....	23
2.3.7 <i>Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)</i> .....	24
2.3.8 <i>Température et humidité relative</i> .....	24
2.4 QUESTIONNAIRES .....	24
<b>3 EXPLOITATION STATISTIQUE .....</b>	<b>25</b>
3.1 PERIODES DE CHAUFFE ET HORS CHAUFFE .....	25
3.2 CALCUL DU TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR (TRA) .....	25
3.3 COEFFICIENTS DE CORRELATION INTRA CLASSE .....	26
3.4 METHODE DE CLASSIFICATION DES ESPACES DE BUREAUX .....	26
3.4.1 <i>Sélection des variables</i> .....	26
3.4.2 <i>Standardisation des variables</i> .....	27
3.4.3 <i>Classification mixte</i> .....	27
3.5 MISE EN PERSPECTIVE DES CONCENTRATIONS MESUREES .....	29
<b>4 CARACTERISTIQUES DES BATIMENTS ET DES REpondANTS .....</b>	<b>30</b>
4.1 CARACTERISTIQUES DES IMMEUBLES DE BUREAUX ETUDIES .....	30
4.2 CARACTERISTIQUES DES OCCUPANTS ET DE LEUR POSTE DE TRAVAIL .....	35
<b>5 QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ET CONDITIONS HYGROTHERMIQUES DANS LES IMMEUBLES DE BUREAUX .....</b>	<b>38</b>
5.1 ALDEHYDES .....	38
5.1.1 <i>Détection et quantification</i> .....	38
5.1.2 <i>Distribution des concentrations</i> .....	38
5.1.3 <i>Positionnement par rapport aux valeurs guides de qualité de l'air intérieur et concentrations mesurées dans la campagne « Bureaux » de l'OQAI</i> .....	39
5.2 COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS (COV) .....	40
5.2.1 <i>Détection et quantification</i> .....	40
5.2.2 <i>Distribution des concentrations</i> .....	41

5.2.3	<i>Positionnement par rapport aux valeurs de référence de qualité de l'air intérieur et concentrations mesurées dans la campagne « Bureaux » de l'OQAI</i> .....	43
5.3	COMPOSES ORGANIQUES SEMI-VOLATILS (COSV).....	45
5.3.1	<i>Détection et quantification</i> .....	45
5.3.2	<i>Distribution des concentrations</i> .....	46
5.3.3	<i>Positionnement par rapport aux autres campagnes de qualité d'air intérieur</i> .....	48
5.4	PARTICULES FINES (PM <sub>2,5</sub> ).....	50
5.5	METAUX DANS LES PARTICULES EN SUSPENSION.....	50
5.6	POTENTIEL OXYDANT.....	51
5.7	DIOXYDE DE CARBONE ET TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR.....	52
5.8	TEMPERATURE ET HUMIDITE RELATIVE.....	53
5.9	VARIABILITE SPATIALE DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR DANS LES IMMEUBLES DE BUREAUX.....	54
<b>6</b>	<b>ANALYSE DES CORRELATIONS ENTRE LES COMPOSES PRESENTS EN PHASE PARTICULAIRE ET LE POTENTIEL OXYDANT</b> .....	<b>55</b>
6.1	CORRELATIONS ENTRE LES CONCENTRATIONS EN METAUX ET EN PARTICULES PM <sub>2,5</sub> .....	55
6.2	CORRELATIONS ENTRE LE POTENTIEL OXYDANT ET LES CONCENTRATIONS EN PARTICULES PM <sub>2,5</sub> .....	56
6.3	CORRELATIONS ENTRE LE POTENTIEL OXYDANT ET LES CONCENTRATIONS EN METAUX.....	57
6.4	CORRELATIONS ENTRE LE POTENTIEL OXYDANT ET LES CONCENTRATIONS EN COSV.....	58
<b>7</b>	<b>CLASSIFICATION DES ESPACES DE BUREAUX EN FONCTION DU NIVEAU DE POLLUTION INTERIEURE EN COV ET ALDEHYDES</b> .....	<b>60</b>
7.1	ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP).....	60
7.2	CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE (CAH).....	63
7.3	CLASSIFICATION AVEC LA METHODE DES CENTRES MOBILES (K-MEANS).....	64
7.4	DESCRIPTION DES GROUPES DE POLLUTION.....	64
<b>8</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>74</b>
<b>10</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>76</b>

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1. Substances dites « émergentes » recherchées dans l'air intérieur dans le cadre du projet POEME.....	13
Tableau 2. Limites de détection et de quantification des 9 aldéhydes.....	17
Tableau 3. Limites de détection et de quantification des 56 COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).....	18
Tableau 4. Exemples des usages et sources de composés organiques semi-volatils dans les bâtiments .....	20
Tableau 5. Limites de quantification des 46 COSV ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ).....	22
Tableau 6. Distributions des concentrations en aldéhydes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans l'air des espaces de bureaux enquêtés.....	38
Tableau 7. Concentrations en aldéhydes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dépassant les valeurs de référence.....	39
Tableau 8. Comparaison des concentrations en aldéhydes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) avec les résultats de la campagne bureaux de l'OQAI (CNB).....	39
Tableau 9. Distributions des concentrations des 41 COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) détectés dans l'air des espaces de bureaux enquêtés.....	41
Tableau 10. Concentrations en COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dépassant les valeurs de référence .....	43
Tableau 11. Concentrations en COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dépassant les valeurs d'alerte .....	44
Tableau 12. Comparaison des concentrations en COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) avec les résultats de la campagne bureaux de l'OQAI (CNB).....	44
Tableau 13. Distributions des concentrations en COSV ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) quantifiés dans l'air des espaces de bureaux enquêtés (n = 30) .....	47
Tableau 14. Comparaison des concentrations en COSV mesurées dans le cadre de POEME ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) avec celles mesurées dans les écoles (2013-2017) et les logements (2003-2005) .....	48
Tableau 15. Distributions des concentrations massiques en $\text{PM}_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans l'air des espaces de bureaux enquêtés.....	50
Tableau 16. Distribution des concentrations en métaux ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) dans l'air des espaces de bureaux enquêtés (n = 25).....	50
Tableau 17. Distributions du potentiel oxydant dans l'air des espaces de bureaux (exprimé en $\text{nmolAntioxydant}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ et en $\text{nmolAntioxydant}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ) selon trois méthodes de calcul (DTT, AA, DCFH) (n = 25).....	51
Tableau 18. Distribution des concentrations moyennes et maximum en $\text{CO}_2$ (ppm) dans les espaces de bureaux enquêtés.....	52
Tableau 19. Distribution du taux de renouvellement d'air dans les espaces de bureaux enquêtés ....	53
Tableau 20. Distribution de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) et de l'humidité relative (%) en période d'occupation sur une semaine dans les espaces de bureaux enquêtés .....	53
Tableau 21. Distribution de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) et de l'humidité relative (%) en période d'occupation sur une journée dans les espaces de bureaux enquêtés .....	53
Tableau 22. Coefficient de corrélation intra-classe des aldéhydes et COV.....	54
Tableau 23. Coefficients de corrélation de Spearman entre les métaux et les particules $\text{PM}_{2,5}$ .....	56
Tableau 24. Coefficients de Spearman entre les niveaux de potentiel oxydant et les particules $\text{PM}_{2,5}$ .....	56
Tableau 25. Coefficients de corrélation entre les concentrations en métaux et les niveaux de potentiel oxydant normalisé par $\text{m}^3$ d'air .....	57

Tableau 26. Coefficients de corrélation entre les concentrations en COSV et les niveaux de potentiel oxydant normalisé en m <sup>3</sup> .....	58
Tableau 27. Vecteurs propres des six composantes principales.....	62
Tableau 28. Répartition des espaces de bureaux par groupe (n = 100).....	64
Tableau 29. Aldéhydes et COV dont les rangs moyens intra-groupes présentent des écarts significatifs avec les rangs moyens de l'échantillon entier .....	66
Tableau 30. Moyennes par groupe des températures, humidités relatives et concentrations moyennes en CO <sub>2</sub> pendant la journée de mesure .....	66
Tableau 31. Description des groupes de multipollution en fonction des caractéristiques des immeubles de bureaux (n = 98) .....	67
Tableau 32. Description des groupes de multipollution en fonction des caractéristiques des espaces de bureau (n = 94) .....	69

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1. Localisation des immeubles de bureaux enquêtés (n = 30) .....	15
Figure 2. Répartition des immeubles de bureaux enquêtés par période de fin de construction (n = 29) .....	30
Figure 3. Nombre de niveaux dans les immeubles de bureaux enquêtés (n = 29) .....	30
Figure 4. Fuites d'eau importantes ou inondations au cours des 12 derniers mois et présence de moisissures apparentes dans les bureaux (n = 29) .....	31
Figure 5. Présence d'équipements dans les immeubles de bureaux étudiés (n = 29) .....	31
Figure 6. Type de ventilation dans les immeubles de bureaux enquêtés (n = 29) .....	32
Figure 7. Arrêt de la VMC pendant la nuit (n = 29) .....	32
Figure 8. Emplacement de la prise d'air neuf dans les immeubles de bureaux (n = 29) .....	33
Figure 9. Fréquence de nettoyage des sols par détergents (n = 29) .....	34
Figure 10. Moment de la journée pour le nettoyage des sols par détergents (n = 29) .....	34
Figure 11. Fréquence de nettoyage du mobilier par détergents (n = 29) .....	34
Figure 12. Moment de la journée pour le nettoyage du mobilier par détergents (n = 29) .....	34
Figure 13. Nombre d'occupants dans les espaces de bureaux (n = 106) .....	35
Figure 14. Type des espaces de bureaux (n = 106) .....	35
Figure 15. Revêtement de sol principal des espaces de bureaux (n = 106) .....	36
Figure 16. Revêtement mural occupant au moins toute une paroi (n = 106) .....	36
Figure 17. Matériau principal constituant le plafond ou faux-plafond (n = 106) .....	36
Figure 18. Présence d'imprimantes et de photocopieuses dans les espaces de bureaux (n = 106) .....	37
Figure 19. Présence de plantes vertes dans les espaces de bureaux (n = 106) .....	37
Figure 20. Possibilité d'ouverture des fenêtres et durée d'ouverture des fenêtres au cours de la journée de prélèvements gazeux (n = 106) .....	37
Figure 21. Fréquences de quantification des aldéhydes dans l'air des espaces de bureaux enquêtés .....	38
Figure 22. Fréquences de détection et de quantification des COV dans l'air des espaces de bureaux enquêtés .....	40
Figure 23. Fréquences de quantification des 27 COSV quantifiés dans l'air des espaces de bureaux enquêtés (n = 30) .....	46
Figure 24. Part d'inertie expliquée par composante principale (%) .....	60
Figure 25. Représentation des variables sur les axes des deux premières composantes principales (39 % de l'inertie) .....	61
Figure 26. Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des espaces de bureaux en fonction des concentrations en aldéhydes et COV (n = 100) .....	63
Figure 27. Représentation des espaces de bureaux sur les deux premières composantes principales de l'ACP (n = 100) .....	65

## ABRÉVIATIONS

---

CNL	Campagne nationale logements
CNB	Campagne nationale bureaux
COV	Composés organiques volatils
COSV	Composés organiques semi-volatils
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
LD	Limite de détection
LQ	Limite de quantification
MIBK	<i>Méthylisobutylcétone</i>
P5	Percentile 5
P25	Percentile 25
P50	Percentile 50 ou médiane
P75	Percentile 75
P95	Percentile 95
PO	Potentiel oxydant
PPM	Partie par million

## 1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Une problématique centrale dans le domaine de la qualité de l'air intérieur est l'identification des polluants d'intérêt prioritaire, sachant que l'air intérieur peut contenir des centaines de substances différentes, qui proviennent de l'extérieur ou sont émises par les matériaux, le mobilier, les occupants, les équipements électriques, les produits d'entretien et tout autre type de produits de consommation.

Cette question est d'autant plus difficile à appréhender que la nature et les concentrations des substances présentes dans l'air évoluent au fil des années sous l'effet combiné des évolutions technologiques et des réglementations, qui conduisent à interdire les substances dont les risques sanitaires sont démontrés, mais aussi à en faire émerger d'autres qui sont utilisées comme substituts.

Dans le cadre de la thèse de doctorat de Guillaume Sérafin (Sérafin, 2020), une hiérarchisation des polluants dans l'air intérieur des immeubles de bureaux a été réalisée en croisant les données de concentrations récemment publiées dans la littérature scientifique avec les données toxicologiques des substances chimiques (existence de valeurs toxicologiques de référence et classements cancérigène, mutagène, reprotoxique et de perturbation endocrinienne).

Au total, 162 polluants ont ainsi pu être classés suivant leur danger ou le risque sanitaire potentiel qu'ils représentent pour les personnes travaillant dans des bureaux. 150 autres substances ayant fait l'objet de mesures de concentrations intérieures n'ont pu l'être du fait de l'absence de données toxicologiques. Ce travail de hiérarchisation permet d'orienter les futures études vers le choix de traceurs pertinents pour juger de la qualité de l'air intérieur.

Le classement de quelques substances demeure cependant incertain car établi sur la base d'un jeu de concentrations très restreint. Par ailleurs, de nombreuses substances pourraient désormais être retrouvées dans l'air intérieur des bureaux par le fait qu'elles entrent dans la composition de matériaux et/ou de produits de consommation (substances dites émergentes), mais elles n'ont pu être évaluées en raison de l'absence totale de données de concentrations (substances jamais recherchées).

Ainsi, pour aller plus loin dans l'analyse, le LaSIE (UMR 7356) de La Rochelle Université, Atmo Nouvelle-Aquitaine et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) se sont associés pour réaliser des mesures de qualité de l'air dans 30 immeubles de bureaux répartis sur le territoire de Nouvelle-Aquitaine. Ces mesures ont pour objectif de déterminer les concentrations intérieures :

- De substances qui apparaissent **d'intérêt sanitaire prioritaire** mais dont le classement est incertain du fait d'un **très faible nombre de données de concentrations** ou bien qui **n'ont jamais fait l'objet de mesure de concentrations intérieures** ;
- De substances n'ayant pu être classées car **aucune mesure de concentration n'a jamais été réalisée** dans des immeubles de bureaux dans le monde. Pour certaines, **les usages accrus des produits en contenant posent question sur les expositions de la population générale**. La mise en évidence de la présence dans l'air intérieur de ces substances, et le cas échéant la mesure de leur concentration, permettront aux agences sanitaires d'orienter leurs travaux d'évaluation ;

Ces deux groupes correspondent à 46 substances qui sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Substances dites « émergentes » recherchées dans l'air intérieur dans le cadre du projet POEME

<b>Substances disposant de données toxicologiques ou classées dangereuses mais rarement ou jamais mesurées dans les bureaux</b> <b>31 substances</b>	<b>Substances susceptibles d'être présentes dans l'air intérieur mais rarement ou jamais mesurées dans les bureaux</b> <b>15 substances</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,1,2,2-tétrachloroéthane</li> <li>• 1,2,3-trichloropropane</li> <li>• 1,2-dichloroéthane</li> <li>• 1,2-dichloropropane</li> <li>• 1,3,5,7-cyclooctatétraène</li> <li>• 1-bromopropane</li> <li>• 1-éthylpyrrolidin-2-one</li> <li>• 1-methoxy-2-propyl acétate</li> <li>• 2,4,6-trichlorophénol</li> <li>• 2-éthoxy éthyl acétate</li> <li>• 2-éthoxyéthanol</li> <li>• 2-methoxy-1-propanol</li> <li>• Alpha-chlorotoluène</li> <li>• Benzophénone</li> <li>• Bromoforme</li> <li>• Catéchol</li> <li>• Chlorocrésol</li> <li>• Crésol</li> <li>• Cyclopropylbenzène</li> <li>• DEGDME</li> <li>• Dichlorobromométhane</li> <li>• Dichlorométhane</li> <li>• Méthylstyrène</li> <li>• 2-méthoxy-éthanol</li> <li>• N,N-diméthylacétamide</li> <li>• N,N-diméthylformamide</li> <li>• N-méthyl-2-pyrrolidone</li> <li>• N-méthylformamide</li> <li>• Sorbaldéhyde</li> <li>• Trichlorométhyl-benzène</li> <li>• Vinyl-cyclohexène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terpènes : linalool, bornéol, dihydromyrcénol, terpinéol, eucalyptol, géraniol, terpinolène et nérol</li> <li>• Siloxanes : D4, D5 et D6</li> <li>• 4 aldéhydes : acroléine, propionaldéhyde, crotonaldéhyde, butyraldéhyde</li> </ul>

- De substances considérées comme des **traceurs classiques** de la qualité de l'air intérieur, à savoir celles mesurées dans le cadre de la campagne nationale bureaux de l'OQAI (5 aldéhydes et 14 COV) et d'autres pour lesquelles peu de données existent dans les bâtiments de bureaux en France, comme les composés organiques semi-volatils (COSV) et les particules fines (PM<sub>2,5</sub>).

A ces substances organiques, ont été ajoutés 17 éléments traces métalliques susceptibles d'être présents sur les particules en suspension dans l'air extérieur mais jamais ou rarement mesurés dans les bureaux en France.

Au total et en comptant le potentiel oxydant, ce sont **130 paramètres qui ont été recherchés** dans le cadre du projet POEME.

Ce rapport présente l'exploitation statistique globale des données collectées à l'échelle des 30 bâtiments. Des rapports individuels ont été remis à chacun des immeubles instrumentés.

## **2 STRATEGIE D'ENQUETE ET PARAMETRES MESURES**

### **2.1 Sélection des immeubles**

Le recrutement des immeubles a été réalisé par Atmo Nouvelle Aquitaine. L'appel au volontariat a été opéré en premier lieu dans le parc de bâtiments publics avant d'être élargi aux entreprises privées.

Sur les 44 immeubles de bureaux qui se sont portés volontaire, une sélection a dû être opérée. La sélection des bâtiments instrumentés a cherché à privilégier la plus grande diversité de configurations représentées dans l'échantillon, en termes de date de construction, de localisation géographique, de proximité aux sources de pollution extérieures (trafic routier, industries, etc.), ou d'équipements techniques (système de ventilation par exemple).

Finalement, 30 immeubles de bureaux ont été recrutés en région Nouvelle-Aquitaine sur la base d'une démarche volontaire de leur propriétaire et/ou locataire. La Figure 1 représente la localisation géographique des 30 immeubles de bureaux. Sur ces 30 immeubles de bureaux, 29 sont situés en zone urbaine, au sens où les communes des immeubles appartiennent à des unités urbaines (INSEE<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> Définition des unités urbaines selon l'INSEE : <https://www.insee.fr/fr/information/2115018>

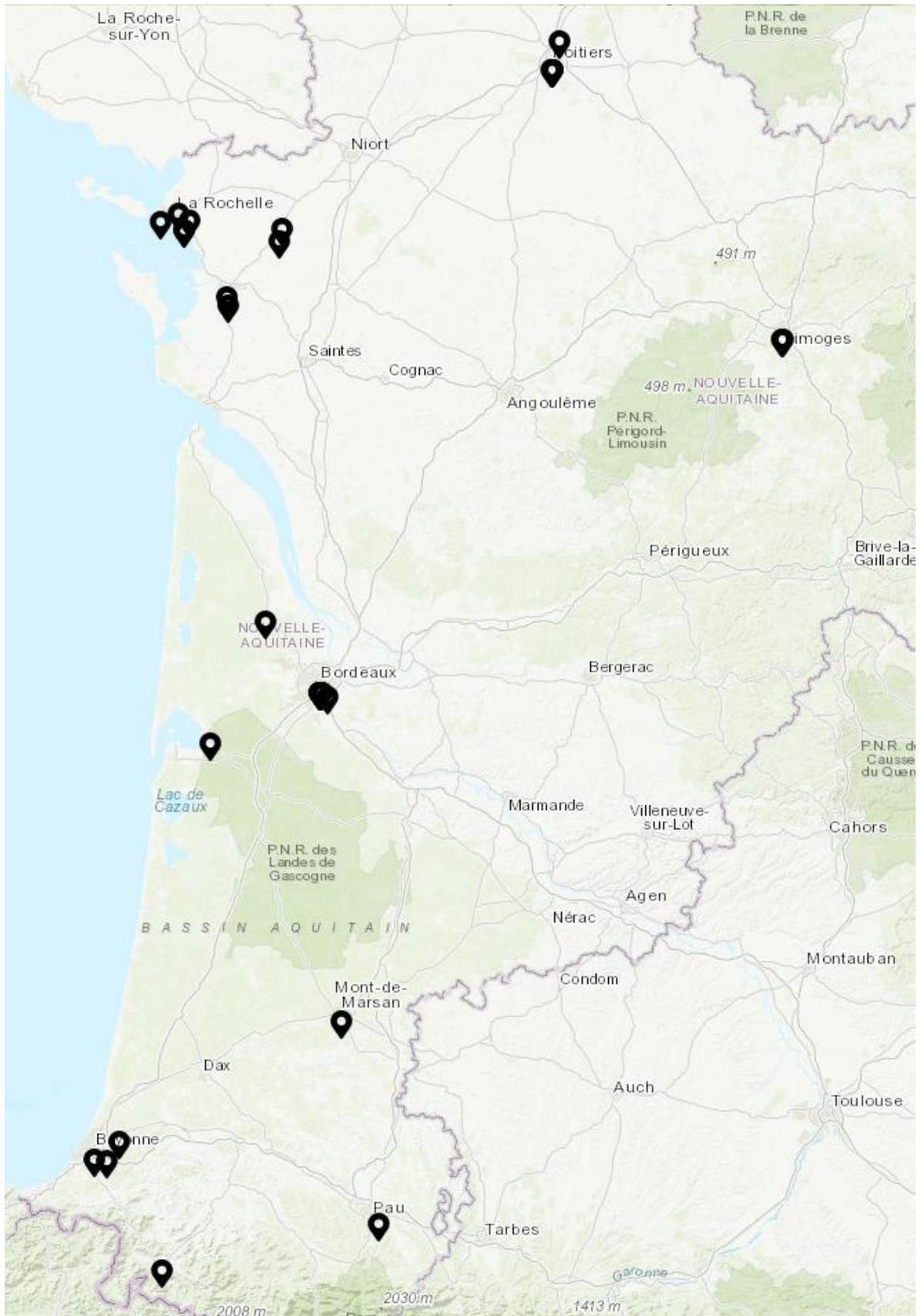


Figure 1. Localisation des immeubles de bureaux enquêtés (n = 30)

## 2.2 Sélection des pièces instrumentées et organisation globale de chaque enquête

Pour chaque immeuble de bureaux sélectionné, les enquêtes se sont déroulées en plusieurs étapes. Tout d'abord, une visite sur site des bâtiments en question dans le but de sélectionner les pièces investiguées. En effet, toutes les pièces des bâtiments n'ont pas fait l'objet de mesures, mais un échantillonnage représentatif a été réalisé. Seules les pièces de bureaux réellement occupées ont été investiguées. Les salles de réunion, les circulations, les sanitaires, les cuisines ou réfectoires, les salles à pollution spécifique n'ont pas été investiguées dans le cadre de cette étude, à l'exception ponctuellement de certains bâtiments où des prélèvements ont été réalisés au niveau de l'accueil car ils n'ont pas pu être positionnés ailleurs.

Les critères pris en compte pour l'échantillonnage des pièces sont la taille du bâtiment et le nombre de bureaux occupés dans celui-ci, le nombre d'étages, l'environnement extérieur. Pour avoir un échantillonnage représentatif, plusieurs configurations de bureaux ont également été intégrées (bureau individuel, à plusieurs ou open-space par exemple). En fonction des bâtiments, 2 à 8 pièces par immeuble ont été finalement investiguées. Les pièces où ont été effectuées les prélèvements pendant une journée (aldéhydes et COV) ou pendant une semaine (COSV et PM<sub>2,5</sub>) n'ont pas été nécessairement les mêmes pour des raisons d'organisation avec les occupants des locaux. A noter par ailleurs qu'il n'a pas été réalisé de prélèvement en extérieur.

Après la visite sur site et la définition précise du plan d'échantillonnage, les prélèvements ont été réalisés entre septembre 2018 et juin 2019 et réalisés au cours d'une semaine où le bâtiment était occupé. En plus de la réalisation des mesures par Atmo Nouvelle-Aquitaine, des questionnaires ont été complétés par les gestionnaires des bâtiments d'une part et par les occupants des pièces investiguées d'autre part. Ces questionnaires permettent de recueillir des informations sur les caractéristiques techniques des bâtiments (âge, équipements, système de ventilation, chauffage, entretien) mais aussi sur les activités réalisées par les occupants au cours de la semaine d'enquête.

## 2.3 Prélèvements et analyses

### 2.3.1 Aldéhydes

#### 2.3.1.1 Composés ciblés et sources d'émission

Les composés ciblés sont le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acroléine, le propionaldéhyde, le crotonaldéhyde, le butyraldéhyde, le nonanal, l'hexanal et le benzaldéhyde.

Les aldéhydes sont principalement émis par des sources intérieures comme le mobilier, les revêtements et les produits de nettoyage. L'acétaldéhyde et l'acroléine peuvent être émis par des sources de combustion (trafic, tabagisme ou présence d'une cuisine/d'un restaurant dans le bâtiment). Le formaldéhyde est également un polluant secondaire dont la formation est favorisée en présence d'ozone.

En extérieur, les aldéhydes résultent à la fois de processus d'émissions primaires (favorisés durant la période hivernale dans les zones urbaines) et secondaires (processus photochimiques). L'isoprène émis par la végétation est le précurseur majeur du formaldéhyde en été (60 % à l'échelle mondiale).

### 2.3.1.2 Prélèvement

Les aldéhydes sont mesurés par pompage actif (débit de 300 mL/min) sur une cartouche d'adsorbant contenant du gel de silicium et imprégnée avec un réactif, la DNPH (2,4-dinitrophénylhydrazine)<sup>2</sup>. Ce réactif en présence d'aldéhydes forme des dérivés DNPH stables (dérivés hydrazones).

La durée de prélèvement est de 6 heures en continu (362 min) dans l'espace de travail sélectionné. Le prélèvement n'est pas interrompu pendant la pause déjeuner ni durant les absences du ou des occupants au cours du prélèvement. Un seul prélèvement d'aldéhydes est réalisé pour chaque point de mesure. Les cartouches et pompes de prélèvement sont disposées dans un portoir prévu à cet effet. La cartouche est placée à une hauteur de 1m20, proche de la hauteur des voies respiratoires. L'emplacement du portoir est représentatif du volume d'air à caractériser (centre de la pièce, éloigné des courants d'air éventuels ou des sources de pollution identifiées).

Plusieurs blancs de lot (jusqu'à 3 cartouches) ont été réalisés pour chaque lot de cartouches à usage unique. Les masses des blancs sont retranchées des masses des échantillons.

Un blanc de terrain est réalisé par bâtiment pour vérifier que les échantillonneurs ne présentent pas de contamination. Ces blancs servent uniquement pour l'assurance qualité et les masses faibles éventuellement détectées n'ont pas été retranchées des masses des échantillons. En cas de valeur élevée, les échantillons associés auraient été invalidés.

### 2.3.1.3 Analyse

Les dérivés DNPH sont extraits par solvant (acétonitrile) et analysés par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) avec détection UV. L'identification et la quantification des substances sont réalisées par étalonnage externe préalable. La masse de chaque composé carbonyle trouvé sur la cartouche est déterminée et exprimée en ng. Les limites de détection (LD) et de quantification (LQ) associées sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Limites de détection et de quantification des 9 aldéhydes

Composés	n°CAS	LD (µg/m <sup>3</sup> )	LQ (µg/m <sup>3</sup> )
<b>Acétaldéhyde</b>	108-62-3	0,01	0,03
<b>Acroléine</b>	107-02-8	0,01	0,03
<b>Benzaldéhyde</b>	100-52-7	0,02	0,05
<b>Butyraldéhyde</b>	123-72-8	0,01	0,03
<b>Crotonaldéhyde</b>	4170-30-3	0,01	0,03
<b>Formaldéhyde</b>	50-00-0	0,01	0,03
<b>Hexanal</b>	66-25-1	0,02	0,05
<b>Nonanal</b>	124-19-6	0,02	0,05
<b>Propionaldéhyde</b>	123-38-6	0,01	0,03

<sup>2</sup> A l'exception du nonanal, de l'hexanal et du benzaldéhyde qui sont prélevés sur le tube Tenax avec les COV

## 2.3.2 Composés organiques volatils (COV)

### 2.3.2.1 Composés ciblés et sources d'émission

Les COV ciblés sont à la fois ceux mesurés dans la campagne nationale « Bureaux » (2013-2017) de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur et ceux identifiés comme pouvant présenter un effet sur la santé mais pour lesquels aucune ou très peu de donnée n'est disponible à ce jour (Sérafine, 2020 ; cf. Tableau 1).

Ces COV sont principalement émis par des sources intérieures comme le mobilier, les revêtements, les produits de nettoyage, les occupants (bioeffluents, produits de soin corporel) et les éventuels parfums d'ambiance utilisés. Les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) sont également présents dans les émissions du trafic routier. Aussi, ils peuvent marquer l'impact de la pollution de l'air extérieur sur la qualité de l'air dans les bâtiments étudiés.

### 2.3.2.2 Prélèvement

Les COV sont mesurés par pompage actif au débit de 20 ml/min sur une cartouche d'adsorbant (Tenax TA®).

La durée de prélèvement est de 6 heures en continu dans l'espace de travail sélectionné. Le prélèvement n'est pas interrompu pendant la pause déjeuner ni durant les absences du ou des occupants au cours du prélèvement. Un seul prélèvement de COV est réalisé pour chaque point de mesure. Les cartouches et pompes de prélèvement sont disposées dans un portoir prévu à cet effet. La cartouche est placée à une hauteur de 1m20, proche de la hauteur des voies respiratoires. L'emplacement du portoir est représentatif du volume d'air à caractériser (centre de la pièce, éloigné des courants d'air éventuels ou des sources de pollution identifiées).

Un blanc de terrain est réalisé par bâtiment pour vérifier que les échantillonneurs ne présentent pas de contamination. A l'instar du cas des aldéhydes, ces blancs servent uniquement pour l'assurance qualité et les masses faibles éventuellement détectées n'ont pas été retranchées des masses des échantillons. En cas de valeur élevée, les échantillons associés auraient été invalidés.

### 2.3.2.3 Analyse

Les COV prélevés sont extraits par désorption thermique, puis analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. L'identification et la quantification des substances sont réalisées par étalonnage externe préalable. Les limites de détection (LD) et de quantification (LQ) associées sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Limites de détection et de quantification des 56 COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Composés	N°CAS	LD ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	LQ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
<b>1,1,2,2-tétrachloroéthane</b>	79-34-5	0,014	0,04
<b>1,2,3-trichloropropane</b>	96-18-4	0,010	0,03
<b>1,2-dichloroéthane</b>	107-06-2	0,014	0,04
<b>1,2-dichloropropane</b>	78-87-5	0,014	0,04
<b>1,3,5,7-cyclooctatétraène*</b>	629-20-9		
<b>1-bromopropane</b>	106-94-5	0,033	0,1
<b>1-éthylpyrrolidin-2-one</b>	2687-91-4	0,020	0,06

Composés	N°CAS	LD (µg/m³)	LQ (µg/m³)
1-methoxy-2-propyl acétate	108-65-6	0,030	0,09
2,4,6-trichlorophénol	88-06-2	0,014	0,04
2-butoxyéthanol	111-76-2	0,017	0,05
2-éthoxy éthyl acétate	111-15-9	0,014	0,04
2-éthoxyéthanol	110-80-5	0,013	0,04
2-ethylhexanol	104-76-7	0,033	0,10
2-methoxy-1-propanol	1589-47-5	0,013	0,04
Alpha-chlorotoluène	100-44-7	0,014	0,04
Alpha-pinène	80-56-8	0,013	0,04
Benzène	71-43-2	0,014	0,04
Benzophénone	119-61-9	0,013	0,04
Bornéol	464-45-9	0,034	0,10
Bromoforme	75-25-2	0,013	0,04
Catéchol	120-80-9	0,033	0,10
Chlorocrésol	59-50-7	0,015	0,04
Crésol	1319-77-3	0,015	0,04
Cyclopropylbenzène*	873-49-4		
DEGDME	111-96-6	0,013	0,04
Dichlorobromométhane	75-27-4	0,033	0,10
Dichlorométhane	75-09-2	0,029	0,09
Dihydromyrcénol	18479-58-8	0,013	0,04
Ethylbenzène	100-41-4	0,013	0,04
Eucalyptol	470-82-6	0,015	0,04
Géranol	106-24-1	0,033	0,10
Limonène	5989-27-5	0,014	0,04
Linalool	78-70-6	0,013	0,04
Méthylisobutylcétone (MIBK)	108-10-1	0,015	0,05
Méthylstyrène	25013-15-4	0,014	0,04
2-méthoxy-éthanol	109-86-4	0,036	0,11
m,p-xylènes	108-38-3 / 106-42-3	0,013	0,04
N,N-diméthylacétamide	127-19-5	0,031	0,09
N,N-diméthylformamide	68-12-2	0,030	0,09
Naphtalène	91-20-3	0,013	0,04
Nérol	106-25-2	0,036	0,11
N-méthyl-2-pyrrolidone	872-50-4	0,034	0,10
N-méthylformamide	123-39-7	0,033	0,10
o-xylène	95-47-6	0,013	0,04
Phénol	108-95-2	0,015	0,04
Siloxane D4	556-67-2	0,013	0,04
Siloxane D5	541-02-6	0,014	0,04

Composés	N°CAS	LD (µg/m <sup>3</sup> )	LQ (µg/m <sup>3</sup> )
Siloxane D6	540-97-6	0,014	0,04
Sorbaldéhyde*	142-83-6		
Styrène	100-42-5	0,013	0,04
Terpinéol	98-55-5	0,015	0,05
Terpinolène	586-62-9	0,030	0,09
Tétrachloroéthylène	127-18-4	0,013	0,04
Toluène	108-88-3	0,017	0,05
Trichlorométhyl-benzène	98-07-7	0,013	0,04
Vinyl-cyclohexène	100-40-3	0,026	0,08

\* : Composés non disponibles en étalon, recherchés individuellement avec l'ensemble de leurs fragments ioniques et jamais détectés. Les limites de détection (LD) et de quantification (LQ) prises en compte pour ces composés sont celle du toluène (quantification pour ces composés en « µg/m<sup>3</sup> équivalent toluène »).

### 2.3.3 Composés organiques semi-volatils (COSV)

#### 2.3.3.1 Composés ciblés et sources d'émission

Quarante-six COSV ont été ciblés. Ils appartiennent aux familles des phtalates, polybromodiphényl éthers (PBDE), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pesticides, muscs synthétiques et polychlorobiphényles (PCB). Ces COSV sont ceux qui ont été recherchés dans les campagnes « logements » et « écoles » de l'OQAI, mais qui n'avaient pas été retenus pour la campagne nationale « bureaux ». Aussi, avant cette étude, aucune donnée n'était disponible en France s'agissant de l'air intérieur d'espaces de bureaux.

Les usages et les principales sources des COSV ciblés sont résumés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Exemples des usages et sources de composés organiques semi-volatils dans les bâtiments

Familles chimiques	Usages	Sources
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Non intentionnels (présents dans les produits pétroliers ; résidus de combustion)	Tabagisme, cuisson, combustion d'encens, chauffage domestique (charbon, bois)  Air extérieur (trafic, émissions industrielles, feux de forêt, etc.)
Muscs de synthèse	Parfums	Produits de soin, cosmétiques, produits d'entretien
Pesticides organochlorés et organophosphorés, pyréthriinoïdes	Pesticides, biocides	Produits insecticides, antiparasitaires humain et animal, de traitement des plantes (phytosanitaires)  Air extérieur (traitement des cultures)
Phtalates	Plastifiants	Matières plastiques souples (revêtements de sol ou muraux, câbles électriques, rideaux de douche, matériel médical, etc.), lubrifiants, parfums
Polybromodiphényléthers (PBDE)	Retardateurs de flamme	Textiles, mobiliers rembourrés, plastiques durs (ordinateurs, téléviseurs, etc.)

Polychlorobiphényles (PCB)	Stabilisateurs, retardateurs de flamme	Vieux joints d'étanchéité (ouvrants, revêtements de sol)
Tributylphosphate (TBP)	Solvant, plastifiant, retardateur de flamme	Revêtements, peintures

Adapté du bulletin de l'OQAI n°9 dédié aux COSV (<http://www.oqai.fr>)

### 2.3.3.2 Prélèvement

Les COSV sont prélevés par pompage actif (débit de 2 L/min - coupure PM<sub>2,5</sub>) sur une cartouche URG (URG Corporation, Chapel Hill, NC, USA) dans laquelle est insérée un filtre en quartz et une mousse polyuréthane.

La durée de prélèvement est de 4,5 jours en continu dans l'espace de travail sélectionné. Le prélèvement n'est pas interrompu pendant les nuits, les pauses déjeuner ni durant les absences du ou des occupants au cours du prélèvement. Un seul prélèvement de COSV est réalisé pour chaque bâtiment. Les cartouches et pompes de prélèvements sont disposées dans un portoir prévu à cet effet. La cartouche est placée à une hauteur de 1,2 m, proche de la hauteur des voies respiratoires. L'emplacement du portoir est représentatif du volume d'air à caractériser (centre de la pièce, éloigné des courants d'air éventuels ou des sources de pollution identifiées).

Un blanc de terrain est réalisé par bâtiment pour vérifier que les échantillonneurs ne présentent pas de contamination. Les cartouches URG sont transportées dans des flacons en Teflon et en glacière.

### 2.3.3.3 Analyse

Les COSV, phases gazeuse et particulaire simultanément, sont extraits au solvant (ASE), puis analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Les limites de quantification (LQ) associées sont présentées dans le Tableau 5 (LD non fournies par le laboratoire).

Tableau 5. Limites de quantification des 46 COSV (ng/m<sup>3</sup>)

Composés	LQ (ng/m <sup>3</sup> )	Composés	LQ (ng/m <sup>3</sup> )
<b>Pesticides organochlorés</b>		<b>Muscs</b>	
Aldrine	0,28	Galaxolide	1,09
Dieldrine	0,28	Tonalide	1,09
4,4'-DDE	0,11	<b>Phtalates</b>	
4,4'-DDT	0,28	Butylbenzyl phtalate (BBP)	22
alpha-HCH	0,11	Dibutylphtalate (DBP)	19
gamma-HCH (lindane)	0,28	Di(2-éthylhexyl) phtalate (DEHP)	26
Alpha-endosulfan	0,28	Diéthylphtalate (DEP)	43
<b>Pesticides organophosphorés</b>		Diisobutylphtalate (DiBP)	17
Chlorpyrifos-éthyl	0,28	Diisononylphtalate (DiNP)	22
Diazinon	0,28	<b>Oxadiazolones</b>	
Dichlorvos	0,28	Oxadiazon	0,28
<b>Pesticides pyréthrinoïdes</b>		<b>Polychlorobiphényles</b>	
Cyfluthrine	0,56	PCB 28	0,11
Cyperméthrine	0,84	PCB 31	0,11
Deltaméthrine	0,56	PCB 52	0,11
Perméthrine	1,5	PCB 101	0,11
Tétraméthrine	0,56	PCB 105	0,11
<b>Ester phosphorique</b>		PCB 118	0,11
Tributylphosphate	4,3	PCB 138	0,11
<b>HAP</b>		PCB 153	0,11
Acénaphène	0,23	PCB 180	0,11
Anthracène	0,56	<b>Retardateurs de flamme bromés</b>	
Benzo[a]pyrène	0,28	BDE 47	0,28
Fluoranthène	0,22	BDE 85	0,46
Fluorène	0,22	BDE 99	0,46
Phénanthrène	0,43	BDE 100	0,46
Pyrène	0,22	BDE 153	1,1

## 2.3.4 Particules fines (PM<sub>2,5</sub>)

### 2.3.4.1 Prélèvement

Les PM<sub>2,5</sub> sont prélevés par pompage actif (débit de 1,8 L/min) sur un filtre en Teflon PTFE pré-pesé (porosité 2 µm).

La durée de prélèvement est de 4,5 jours en continu dans l'espace de travail sélectionné. Le prélèvement n'est pas interrompu pendant les nuits, les pauses déjeuner ni durant les absences du ou des occupants au cours du prélèvement. Un seul prélèvement de PM<sub>2,5</sub> est réalisé pour chaque bâtiment. Les filtres et pompes de prélèvement sont disposées dans un portoir prévu à cet effet. La cartouche est placée à une hauteur de 1,2 m, proche de la hauteur des voies respiratoires. L'emplacement du portoir est représentatif du volume d'air à caractériser (centre de la pièce, éloigné des courants d'air éventuels ou des sources de pollution identifiées).

Un blanc de terrain est réalisé par bâtiment pour vérifier l'absence de contamination. Le cas échéant, l'échantillon associé est invalidé.

#### 2.3.4.2 Analyse

La pesée des filtres est effectuée dans une salle de pesée régulée en température (20°C) et en humidité (50 %) à l'aide d'une balance de précision dont la sensibilité est de 1 µg. La pesée des filtres avant et après prélèvement a été réalisée selon la norme NF EN 12341 (AFNOR 2014). Les filtres sont pesés une première fois après 48 heures de conditionnement dans la salle de pesée (pesée 1), puis une seconde fois 24 heures après (pesée 2). La masse retenue du filtre correspond à la moyenne des deux pesées. La limite de détection est calculée à partir des écarts observés sur les double-pesées. On a  $LD = LQ = 6,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 2.3.5 Métaux sur les particules en suspension

Après pesée, les filtres de  $\text{PM}_{2,5}$  ont été analysés par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif associée à un détecteur de type quadripôle (ICP-MS) pour déterminer les concentrations des 17 éléments traces suivants : aluminium, arsenic, baryum, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, fer, manganèse, molybdène, nickel, plomb, rubidium, antimoine, titane, vanadium et zinc.

La limite de quantification est égale à  $62 \text{ ng}/\text{m}^3$  pour l'aluminium et le fer. Elle est égale à  $0,62 \text{ ng}/\text{m}^3$  pour les autres métaux (arsenic, baryum, cadmium, cobalt, chrome, cuivre, manganèse, molybdène, nickel, plomb, rubidium, antimoine, titane, vanadium et zinc).

#### 2.3.6 Potentiel oxydant (PO)

Les études de processus *in vitro* ont montré que les effets sanitaires des particules atmosphériques sont principalement attribués à leur potentiel inflammatoire via les espèces oxydantes qu'elles véhiculent : métaux et molécules organiques principalement (Hellack et al. 2014). Les maladies déclenchées diffèrent ensuite, dans l'arbre respiratoire, selon les mélanges spécifiques des différentes sources de pollution, la durée d'exposition et la susceptibilité des personnes, mais l'origine commune de ces affections est attribuée au stress oxydatif pulmonaire engendré par l'exposition aux particules. Il en découle une métrique appelée potentiel oxydant (PO) des aérosols, définie comme la capacité des particules à générer *in vitro* des espèces oxydantes ou ROS (*reactive oxygen species*).

Ainsi, la communauté de chimie atmosphérique se penche depuis 2005 sur cette mesure qui semble intégrative de plusieurs caractéristiques toxiques des particules. Trois méthodologies acellulaires et biochimiques sont désormais les plus utilisées. Elles reposent sur le monitoring de la déplétion d'antioxydants (ou de substituts), catalysée par les espèces redox présentes dans les PM (Cho et al. 2005, Uzu et al. 2011). Le "DTT assay", à base de dithiothréitol, un substitut d'anti-oxydant pulmonaire a été conçu pour simuler la production de l'anion superoxyde ( $\text{O}_2^-$ ) (Uzu et al. 2011, Goix et al. 2014, Calas et al. 2017). Le "AA assay" est à base d'acide ascorbique, un antioxydant pulmonaire naturel qui est sensible aux espèces  $\text{O}_2^-$  et peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Janssen et al. 2015, Calas et al. 2018). Enfin, la sonde fluorescente 2,7-dichlorofluoresceine a donné son nom au "DCFH assay", pour détecter à la fois les ROS (*Reactive oxygenated species*) et les RNS (espèces réactives de l'azote) (Platt et al. 2014, Perrone et al. 2016).

A cause de leur spécificité à certains types de ROS ou à certains constituants des PM (e.g, le "AA assay" est très sensible aux métaux), aucun consensus n'est aujourd'hui accepté sur le test le plus représentatif des effets sanitaires réels, et la communauté s'oriente vers des combinaisons de méthodes pour obtenir les résultats les plus pertinents (Fang et al. 2016). Ces mesures sont effectuées en routine depuis 2014 au laboratoire IGE (Calas et al. 2017, Calas et al. 2018).

### **2.3.7 Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**

Les concentrations en CO<sub>2</sub> sont mesurées au moyen de capteurs Class'Air développés par la société PYRES.COM. Ces capteurs sont équipés de sondes de CO<sub>2</sub> à infrarouge non dispersif (NDIR). Les capteurs de CO<sub>2</sub> sont également placés sur les portoirs à une hauteur de 1m20, proche de la hauteur des voies respiratoires. L'emplacement des portoirs est représentatif du volume d'air à caractériser (centre de la pièce, éloigné des courants d'air éventuels ou des sources de pollution identifiées).

Les mesures sont réalisées en continu pendant 6 heures, avec une acquisition toutes les 10 minutes, dans les pièces où sont réalisés les prélèvements de COV et aldéhydes. Elles sont réalisées pendant 4,5 jours, avec la même fréquence d'acquisition, dans les pièces où sont réalisés les prélèvements de PM<sub>2,5</sub> et COSV.

### **2.3.8 Température et humidité relative**

La température et l'humidité relative sont mesurées au moyen des capteurs Class'Air qui mesurent également le CO<sub>2</sub>.

Les mesures sont réalisées sur un pas de temps de 10 minutes pendant 6 heures dans les pièces où sont réalisés les prélèvements de COV et aldéhydes. Les mesures sont réalisées pendant 4,5 jours dans les pièces où sont réalisés les prélèvements de PM<sub>2,5</sub> et COSV.

## **2.4 Questionnaires**

Les mesures sont accompagnées de questionnaires. Deux types de questionnaires ont été complétés. Tout d'abord un questionnaire adressé aux gestionnaires des bâtiments pour recueillir des informations sur l'âge du bâtiment, les rénovations éventuelles, les équipements, le système de ventilation et l'entretien des locaux.

Un autre type de questionnaire a été distribué aux occupants des pièces investiguées pour connaître les caractéristiques des pièces en question (volumes, nombre d'occupants, type de revêtements des murs, sols, plafonds), les équipements présents dans ces pièces (imprimantes, photocopieuses, mobiliers, appareils de chauffage), les conditions d'aération et les activités particulières réalisées pendant les périodes de mesures (ménage, diffusion de parfums d'ambiance, brûlage d'encens, travaux, introduction de mobilier neuf, etc.).

### 3 EXPLOITATION STATISTIQUE

#### 3.1 Périodes de chauffe et hors chauffe

Les immeubles de bureaux ont été enquêtés entre octobre 2018 et juin 2019, avec seulement 3 immeubles enquêtés en juin. Parmi les 30 immeubles, 25 ont répondu que le chauffage était en fonctionnement pendant la semaine de mesure, 4 qu'il n'était pas en fonctionnement et 1 questionnaire n'a pas été remis. Les résultats sont donc présentés **toutes saisons confondues** du fait du faible effectif d'immeubles de bureaux enquêtés en période hors chauffe.

#### 3.2 Calcul du taux de renouvellement d'air (TRA)

A partir des mesures de CO<sub>2</sub>, il est possible de déterminer le taux de renouvellement d'air pour chaque séquence de décroissance de la concentration en CO<sub>2</sub>, par un processus de calcul automatique. Le TRA final est la moyenne des TRA de chaque décroissance sur la période considérée.

Chaque séquence de décroissance est supposée correspondre à un départ de l'occupant de la pièce. Cette hypothèse n'est pas vérifiée en cas d'ouverture de fenêtres. Dans ce cas, le renouvellement d'air effectif est alors sous-estimé. En première approche, dans la mesure où seules les décroissances de fin de journée sont prises en compte, on considère négligeable l'impact de l'ouverture des fenêtres.

En conséquence, le TRA est proportionnel à la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air, selon la formule suivante :

$$\text{Ln} \frac{(C_{ext} - C_{int})}{(C_{ext} - C_{int}^0)} = -\lambda t$$

avec  $C_{ext}$  : concentration extérieure en CO<sub>2</sub> pris comme constante à 400 ppm

$C_{int}$  : concentration intérieure en CO<sub>2</sub>

$C_{int}^0$  : concentration initiale en CO<sub>2</sub> (début de la décroissance)

$\lambda$  : taux de renouvellement d'air exprimé en h<sup>-1</sup>

$t$  : temps en heure

Ainsi chaque séquence de décroissance identifiée dans l'enregistrement des mesures déclenche le calcul d'un taux de renouvellement d'air par régression linéaire. Un seuil minimum de CO<sub>2</sub> (450 ppm) fixe le nombre de points pris en compte dans la régression, c'est-à-dire que la séquence est considérée terminée quand on atteint 450 ppm.

Pour chaque pièce, on obtient ainsi une série de taux de renouvellement d'air calculés. Les critères suivants, calculés pour chaque séquence, sont fixés pour sélectionner les TRA valides :

- heure de début de la décroissance > 17h. Dans le cas d'une VMC arrêtée la nuit, cette période d'arrêt est *a priori* en dehors de la phase de décroissance des concentrations en CO<sub>2</sub> étudiée ;
- coefficient de détermination de la régression  $r^2 > 0,9$  ;
- nombre de points pris en compte dans la régression  $\geq 6$  (soit 1h de décroissance minimum) ;
- concentration initiale en CO<sub>2</sub> au moment de la décroissance  $\geq 600$  ppm (de façon à ne pas prendre en compte les faibles variations de CO<sub>2</sub>).

### 3.3 Coefficients de corrélation intra classe

L'homogénéité des concentrations intérieures au sein des immeubles de bureaux a été évaluée. Cette variabilité spatiale a été déterminée à partir du calcul des coefficients de corrélation intra classe (CCI) avec un modèle à deux niveaux : le niveau des espaces de bureaux et le niveau des immeubles de bureaux.

Le modèle est défini comme suit :

$$y_{ij} = \mu_Y + u_{oj} + \varepsilon_{ij}$$

Avec :

$i = 1, \dots, b$  avec  $b$  le nombre d'espaces de bureaux

$j = 1, \dots, B$  avec  $B$  le nombre d'immeubles de bureaux

$y_{ij}$  est la concentration mesurée dans l'espace de bureau  $i$  au sein de l'immeuble  $j$

$\mu_Y$  est la « vraie » concentration moyenne

$u_{oj}$  est la déviation par rapport à  $\mu_Y$  due à l'effet de l'immeuble  $j$

$\varepsilon_{ij}$  est la déviation par rapport à l'immeuble  $j$  due à l'effet de l'espace de bureau  $i$

Les composantes de la variance sont  $var(\varepsilon_{ij}) = \sigma_\varepsilon^2$  et  $var(u_{oj}) = \sigma_u^2$ .

$\sigma_\varepsilon^2$  représente la variance entre les espaces de bureaux, et  $\sigma_u^2$  représente la variance entre les immeubles de bureaux.

Les coefficients de corrélation intra classe (CCI) sont calculés comme suit :

$$CCI = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_\varepsilon^2}$$

Pour un polluant donné, les concentrations dans les espaces de bureaux sont considérées comme corrélées (c'est-à-dire, la variance entre les espaces de bureaux est inférieure à la variance entre les immeubles de bureaux) lorsque le CCI est supérieur à 60 %. Inversement, les concentrations sont considérées hétérogènes (c'est-à-dire, la variance entre les espaces de bureaux est supérieure à la variance entre les immeubles de bureaux) si le CCI est inférieur à 40 %.

### 3.4 Méthode de classification des espaces de bureaux

La classification des espaces de bureaux permet d'identifier des groupes de bureaux similaires du point de vue de leur pollution intérieure, puis d'associer ces groupes à des caractéristiques propres à ces espaces (construction, occupation, usages). Autrement dit, cette classification permet d'identifier les déterminants des profils de concentrations intérieures mesurées.

#### 3.4.1 Sélection des variables

La classification des espaces de bureaux a été réalisée uniquement sur les concentrations en aldéhydes et COV car ces substances ont été mesurées dans plusieurs espaces de bureaux de chaque immeuble de bureaux, avec un effectif de 101 prélèvements valides pour les aldéhydes, et de 102 prélèvements valides pour les COV, pour un effectif final de 100 espaces de bureaux en commun.

A l'inverse, le nombre d'observations n'a pas été jugé suffisant pour inclure les  $PM_{2,5}$ , les métaux, le potentiel oxydant et les COSV, ainsi que la température, l'humidité relative et le  $CO_2$  (moins de 30 pièces en commun).

Seuls les polluants avec plus de 15 % de valeurs supérieures à la limite de quantification ont été retenus. En effet, les polluants peu quantifiés ou détectés présentent peu d'intérêt dans un modèle basé sur l'analyse de la variance, car on affecte la même valeur ( $LD/2$ ) à tous les prélèvements inférieurs à la LD, et la même valeur ( $LQ/2$ ) à tous les prélèvements supérieurs à la LD et inférieurs à la LQ.

Finalement, 34 polluants ont été retenus pour la construction du modèle de classification : 8 aldéhydes et 26 COV.

### **3.4.2 Standardisation des variables**

Une standardisation est nécessaire pour que les polluants retenus contribuent de manière égale à la construction du modèle de classification. En effet, la méthode de classification est basée sur une analyse de la variance. Sans standardisation, les polluants avec une variance élevée représenteraient un poids beaucoup plus important que les polluants avec une variance faible.

La méthode de standardisation choisie est celle de la transformation en rangs. Lorsque des valeurs sont identiques, le même rang leur a été attribué et un saut de rang a été effectué pour la valeur suivante. Cette méthode de standardisation a comme avantages d'être adaptée à des données de concentrations censurées à gauche (inférieures à la LD ou à la LQ), et de donner moins de poids à la présence de valeurs extrêmes.

Les statistiques de rangs ont été calculées avec la procédure RANK du logiciel SAS (SAS Enterprise Guide, version 8.2 ; SAS Institute Inc., Cary, NC).

### **3.4.3 Classification mixte**

Une classification mixte des espaces bureaux à partir d'une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée. Puis, elle combine la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et la méthode des centres mobiles K-means.

#### *3.4.3.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)*

L'ACP permet de projeter l'information contenue dans un espace multidimensionnel sur un espace de dimension réduite, tout en conservant un maximum d'information. Elle a pour objectif de synthétiser, résumer et structurer l'information contenue dans les données.

Par le biais de l'ACP, de nouvelles variables ont été calculées par combinaison linéaire des variables. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent un système d'axes de dimension inférieure à l'espace initial. Les individus statistiques, *i.e.* les espaces de bureaux, sont ensuite projetés sur ce nouveau système d'axes. Cette projection permet de visualiser les groupes d'espaces de bureaux au profil similaire en termes de concentrations en aldéhydes et COV.

Une grande partie de l'information est portée par les premières composantes principales, c'est pourquoi la classification des espaces de bureaux a été construite sur ces premières composantes uniquement. Le nombre de composantes principales retenues a été déterminé à l'aide du critère du coude, qui consiste à ne sélectionner que les composantes situées graphiquement en amont et au niveau du « coude » de la courbe des valeurs propres (Cattell et al. 1977).

Certaines variables contribuent davantage à la construction des composantes principales que d'autres. Ces variables sont identifiées en comparant leur contribution respective à la contribution moyenne des variables. Lorsque leur contribution est supérieure à la moyenne, elle est dite significative. On considère alors que la variable, et *a fortiori* la classe de polluants qu'elle représente, caractérise la composante principale.

L'interprétation des axes retenus est rendue possible via la projection des variables initiales et des individus statistiques sur ce nouveau système d'axes.

L'ACP a été réalisée avec la procédure PRINCOMP du logiciel SAS (SAS Enterprise Guide, version 8.2 ; SAS Institute Inc., Cary, NC).

#### 3.4.3.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH) et méthode des centres mobiles

La CAH et la méthode des centres mobiles (ou algorithme K-means) sont des méthodes de partitionnement d'une population en groupes homogènes. L'objectif est que les individus au sein d'un même groupe (homogénéité intra-classe) soient le plus semblables possible tandis que les individus de groupes différents soient le plus dissemblables (hétérogénéité interclasse). Autrement dit, les groupes sont créés en cherchant à minimiser l'inertie intra-classe (dispersion entre individus statistiques au sein d'un même groupe) et à maximiser l'inertie interclasse (dispersion entre individus statistiques de différents groupes).

La méthode des centres mobiles ou algorithme des K-means est une méthode de partitionnement non hiérarchique qui améliore à chaque itération la qualité des groupes et permet de détecter les individus statistiques hors norme ou isolés. Elle nécessite un paramétrage initial : le nombre de groupes et les barycentres initiaux des groupes doivent être spécifiés en amont de l'algorithme.

Pour cette raison, une CAH par la méthode de Ward a été réalisée avant la K-means pour déterminer les barycentres initiaux des groupes et définir le nombre optimal de groupes à l'aide du coefficient de détermination ( $R^2$ ) et du critère de classification cubique (CCC) :

- le **Cubic clustering criterion** (CCC) permet de tester l'hypothèse  $H_0$  selon laquelle les données sont distribuées uniformément. Un CCC supérieur à 2 indique une bonne classification ;
- le  $R^2$  correspond au rapport entre l'inertie interclasse et l'inertie totale. Il doit être le plus proche possible de 100 %.

La CAH réalisée utilise la distance euclidienne. Les individus sont rassemblés de manière itérative. La méthode de regroupement du saut de Ward permet de minimiser à chaque itération la perte d'inertie interclasse.

La CAH et la méthode des K-means ont été réalisées avec les procédures CLUSTER et FASTCLUS du logiciel SAS (SAS Enterprise Guide, version 8.2 ; SAS Institute Inc., Cary, NC).

### 3.4.3.3 Critères de caractérisation des groupes

Les variables caractéristiques de chaque groupe ont été déterminées par l'étude des valeurs-tests, conditionnée par l'hypothèse de normalité des données.

Pour chaque variable quantitative, la valeur-test a évalué l'écart entre la valeur moyenne du groupe considéré et la valeur moyenne de tout l'échantillon. Pour chaque modalité des variables qualitatives, la valeur-test a évalué l'écart entre la proportion de la modalité observée dans le groupe et la proportion de la modalité observée dans tout l'échantillon. La valeur-test a ensuite été comparée à 1,96, correspondant au fractile d'ordre 0,975 de la loi normale pour un risque d'erreur de 5 %. Si la valeur-test était supérieure à 1,96, la variable caractérisait le groupe considéré.

## 3.5 Mise en perspective des concentrations mesurées

Les concentrations mesurées dans l'air intérieur dans le cadre du projet POEME ont été principalement comparées aux concentrations mesurées :

- Dans la **campagne nationale menée par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur** dans 129 immeubles de bureaux de France métropolitaine entre juin 2013 et juin 2017. L'objectif de cette campagne était notamment de dresser un état du parc français des immeubles de bureaux en termes de qualité de l'air intérieur. Deux-tiers des bâtiments de cette campagne ont été tirés au sort, tandis que les autres étaient volontaires. Aucun bâtiment de l'échantillon n'était localisé en Nouvelle-Aquitaine. Les mesures de COV et aldéhydes ont été réalisées en cinq points de chaque immeuble quelle que soit sa taille ;
- Dans le cadre du projet européen de recherche **OFFICAIR** qui avait pour objectif l'étude de la qualité de l'air et du confort dans les immeubles de bureaux construits ou rénovés depuis moins de 10 ans. Au total, 37 immeubles de bureaux volontaires répartis dans 8 pays, dont 9 en France, ont participé aux mesures. Celles-ci étaient réalisées en 4 points par bâtiment et visaient les aldéhydes, COV, PM<sub>2,5</sub> et le potentiel oxydant dans un sous-échantillon ; elles ont eu lieu durant une semaine à l'été 2012, puis une semaine à l'hiver 2012-2013.

## 4 CARACTERISTIQUES DES BATIMENTS ET DES REpondANTS

Le questionnaire descriptif du bâtiment n'a pas été renseigné pour un immeuble parmi les 30 étudiés.

### 4.1 Caractéristiques des immeubles de bureaux étudiés

La répartition des immeubles de bureaux enquêtés par période de fin de construction est présentée dans la Figure 2. Près de la moitié des immeubles de bureaux enquêtés ont été construits après 2000. 34 % l'ont été après 2011. Avant 2000, une part non négligeable des immeubles ont été construits avant 1945 (21 %) et entre 1974 et 1989 (24 %).

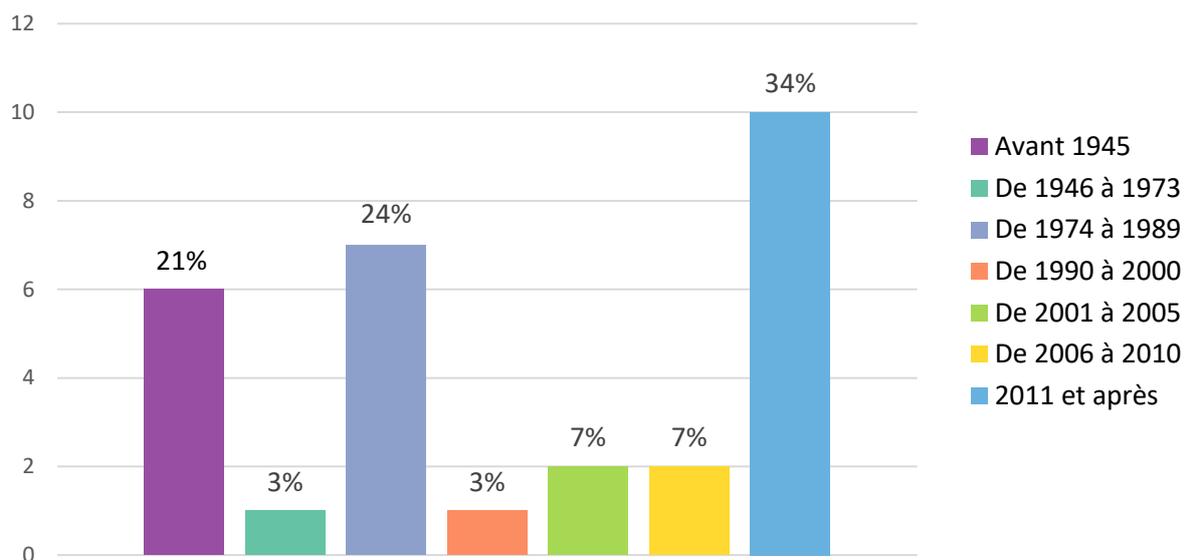


Figure 2. Répartition des immeubles de bureaux enquêtés par période de fin de construction (n = 29)

La Figure 3 présente la répartition des immeubles de bureaux enquêtés en fonction du nombre de niveaux. La moitié des immeubles sont des immeubles à 1, 2 ou 3 niveaux, 38 % des immeubles ont entre 4 et 9 niveaux, et 10 % des immeubles s'élèvent sur plus de 10 niveaux.

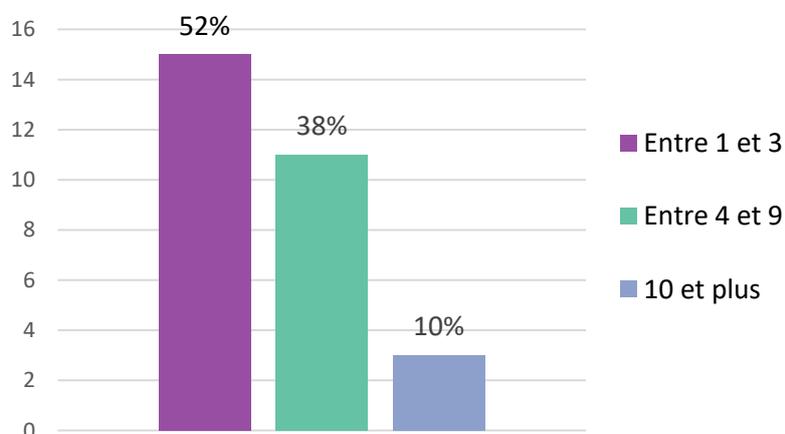


Figure 3. Nombre de niveaux dans les immeubles de bureaux enquêtés (n = 29)

La Figure 4 représente le pourcentage d'immeubles de bureaux enquêtés ayant eu des fuites d'eau importantes ou inondations au cours des 12 derniers mois, ainsi que la présence de moisissures apparentes dans les bureaux. Des fuites d'eau ou inondations ont été déclarées pour 10 immeubles (34 %). Les origines des fuites d'eau ou inondations les plus citées sont le toit (n = 6), les tuyaux (n = 4) ou d'autres origines (n = 4). Par ailleurs, 14 % des immeubles de bureaux présentent des moisissures apparentes.

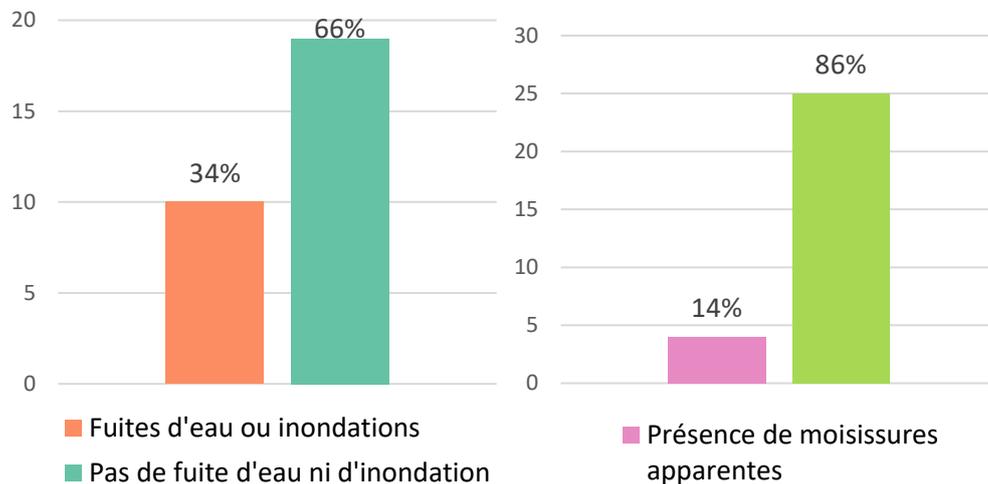


Figure 4. Fuites d'eau importantes ou inondations au cours des 12 derniers mois et présence de moisissures apparentes dans les bureaux (n = 29)

D'après la Figure 5, la majorité des immeubles de bureaux disposent d'au moins un ascenseur (90 %), d'une salle avec des serveurs informatique (79 %) et d'une chaufferie (72 %). La moitié ou moins de la moitié des immeubles disposent d'une salle de restauration (55 %), d'une cuisine (45 %) et d'un parking souterrain (38 %). Seulement 10 % des immeubles sont équipés d'une salle d'activités sportives. Enfin, aucun des immeubles de bureaux enquêtés ne dispose d'un parking sur le toit, ni d'un local fumeurs.

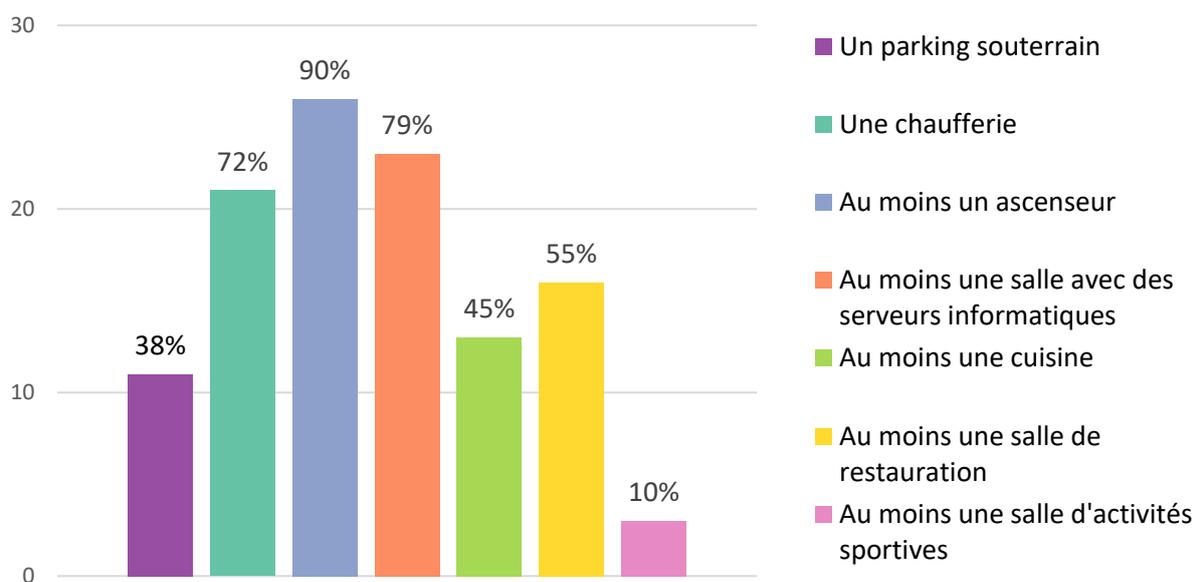


Figure 5. Présence d'équipements dans les immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

La Figure 6 présente le mode de ventilation des immeubles de bureaux enquêtés. Le système de ventilation le plus utilisé est la ventilation mécanique contrôlée (VMC), présente dans 86 % des immeubles de bureaux. 45 % des immeubles sont équipés de VMC double flux tandis que 41 % des immeubles sont occupés de VMC simple flux. La ventilation par la seule ouverture des fenêtres est utilisée dans 10 % des immeubles. Enfin, la ventilation naturelle est utilisée dans uniquement 3 % des immeubles.

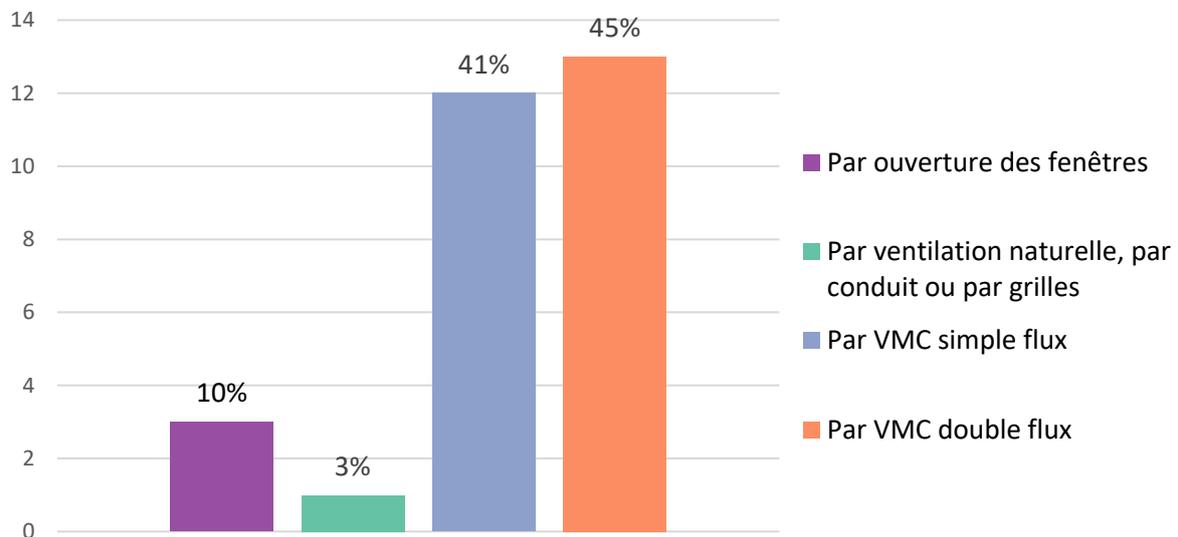


Figure 6. Type de ventilation dans les immeubles de bureaux enquêtés (n = 29)

La Figure 7 représente le pourcentage d'immeubles de bureaux arrêtant la VMC pendant la nuit. Elle montre que celle-ci n'est pas interrompue pendant la nuit dans la majorité des immeubles.

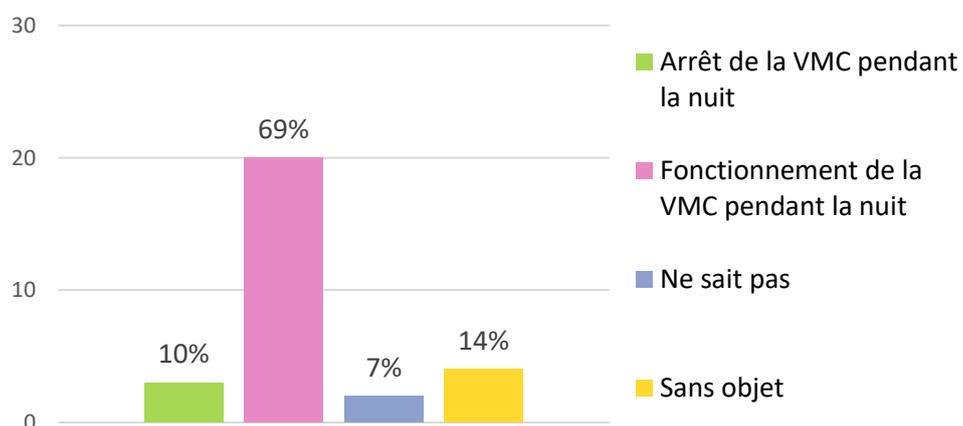


Figure 7. Arrêt de la VMC pendant la nuit (n = 29)

La Figure 8 représente les pourcentages d'immeubles de bureaux en fonction de l'emplacement de la prise d'air neuf. Seuls les immeubles de bureaux équipés d'une VMC double flux (n = 13) sont concernés par cette question. Parmi ceux-ci, la prise d'air neuf peut se trouver en toiture (69 %) ou en façade (54 %). Trois immeubles ont déclaré avoir à la fois une prise d'air neuf en toiture et en façade :

3 sont de grands bâtiments dans lesquels il est possible d'avoir plusieurs centrales de traitement d'air et 1 est de petite taille. Il est possible pour celui-ci que le questionnaire ait été mal complété.

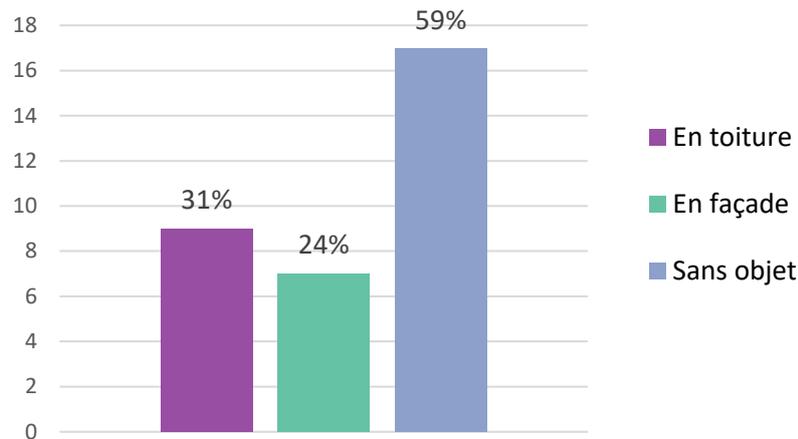


Figure 8. Emplacement de la prise d'air neuf dans les immeubles de bureaux (n = 29)

La Figure 9, la Figure 10, la Figure 11 et la Figure 12 représentent la fréquence et le moment de la journée pour le nettoyage des sols et du mobilier par détergents, sprays ou lingettes humides.

Dans la majorité des immeubles de bureaux, le sol et le mobilier sont nettoyés par détergents au moins une fois par semaine (83 % et 62 % respectivement), le cas le plus courant étant un nettoyage des sols deux fois par semaine (59 % pour les sols et 38 % pour le mobilier).

Les sols sont nettoyés par détergents sans préférence marquée vis-à-vis du moment dans la journée : nettoyage le matin avant l'occupation des bureaux pour 45 % des immeubles, dans la journée pour 38 % des immeubles et le soir après l'occupation des bureaux pour 31 % des immeubles. La même tendance est observée pour le mobilier qui est nettoyé le matin (34 %), dans la journée (28 %) ou le soir (24 %).

Les détergents ne sont pas utilisés pour nettoyer le sol dans 10 % des immeubles de bureaux, et dans 28 % des immeubles de bureaux pour ce qui est du mobilier.

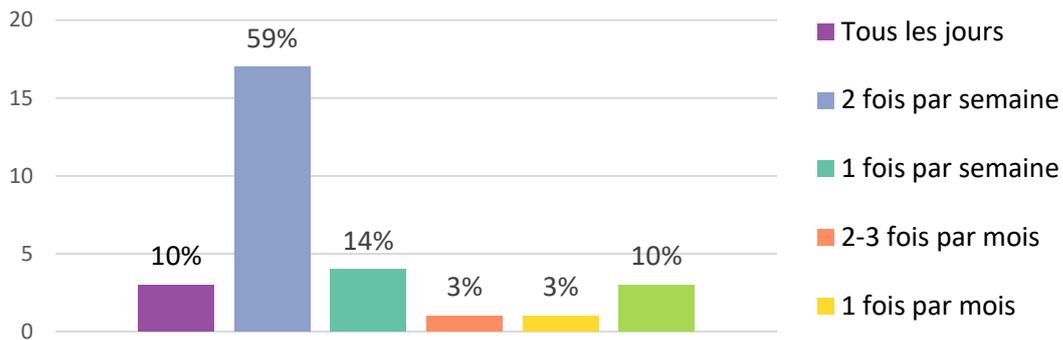


Figure 9. Fréquence de nettoyage des sols par détergents (n = 29)

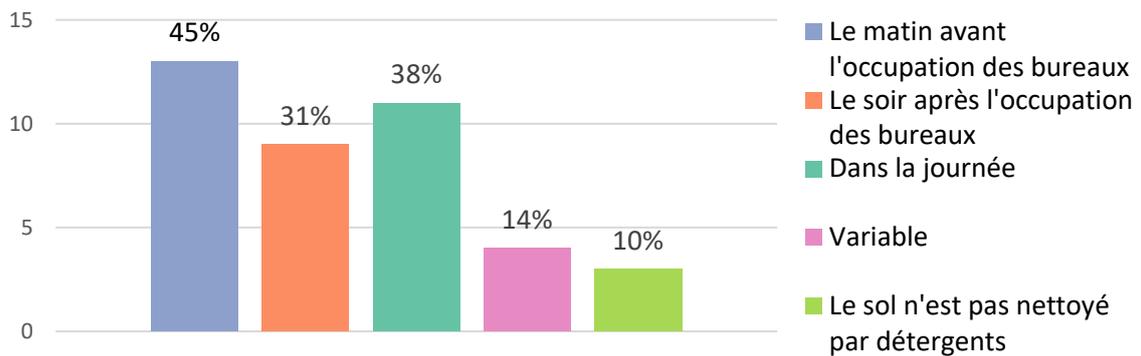


Figure 10. Moment de la journée pour le nettoyage des sols par détergents (n = 29)

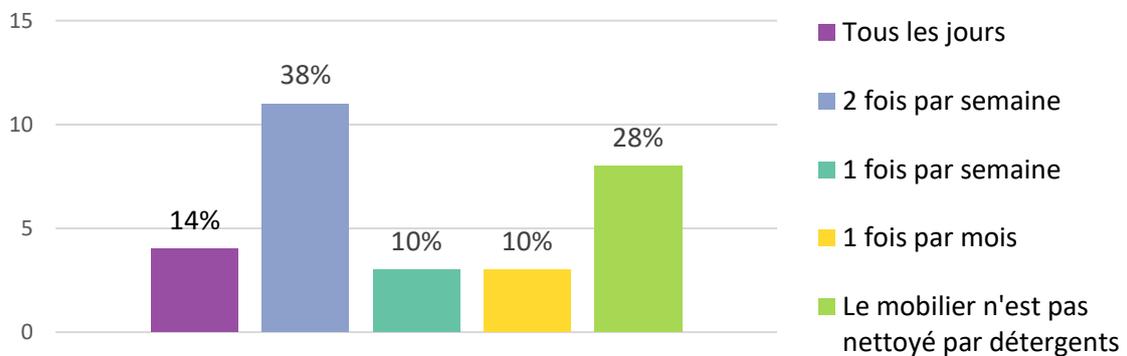


Figure 11. Fréquence de nettoyage du mobilier par détergents (n = 29)

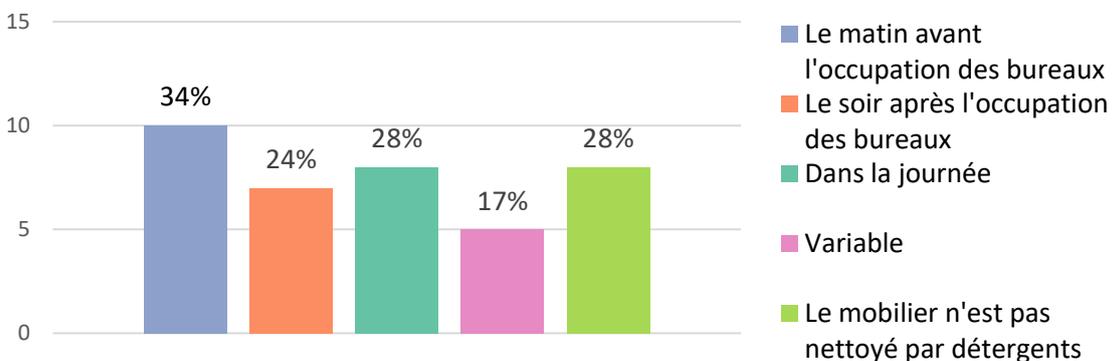


Figure 12. Moment de la journée pour le nettoyage du mobilier par détergents (n = 29)

## 4.2 Caractéristiques des occupants et de leur poste de travail

La Figure 13 représente la distribution du nombre d'occupants dans les bureaux enquêtés. Un tiers des espaces de bureaux sont occupés par une seule personne. 40 % des espaces de bureaux sont occupés par 2 ou 3 personnes. La Figure 14 indique la répartition entre les open-spaces et les bureaux paysagers : 77 % des espaces de bureaux sont des bureaux paysagers.

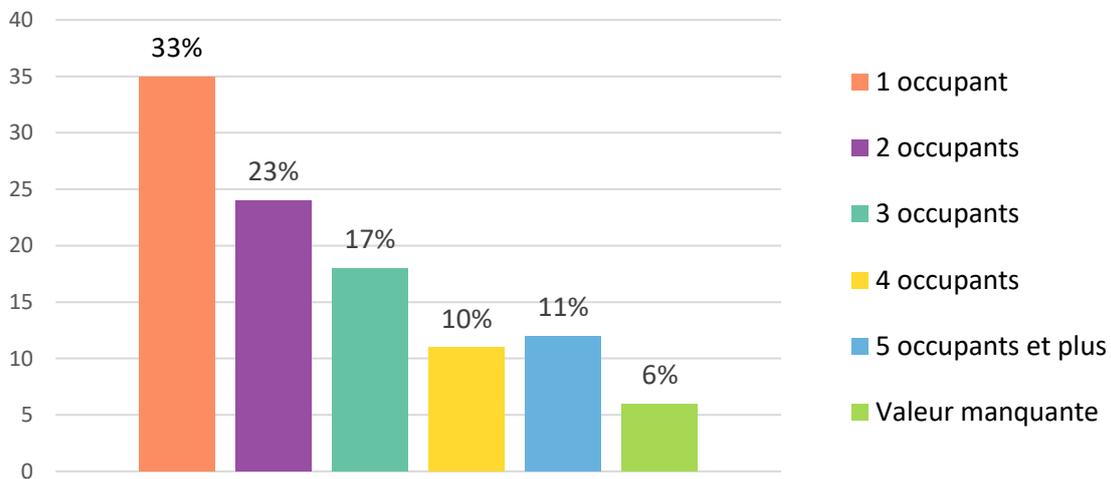


Figure 13. Nombre d'occupants dans les espaces de bureaux (n = 106)

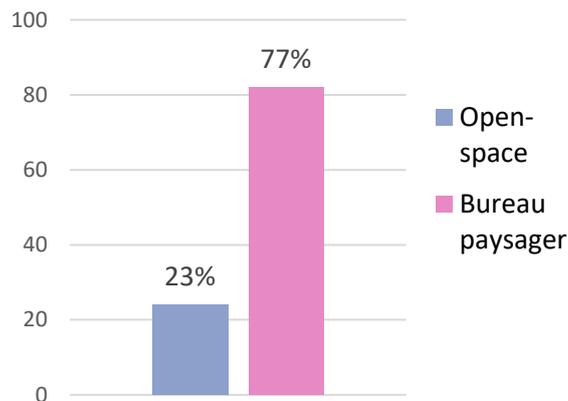


Figure 14. Type des espaces de bureaux (n = 106)

Les Figure 15 et Figure 16 représentent la répartition des espaces de bureaux en fonction du revêtement de sol principal et des revêtements muraux disposés sur au moins une paroi complète. Les matériaux de revêtement les plus répandus sont les sols synthétiques (67 %) et la peinture (70 %). La moquette (19 %) et la toile de verre (26 %) représentent également une part non négligeable des revêtements de sol et mural.

La Figure 17 représente la répartition des espaces de bureaux en fonction du matériau constituant le plafond ou faux-plafond. L'essentiel des espaces de bureaux (73 %) comportent des dalles de faux-plafond. Les autres matériaux utilisés sont en proportion comparable : béton/pierre (8 %), peinture (11 %), et autres (8 %).

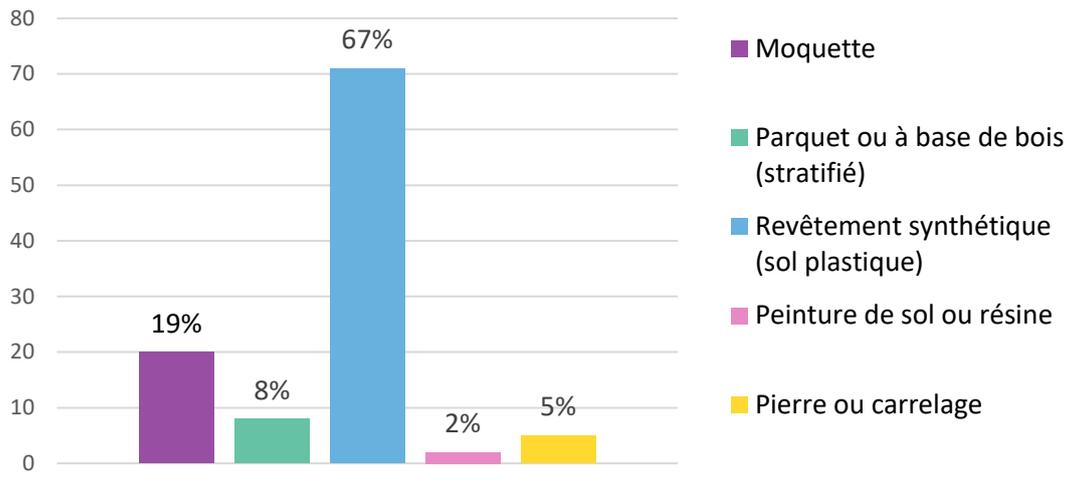


Figure 15. Revêtement de sol principal des espaces de bureaux (n = 106)

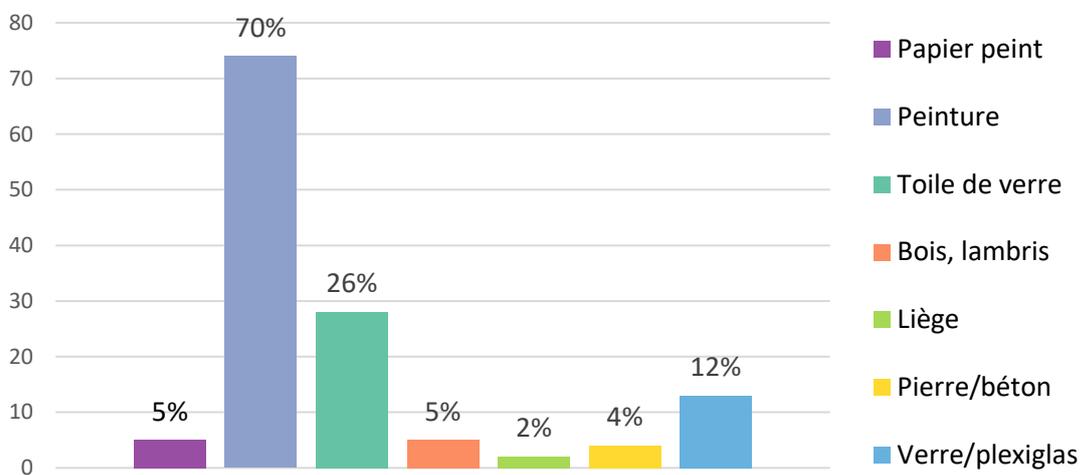


Figure 16. Revêtement mural occupant au moins toute une paroi (n = 106)

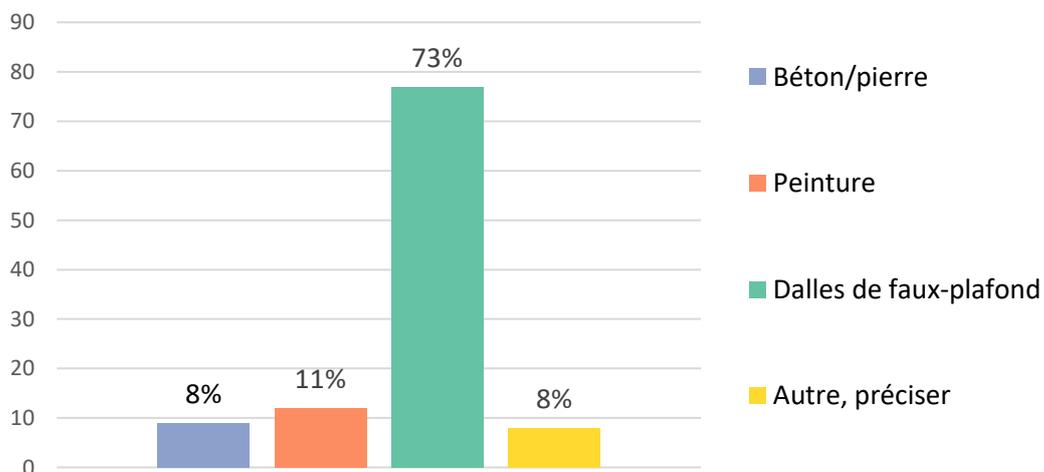


Figure 17. Matériau principal constituant le plafond ou faux-plafond (n = 106)

D'après la Figure 18, la majorité des espaces de bureaux n'est pas équipée d'imprimante (82 %) ni de photocopieuse (86 %). Aucune plante n'est présente dans plus de la moitié des bureaux, contre un tiers de bureaux où l'on compte une plante ou deux (Figure 19).

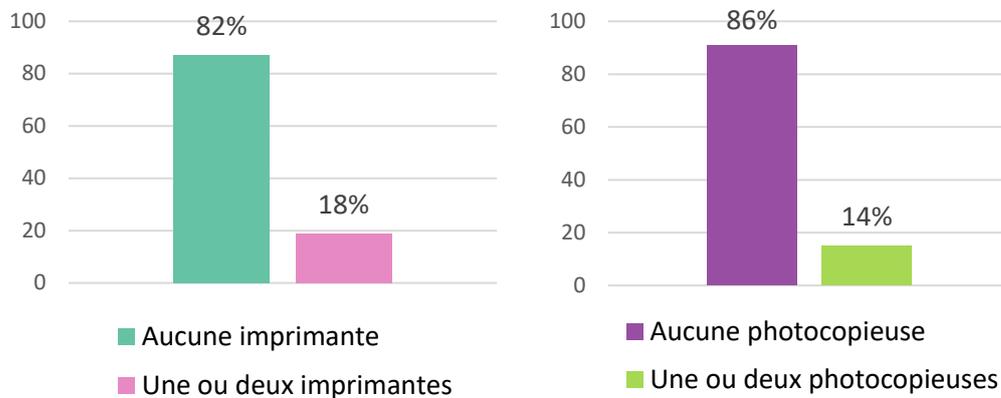


Figure 18. Présence d'imprimantes et de photocopieuses dans les espaces de bureaux (n = 106)

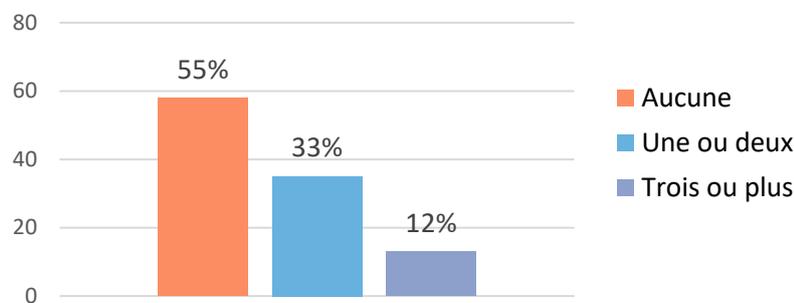


Figure 19. Présence de plantes vertes dans les espaces de bureaux (n = 106)

Il est possible d'ouvrir la fenêtre dans la majorité des bureaux (82 %) mais les fenêtres n'ont pas été ouvertes au cours de la journée de prélèvements gazeux dans la moitié des bureaux (Figure 20). Les proportions de bureaux où les fenêtres ont été ouvertes moins de 30 minutes et plus de 30 minutes dans la journée sont identiques (22 %).

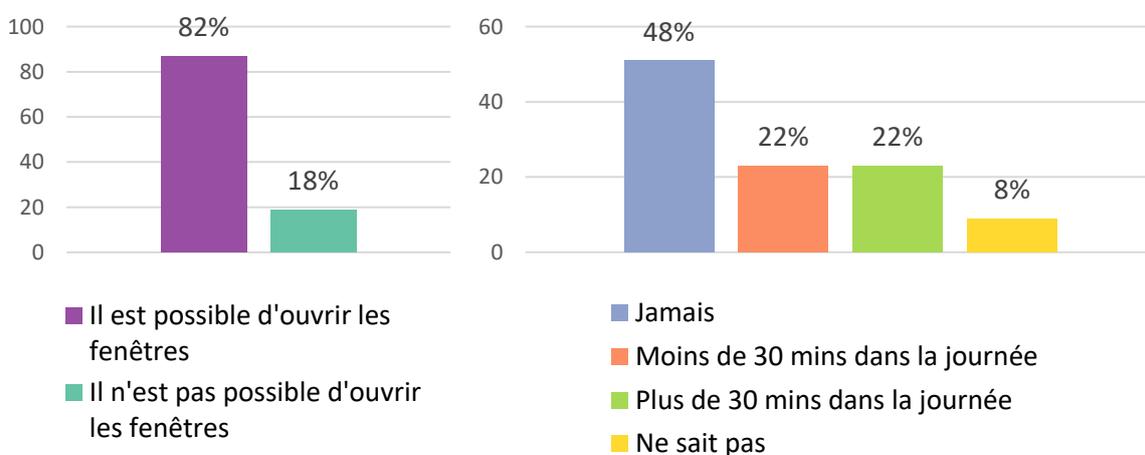


Figure 20. Possibilité d'ouverture des fenêtres et durée d'ouverture des fenêtres au cours de la journée de prélèvements gazeux (n = 106)

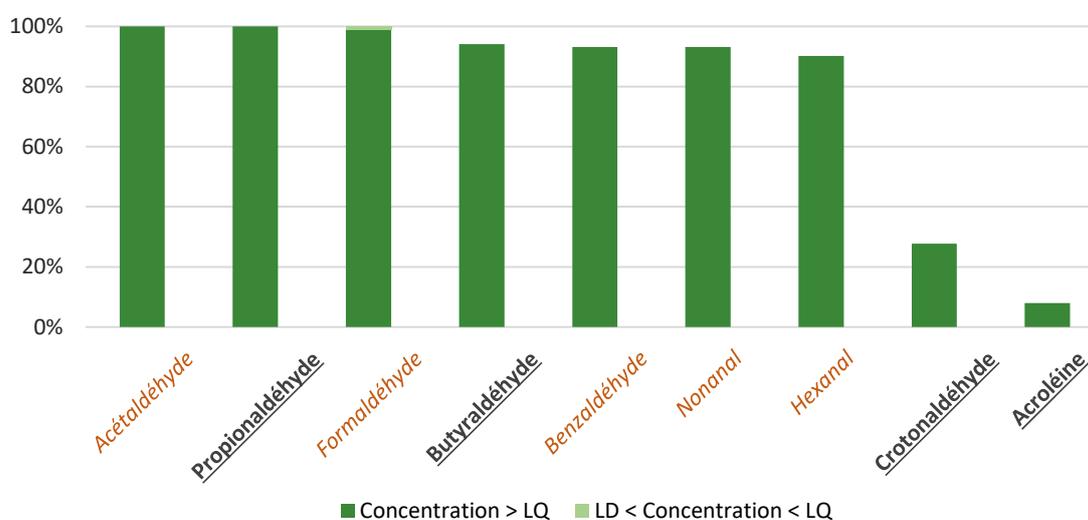
## 5 QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ET CONDITIONS HYGROTHERMIQUES DANS LES IMMEUBLES DE BUREAUX

### 5.1 Aldéhydes

Deux prélèvements ont été invalidés pour cause d'arrêt de la pompe.

#### 5.1.1 Détection et quantification

La Figure 21 présente les pourcentages d'espaces de bureaux dans lesquels chaque aldéhyde recherché est détecté ou quantifié. On observe que dès lors qu'ils sont détectés, tous les aldéhydes sont quantifiés.



Les composés en **gras souligné** sont des aldéhydes non mesurés dans la campagne nationale « Bureaux » de l'OQAI.

Figure 21. Fréquences de quantification des aldéhydes dans l'air des espaces de bureaux enquêtés

#### 5.1.2 Distribution des concentrations

Tableau 6. Distributions des concentrations en aldéhydes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans l'air des espaces de bureaux enquêtés

	Effectif	> LD	> LQ	P5	P25	Médiane	P75	P95	Moyenne	ET
<i>Acétaldéhyde</i>	101	100%	100%	1,9	3,3	4,6	6,5	9,8	5,2	2,9
<b>Acroléine</b>	101	8%	8%	<LD	<LD	<LD	<LD	4,7	0,4	1,6
<i>Benzaldéhyde</i>	102	93%	93%	<LD	0,6	1,3	3,1	6,3	2,3	2,7
<b>Butyraldéhyde</b>	101	94%	94%	<LD	0,4	0,6	0,8	2,0	0,7	0,6
<b>Crotonaldéhyde</b>	101	28%	28%	<LD	<LD	<LD	0,4	1,0	0,2	0,4
<i>Formaldéhyde</i>	101	100%	99%	4,7	7,4	9,5	14,6	34,9	13,1	9,4
<i>Hexanal</i>	102	90%	90%	<LD	0,3	0,6	1,7	3,8	1,1	1,2
<i>Nonanal</i>	102	93%	93%	<LD	0,7	1,4	2,7	7,7	2,3	2,5
<b>Propionaldéhyde</b>	101	100%	100%	10,3	20,5	30,5	40,8	52,0	30,9	13,6

Les polluants en **gras souligné** sont des aldéhydes non mesurés dans la campagne nationale « Bureaux » de l'OQAI.

L'aldéhyde présent en concentrations les plus élevées est le propionaldéhyde. Il n'a pas été mesuré dans la campagne « bureaux » de l'OQAI et donc ne dispose pas d'éléments de comparaison à l'échelle nationale. Il a été mesuré dans l'air intérieur des bureaux lors du projet européen OFFICAIR (2011-2014) qui visait à documenter la qualité de l'air et le confort dans les bureaux neufs ou récemment rénovés de huit pays européens. Les mesures avaient été réalisées au moyen de tubes passifs exposés du lundi matin au vendredi après-midi ; aussi, les concentrations ne sont pas strictement comparables. La médiane des concentrations mesurées était égale à 2,4 µg/m<sup>3</sup> (Mandin et al., 2017).

### 5.1.3 Positionnement par rapport aux valeurs guides de qualité de l'air intérieur et concentrations mesurées dans la campagne « Bureaux » de l'OQAI

Le Tableau 7 présente le positionnement des concentrations mesurées par rapport aux valeurs guides de qualité de l'air intérieur, pour les différentes pièces étudiées d'une part, et à l'échelle des bâtiments d'autre part. On considère dans ce cas qu'il y a dépassement dès lors qu'une des pièces instrumentées dans le bâtiment présente un dépassement.

Tableau 7. Concentrations en aldéhydes (µg/m<sup>3</sup>) dépassant les valeurs de référence

	Valeur de référence (valeur réglementaire ou valeur guide indicative)	Espaces de bureaux dépassant la valeur de référence	Immeubles de bureaux où au moins un espace de bureau dépasse la valeur de référence
<b>Acétaldéhyde</b>	160 µg/m <sup>3</sup> (2)	0	0
<b>Benzaldéhyde</b>	20 µg/m <sup>3</sup> (3)	0	0
<b>Formaldéhyde</b>	30 µg/m <sup>3</sup> (1)	10 (10%)	9 (30%)
<b>Hexanal</b>	100 µg/m <sup>3</sup> (3)	0	0
<b>Nonanal</b>	100 µg/m <sup>3</sup> (3)	0	0

(1) Valeur réglementaire depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2015 ; (2) Valeurs guides proposées par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) ; (3) Valeurs allemandes de l'Umweltbundesamt

La valeur d'alerte de 100 µg/m<sup>3</sup> n'a été dépassée dans aucun des bureaux instrumentés.

En comparaison de la campagne nationale « bureaux » (CNB) de l'OQAI, il apparaît que les médianes des concentrations intérieures en aldéhydes mesurées dans le cadre du projet POEME sont inférieures.

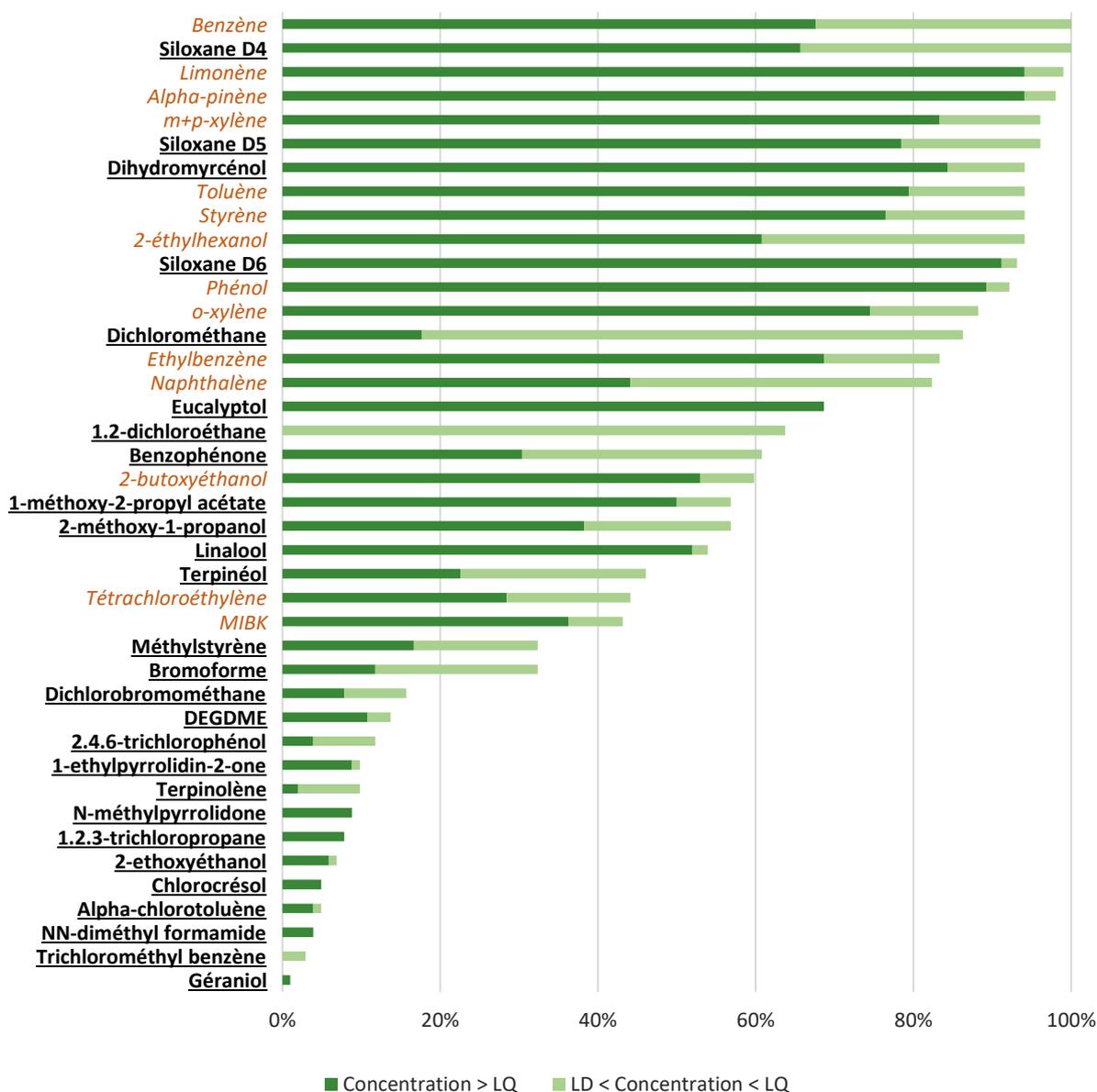
Tableau 8. Comparaison des concentrations en aldéhydes (µg/m<sup>3</sup>) avec les résultats de la campagne bureaux de l'OQAI (CNB)

	Effectif		% > LQ		Médiane (µg/m <sup>3</sup> )	
	POEME	CNB	POEME	CNB	POEME	CNB
<b>Acétaldéhyde</b>	101	604	100%	99%	4,6	5,3
<b>Benzaldéhyde</b>	102	612	93%	88%	1,3	4,3
<b>Formaldéhyde</b>	101	604	99%	98%	9,5	13,6
<b>Hexanal</b>	102	593	90%	68%	0,6	2,9
<b>Nonanal</b>	102	594	93%	92%	1,4	7,5

## 5.2 Composés organiques volatils (COV)

### 5.2.1 Détection et quantification

Les fréquences de détection et de quantification et les distributions des concentrations des COV dans l'air des espaces de bureaux sont présentées dans la Figure 22 et le Tableau 9.



Les polluants en **gras souligné** sont des COV non mesurés dans la campagne nationale « Bureaux » de l'OQAI.

Figure 22. Fréquences de détection et de quantification des COV dans l'air des espaces de bureaux enquêtés

**15 COV ne sont jamais détectés** : 1-bromopropane, 1,1,2,2-tétrachloroéthane, 1,2-dichloropropane, 1,3,5,7-cyclooctatétraène, 2 éthoxy éthyl acétate, N-méthylformamide, N,N-diméthylacétamide, bornéol, catéchol, crésol, cyclopropylbenzène, methoxyéthanol, nérol, sorbaldéhyde et vinyl-cyclohexène. Tous sont des substances présentant des dangers pour la santé mais pour lesquelles peu ou pas d'informations sur les concentrations dans l'air intérieur n'étaient disponibles à ce jour.

Parmi les 27 COV « émergents » détectés, 16 le sont dans moins de la moitié des bureaux et 11 dans plus de la moitié. Parmi ces 11 COV, on note les 3 siloxanes et 3 terpènes : dihydromyrcénol, eucalyptol et linalool.

De plus, il convient de noter que deux composés chlorés sont détectés dans l'air des bureaux alors qu'ils sont classés cancérigènes probables (1B) chez l'Homme par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). Le 1,2,3-trichloropropane est détecté dans 8 % des espaces de bureaux étudiés ; il est également classé reprotoxique probable selon la réglementation européenne<sup>3</sup>. Le dichlorométhane est détecté dans 86 % des espaces de bureaux ; il est classé cancérigène possible chez l'Homme et suspecté d'être perturbateur endocrinien selon la réglementation européenne<sup>4</sup>. Ces deux composés chlorés font partie de la liste des 21 substances que l'Anses a retenu prioritaires dans le cadre d'un étiquetage des meubles (Anses, 2015). De plus, l'Agence européenne des substances chimiques (ECHA) récence d'autres usages dans les adhésifs ou les désinfectants, par exemple, pour le dichlorométhane<sup>4</sup>.

### 5.2.2 Distribution des concentrations

Les distributions des concentrations sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9. Distributions des concentrations des 41 COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) détectés dans l'air des espaces de bureaux enquêtés

	Effectif	> LD	> LQ	P5	P25	Médiane	P75	P95	Moyenne	ET
<b>1,2,3-trichloropropane</b>	102	8%	8%	<LD	<LD	<LD	<LD	0,56	0,07	0,27
<b>1,2-dichloroéthane</b>	102	64%	0%	<LD	<LD	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
<b>1-éthylpyrrolidin-2-one</b>	102	10%	9%	<LD	<LD	<LD	<LD	0,09	0,03	0,08
<b>1-méthoxy-2-propyl acétate</b>	102	57%	50%	<LD	<LD	0,07	0,30	0,90	0,27	0,59
<b>2,4,6-trichlorophénol</b>	102	12%	4%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	nc	nc
<i>2-butoxyéthanol</i>	102	60%	53%	<LD	<LD	0,06	0,27	1,2	0,25	0,61
<b>2-éthoxyéthanol</b>	102	7%	6%	<LD	<LD	<LD	<LD	0,05	0,02	0,09
<i>2-éthylhexanol</i>	102	94%	61%	<LD	<LQ	0,15	0,50	4,2	0,97	2,88
<b>2-méthoxy-1-propanol</b>	102	57%	38%	<LD	<LD	<LQ	0,14	1,0	0,32	1,25
<b>Alpha-chlorotoluène</b>	102	5%	4%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	nc	nc
<i>Alpha-pinène</i>	102	98%	94%	<LQ	0,50	1,5	2,99	15	4,0	8,50
<i>Benzène</i>	102	100%	68%	<LQ	<LQ	0,63	1,5	3,8	1,1	1,4
<b>Benzophénone</b>	102	61%	30%	<LD	<LD	<LQ	0,06	0,26	0,06	0,10
<b>Bromoforme</b>	102	32%	12%	<LD	<LD	<LD	<LQ	0,51	0,08	0,29
<b>Chlorocrésol</b>	102	5%	5%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	nc	nc
<b>DEGDME</b>	102	14%	11%	<LD	<LD	<LD	<LD	0,74	0,57	3,61
<b>Dichlorobromométhane</b>	102	16%	8%	<LD	<LD	<LD	<LD	1,9	0,37	1,48
<b>Dichlorométhane</b>	102	86%	18%	<LD	<LQ	<LQ	<LQ	4,7	0,62	2,04
<b>Dihydromyrcénol</b>	102	94%	84%	<LD	0,08	0,22	0,48	1,1	0,35	0,40

<sup>3</sup> <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.002.261>

<sup>4</sup> <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.000.763>

	Effectif	> LD	> LQ	P5	P25	Médiane	P75	P95	Moyenne	ET
<i>Ethylbenzène</i>	102	83%	69%	<LD	<LQ	0,24	0,63	1,8	0,45	0,56
<b><u>Eucalyptol</u></b>	102	69%	69%	<LD	<LD	0,23	0,54	1,8	0,70	2,19
<b><u>Géraniol</u></b>	102	1%	1%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	nc	nc
<i>Limonène</i>	102	99%	94%	<LQ	0,86	2,4	6,15	40	15	64
<b><u>Linalool</u></b>	102	54%	52%	<LD	<LD	0,05	0,24	0,83	0,26	0,85
<b><u>Méthylstyrène</u></b>	102	32%	17%	<LD	<LD	<LD	<LQ	0,11	0,02	0,04
<i>MIBK</i>	102	43%	36%	<LD	<LD	<LD	0,13	0,60	0,28	1,75
<i>m,p-xylènes</i>	102	100%	100%	0,04	0,37	0,87	1,62	5,6	1,38	1,62
<i>Naphtalène</i>	102	82%	44%	<LD	<LQ	<LQ	0,09	0,20	0,07	0,11
<b><u>N-méthylpyrrolidone</u></b>	102	9%	9%	<LD	<LD	<LD	<LD	0,16	0,03	0,05
<b><u>N,N-diméthyl formamide</u></b>	102	4%	4%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	nc	nc
<i>o-xylène</i>	102	88%	75%	<LD	<LQ	0,35	0,64	2,0	0,54	0,66
<i>Phénol</i>	102	92%	89%	<LD	0,26	0,48	0,83	1,6	0,60	0,52
<b><u>Siloxane D4</u></b>	102	100%	66%	<LQ	<LQ	0,16	0,54	1,6	0,43	0,64
<b><u>Siloxane D5</u></b>	102	96%	78%	<LQ	0,07	1,1	3,4	24	5,4	15
<b><u>Siloxane D6</u></b>	102	93%	91%	<LD	0,18	0,51	1,12	3,5	1,14	2,10
<i>Styrène</i>	102	94%	76%	<LD	0,04	0,12	0,22	0,91	0,32	0,97
<b><u>Terpinéol</u></b>	102	46%	23%	<LD	<LD	<LD	<LQ	0,31	0,11	0,58
<b><u>Terpinolène</u></b>	102	10%	2%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LQ	nc	nc
<i>Tétrachloroéthylène</i>	102	44%	28%	<LD	<LD	<LD	0,05	1,1	0,14	0,47
<i>Toluène</i>	102	94%	79%	<LD	0,21	0,83	2,12	4,2	1,52	2,12
<b><u>Trichlorométhyl benzène</u></b>	102	3%	0%	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	nc	nc

Les polluants en **gras souligné** sont des COV non mesurés dans la campagne nationale « Bureaux » de l'OQAI.

Les percentiles 95 surlignés en saumon soulignent les valeurs les plus élevées.

nc : Les moyennes et écarts-types sont affichés à partir de 5 % de valeurs supérieures à la LQ.

Les concentrations en COV sont globalement faibles, la médiane la plus élevée étant observée pour le limonène (2,4 µg/m<sup>3</sup>). Les concentrations les plus élevées sont observées pour les terpènes, notamment le limonène et l'α-pinène, et les siloxanes. Les concentrations élevées en terpènes dans l'air intérieur sont souvent observées depuis quelques années, en lien notamment avec l'utilisation de produits de nettoyage parfumés et/ou de parfums d'ambiance. Le bois est également associé à la présence de terpènes (Derbez et al., 2018). De même, des concentrations en siloxanes du même ordre de grandeur que celles mesurées ici sont rapportées depuis peu dans les lieux de vie (Tran et al., 2019). Les siloxanes cycliques (D3 à D6) sont présents dans les produits d'hygiène et les cosmétiques (après-shampoings et shampoings, déodorants, crèmes solaires, fonds de teint). Enfin, on note des concentrations ponctuellement élevées pour le dichlorométhane ; la concentration maximale mesurée est égale à 12 µg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.3 Positionnement par rapport aux valeurs de référence de qualité de l'air intérieur et concentrations mesurées dans la campagne « Bureaux » de l'OQAI

Le Tableau 10 présente le positionnement des concentrations mesurées par rapport aux valeurs guides de qualité de l'air intérieur, pour les différentes pièces étudiées d'une part, et à l'échelle des bâtiments d'autre part. On considère dans ce cas qu'il y a dépassement dès lors qu'une des pièces instrumentées dans le bâtiment présente un dépassement.

La valeur réglementaire de qualité de l'air intérieur pour le benzène ( $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est dépassée dans 9 immeubles, sans pour autant dépasser la valeur d'alerte ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) qui nécessiterait une action immédiate. Il est probable que ces concentrations intérieures élevées soient liées à des concentrations élevées dans l'air extérieur, comme souvent observé dans les bâtiments de bureaux, en l'absence de sources de combustion intérieures (émettrices de benzène). L'analyse des typologies de pollution intérieure présentée ci-après (chapitre 7) va en ce sens. Néanmoins, en l'absence de mesures réalisées en extérieur, cela ne peut être totalement confirmé.

Tableau 10. Concentrations en COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dépassant les valeurs de référence

	Valeur de référence (valeur réglementaire ou valeur guide indicative)	Espaces de bureaux dépassant la valeur de référence	Immeubles de bureaux où au moins un espace de bureau dépasse la valeur de référence
<b>2-butoxyéthanol</b>	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5)	0	0
<b>2-éthylhexanol</b>	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5)	0	0
<b>Alpha-pinène</b>	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5)	0	0
<b>Benzène</b>	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2)	15 (15%)	9 (30%)
<b>Ethylbenzène</b>	1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1)	0	0
<b>Limonène</b>	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5)	1 (1%)	1 (3%)
<b>MIBK</b>	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5)	0	0
<b>Naphtalène</b>	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1)	0	0
<b>o-xylène + m/p-xylènes</b>	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3)	0	0
<b>Phénol</b>	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5)	0	0
<b>Styrène</b>	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3)	0	0
<b>Tétrachloroéthylène</b>	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4)	0	0
<b>Toluène</b>	20 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1)	0	0

(1) Valeurs guides proposées par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) ; (2) Valeur réglementaire depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2016 ; (3) Valeurs guides proposées dans le cadre du projet européen INDEX en 2007 ; (4) Valeur guide proposée par le Haut Conseil de la santé publique ; (5) Valeurs allemandes de l'Umweltbundesamt

Aucune des valeurs d’alerte qui nécessiterait une action immédiate en cas de dépassement n’est atteinte (Tableau 11).

Tableau 11. Concentrations en COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dépassant les valeurs d’alerte

	Valeur d’alerte	Espaces de bureaux dépassant la valeur d’alerte	Immeubles de bureaux où au moins un espace de bureau dépasse la valeur d’alerte
<b>Benzène</b>	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0
<b>Tétrachloroéthylène</b>	1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0	0

Il apparaît que les médianes des concentrations intérieures en COV mesurées dans le cadre du projet POEME sont inférieures à celles mesurées dans la campagne nationale « bureaux » de l’OQAI. Il est complexe de fournir une explication à ces différences dans la mesure où les deux campagnes ne couvrent ni la même zone géographique (aucun immeuble en Nouvelle-Aquitaine dans la CNB), ni la même période (mesures réalisées entre 2013 et 2017 pour la CNB). Une des explications possibles pourrait être que les limites de quantification sont plus performantes (plus faibles) dans le cadre du projet POEME, décalant en conséquence les médianes vers des valeurs plus faibles.

Tableau 12. Comparaison des concentrations en COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) avec les résultats de la campagne bureaux de l’OQAI (CNB)

	Effectif		% > LQ		Médiane ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	POEME	CNB	POEME	CNB	POEME	CNB
<b>2-butoxyéthanol</b>	102	569	53%	68%	0,06	1,7
<b>2-éthylhexanol</b>	102	589	61%	82%	0,15	4,1
<b>Alpha-pinène</b>	102	570	94%	60%	1,5	1,2
<b>Benzène</b>	102	582	68%	59%	0,63	1,2
<b>Ethylbenzène</b>	102	571	69%	61%	0,24	1,2
<b>Limonène</b>	102	592	94%	79%	2,4	2,9
<b>m/p-xylènes</b>	102	518	100%	90%	0,4	3,7
<b>MIBK</b>	102	561	36%	15%	<LD	< LQ
<b>Naphtalène</b>	102	563	44%	8%	<LQ	< LQ
<b>o-xylène</b>	102	574	75%	68%	0,35	1,4
<b>Phénol</b>	102	592	89%	88%	0,48	2,9
<b>Styrène</b>	102	559	76%	27%	0,12	< LQ
<b>Tétrachloroéthylène</b>	102	562	28%	21%	<LD	< LQ
<b>Toluène</b>	102	605	79%	91%	0,83	4,0

### 5.3 Composés organiques semi-volatils (COSV)

Les fréquences de détection et de quantification et les distributions des concentrations des COSV dans l'air des espaces de bureaux sont présentées dans la Figure 23 et le Tableau 13.

#### 5.3.1 Détection et quantification

**Sur les 46 COSV recherchés, 27 sont quantifiés au moins une fois et 11 le sont dans au moins 50 % des espaces de bureaux.**

Trois des six **phthalates** recherchés (DBP, DiBP, DEP) sont quantifiés dans plus de 85 % des espaces de bureaux. Le DiNP et le DEHP sont détectés dans 17 % des espaces de bureaux, le BBP dans 7 %.

Les deux **muscs synthétiques** polycycliques (galaxolide et tonalide) sont présents dans l'air de 100 % des espaces de bureaux.

Cinq des sept **HAP** recherchés (le fluorène, le phénanthrène, le pyrène, le fluoranthène, l'acénaphène) sont quantifiés dans l'air de plus de 90 % des espaces de bureaux. Au contraire, l'anthracène et le benzo[a]pyrène sont détectés dans l'air de moins de 10 % des espaces de bureaux.

Parmi les dix pesticides recherchés, seul **le lindane** est quantifié dans l'air d'au moins la moitié des espaces de bureaux (73 %). Son isomère, l'alpha-hexachlorohexane est quantifié dans l'air de 40 % des espaces de bureaux. Parmi les autres pesticides quantifiés en moindre mesure, on trouve un pesticide organophosphoré, le chlorpyrifos-ethyl (3 %), ainsi que trois pesticides organochlorés, le 4,4'-DDE (8 %), le dieldrine (8 %) et le 4,4'-DDT (3 %). Tous les autres pesticides organochlorés et organophosphorés ne sont jamais quantifiés.

Parmi les neuf **PCB** analysés, seuls quatre sont quantifiés dans l'air des espaces de bureaux. Il s'agit des composés les plus légers, PCB 28, PCB 31, PCB 52 et PCB 101.

Enfin, les pyréthriinoïdes (cyfluthrine, cyperméthrine, deltaméthrine, perméthrine, tétraméthrine) et les retardateurs de flamme bromés ou polybromodiphényléthers (PBDE) ne sont jamais quantifiés dans l'air des espaces de bureaux.

**Les 19 COSV suivants ne sont jamais quantifiés :**

- aldrine, diazinon, dichlorvos et alpha-endosulfan ;
- cyfluthrine, cyperméthrine, deltaméthrine, perméthrine et tetraméthrine ;
- BDE 47, BDE 85, BDE 99, BDE 100 et BDE 153 ;
- PCB 105, PCB 118, PCB 138, PCB 153 et PCB 180.

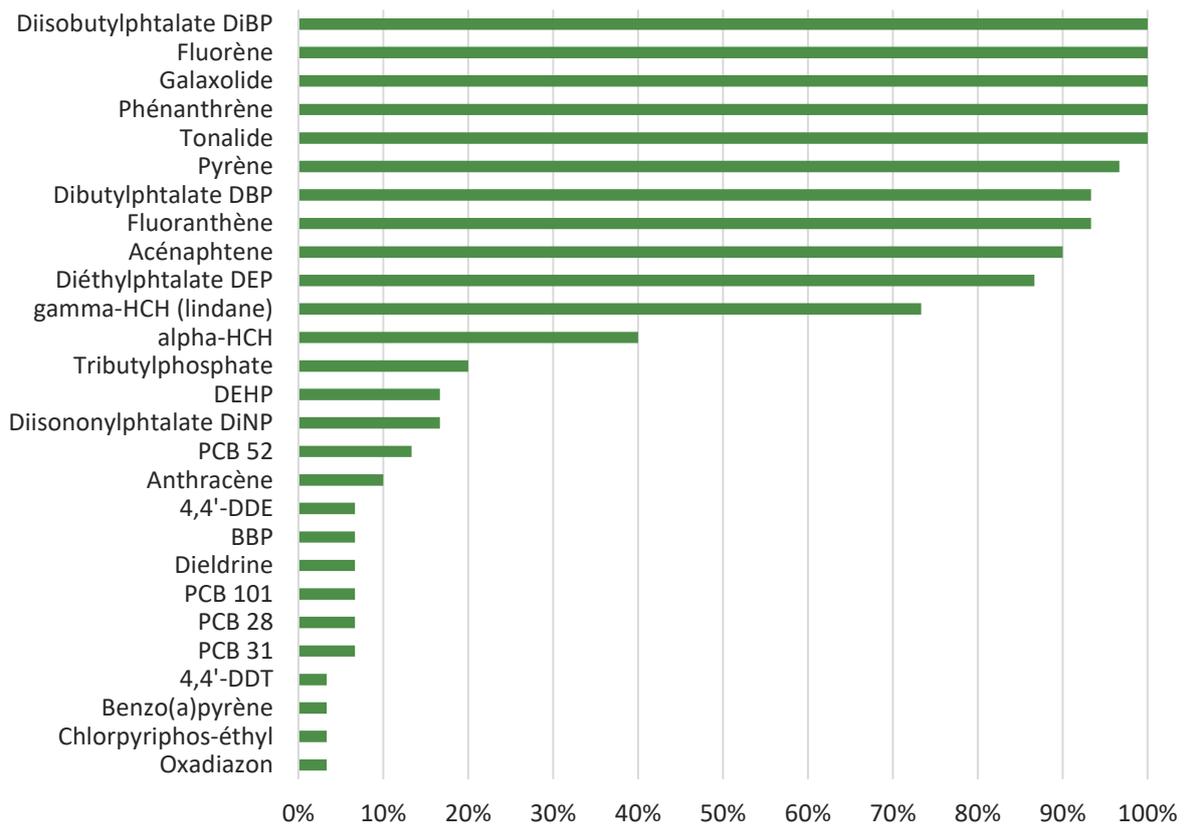


Figure 23. Fréquences de quantification des 27 COSV quantifiés dans l'air des espaces de bureaux enquêtés (n = 30)

### 5.3.2 Distribution des concentrations

Les distributions des concentrations en COSV quantifiés dans les espaces de bureaux sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13. Distributions des concentrations en COSV (ng/m<sup>3</sup>) quantifiés dans l'air des espaces de bureaux enquêtés (n = 30)

	Effectif	% > LQ	P10	P25	Médiane	P75	P90	Moyenne	ET
<b>Pesticides organochlorés</b>									
Dieldrine	30	7%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
4,4'-DDE	30	7%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
4,4'-DDT	30	3%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
alpha-HCH	30	40%	<LQ	<LQ	<LQ	0,1	0,2	0,1	0,1
gamma-HCH (lindane)	30	73%	<LQ	<LQ	0,4	1,0	1,5	0,7	0,7
<b>Pesticides organophosphorés</b>									
Chlorpyriphos-éthyl	30	3%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
<b>Oxadiazolones</b>									
Oxadiazon	30	3%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
<b>Ester phosphorique</b>									
Tributylphosphate	30	20%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	5,5	4,1	7,0
<b>HAP</b>									
Acénaphène	30	90%	0,2	0,8	1,2	1,6	2,0	1,3	1,0
Anthracène	30	10%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,5	0,3	0,2
Benzo[a]pyrène	30	3%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
Fluoranthène	30	93%	0,3	0,5	0,6	0,9	1,9	0,9	0,8
Fluorène	30	100%	1,9	3,8	5,0	6,1	9,5	5,4	3,2
Phénanthrène	30	100%	4,2	4,9	6,4	8,3	13,5	7,6	4,4
Pyrène	30	97%	0,3	0,3	0,5	0,7	0,9	0,5	0,3
<b>Muscs</b>									
Galaxolide	30	100%	23	54	92	180	250	113	87
Tonalide	30	100%	6	9	16	28	38	20	15
<b>Phtalates</b>									
BBP	30	7%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
DBP	30	93%	25	34	77	120	185	86	60
DEHP	30	17%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	36	19	18
DEP	30	87%	<LQ	110	170	230	330	173	102
DiBP	30	100%	87	150	285	450	975	651	1482
DiNP	30	17%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	47	27	61
<b>Polychlorobiphényles</b>									
PCB 28	30	7%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
PCB 31	30	7%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc
PCB 52	30	13%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,2	0,1	0,1
PCB 101	30	7%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	nc	nc

nc : Les moyennes et écarts-types sont affichés à partir de 10 % de valeurs supérieures à la LQ.

### 5.3.3 Positionnement par rapport aux autres campagnes de qualité d'air intérieur

Les COSV n'ont pas été mesurés dans le cadre de la campagne nationale « Bureaux » de l'OQAI. Il est proposé de comparer les concentrations mesurées dans le cadre de POEME à celles mesurées respectivement dans la campagne nationale « écoles » de l'OQAI (CNE, 2013-2017) et de la campagne nationale « Logements » de l'OQAI (CNL1, 2003-2005) (Tableau 14). Pour cette dernière, les données sont issues de la mesure de la concentration en phase particulaire (Mandin et al., 2016) et la modélisation de la concentration en phase gazeuse (Wei et al., 2017). Les pourcentages de concentrations détectées et quantifiées ne sont ainsi pas disponibles.

Tableau 14. Comparaison des concentrations en COSV mesurées dans le cadre de POEME (ng/m<sup>3</sup>) avec celles mesurées dans les écoles (2013-2017) et les logements (2003-2005)

	% > LQ		Médiane		
	POEME	Ecoles	POEME	Ecoles	Logements
<b>Pesticides organochlorés</b>					
Aldrine	0%	5%	<LQ	< LD	Non disponible
Dieldrine	7%	26%	<LQ	< LD	Non disponible
4,4'-DDE	7%	11%	<LQ	< LD	Non disponible
4,4'-DDT	3%	8%	<LQ	< LD	Non disponible
alpha-HCH	40%	94%	<LQ	0,2	Non disponible
gamma-HCH (lindane)	73%	100%	0,4	1,4	0,7
Alpha-endosulfan	0%	32%	<LQ	< LQ	Non disponible
<b>Pesticides organophosphorés</b>					
Chlorpyrifos-éthyl	3%	22%	<LQ	< LD	Non disponible
Diazinon	0%	33%	<LQ	< LQ	Non disponible
Dichlorvos	0%	3%	<LQ	< LD	Non disponible
<b>Pesticides pyréthrinoïdes</b>					
Cyfluthrine	0%	0%	<LQ	< LD	Non disponible
Cyperméthrine	0%	0%	<LQ	< LD	Non disponible
Deltaméthrine	0%	0%	<LQ	< LD	Non disponible
Perméthrine	0%	1%	<LQ	< LD	Non disponible
Tétraméthrine	0%	0%	<LQ	< LD	Non disponible
<b>Oxadiazolones</b>					
Oxadiazon	3%	0%	<LQ	< LD	Non disponible
<b>Ester phosphorique</b>					
Tributylphosphate	20%	78%	<LQ	3,8	Non disponible
<b>HAP</b>					
Acénaphène	90%	100%	1,2	1,9	Non disponible
Anthracène	10%	83%	<LQ	0,5	Non disponible
Benzo[a]pyrène	3%	30%	<LQ	< LD	Non disponible
Fluoranthène	93%	100%	0,6	0,7	1,9
Fluorène	100%	100%	5,0	7,5	17
Phénanthrène	100%	100%	6,4	11,6	7,9
Pyrène	97%	63%	0,5	< LD	0,7

	% > LQ		Médiane		
	POEME	Ecoles	POEME	Ecoles	Logements
<b>Muscs</b>					
Galaxolide	100%	100%	92	148	6,8
Tonalide	100%	100%	16	21,1	2,5
<b>Phtalates</b>					
BBP	7%	42%	<LQ	< LQ	Non disponible
DBP	93%	99%	77	168	36
DEHP	17%	6%	<LQ	< LD	Non disponible
DEP	87%	100%	170	286	343
DiBP	100%	100%	285	790	108
DiNP	17%	43%	<LQ	< LD	Non disponible
<b>Polychlorobiphényles</b>					
PCB 28	7%	86%	<LQ	0,1	Non disponible
PCB 31	7%	88%	<LQ	0,1	Non disponible
PCB 52	13%	97%	<LQ	0,2	Non disponible
PCB 101	7%	74%	<LQ	0,1	Non disponible
PCB 105	0%	8%	<LQ	< LD	Non disponible
PCB 118	0%	31%	<LQ	< LD	Non disponible
PCB 138	0%	20%	<LQ	< LD	Non disponible
PCB 153	0%	21%	<LQ	< LD	Non disponible
PCB 180	0%	3%	<LQ	< LD	Non disponible
<b>Retardateurs de flamme bromés</b>					
BDE 47	0%	4%	<LQ	< LD	Non disponible
BDE 85	0%	1%	<LQ	< LD	Non disponible
BDE 99	0%	2%	<LQ	< LD	Non disponible
BDE 100	0%	2%	<LQ	< LD	Non disponible
BDE 153	0%	0%	<LQ	< LD	Non disponible

**Effectifs** : POEME : n = 30 ; CNE : N = 63 813 (échantillon redressé à l'échelle du parc national d'écoles) ; CNL1 : N = 24 672 136 (échantillon redressé à l'échelle du parc national de résidences principales) ; POEME : n = 30

Cette comparaison montre que les concentrations dans les bureaux sont inférieures à celles mesurées dans les écoles et dans les logements, à l'exception des deux muscs de synthèse et de deux phtalates, le DBP et le DiBP, qui présentent des concentrations supérieures dans les bureaux en comparaison des logements. Les muscs étant présents dans les parfums et l'usage de produits parfumés étant en croissance, cela peut expliquer les concentrations plus élevées mesurées dans le cadre de POEME. S'agissant des phtalates, le DiBP est utilisé depuis quelques années en remplacement du DEHP, classé reprotoxique. Ceci explique en partie que les concentrations soient plus élevées pour des mesures réalisées récemment en comparaison de celles réalisées il y a plus de 15 ans.

Il n'existe pas de valeurs guides de qualité de l'air intérieur pour les COSV.

## 5.4 Particules fines (PM<sub>2,5</sub>)

Trois prélèvements ont été invalidés car le volume de prélèvement est inférieur à 5000 l (problèmes avec la pompe).

Tableau 15. Distributions des concentrations massiques en PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) dans l'air des espaces de bureaux enquêtés

Variable	Effectif	P10	P25	Médiane	P75	P90	Moyenne	Ecart-type
PM <sub>2,5</sub>	27	<LD	<LD	7,9	10,7	15,5	7,8	4,6

La concentration médiane est considérée fiable et apparaît beaucoup plus faible que la médiane des concentrations en PM<sub>2,5</sub> dans les écoles en France, égale à 18 µg/m<sup>3</sup> (campagne OQAI 2013-2017). Dans le cadre du projet OFFICAIR, les concentrations médianes mesurées dans les bureaux étaient respectivement égales à 9,2 µg/m<sup>3</sup> en été et 16 µg/m<sup>3</sup> en hiver (Mandin et al., 2017).

## 5.5 Métaux dans les particules en suspension

Les résultats sont présentés dans le Tableau 16 pour les 17 éléments traces recherchés.

Cinq prélèvements ont été invalidés, incluant les trois prélèvements invalidés parce que le volume de prélèvement était inférieur à 5000 L, et deux blancs contaminés.

Tableau 16. Distribution des concentrations en métaux (ng/m<sup>3</sup>) dans l'air des espaces de bureaux enquêtés (n = 25)

Variable	LQ	> LQ	P10	P25	Médiane	P75	P90	Moyenne	Ecart-type
Aluminium	42	84%	<LQ	45	64	91	113	76	55
Arsenic	0,31	36%	<LQ	<LQ	<LQ	0,4	2,7	0,9	2,2
Baryum	0,55	96%	0,7	0,9	1,2	2,1	9,0	3,6	7,6
Cadmium	0,31	20%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	4,4	0,8	1,5
Cobalt	0,31	68%	<LQ	<LQ	0,7	2,6	8,1	2,5	4,2
Chrome	0,31	96%	7,2	9,3	11,4	16,0	24,2	13,5	6,9
Cuivre	3,0	56%	<LQ	<LQ	3,7	8,5	11,1	5,7	5,6
Fer	30,9	40%	<LQ	<LQ	<LQ	44	75	35	29
Manganèse	0,31	100%	0,7	0,9	1,1	1,3	6,7	2,1	2,4
Molybdène	0,31	60%	<LQ	<LQ	0,4	0,7	2,5	1,3	2,9
Nickel	0,45	96%	0,9	1,2	1,6	1,9	6,0	2,2	2,0
Plomb	0,31	92%	0,6	0,8	1,2	2,3	8,2	2,5	2,8
Rubidium	0,31	20%	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	3,9	1,0	2,6
Antimoine	0,31	48%	<LQ	<LQ	<LQ	0,7	2,7	1,0	2,2
Titane	3,1	36%	<LQ	<LQ	<LQ	9,2	19,7	5,7	6,8
Vanadium	0,31	52%	<LQ	<LQ	0,3	0,7	2,0	0,6	0,6
Zinc	10	96%	26	39	56	281	344	160	154

Les stations de mesure des concentrations en métaux dans l'air ambiant d'ATMO Nouvelle Aquitaine n'étant pas situées à proximité des bâtiments étudiés, il n'a pas été possible de mettre en perspective les concentrations intérieures avec celles mesurées en extérieur.

Parmi les éléments traces réglementés, un espace de bureau dépasse la valeur cible de l'arsenic ( $6 \text{ ng/m}^3$ ) avec une valeur de  $10,5 \text{ ng/m}^3$  ; un autre espace de bureau dépasse la valeur cible du cadmium ( $5 \text{ ng/m}^3$ ) avec une concentration égale à  $5,4 \text{ ng/m}^3$ . Aucune concentration ne dépasse les valeurs réglementaires dans l'air ambiant pour le nickel (valeur cible fixée à  $20 \text{ ng/m}^3$ ) et le plomb (valeur limite fixée à  $500 \text{ ng/m}^3$ ).

Parmi les éléments traces non-réglementés, l'aluminium, le zinc, le chrome et, dans une moindre mesure le cuivre, présentent les concentrations moyennes les plus élevées. La source majeure atmosphérique de ces éléments est liée au trafic routier, à savoir les particules diffuses émises par les plaquettes et disques de frein ainsi que l'usure des pneus (incorporation de zinc et d'autres métaux minoritaires dans la fabrication de la gomme pneumatique). La prévalence de ces éléments parmi les éléments traces est donc possiblement liée au transfert dans le bâtiment de particules provenant de l'air extérieur. Pour le zinc et le chrome, les concentrations moyennes et médianes observées ( $> 50 \text{ ng/m}^3$  pour le zinc et  $> 10 \text{ ng/m}^3$  pour le chrome) sont supérieures aux concentrations ambiantes de fond urbain, en général  $< 20 \text{ ng/m}^3$  et  $< 5 \text{ ng/m}^3$  respectivement (moyennes annuelles à Talence, Grenoble, Nice entre 2013 et 2018). Cette observation soulève l'hypothèse de sources additionnelles pour ces deux éléments ou de leur accumulation particulière dans l'air intérieur. Concernant le chrome, les autres sources notables en France sont industrielles ou liées à des activités de recyclage. Les émissions de zinc sont multiples ; elles peuvent résulter des émissions du chauffage résidentiel (en association avec le rubidium, le plomb et le cadmium) mais le zinc est aussi utilisé dans de nombreux procédés industriels et entre dans la composition de produits manufacturés, comme les peintures blanches intégrant de l'oxyde de zinc ou des produits d'hygiène corporelle tels que crèmes, déodorants et shampoings antipelliculaires. Les concentrations en aluminium, chrome et zinc, bien que plus élevées que celles des autres éléments traces recherchés, sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans des bureaux non-fumeurs dans de précédentes études menées en Belgique (Horemans et Van Grieken, 2010) et en Grèce (Gemenetzis et al., 2006).

## 5.6 Potentiel oxydant

Les distributions du potentiel oxydant, normalisé par  $\text{m}^3$  d'air et par  $\mu\text{g}$  sont présentées dans le Tableau 17. Le potentiel oxydant normalisé par  $\text{m}^3$  d'air est associé à l'exposition des personnes à l'inhalation des molécules oxydantes, alors que le potentiel oxydant normalisé par  $\mu\text{g}$  correspond à la capacité oxydante d'un microgramme de particules.

Tableau 17. Distributions du potentiel oxydant dans l'air des espaces de bureaux (exprimé en  $\text{nmolAntioxydant}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\mu\text{g}^{-1}$  et en  $\text{nmolAntioxydant}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ) selon trois méthodes de calcul (DTT, AA, DCFH) ( $n = 25$ )

Variable	Effectif	P10	P25	Médiane	P75	P90	Moyenne	Ecart-type
<b>Normalisé par <math>\text{m}^3</math> d'air</b>								
DTT	25	0,211	0,398	0,569	0,982	1,353	0,687	0,422
AA	25	0,134	0,422	0,648	0,766	1,461	0,716	0,513

Variable	Effectif	P10	P25	Médiane	P75	P90	Moyenne	Ecart-type
DCFH	25	0,050	0,082	0,128	0,192	0,280	0,152	0,117
<b>Normalisé en µg</b>								
DTT	25	0,042	0,055	0,080	0,094	0,124	0,081	0,043
AA	25	0,013	0,053	0,069	0,123	0,148	0,095	0,080
DCFH	25	0,005	0,012	0,015	0,024	0,046	0,022	0,021

Les moyennes obtenues pour les différents tests suivent une distribution normale à l'exception du PO AA. Le potentiel oxydant n'étant pas une mesure réglementée à ce jour, il n'existe pas de valeur à ne pas dépasser. On sait néanmoins caractériser différents environnements extérieurs (ruraux, industriels, urbains) en fonction de leurs niveaux de potentiels oxydants. Les valeurs obtenues (n = 25) dans les bâtiments du projet POEME sont intermédiaires, entre des valeurs moyennes obtenues sur des sites de typologie rurale (n = 222) et un site de fond urbain de la façade atlantique (n = 120), que ce soit pour le PO/µg ou le PO/m<sup>3</sup>.

S'agissant de l'air intérieur, très peu d'études ont à ce jour mesuré le potentiel oxydant de particules prélevées dans des bâtiments. Dans le cadre du projet OFFICAIR, le PO a été caractérisé (Mihucz et al., 2015 ; Szigeti et al., 2016) dans différents bureaux de 4 pays européens : Hongrie, Italie, Grèce, et Pays-Bas. Les méthodes utilisées ne sont pas exactement comparables (certains tests sont différents) mais cette étude et les précédentes ont néanmoins un test en commun, mesuré avec l'acide ascorbique (AA). Pour ce test, on peut observer que les bureaux de Nouvelle Aquitaine ont des résultats parmi les plus faibles identifiés dans l'étude OFFICAIR, à savoir que les résultats obtenus dans la même gamme que les bureaux les faibles qui avaient identifiés aux Pays-Bas.

## 5.7 Dioxyde de carbone et taux de renouvellement d'air

Les distributions des concentrations moyennes et maximum en CO<sub>2</sub> sont présentées dans le Tableau 18. Seules les concentrations mesurées **pendant l'occupation des bureaux** (9h-17h) sont considérées.

Tableau 18. Distribution des concentrations moyennes et maximum en CO<sub>2</sub> (ppm) dans les espaces de bureaux enquêtés

	Effectif observé	P5	P25	Médiane	P75	P95	Moyenne	Ecart-type
CO <sub>2</sub> maximum (ppm)	30	643	806	928	1244	1537	1038	344
CO <sub>2</sub> moyen (ppm)	30	471	575	610	776	932	666	157

Le Tableau 19 présente la distribution du taux de renouvellement d'air calculé dans les espaces de bureaux où le CO<sub>2</sub> a été mesuré. Seuls 16 espaces de bureaux, correspondant à 16 immeubles de bureaux, respectent les critères de calcul du taux de renouvellement d'air définis dans le paragraphe 3.2. Un immeuble de bureaux a été retiré car il est équipé d'une centrale de traitement d'air avec recyclage partiel de l'air intérieur : une partie de l'air extrait dans la pièce est réinjecté dans le bâtiment, faussant ainsi le calcul du TRA si le renouvellement d'air n'est pas homogène dans tout le bâtiment (information non disponible).

La réglementation du travail impose un débit de ventilation de 25 m<sup>3</sup> par heure et par personne pour les bureaux. Le fait que les débits présentés dans le Tableau 19 soient en grande majorité inférieurs à cette valeur réglementaire interpelle. Cela signifie soit que le système de ventilation ne fonctionne pas correctement (défaut de conception, d'équilibrage ou de maintenance), soit que le nombre d'occupants est supérieur à ce qui avait été prévu au moment de la construction ou de la réhabilitation des bâtiments.

Tableau 19. Distribution du taux de renouvellement d'air dans les espaces de bureaux enquêtés

Variable	Effectif <sup>(1)</sup>	P25	Médiane	P75	Moyenne	Ecart-type
Taux de renouvellement d'air (h <sup>-1</sup> )	16	0,4	0,5	0,7	0,6	0,3
Débit d'air (m <sup>3</sup> par heure par personne)	13	6	14	16	13	9

(1) Seuls 16 espaces de bureaux respectent les critères de calcul du taux de renouvellement d'air. Pour 3 d'entre eux, le nombre d'occupants est manquant, ce qui ne permet pas le calcul du débit d'air par personne.

## 5.8 Température et humidité relative

Seules les valeurs mesurées **pendant l'occupation des bureaux** (9h-17h) sont considérées.

Les résultats sont présentés pour les pièces instrumentées pendant toute la semaine de mesure (Tableau 20) et pour celles instrumentées pendant une journée uniquement (Tableau 21).

Tableau 20. Distribution de la température (°C) et de l'humidité relative (%) en période d'occupation sur une semaine dans les espaces de bureaux enquêtés

	Effectif observé	P5	P25	Médiane	P75	P95	Moyenne	Ecart-type
Température min (°C)	30	16,2	18,2	19,2	21,0	22,2	19,4	1,9
Température max (°C)	30	22,4	23,2	24,4	25,2	27,5	24,5	1,7
Température moy (°C)	30	21,6	22,2	22,9	23,5	24,6	22,9	1,1
Humidité relative min (%)	30	23,9	28,0	32,5	36,0	46,0	32,8	6,9
Humidité relative max (%)	30	43,5	48,3	53,0	60,8	66,2	54,3	7,7
Humidité relative moy (%)	30	32,6	35,9	40,3	44,1	52,1	40,5	6,4

Tableau 21. Distribution de la température (°C) et de l'humidité relative (%) en période d'occupation sur une journée dans les espaces de bureaux enquêtés

	Effectif observé	P5	P25	Médiane	P75	P95	Moyenne	Ecart-type
Température min (°C)	83	11,0	16,3	17,8	20,1	22,0	17,8	3,0
Température max (°C)	83	21,7	23,1	24,0	25,1	26,8	24,1	1,5
Température moyenne (°C)	83	21,0	21,9	23,1	23,7	24,6	22,9	1,3
Humidité relative min (%)	83	25,0	32,0	36,0	39,0	52,9	36,8	8,2
Humidité relative max (%)	83	44,1	50,0	56,0	63,5	74,8	57,5	10,2
Humidité relative moyenne (%)	83	31,2	35,8	39,8	43,9	55,0	40,9	7,4

## 5.9 Variabilité spatiale de la qualité de l'air intérieur dans les immeubles de bureaux

Les coefficients de corrélation intra-classe pour les aldéhydes et COV quantifiés dans plus de 15 % des espaces instrumentés sont présentés dans le Tableau 22.

**S'agissant des aldéhydes**, les concentrations en butyraldéhyde et propionaldéhyde sont considérées homogènes au sein d'un même immeuble. Au contraire, les concentrations en benzaldéhyde sont considérées hétérogènes au sein d'un même immeuble. On ne peut pas conclure pour les autres aldéhydes. La recherche des sources de ces aldéhydes dans l'air intérieur ne permet pas d'expliquer ces observations.

**Pour les COV**, les concentrations sont considérées homogènes au sein d'un même immeuble pour les composés suivants : 2-éthylhexanol, benzophénone, éthylbenzène, m/p-xylènes, méthylstyrène, o-xylène et toluène. Elles sont considérées hétérogènes au sein d'un même immeuble pour les COV suivants : 1-méthoxy-2-propyl acétate, 2-butoxyéthanol, 2-méthoxy-1-propanol, benzène, dichlorométhane, dihydromyrcénol, eucalyptol, limonène, linalool, MIBK, naphtalène, phénol, siloxane D6 et terpinéol.

L'éthylbenzène, les xylènes et le toluène étant notamment liés aux émissions du trafic routier, il est attendu que les concentrations soient homogènes au sein des bâtiments. Le fait que les concentrations en benzène ne le soient pas est ainsi surprenant. Les COV qui présentent des concentrations non homogènes sont liées aux parfums (terpènes) et aux occupants (siloxanes), qui peuvent varier d'une pièce à l'autre.

Tableau 22. Coefficient de corrélation intra-classe des aldéhydes et COV

	Composé	N	Coefficient de Corrélation Intraclasse
Aldéhydes	Acétaldéhyde	101	46%
	Benzaldéhyde	102	<u>36%</u>
	Butyraldéhyde	101	<b>78%</b>
	Crotonaldéhyde	101	59%
	Formaldéhyde	101	57%
	Hexanal	102	42%
	Nonanal	102	55%
	Propionaldéhyde	101	<b>77%</b>
	1-méthoxy-2-propyl acétate	102	<u>7%</u>
	2-butoxyéthanol	102	<u>32%</u>
	2-éthylhexanol	102	<b>71%</b>
	2-méthoxy-1-propanol	102	<u>10%</u>
	Alpha-pinène	102	43%
	Benzène	102	<u>30%</u>
	Benzophénone	102	<b>61%</b>
	Dichlorométhane	102	<u>30%</u>
	Dihydromyrcénol	102	<u>33%</u>
	Ethylbenzène	102	<b>68%</b>
	Eucalyptol	102	<u>3%</u>
Limonène	102	<u>0%</u>	
Linalool	102	<u>5%</u>	

Composé	N	Coefficient de Corrélation Intraclasse
<b>m,p-xylènes</b>	102	<b>73%</b>
<b>Méthylisobutylcétone (MIBK)</b>	102	<u>3%</u>
<b>Méthylstyrène</b>	102	<b>76%</b>
<b>Naphtalène</b>	102	<u>38%</u>
<b>o-xylène</b>	102	<b>79%</b>
<b>Phénol</b>	102	<u>20%</u>
<b>Siloxane D4</b>	102	45%
<b>Siloxane D5</b>	102	54%
<b>Siloxane D6</b>	102	<u>3%</u>
<b>Styrène</b>	102	53%
<b>Terpinéol</b>	102	<u>0%</u>
<b>Tétrachloroéthylène</b>	102	58%
<b>Toluène</b>	102	<b>84%</b>

**Cellules en gras** : ICC > 60 %, les concentrations sont considérées homogènes au sein d'un même immeuble ; cellules surlignées et italiques : ICC < 40 %, les concentrations sont considérées hétérogènes au sein d'un même immeuble ; cellules blanches : ICC compris entre 40 % et 60 %, pas de conclusion.

## 6 ANALYSE DES CORRELATIONS ENTRE LES COMPOSES PRESENTS EN PHASE PARTICULAIRE ET LE POTENTIEL OXYDANT

Les coefficients de corrélation de Spearman entre les niveaux de potentiel oxydant et les concentrations en métaux, en particules PM<sub>2,5</sub> et en COSV ont été étudiées. Comparé au coefficient de corrélation de Pearson, le coefficient de corrélation de Spearman a pour avantage de détecter les liaisons non linéaires monotones. De plus, il est préféré au coefficient de Pearson en présence d'un échantillon de petite taille, comme dans le cas présent.

Chaque coefficient de corrélation est présenté avec sa p-valeur : si la p-valeur est inférieure à 0,05 on peut conclure que le coefficient est significativement différent de zéro au seuil de 5 %. Les corrélations avec les COV et aldéhydes n'ont pas pu être calculées dans la mesure où ces derniers n'ont pas systématiquement été mesurés dans la pièce où les particules étaient prélevées. De plus, les durées de prélèvement ne sont pas identiques : 4,5 jours pour le potentiel oxydant *versus* 6 heures pour les aldéhydes et COV. Ces différences spatio-temporelles induisent trop d'incertitudes pour que le calcul des corrélations puisse être considéré satisfaisant.

### 6.1 Corrélations entre les concentrations en métaux et en particules PM<sub>2,5</sub>

Les coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations en métaux et en particules PM<sub>2,5</sub> sont présentés dans le Tableau 23.

Tableau 23. Coefficients de corrélation de Spearman entre les métaux et les particules PM<sub>2,5</sub>

	Coefficient	P-valeur
Aluminium	0,03	0,870
Arsenic	-0,08	0,710
Baryum	0,29	0,157
Cadmium	0,21	0,351
Cobalt	0,29	0,163
Chrome	0,22	0,289
Cuivre	-0,18	0,377
<b>Fer</b>	<b>0,46</b>	<b>0,020*</b>
Manganèse	0,32	0,114
Molybdène	-0,03	0,875
Nickel	0,15	0,472
Plomb	0,29	0,163
Rubidium	0,27	0,197
Antimoine	0,22	0,289
Titane	0,17	0,412
Vanadium	0,28	0,174
Zinc	0,29	0,167

Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives au seuil de 5 %.

Seul le fer est corrélé aux concentrations en particules fines. Le fer est un élément ubiquitaire pouvant provenir de sources naturelles (érosion des sols et croûte terrestre) ou de sources anthropiques (combustion d'énergie fossile ou de biomasse). Cette faible corrélation entre les métaux et les concentrations en particules reflète possiblement que les métaux ne sont pas émis par les sources qui contribuent le plus à la concentration massique des particules.

## 6.2 Corrélations entre le potentiel oxydant et les concentrations en particules PM<sub>2,5</sub>

Les coefficients de corrélation de Spearman entre les niveaux de potentiel oxydant et les concentrations en particules PM<sub>2,5</sub> sont présentés dans le Tableau 24.

Tableau 24. Coefficients de Spearman entre les niveaux de potentiel oxydant et les particules PM<sub>2,5</sub>

	Coefficient	P-valeur
<b>PO DTT (m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,64</b>	<b>0,0006*</b>
PO AA (m <sup>3</sup> )	0,35	0,0901
PO DCFH (m <sup>3</sup> )	0,25	0,2258
PO DTT (µg)	-0,08	0,7043
PO AA (µg)	-0,28	0,1705
PO DCFH (µg)	-0,32	0,1134

Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives au seuil de 5 %.

Les résultats sont en accord avec la littérature sur le fait que le PO DTT/m<sup>3</sup> est associé aux concentrations en particules car il est sensible de façon équivalente à différentes sources de polluants et répond positivement aux polluants organiques et polluants métalliques (Charrier et al. 2012, Calas et al. 2017). Les PO AA/m<sup>3</sup> et DCFH/m<sup>3</sup> ne sont pas significativement corrélés avec les concentrations

en particules car ils sont plus dépendants de la composition chimique en étant sélectifs vis-à-vis de certains composés, notamment le PO AA, antioxydant majeur des poumons qui réagit préférentiellement avec les métaux (Calas et al. 2019). Les PO/ $\mu\text{g}$  de particules ne sont pas corrélés avec les concentrations intérieures en  $\text{PM}_{2,5}$  comme rapporté habituellement par la littérature pour l'air ambiant (Weber et al. 2018, Calas et al. 2019).

### 6.3 Corrélations entre le potentiel oxydant et les concentrations en métaux

Les coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations en métaux et les niveaux de potentiel oxydant sont présentés dans le Tableau 25.

Tableau 25. Coefficients de corrélation entre les concentrations en métaux et les niveaux de potentiel oxydant normalisé par  $\text{m}^3$  d'air

	PO DTT ( $\text{m}^{-3}$ )		PO AA ( $\text{m}^{-3}$ )		PO DCFH ( $\text{m}^{-3}$ )	
	Coefficient	P-valeur	Coefficient	P-valeur	Coefficient	P-valeur
Aluminium	0,08	0,7011	-0,18	0,3770	0,27	0,1944
Arsenic	0,08	0,6923	-0,18	0,3893	-0,15	0,4810
Baryum	<b>0,42</b>	<b>0,0386*</b>	0,00	0,9854	0,02	0,9186
Cadmium	0,05	0,8206	-0,15	0,5158	0,12	0,6074
Cobalt	<b>0,40</b>	<b>0,0453*</b>	0,20	0,3340	0,02	0,9070
Chrome	0,07	0,7395	0,20	0,3378	0,33	0,1107
Cuivre	0,29	0,1549	-0,02	0,9294	-0,12	0,5660
Fer	<b>0,52</b>	<b>0,0072*</b>	0,04	0,8437	0,07	0,7506
Manganèse	0,12	0,5726	-0,08	0,6902	0,19	0,3668
Molybdène	0,04	0,8379	0,08	0,7064	0,16	0,4479
Nickel	0,25	0,2286	-0,04	0,8666	0,38	0,0622
Plomb	<b>0,49</b>	<b>0,0124*</b>	0,00	0,9942	-0,08	0,7202
Rubidium	0,29	0,1558	-0,17	0,4183	-0,03	0,8877
Antimoine	<b>0,40</b>	<b>0,0499*</b>	-0,15	0,4694	-0,01	0,9782
Titane	0,31	0,1327	0,14	0,4988	0,05	0,8063
Vanadium	0,09	0,6725	-0,11	0,5876	0,20	0,3308
Zinc	<b>0,44</b>	<b>0,0277*</b>	0,19	0,3571	0,16	0,4427

Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives au seuil de 5 %.

Des associations significatives ont été retrouvées entre le PO DTT et les concentrations en baryum, cobalt, fer, plomb, antimoine et zinc. Tous ces éléments traces peuvent provenir d'émissions naturelles (érosion des sols) ou anthropiques. Le baryum, le fer, l'antimoine, le plomb, le cobalt et le zinc font partie des traceurs classiques associés aux émissions diffuses du trafic routier, à savoir les émissions des plaquettes et disques de frein (Ba, Fe, Sb, Zn, Pb), les débris de pneus (Zn) ou l'usure de certaines pièces du véhicule (Zn, Fe) (Penkala et al., 2018). Le cobalt, le zinc et le plomb peuvent avoir d'autres origines anthropiques (émissions industrielles par exemple).

Aucune association n'a été retrouvée entre le PO AA et PO DCFH et les concentrations en métaux, ce qui est inhabituel dans la littérature pour ces deux tests, mais peut être lié à la taille restreinte de l'échantillon et à des valeurs de PO considérées assez faibles.

## 6.4 Corrélations entre le potentiel oxydant et les concentrations en COSV

Les coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations en COSV et les niveaux de potentiel oxydant sont présentés dans le Tableau 26.

Tableau 26. Coefficients de corrélation entre les concentrations en COSV et les niveaux de potentiel oxydant normalisé en m<sup>3</sup>

	PO DTT (m <sup>3</sup> )		PO AA (m <sup>3</sup> )		PO DCFH (m <sup>3</sup> )	
	Coefficient	P-valeur	Coefficient	P-valeur	Coefficient	P-valeur
Acénaphène	0,2913	0,1577	<b>0,5688</b>	<b>0,0030*</b>	-0,2034	0,3296
Diéthylphthalate (DEP)	-0,1979	0,3430	-0,0625	0,7667	-0,1886	0,3665
Tributylphosphate	-0,1229	0,5584	-0,1482	0,4796	-0,1699	0,4169
Fluorène	0,2174	0,2966	<b>0,5367</b>	<b>0,0057*</b>	-0,1855	0,3748
alpha-HCH	0,2881	0,1626	0,2473	0,2333	-0,3925	0,0523
Galaxolide	-0,3195	0,1195	-0,0266	0,8997	-0,1505	0,4726
Tonalide	-0,3398	0,0965	-0,1497	0,4751	-0,1162	0,5801
gamma-HCH (lindane)	0,3207	0,1181	0,3520	0,0844	<b>-0,4657</b>	<b>0,0190*</b>
Diisobutylphthalate (DiBP)	0,0947	0,6526	0,1809	0,3869	<b>-0,4383</b>	<b>0,0284*</b>
Phénanthrène	0,3324	0,1045	<b>0,6313</b>	<b>0,0007*</b>	-0,3666	0,0715
Anthracène	0,3140	0,1264	0,2922	0,1564	<b>-0,4032</b>	<b>0,0456*</b>
PCB 31	0,3397	0,0967	0,3114	0,1297	-0,0849	0,6865
PCB 28	0,3397	0,0967	0,3114	0,1297	-0,0849	0,6865
Dibutylphthalate (DBP)	0,3226	0,1157	0,2834	0,1699	-0,3665	0,0715
PCB 52	0,3243	0,1137	0,2902	0,1594	<b>-0,4097</b>	<b>0,0420*</b>
Chlorpyriphos-éthyl	0,0000	1,0000	-0,0849	0,6865	0,2265	0,2764
PCB 101	0,1698	0,4170	0,0283	0,8932	-0,3397	0,0967
Oxadiazon	0,1982	0,3424	0,2831	0,1703	0,3397	0,0967
Fluoranthène	<b>0,4690</b>	<b>0,0180*</b>	<b>0,5668</b>	<b>0,0031*</b>	<b>-0,6241</b>	<b>0,0009*</b>
4,4'-DDE	0,1422	0,4978	0,2697	0,1924	-0,0654	0,7562
Pyrène	<b>0,5668</b>	<b>0,0031*</b>	<b>0,6561</b>	<b>0,0004*</b>	<b>-0,4482</b>	<b>0,0246*</b>
Dieldrine	0,3089	0,1330	-0,1929	0,3557	-0,0229	0,9136
BBP	0,0049	0,9814	-0,0964	0,6466	-0,3694	0,0692
4,4'-DDT	0,0849	0,6865	0,2548	0,2191	-0,1132	0,5900
DEHP	0,0627	0,7661	-0,0289	0,8909	-0,3470	0,0893
Diisononylphthalate (DiNP)	-0,0160	0,9396	0,0528	0,8020	0,1095	0,6023

Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives au seuil de 5 %.

Pour deux composés, le pyrène et le fluoranthène, les trois tests montrent des associations significatives. D'autres composés sont associés significativement aux niveaux de potentiel oxydant mais pour un seul test : acénaphène, fluorène, phénanthrène, anthracène, DiBP, lindane et PCB 52.

De manière générale, la famille des HAP dont sont issus le pyrène et le fluoranthène ne sont pas des composés redox-actifs et lorsqu'on teste le potentiel oxydant de composés individuels, il est nul (Calas et al. 2017). En revanche, les HAP dans l'atmosphère évoluent rapidement vers des formes dérivées à savoir les oxy-HAP (quinones), les méthyl-HAP, les nitro-HAP, les HAP soufrés, etc. Ces formes sont en général redox-actives et les quinones sont parmi les espèces les plus réactives vis-à-vis des tests de PO (Charrier et al. 2014, Sauvain et al. 2015, Calas et al. 2017, Calas et al. 2018).

Ainsi, les corrélations univoques des 3 tests avec le pyrène et le fluoranthène ne signifient pas un lien de causalité avec ces deux espèces. Elles ciblent plutôt des espèces redox-actives émises par la ou les sources associées à ces HAP ou issues de leur transformation dans l'atmosphère (quinones par exemple).

En l'absence de sources de combustion dans les espaces de bureaux, notamment depuis l'interdiction du tabagisme, la présence de HAP dans l'air intérieur est principalement liée aux concentrations extérieures.

Le fluoranthène est le HAP le plus largement émis dans l'atmosphère en France. Les sources anthropiques sont multiples. Les sources stationnaires, comme le chauffage résidentiel, les incinérateurs et les activités pétrolières et dérivés (production goudron) représentent environ 80 % des émissions. Les 20 % restants sont attribués aux sources mobiles (pots d'échappements des véhicules essence et diesel).

Le pyrène est associé en partie aux mêmes sources d'émission que le fluoranthène car il est présent dans les combustibles fossiles. Il est émis dans l'atmosphère lors de combustion incomplète de charbon ou produits pétroliers (essence, huiles, etc.). De même, il entre dans la fabrication du goudron (4 %, OMS IPCS, 1998), et est émis par l'incinération. La source supplémentaire d'émissions de pyrène par rapport au fluoranthène provient des aciéries et fonderies, procédés par ailleurs liés à l'aluminium et au fer.

Ainsi, ces associations significatives entre le PO et ces 2 HAP pourraient cibler des sources liées à l'usage de combustibles fossiles, sans possible identification précise.

## 7 CLASSIFICATION DES ESPACES DE BUREAUX EN FONCTION DU NIVEAU DE POLLUTION INTERIEURE EN COV ET ALDEHYDES

Une classification non-supervisée des espaces de bureaux a été réalisée pour créer des groupes d'espaces de bureaux en fonction des niveaux de pollution intérieure en COV et aldéhydes. Les autres polluants étudiés (PM<sub>2,5</sub>, COSV, métaux) ainsi que la température, l'humidité relative et le CO<sub>2</sub> n'ont pas pu être intégrés à cette analyse puisqu'ils ont été mesurés dans un sous-échantillon de 30 espaces de bureaux (nombre d'observations trop faible).

L'analyse est réalisée sur les espaces de bureaux pour lesquels il n'y a aucune donnée manquante. Les polluants quantifiés dans moins de 15 % des cas ont été retirés de l'analyse.

### 7.1 Analyse en composantes principales (ACP)

La première étape a consisté à utiliser une analyse en composantes principales afin d'identifier d'éventuels individus atypiques et synthétiser l'information. L'ACP a été réalisée sur les concentrations en aldéhydes et COV transformées en rang. Aucun espace de bureaux atypique n'a été identifié, c'est-à-dire qu'aucun espace de bureau ne se démarque par des concentrations contrastant grandement avec les autres concentrations mesurées.

Le critère du coude a été utilisé afin de choisir le nombre de composantes principales à retenir. La Figure 24 représente l'inertie expliquée par composante principale. On observe un décrochement (coude) suivi d'une décroissance régulière à partir de la septième composante principale, ce qui nous conduit à retenir les six premiers axes. La première composante permet d'expliquer 24,5 % de l'inertie totale tandis que la deuxième composante en explique 14 %. Au total, les 6 axes retenus permettent d'expliquer 66 % de l'inertie totale.

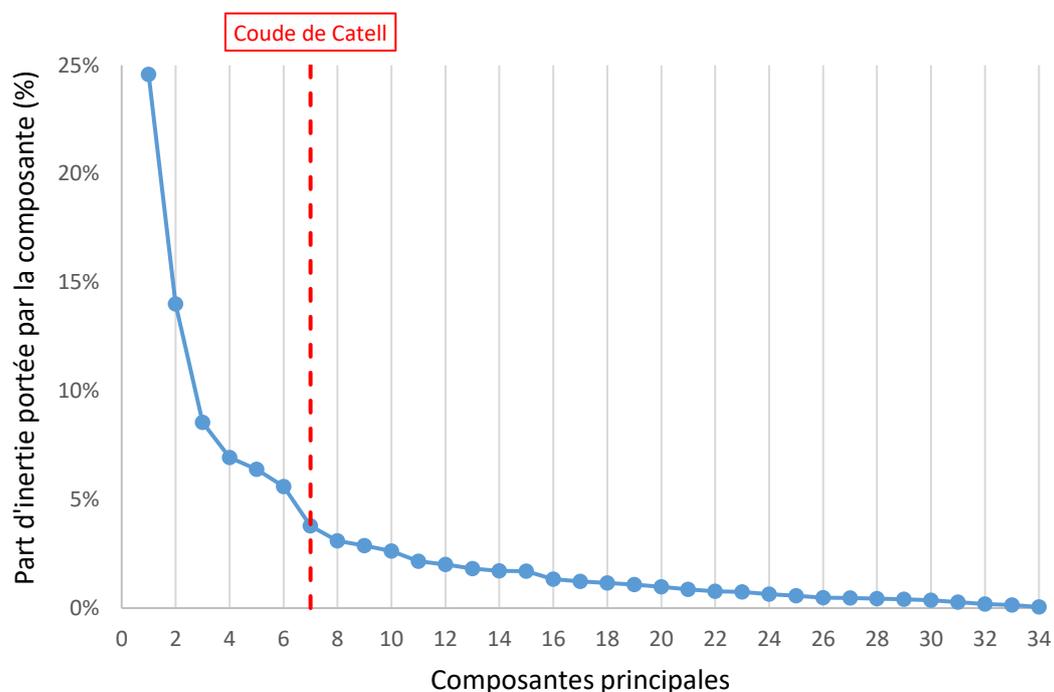


Figure 24. Part d'inertie expliquée par composante principale (%)

La Figure 25 représente les variables sur les axes des deux premières composantes principales. Ce graphique nous permet d'interpréter les axes en fonction du positionnement des variables. En effet, les variables contribuant le plus aux formations de chaque axe sont celles dont les coordonnées sur cet axe sont proches de 1. Pour repérer les contributions significatives, on utilise le tableau des vecteurs propres (Tableau 27). Les valeurs sont à comparer à la contribution moyenne, qui est ici de 17 % (=  $1/\sqrt{p}$  avec  $p = 34$  polluants inclus dans l'ACP).

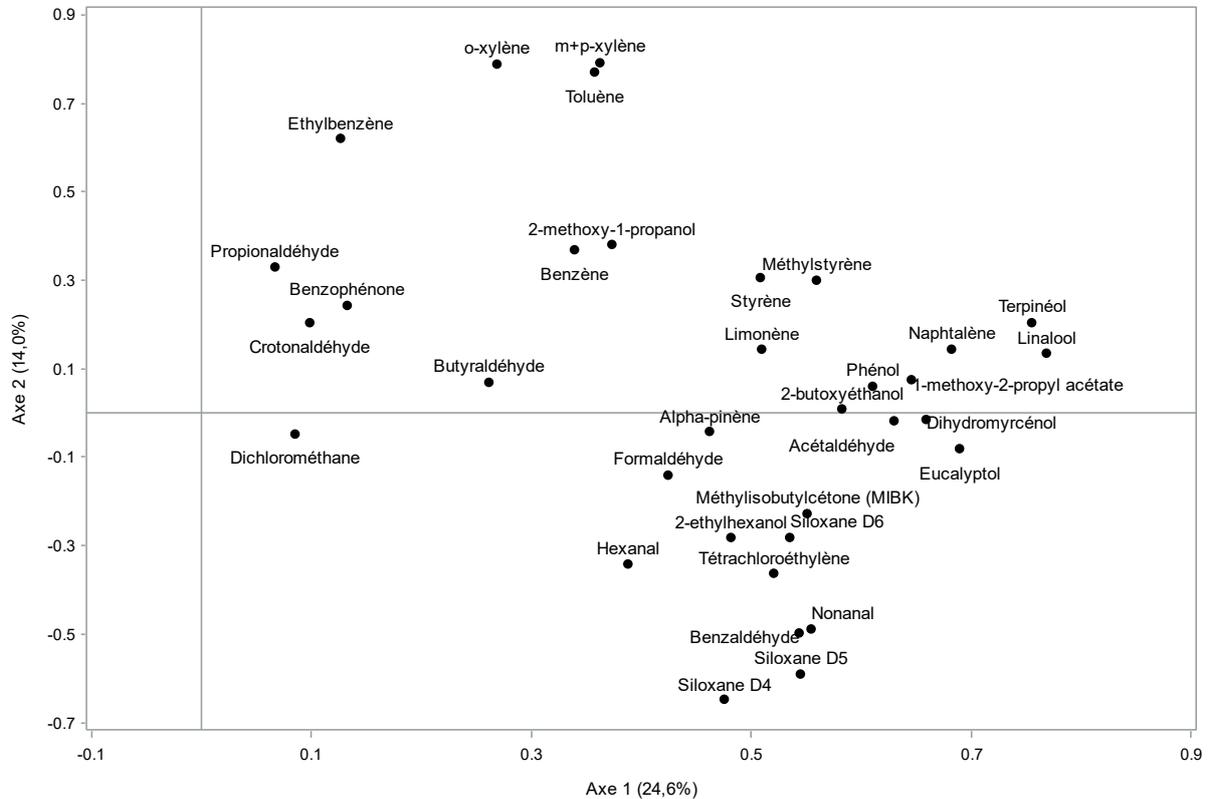


Figure 25. Représentation des variables sur les axes des deux premières composantes principales (39 % de l'inertie)

### Axe 1 :

Les polluants contribuant significativement à la première composante principale sont : l'acétaldéhyde, le benzaldéhyde, le nonanal, le 1-méthoxy-2-propyl acétate, le 2-butoxyéthanol, le dihydromyrcénol, l'eucalyptol, le limonène, le linalool, le MIBK, le méthyl-styrène, le naphtalène, le phénol, le siloxane D5, le siloxane D6, le styrène, le terpinéol et le tétrachloroéthylène.

Etant donné que les valeurs propres sont positives, les espaces de bureaux qui approchent 1 sur le premier axe (Figure 27) sont ceux avec les plus fortes concentrations de ces polluants.

### Axe 2 :

Les polluants contribuant significativement à la deuxième composante principale sont :

- Avec valeur propre positive : le 2-méthoxy-1-propanol, l'éthylbenzène, le m+p-xylène, l'o-xylène et le toluène. Les espaces de bureaux qui approchent 1 sur le deuxième axe (Figure 27) sont ceux avec les plus **fortes** concentrations sur ces polluants.
- Avec valeur propre négative : le benzaldéhyde, le nonanal, le siloxane D4 et le siloxane D5. Les espaces de bureaux qui approchent 1 sur le deuxième axe sont ceux avec les plus **faibles** concentrations sur ces polluants.

Les polluants contribuant significativement à la création des quatre autres composantes principales retenues sont représentés en bleu (valeur propre positive supérieure à 17 %) ou en orange (valeur propre négative inférieure à -17 %) dans le Tableau 27.

Tableau 27. Vecteurs propres des six composantes principales

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Acétaldéhyde	<b>0,22</b>	-0,01	0,01	<b>0,34</b>	<u>-0,19</u>	0,09
Benzaldéhyde	<b>0,19</b>	<u>-0,23</u>	-0,05	-0,12	<b>0,27</b>	0,07
Butyraldéhyde	0,09	0,03	-0,11	<b>0,43</b>	-0,02	<b>0,34</b>
Crotonaldéhyde	0,03	0,09	<b>0,33</b>	0,09	-0,06	<u>-0,33</u>
Formaldéhyde	0,15	-0,06	-0,08	<b>0,30</b>	<u>-0,35</u>	-0,01
Hexanal	0,13	-0,16	<b>0,23</b>	0,09	-0,16	<b>0,32</b>
Nonanal	<b>0,19</b>	<u>-0,22</u>	<b>0,21</b>	<u>-0,17</u>	0,00	<b>0,17</b>
Propionaldéhyde	0,02	0,15	<b>0,21</b>	<b>0,28</b>	<b>0,32</b>	0,03
1-methoxy-2-propyl acétate	<b>0,22</b>	0,03	-0,01	-0,10	0,10	-0,15
2-butoxyéthanol	<b>0,20</b>	0,00	-0,16	-0,01	0,08	<b>0,26</b>
2-éthylhexanol	0,17	-0,13	0,15	-0,15	-0,12	<b>0,28</b>
2-methoxy-1-propanol	0,13	<b>0,17</b>	0,09	-0,15	<u>-0,28</u>	0,01
Alpha-pinène	0,16	-0,02	0,12	0,07	-0,13	0,07
Benzène	0,12	0,17	<u>-0,21</u>	0,01	0,00	<u>-0,27</u>
Benzophénone	0,05	0,11	<b>0,41</b>	-0,03	<b>0,20</b>	0,14
Dichlorométhane	0,03	-0,02	<b>0,35</b>	0,05	<b>0,31</b>	0,01
Dihydromyrcénol	<b>0,23</b>	-0,01	<b>0,19</b>	-0,17	-0,12	0,07
Ethylbenzène	0,04	<b>0,28</b>	0,11	<u>-0,28</u>	0,06	0,05
Eucalyptol	<b>0,24</b>	-0,04	0,05	0,14	-0,10	<u>-0,22</u>
Limonène	<b>0,18</b>	0,07	0,09	0,14	<u>-0,23</u>	<u>-0,25</u>
Linalool	<b>0,27</b>	0,06	0,01	<b>0,19</b>	0,15	-0,16
m,p-xylènes	0,13	<b>0,36</b>	-0,08	-0,02	0,09	<b>0,21</b>
Méthylisobutylcétone (MIBK)	<b>0,19</b>	-0,10	<b>0,21</b>	-0,07	0,13	-0,11
Méthylstyrène	<b>0,19</b>	0,14	-0,05	<u>-0,18</u>	0,11	<u>-0,19</u>
Naphtalène	<b>0,24</b>	0,07	-0,13	<u>-0,25</u>	-0,12	-0,04
o-xylène	0,09	<b>0,36</b>	-0,04	0,10	0,10	<b>0,22</b>
Phénol	<b>0,21</b>	0,03	<u>-0,18</u>	0,06	<b>0,25</b>	0,04
Siloxane D4	0,16	<u>-0,30</u>	-0,12	0,01	0,15	-0,08
Siloxane D5	<b>0,19</b>	<u>-0,27</u>	-0,17	0,10	<b>0,18</b>	-0,04
Siloxane D6	<b>0,19</b>	-0,13	0,16	-0,04	-0,14	-0,17
Styrène	<b>0,18</b>	0,14	-0,09	<u>-0,27</u>	<u>-0,22</u>	0,16
Terpinéol	<b>0,26</b>	0,09	-0,05	0,09	0,09	-0,11
Tétrachloroéthylène	<b>0,18</b>	-0,17	<u>-0,28</u>	-0,17	0,10	0,05
Toluène	0,12	<b>0,35</b>	-0,07	0,04	0,03	-0,01

**Cellules en gras** : contribution supérieure à la contribution moyenne (17 %), le polluant contribue significativement et positivement à la création de la composante principale ; **cellules surlignées et en italique** : valeur absolue de la contribution supérieure à la contribution moyenne (17 %), le polluant contribue significativement et négativement à la création de la composante principale.

Pour les polluants en commun avec le projet OFFICAIR, on observe une cohérence des résultats : axe regroupant les aldéhydes, axe regroupant les BTEX, axe avec le 2-éthylhexanol et le 2-butoxyéthanol (Campagnolo et al., 2017).

## 7.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH)

Une classification ascendante hiérarchique a été effectuée sur les six composantes principales ressortant de l'ACP. La distance utilisée est la distance euclidienne. La méthode utilisée est la méthode du saut de Ward qui permet de minimiser à chaque agrégation la perte d'inertie interclasse due à cette agrégation.

Le choix du nombre de clusters se fait à l'aide du *Cubic Clustering Criterion* (CCC), du  $R^2$  et du dendrogramme (Figure 26). Avec une classification en 6 groupes, le CCC est égal à 4,5 ce qui indique une bonne classification avec des groupes distincts. Le  $R^2$  est égal à 57 % ce qui signifie une bonne adéquation du modèle aux données.

Le nombre optimal de groupes est donc de 6. Cependant, afin d'obtenir des groupes avec suffisamment d'effectifs pour les comparer statistiquement, il a été décidé de réaliser une **classification des espaces de bureaux en 4 groupes**.

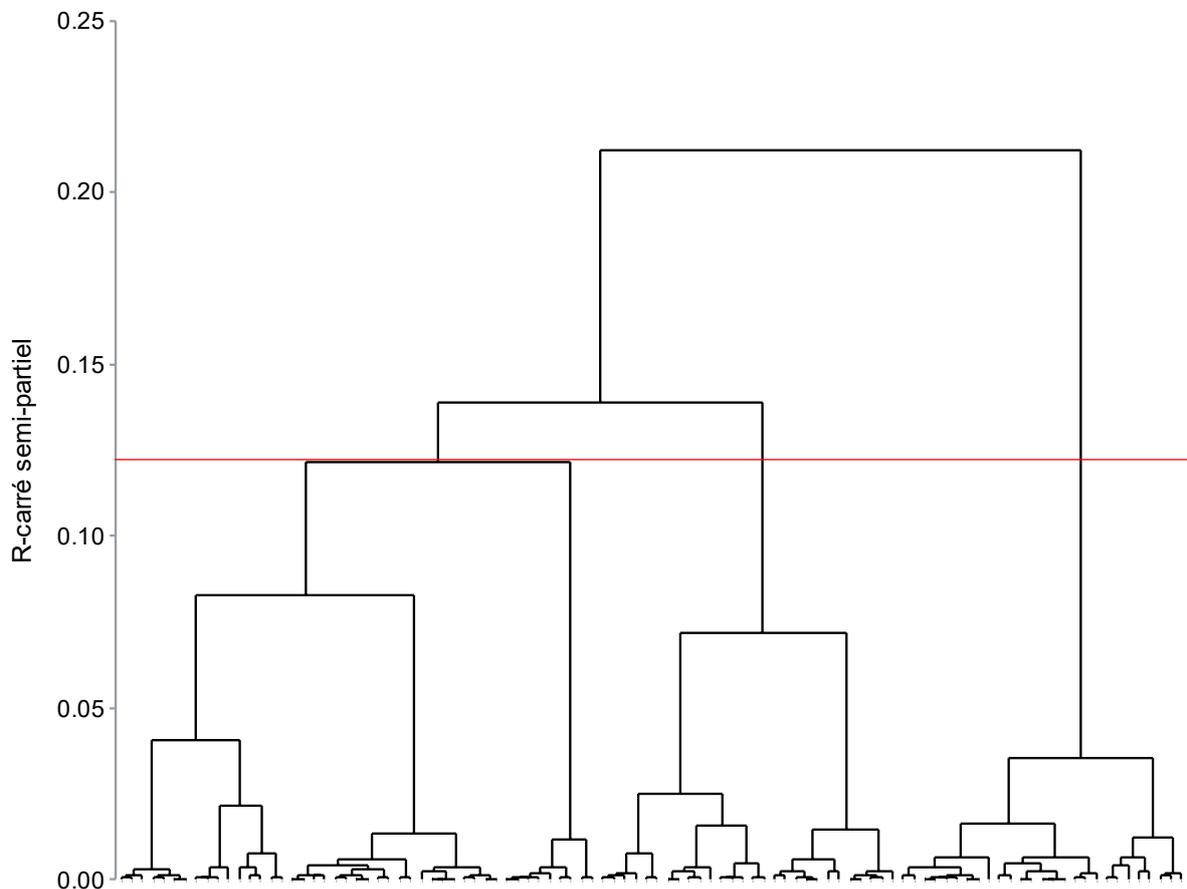


Figure 26. Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des espaces de bureaux en fonction des concentrations en aldéhydes et COV (n = 100)

### 7.3 Classification avec la méthode des centres mobiles (k-means)

Les moyennes des composantes principales retenus à l'issue de l'ACP ont été calculées pour chaque groupe créé par la CAH, afin de déterminer les barycentres initiaux des groupes du modèle des K-means.

Comparé à une classification en 6 groupes, les indicateurs de qualité du modèle ont été légèrement dégradés. Le coefficient de détermination  $R^2$  du modèle obtenu est de 48 %. Le CCC est égal à -0,2, ce qui indique que les groupes ne sont pas totalement distincts mais présentent quelques chevauchements.

### 7.4 Description des groupes de pollution

La répartition des espaces de bureaux obtenue est relativement équilibrée, avec cependant un groupe ne représentant que 9 % des espaces de bureaux (Tableau 28).

Tableau 28. Répartition des espaces de bureaux par groupe (n = 100)

	Nombre d'espaces de bureaux	% d'espaces de bureaux
<b>Groupe 1</b>	9	9%
<b>Groupe 2</b>	35	35%
<b>Groupe 3</b>	26	26%
<b>Groupe 4</b>	30	30%

La Figure 27 représente les espaces de bureaux projetés sur les deux premières composantes principales de l'ACP.

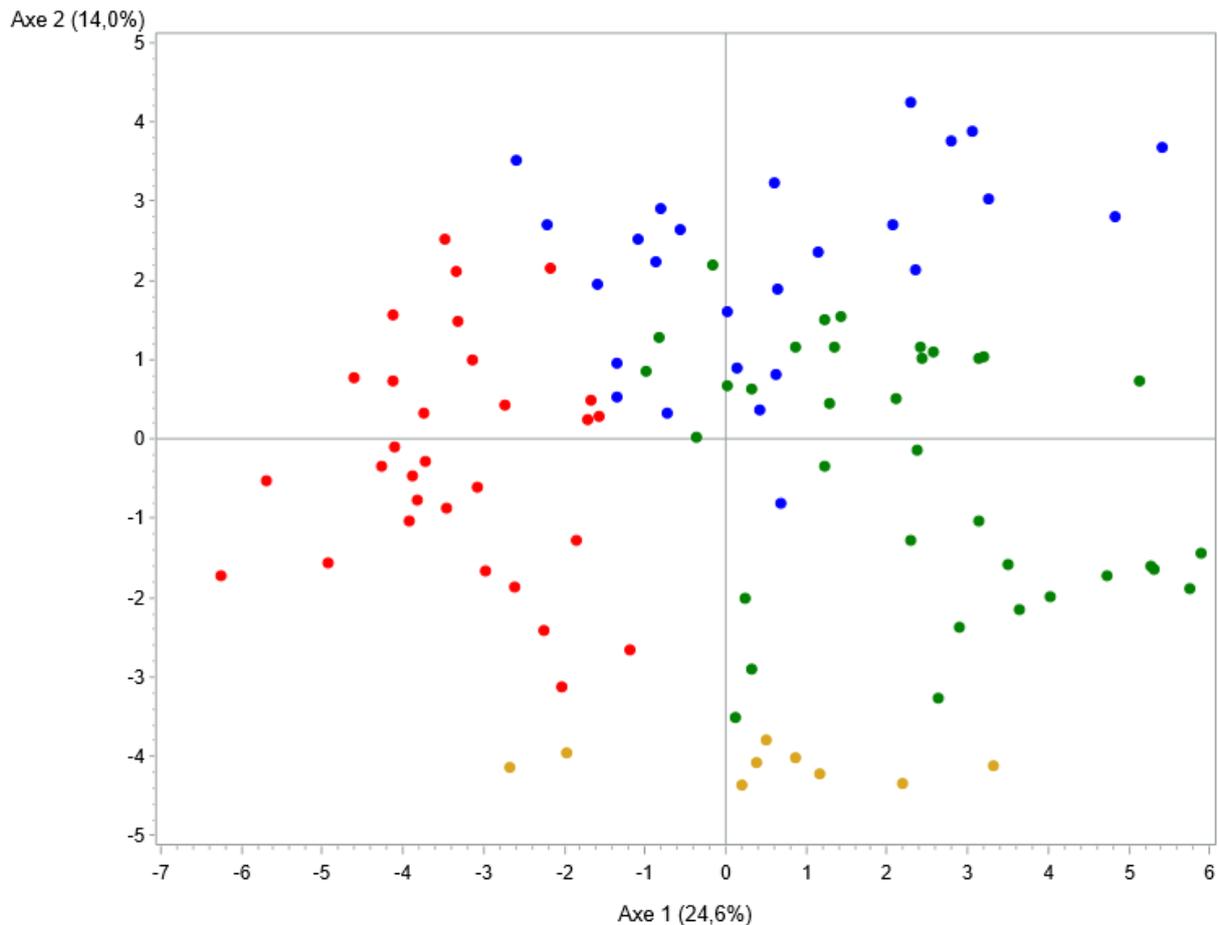


Figure 27. Représentation des espaces de bureaux sur les deux premières composantes principales de l'ACP (n = 100)

Le Tableau 29 présente les substances qui, pour chaque groupe, présentent des écarts significatifs entre la moyenne du groupe et la moyenne observée sur l'échantillon entier.

Le Tableau 31 présente les moyennes par groupe des températures, humidités relatives et concentrations moyennes en CO<sub>2</sub> mesurés pendant la journée de mesure. Les moyennes qui présentent un écart significativement supérieur à la moyenne observée sur l'échantillon entier sont représentées en **gras**. Les moyennes qui présentent un écart significativement inférieur à la moyenne observée sur l'échantillon entier sont représentées en italique souligné.

Le Tableau 31 et le Tableau 32 présentent la description des groupes de multipollution en fonction des caractéristiques des immeubles et des espaces de bureau.

Pour chaque groupe, les modalités présentant une **proportion significativement supérieure** à la proportion de la modalité observée dans tout l'échantillon sont représentées en **gras**.

A l'inverse, les modalités présentant une **proportion significativement inférieure** à la proportion de la modalité observée dans tout l'échantillon sont représentées en italique souligné.

Tableau 29. Aldéhydes et COV dont les rangs moyens intra-groupes présentent des écarts significatifs avec les rangs moyens de l'échantillon entier

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
<b>Concentration faible</b>	Benzène Ethylbenzène m,p-xylènes o-xylène Toluène	Benzophénone Crotonaldéhyde	Benzaldéhyde Siloxane D4 Siloxane D5	1-methoxy-2-propyl acétate 2-butoxyéthanol Acétaldéhyde Benzaldéhyde Benzène Butyraldéhyde Dihydromyrcénol Ethylbenzène Hexanal m,p-xylènes Méthylstyrène Naphtalène Nonanal o-xylène Phénol Siloxane D4 Toluène
<b>Concentration élevée</b>	Benzaldéhyde Benzophénone Dichlorométhane Hexanal Nonanal Siloxane D4 Terpinéol	2-butoxyéthanol 2-ethylhexanol Acétaldéhyde Benzène Naphtalène Phénol Siloxane D4 Siloxane D5 Styrène Tétrachloroéthylène	m,p-xylènes 1-methoxy-2-propyl acétate Ethylbenzène Toluène Benzophénone o-xylène Propionaldéhyde Crotonaldéhyde	

Tableau 30. Moyennes par groupe des températures, humidités relatives et concentrations moyennes en CO<sub>2</sub> pendant la journée de mesure

	Total	Moyenne Groupe 1	Moyenne Groupe 2	Moyenne Groupe 3	Moyenne Groupe 4
Effectif	100	9	35	26	30
Température moyenne	23,0	22,5	<b>23,6</b>	<u>22,5</u>	23,0
Humidité relative moyenne	40,1	38,2	41,9	38,3	40,1
Concentration moyenne en CO <sub>2</sub>	738	676	<b>801</b>	764	<u>660</u>

Tableau 31. Description des groupes de multipollution en fonction des caractéristiques des immeubles de bureaux (n = 98)

	n (%)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
<i>Echantillon total</i>	98	9	33	26	30
<b>Période de fin de construction</b>					
Avant 1945	17 (18%)	0 (0%)	3 (10%)	7 (26%)	7 (24%)
De 1946 à 1989	26 (26%)	0 (0%)	<b>16 (48%)</b>	4 (16%)	6 (20%)
De 1990 à 2010	22 (22%)	0 (0%)	4 (12%)	8 (30%)	10 (34%)
Après 2011	33 (34%)	<b>9 (100%)</b>	10 (30%)	7 (26%)	7 (24%)
<b>Nombre de niveaux</b>					
Entre 1 et 3 niveaux	36 (36%)	<u>0 (0%)</u>	13 (40%)	10 (38%)	13 (44%)
Entre 4 et 9 niveaux	44 (44%)	<u>0 (0%)</u>	14 (42%)	15 (58%)	15 (50%)
Plus de 10 niveaux	18 (18%)	<b>9 (100%)</b>	6 (18%)	<u>1 (4%)</u>	<u>2 (6%)</u>
<b>Fuites d'eau ou inondations au cours des 12 derniers mois</b>					
Oui	44 (44%)	<b>9 (100%)</b>	12 (36%)	9 (34%)	14 (46%)
Non	54 (56%)	<u>0 (0%)</u>	21 (64%)	17 (66%)	16 (54%)
<b>Présence de moisissures apparentes</b>					
Oui	18 (18%)	<b>5 (56%)</b>	3 (10%)	4 (16%)	6 (20%)
Non	80 (82%)	<u>4 (44%)</u>	30 (90%)	22 (84%)	24 (80%)
<b>Equipements</b>					
Parking souterrain	48 (48%)	<b>9 (100%)</b>	19 (58%)	12 (46%)	<u>8 (26%)</u>
Chaufferie	72 (74%)	9 (100%)	26 (78%)	<b>24 (92%)</b>	<u>13 (44%)</u>
Salle avec des serveurs informatiques	74 (76%)	<u>4 (44%)</u>	22 (66%)	<b>25 (96%)</b>	23 (76%)
Cuisine	38 (38%)	<u>0 (0%)</u>	11 (34%)	<b>15 (58%)</b>	12 (40%)
<b>SYSTÈME DE VENTILATION</b>					
<b>Système de ventilation</b>					
Ventilation par ouverture des fenêtres	7 (8%)	0 (0%)	4 (12%)	1 (4%)	2 (6%)
Ventilation naturelle par conduit ou par grilles	2 (2%)	0 (0%)	<b>2 (6%)</b>	0 (0%)	0 (0%)
VMC simple flux	47 (48%)	5 (56%)	<u>11 (34%)</u>	16 (62%)	15 (50%)
VMC double flux	42 (42%)	4 (44%)	16 (48%)	9 (34%)	13 (44%)
<b>VMC interrompue pendant la nuit</b>					
Oui	14 (14%)	<b>4 (44%)</b>	4 (12%)	1 (4%)	5 (16%)
Non	66 (68%)	5 (56%)	<u>14 (42%)</u>	<b>24 (92%)</b>	23 (76%)
Ne sait pas ou sans objet	18 (18%)	0 (0%)	<b>15 (46%)</b>	<u>1 (4%)</u>	<u>2 (6%)</u>

	n (%)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
<b>Emplacement de la prise d'air neuf (si VMC double flux)</b>					
Toiture	34 (34%)	4 (44%)	16 (48%)	4 (16%)	10 (34%)
Façade	19 (20%)	0 (0%)	9 (28%)	5 (20%)	5 (16%)
Sans objet	56 (58%)	5 (56%)	17 (52%)	17 (66%)	17 (56%)
<b>Chauffage en fonctionnement</b>					
Oui	88 (90%)	9 (100%)	30 (90%)	26 (100%)	23 (76%)
Non	10 (10%)	0 (0%)	3 (10%)	0 (0%)	7 (24%)
<b>NETTOYAGE</b>					
<b>Fréquence de nettoyage des sols par détergents</b>					
Tous les jours	8 (8%)	0 (0%)	2 (6%)	4 (16%)	2 (6%)
2 fois par semaine	57 (58%)	9 (100%)	23 (70%)	14 (54%)	11 (36%)
1 fois par semaine	13 (14%)	0 (0%)	4 (12%)	1 (4%)	8 (26%)
Moins d'1 fois par semaine	7 (8%)	0 (0%)	3 (10%)	3 (12%)	1 (4%)
Jamais	13 (14%)	0 (0%)	1 (4%)	4 (16%)	8 (26%)
<b>Moment de la journée pour le nettoyage des sols par détergents</b>					
Le matin avant l'occupation des bureaux	49 (50%)	5 (56%)	16 (48%)	13 (50%)	15 (50%)
Le soir après l'occupation des bureaux	25 (26%)	0 (0%)	9 (28%)	5 (20%)	11 (36%)
Dans la journée	35 (36%)	5 (56%)	13 (40%)	13 (50%)	4 (14%)
Variable	17 (18%)	4 (44%)	12 (36%)	0 (0%)	1 (4%)
<b>Fréquence de nettoyage du mobilier par détergents</b>					
Tous les jours	14 (14%)	0 (0%)	0 (0%)	10 (38%)	4 (14%)
2 fois par semaine	39 (40%)	9 (100%)	19 (58%)	7 (26%)	4 (14%)
1 fois par semaine	8 (8%)	0 (0%)	4 (12%)	0 (0%)	4 (14%)
1 fois par mois	10 (10%)	0 (0%)	2 (6%)	1 (4%)	7 (24%)
Sans objet	27 (28%)	0 (0%)	8 (24%)	8 (30%)	11 (36%)
<b>Moment de la journée pour le nettoyage du mobilier par détergents</b>					
Le matin avant l'occupation des bureaux	35 (36%)	5 (56%)	9 (28%)	13 (50%)	8 (26%)
Le soir après l'occupation des bureaux	21 (22%)	0 (0%)	6 (18%)	5 (20%)	10 (34%)
Dans la journée	27 (28%)	5 (56%)	9 (28%)	9 (34%)	4 (14%)
Variable	21 (22%)	4 (44%)	16 (48%)	0 (0%)	1 (4%)

Tableau 32. Description des groupes de multipollution en fonction des caractéristiques des espaces de bureau (n = 94)

	n (%)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
<i>Echantillon total</i>	94	9	30	26	29
<b>Nombre d'occupants</b>					
1 ou 2 occupants	53 (56%)	4 (44%)	15 (50%)	15 (58%)	19 (66%)
3 ou 4 occupants	27 (28%)	3 (34%)	11 (36%)	7 (26%)	6 (20%)
5 occupants et plus	12 (12%)	1 (12%)	3 (10%)	4 (16%)	4 (14%)
Valeur manquante	2 (2%)	1 (12%)	1 (4%)	0 (0%)	0 (0%)
<b>Type de bureau</b>					
Open-space	23 (24%)	4 (44%)	6 (20%)	4 (16%)	9 (32%)
Bureau paysager	71 (76%)	5 (56%)	24 (80%)	22 (84%)	20 (68%)
<b>REVÊTEMENTS</b>					
<b>Revêtement de sol</b>					
Moquette	18 (20%)	0 (0%)	8 (26%)	2 (8%)	8 (28%)
Revêtement synthétique (sol plastique)	63 (68%)	<b>9 (100%)</b>	17 (56%)	17 (66%)	20 (68%)
Autre revêtement de sol	13 (14%)	0 (0%)	5 (16%)	<b>7 (26%)</b>	1 (4%)
<b>Revêtement mural d'au moins toute une paroi</b>					
Peinture	67 (72%)	<b>9 (100%)</b>	18 (60%)	20 (76%)	20 (68%)
Toile de verre	23 (24%)	0 (0%)	<u>3 (10%)</u>	10 (38%)	10 (34%)
Autre revêtement mural	35 (38%)	4 (44%)	<b>16 (54%)</b>	12 (46%)	<u>3 (10%)</u>
<b>Matériau constituant le plafond ou faux-plafond</b>					
Dalles de faux-plafond	66 (70%)	4 (44%)	19 (64%)	21 (80%)	22 (76%)
Peinture	12 (12%)	2 (22%)	3 (10%)	3 (12%)	4 (14%)
Autre matériau	16 (18%)	3 (34%)	8 (26%)	2 (8%)	3 (10%)

	n (%)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
<b>PRESENCE D'IMPRIMANTES ET DE PHOTOCOPIEUSES</b>					
<b>Nombre d'imprimantes</b>					
Aucune	77 (82%)	8 (88%)	25 (84%)	<u>16 (62%)</u>	<b>28 (96%)</b>
Une ou deux	17 (18%)	1 (12%)	5 (16%)	<b>10 (38%)</b>	<u>1 (4%)</u>
<b>Nombre de photocopieuses</b>					
Aucune	80 (86%)	8 (88%)	28 (94%)	20 (76%)	24 (82%)
Une ou deux	14 (14%)	1 (12%)	2 (6%)	6 (24%)	5 (18%)
<b>Présence de plantes d'intérieur</b>					
Aucune	50 (54%)	3 (34%)	15 (50%)	17 (66%)	15 (52%)
Une ou deux	31 (32%)	2 (22%)	13 (44%)	5 (20%)	11 (38%)
Trois ou plus	13 (14%)	<b>4 (44%)</b>	2 (6%)	4 (16%)	3 (10%)
<b>Possibilité d'ouverture des fenêtres</b>					
Oui	77 (82%)	7 (78%)	22 (74%)	21 (80%)	27 (94%)
Non	17 (18%)	2 (22%)	8 (26%)	5 (20%)	2 (6%)
<b>Durée d'ouverture des fenêtres au cours de la journée de prélèvements gazeux</b>					
Moins de 30min dans la journée	21 (22%)	0 (0%)	2 (6%)	9 (34%)	10 (34%)
Plus de 30 min dans la journée	19 (20%)	2 (22%)	6 (20%)	3 (12%)	8 (28%)
Jamais	49 (52%)	5 (56%)	22 (74%)	13 (50%)	9 (32%)
Ne sait pas	5 (6%)	2 (22%)	0 (0%)	1 (4%)	2 (6%)

Les résultats de la classification sont résumés ci-après.

**Groupe 1 (n = 9 espaces de bureaux) :**

Concentrations faibles en benzène, éthylbenzène, m,p-xylènes, o-xylène, toluène.

Concentrations élevées en benzaldéhyde, benzophénone, dichlorométhane, hexanal, nonanal, siloxane D4, terpinéol.

- 100 % des immeubles de ce groupe sont construits après 2011 et sur plus de 10 niveaux ;
- 100 % des immeubles ont déclaré des fuites importantes d'eau ou inondations au cours des 12 derniers mois, et 56 % d'entre eux signalent la présence de moisissures apparentes, contre 18 % sur l'échantillon entier ;
- 100 % des immeubles de ce groupe disposent d'un parking souterrain. En revanche, aucun immeuble n'est équipé d'une cuisine, et peu d'immeubles disposent d'une salle avec des serveurs informatiques (44 % versus 76 % sur l'échantillon entier) ;
- La VMC est interrompue pendant la nuit pour 44 % des immeubles de ce groupe, contre 14 % sur l'échantillon total ;
- 100 % des espaces de bureaux avec un revêtement synthétique (sol plastique) et de la peinture en revêtement mural ;
- Présence de plantes vertes en plus forte proportion.

→ **Ce groupe est plutôt constitué des immeubles de bureaux combinant plusieurs sources de pollution intérieure** (dégât des eaux et moisissures apparentes, parking souterrain, revêtement synthétique au sol et peinture au mur, bâtiment récent) et moins impactés par la pollution atmosphérique extérieure. De plus, la VMC est arrêtée pendant la nuit dans une plus forte proportion de bâtiments, ce qui peut conduire à l'accumulation de polluants intérieurs.

**Groupe 2 (n = 35 espaces de bureaux) :**

Concentrations faibles en benzophénone et crotonaldéhyde.

Concentrations élevées en 2-butoxyéthanol, 2-éthylhexanol, acétaldéhyde, benzène, naphthalène, phénol, siloxane D4 et D5, styrène et tétrachloroéthylène.

- Température et concentration en CO<sub>2</sub> en moyenne plus élevées que sur l'échantillon total (23,6 °C versus 23 °C, 801 ppm versus 738 ppm).
- Près de la moitié des immeubles de ce groupe sont construits entre 1946 et 1989 (48 % versus 26 % pour l'échantillon total) ;
- Les 2 seuls immeubles ayant recours à de la ventilation naturelle par conduit ou par grilles sont dans ce groupe. La proportion d'immeubles équipés de VMC simple flux est plus faible (34 %) que sur l'échantillon entier (48 %).

→ **Ce groupe est plutôt constitué des immeubles de bureaux anciens**, dans lesquels sont présents des polluants que l'on ne trouve plus ou en faibles concentrations dans les bâtiments récents : benzène, tétrachloroéthylène et naphthalène.

### **Groupe 3 (n = 26 espaces de bureaux) :**

Concentrations faibles en benzaldéhyde, siloxane D4 et D5.

Concentrations élevées en m,p-xylènes, 1-méthoxy-2-propyl acétate, éthylbenzène, toluène, benzophénone, o-xylène et propionaldéhyde.

- Température en moyenne plus faible que sur l'échantillon total (22,5 °C versus 23 °C).
- Les immeubles de bureaux de ce groupe sont presque tous équipés d'une chaufferie (92 %) et d'au moins une salle avec des serveurs informatiques (96 %). Ils sont également plus nombreux à être équipés d'une cuisine (58 %) et d'imprimantes dans les espaces de bureaux (38 %).
- La majorité des immeubles de ce groupe n'interrompt pas la VMC pendant la nuit (92 % versus 68 % sur l'échantillon entier).
- 100 % des immeubles avaient leur chauffage allumé pendant la semaine de mesure.

→ **Ce groupe est plutôt constitué des immeubles de bureaux impactés par la pollution de l'air extérieur** et instrumentés en période hivernale, saison où les concentrations extérieures sont plus élevées du fait du chauffage urbain. Le fonctionnement plutôt en continu de la VMC peut favoriser la pénétration de la pollution de l'air extérieur pour les systèmes non équipés de filtres.

### **Groupe 4 (n = 30 espaces de bureaux) :**

Seul groupe caractérisé uniquement par des concentrations faibles : en 1-méthoxy-2-propyl acétate, 2-butoxyéthanol, acétaldéhyde, benzaldéhyde, benzène, butyraldéhyde, dihydromyrcénol, éthylbenzène, hexanal, m,p-xylènes, méthylstyrène, naphtalène, nonanal, o-xylène, phénol, siloxane D4 et toluène.

- Concentration en CO<sub>2</sub> en moyenne plus faible que sur l'échantillon total (660 ppm versus 738 ppm) ;
- Les immeubles de bureaux de ce groupe sont moins nombreux à être équipés d'un parking souterrain (26 %), d'une chaufferie (44 %) et d'imprimantes (4 %) ;
- 70 % des espaces de bureaux instrumentés alors que le chauffage n'était pas en fonctionnement se trouvent dans ce groupe.

→ **Ce groupe est plutôt constitué des immeubles de bureaux présentant une faible pollution de l'air intérieur.** Ils sont plutôt moins densément occupés que les autres bâtiments et présentent moins d'équipements pouvant générer des pollutions intérieures comme un parking souterrain, une chaufferie ou des imprimantes.

Enfin, il n'apparaît pas de relations entre les pratiques de nettoyage au moyen de détergents (moment et fréquence) et les concentrations intérieures en COV et aldéhydes, ce qui avait été mis en évidence dans le projet OFFICAIR (Spinazze et al., 2020). La durée d'ouverture des fenêtres n'est pas non plus une variable qui est apparue être en relation avec les concentrations intérieures ; ceci peut s'expliquer par un mauvais renseignement de cette variable à l'échelle de la semaine de mesure et/ou par le fait que les bâtiments étudiés sont correctement ventilés et que l'ouverture des fenêtres n'est ainsi pas déterminante dans le renouvellement d'air.

## 8 CONCLUSION

Les mesures ont été réalisées dans 30 immeubles de bureaux de la région Nouvelle-Aquitaine entre septembre 2018 et juin 2019 pendant 7 jours dans chaque bâtiment. Des questionnaires descriptifs de ces derniers ont permis de mettre en perspective les concentrations intérieures mesurées avec les caractéristiques des bâtiments, leur environnement et leur occupation.

Les concentrations en **aldéhydes** sont globalement faibles, avec des concentrations cependant élevées en propionaldéhyde dont les sources n'ont pas été identifiées.

Les concentrations en **COV** sont globalement faibles, la médiane la plus élevée étant observée pour le limonène ( $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les concentrations les plus élevées sont observées pour les terpènes, notamment le limonène et l' $\alpha$ -pinène, et les siloxanes. Néanmoins, on observe, d'une part, le dépassement de la valeur réglementaire de qualité de l'air intérieur pour le benzène dans 9 immeubles et, d'autre part, la présence de deux composés chlorés sont détectés dans l'air des bureaux alors qu'ils sont classés cancérigènes probables chez l'Homme. Il s'agit du 1,2,3-trichloropropane (détecté dans 8 % des espaces de bureaux) et du dichlorométhane (détecté dans 86 % des espaces de bureaux). Ces deux composés chlorés font partie de la liste des 21 substances que l'Anses a retenu prioritaires dans le cadre d'un étiquetage des meubles (Anses, 2015). Leur mesure dans de prochaines études relatives à la qualité de l'air intérieur mérite d'être envisagée.

Les concentrations en **COSV** sont les plus élevées pour les phtalates, les muscs de synthèse et les HAP, ce qui est également observé dans les logements et les écoles. En revanche, elles sont globalement inférieures à celles mesurées dans ces autres lieux. Le lindane, insecticide organochloré interdit, est quantifié dans 73 % des bureaux.

Les concentrations en **PM<sub>2,5</sub>** restent plutôt faibles (médiane égale à  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Les concentrations en **métaux** montrent principalement l'influence de sources extérieures. Des dépassements des valeurs limites disponibles pour la qualité de l'air extérieur sont observés pour l'arsenic et le cadmium (1 espace de bureau dans chaque cas).

Le **potentiel oxydant** a été mesuré selon trois méthodes, ce qui fournit des informations tout à fait originales s'agissant d'air intérieur. Des associations sont observées entre le potentiel oxydant et les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), notamment le pyrène et le fluoranthène. Des associations significatives sont également retrouvées entre le potentiel oxydant et les concentrations en éléments traces majoritairement associés à la source véhiculaire.

Du fait de mesures réalisées dans des espaces différents, il n'a pas été possible d'étudier les relations entre le potentiel oxydant et les concentrations en COV et aldéhydes.

La recherche de **typologies de pollution intérieure vis-à-vis des COV et aldéhydes** et la mise en perspective avec les caractéristiques des bâtiments et des activités ont fait apparaître 4 groupes de bureaux. L'un de ces groupes représente les bureaux peu pollués ; il rassemble 30 % des pièces instrumentées. Les déterminants des concentrations intérieures plus élevées sont i) la pollution de l'air extérieur, les systèmes de ventilation mécanique ne permettant pas de limiter son transfert vers l'intérieur des bâtiments dans la majorité des cas (filtres à particules uniquement dans les caissons de ventilation double-flux et les centrales de traitement d'air, filtres moléculaires très rarement présents), ii) la date de construction du bâtiment, les bâtiments plus anciens ou construits récemment présentant des pollutions différentes, iii) les sources intérieures du type parking souterrain, dégât des eaux ou la présence de revêtement de sol plastifié.

## 9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR (2014). NF EN 12341. Qualité de l'air ambiant, méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la fraction massique MP 2,5 et MP10 de matière particulaire en suspension.: 48.
- Calas, A., G. Uzu, J.-L. Besombes, J. M. Martins, M. Redaelli, S. Weber, A. Charron, A. Albinet, F. Chevrier and G. Brulfert (2019). "Seasonal Variations and Chemical Predictors of Oxidative Potential (OP) of Particulate Matter (PM), for Seven Urban French Sites." Atmosphere **10**(11): 698.
- Calas, A., G. Uzu, F. J. Kelly, S. Houdier, J. M. Martins, F. Thomas, F. Molton, A. Charron, C. Dunster and A. Oliete (2018). "Comparison between five acellular oxidative potential measurement assays performed with detailed chemistry on PM 10 samples from the city of Chamonix (France)." Atmospheric Chemistry and Physics **18**(11): 7863-7875.
- Calas, A., G. Uzu, J. M. F. Martins, D. Voisin, L. Spadini, T. Lacroix and J. L. Jaffrezo (2017). "The importance of simulated lung fluid (SLF) extractions for a more relevant evaluation of the oxidative potential of particulate matter." Sci Rep **7**(1): 11617.
- Cattell, R. B. and S. Vogelmann (1977). "A Comprehensive Trial Of The Scree And Kg Criteria For Determining The Number Of Factors." Multivariate Behavioral Research **12**(3): 289-325.
- Charrier, J. G. and C. Anastasio (2012). "On dithiothreitol (DTT) as a measure of oxidative potential for ambient particles: evidence for the importance of soluble transition metals." Atmospheric Chemistry and Physics Discussions **12**(5): 11317-11350.
- Charrier, J. G., A. S. McFall, N. K. Richards-Henderson and C. Anastasio (2014). "Hydrogen peroxide formation in a surrogate lung fluid by transition metals and quinones present in particulate matter." Environmental science & technology **48**(12): 7010-7017.
- Cho, A. K., C. Sioutas, A. H. Miguel, Y. Kumagai, D. A. Schmitz, M. Singh, A. Eiguren-Fernandez and J. R. Froines (2005). "Redox activity of airborne particulate matter at different sites in the Los Angeles Basin." Environmental Research **99**(1): 40-47.
- Fang, T., V. Verma, J. T. Bates, J. Abrams, M. Klein, M. J. Strickland, S. E. Sarnat, H. H. Chang, J. A. Mulholland, P. E. Tolbert, A. G. Russell and R. J. Weber (2016). "Oxidative potential of ambient water-soluble PM2.5 in the southeastern United States: contrasts in sources and health associations between ascorbic acid (AA) and dithiothreitol (DTT) assays." Atmos. Chem. Phys. **16**(6): 3865-3879.
- Gemenetzis, P., Moussas, P., Arditoglou, A., Samara, C. (2006). "Mass concentration and elemental composition of indoor PM2.5 and PM10 in University rooms in Thessaloniki, northern Greece." Atmos. Environ. **40**(17): 3195-3206.
- Goix, S., T. Lévêque, T.-T. Xiong, E. Schreck, A. Baeza-Squiban, F. Geret, G. Uzu, A. Austruy and C. Dumat (2014). "Environmental and health impacts of fine and ultrafine metallic particles: Assessment of threat scores." Environmental research **133**: 185-194.
- Horemans, B., Van Grieken R. (2010). "Speciation and diurnal variation of thoracic, fine thoracic and sub-micrometer airborne particulate matter at naturally ventilated office environments." Atmos. Environ. **44**: 1497-1505.
- Hellack, B., A. Yang, F. R. Cassee, N. A. Janssen, R. P. Schins and T. A. Kuhlbusch (2014). "Intrinsic hydroxyl radical generation measurements directly from sampled filters as a metric for the oxidative potential of ambient particulate matter." Journal of Aerosol Science **72**: 47-55.

- Janssen, N. A., M. Strak, A. Yang, B. Hellack, F. J. Kelly, T. A. Kuhlbusch, R. M. Harrison, B. Brunekreef, F. R. Cassee and M. Steenhof (2015). "Associations between three specific a-cellular measures of the oxidative potential of particulate matter and markers of acute airway and nasal inflammation in healthy volunteers." Occupational and environmental medicine **72**(1): 49-56.
- Penkała, M., Ogrodnik, P., Rogula-Kozłowska, W. (2018). "Particulate Matter from the Road Surface Abrasion as a Problem of Non-Exhaust Emission Control." Environments, **5**: 9.
- Perrone, M. G., J. Zhou, M. Malandrino, G. Sangiorgi, C. Rizzi, L. Ferrero, J. Dommen and E. Bolzacchini (2016). "PM chemical composition and oxidative potential of the soluble fraction of particles at two sites in the urban area of Milan, Northern Italy." Atmospheric Environment **128**: 104-113.
- Platt, S., I. E. Haddad, S. Pieber, R.-J. Huang, A. Zardini, M. Clairotte, R. Suarez-Bertoa, P. Barmet, L. Pfaffenberger and R. Wolf (2014). "Two-stroke scooters are a dominant source of air pollution in many cities." Nature communications **5**.
- Sauvain, J., D. Simon, S. Ferdinand and R. Michael (2015). "Oxidative Potential of Particles in Different Occupational Environments: A Pilot Study." Ann Occup Hyg **59**(7): 882-894.
- Uzu, G., J.-J. Sauvain, A. Baeza-Squiban, M. Riediker, M. Sanchez Sandoval Hohl, S. Val, K. Tack, S. b. Denys, P. Pradere and C. Dumat (2011). "In vitro Assessment of the Pulmonary Toxicity and Gastric Availability of Lead-Rich Particles from a Lead Recycling Plant." Environmental Science & Technology **45**(18): 7888-7895.
- Weber, S., G. Uzu, A. Calas, F. Chevrier, J. L. Besombes, A. Charron, D. Salameh, I. Ježek, G. Močnik and J. L. Jaffrezo (2018). "An apportionment method for the oxidative potential of atmospheric particulate matter sources: application to a one-year study in Chamonix, France." Atmos. Chem. Phys. **18**(13): 9617-9629.
- Wei, W., Mandin, C., Blanchard, O., Mercier, F., Pelletier, M., Le Bot, B., Glorennec, P., Ramalho, O. (2017). "Predicting the gas-phase concentration of semi-volatile organic compounds from airborne particles: Application to a French nationwide survey." Sci. Total Environ., **576**: 319-325.

## 10 ANNEXES

Annexe 1. Description générale des immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

Caractéristiques	n	%
<b>Période de fin de construction</b>		
Avant 1900	5	17%
De 1900 à 1945	1	3%
De 1946 à 1973	1	3%
De 1974 à 1989	7	24%
De 1990 à 2000	1	3%
De 2001 à 2005	2	7%
De 2006 à 2010	2	7%
2011 et après	10	34%
<b>Reconversion de l'immeuble</b>		
Oui	9	31%
Non	19	66%
Ne sait pas	1	3%
⇒ <b>Si reconversion, période de reconversion de l'immeuble</b>		
De 2001 à 2010	1	11%
2011 et après	5	56%
Valeur manquante	3	33%
<b>Rénovation de l'immeuble</b>		
Oui	13	45%
Non	14	48%
Ne sait pas	2	7%
⇒ <b>Si rénovation, période de rénovation de l'immeuble</b>		
De 2001 à 2010	2	15%
2011 et après	10	77%
Valeur manquante	1	8%
<b>Nombre de niveaux dans l'immeuble</b>		
Entre 1 et 3	15	52%
Entre 4 et 9	11	38%
10 et plus	3	10%
<b>Nombre d'occupants dans l'immeuble</b>		
Moins de 25	6	21%
Entre 25 et 75	9	31%
Entre 75 et 300	4	14%
Plus de 300	6	21%
Valeur manquante	4	14%

Annexe 2. Environnement intérieur des immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

Caractéristiques	n	%
<b>Y a-t-il eu au cours des 12 derniers mois des fuites d'eau importantes ou inondations ?</b>		
Oui	10	34%
Non	19	66%
⇒ Si oui, de quelle origine ?		
Du toit	6	60%
Des fenêtres	1	10%
Des ballons d'eau chaude	1	10%
Des tuyaux	4	40%
Des climatiseurs individuels	1	10%
D'origine inconnue	0	0%
D'autres origines	4	40%
<b>Y a-t-il des taches d'humidité sur les murs, plafonds, sols ?</b>		
Oui	8	28%
Non	21	72%
<b>Y a-t-il des moisissures apparentes dans les bureaux ?</b>		
Oui	4	14%
Non	25	86%

<sup>a</sup> Pourcentages calculés sur l'échantillon restreint des immeubles ayant déclaré des fuites d'eau importantes ou inondation au cours des 12 derniers mois.

Annexe 3. Equipements et activités dans les immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

Caractéristiques	n	%
<b>Présence d'équipements comme :</b>	<b>27</b>	<b>93%</b>
Un parking souterrain	11	38%
Un parking sur le toit	0	0%
Une chaufferie	21	72%
Au moins un ascenseur	26	90%
Au moins un local fumeurs (fumoir)	0	0%
Au moins une salle avec des serveurs informatiques	23	79%
Au moins une cuisine	13	45%
Au moins une salle de restauration	16	55%
Au moins une salle d'activités sportives	3	10%
<b>D'autres activités que celles de bureau sont-elles pratiquées dans l'immeuble ?</b>	<b>19</b>	<b>66%</b>
Accueil de public (bureau de poste, agence bancaire, caisse d'allocation, etc.)	11	38%
Garage automobile	0	0%
Laboratoire	1	3%
Fast-food ou restaurant	0	0%
Imprimerie	3	10%
Onglerie	0	0%
Pressing	0	0%
Autres	6	21%

## Annexe 4. Ventilation des immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

Caractéristiques	n	%
<b>Ventilation de l'immeuble</b>		
Par ouverture des fenêtres	3	10%
Par ventilation naturelle par conduit ou par grilles	1	3%
Par ventilation mécanique contrôlée	25	86%
⇒ Si VMC, type de ventilation mécanique		
VMC double flux avec balayage	4	16%
VMC double flux sans balayage	9	36%
VMC simple flux par extraction avec balayage	6	24%
VMC simple flux par extraction sans balayage	3	12%
VMC simple flux par soufflage	3	12%
⇒ Si VMC, y a-t-il un contrôle de la VMC centralisé ?		
Oui	17	68%
Non	7	28%
Ne sait pas	1	4%
⇒ Si contrôle centralisé, type de contrôle de la VMC centralisé		
Manuelle	8	47%
Horloge	10	59%
En fonction de T°C, HR, CO <sub>2</sub>	4	24%
⇒ Si VMC, y a-t-il un contrôle de la VMC en local dans les bureaux ?		
Oui	6	24%
Non	14	56%
Ne sait pas	5	20%
⇒ Si contrôle en local, type de contrôle de la VMC en local dans les bureaux		
Manuelle	3	50%
Horloge	2	33%
En fonction de T°C, HR, CO <sub>2</sub>	2	33%
⇒ Si VMC, la VMC est-elle arrêtée pendant la nuit ?		
Oui	3	12%
Non	20	80%
Ne sait pas	2	8%
⇒ Si VMC, fonctionnement de la VMC pendant la semaine d'enquête		
Pleine puissance	21	84%
Puissance réduite	1	4%
Autre	2	8%
Valeur manquante	1	4%
⇒ Si VMC, la maintenance de la VMC inclut-elle un nettoyage ?		
Oui	18	72%
Non	1	4%
Mixte (extérieur + service interne)	1	4%
Ne sait pas	5	20%

Caractéristiques	n	%
<b>⇒ Si VMC, la maintenance de la VMC inclut-elle un nettoyage ?</b>		
Oui, au moins une fois par an	13	52%
Oui, moins souvent qu'une fois par an	2	8%
Jamais	2	8%
Ne sait pas	8	32%

Annexe 5. Ventilation des immeubles équipés d'une VMC double flux (n = 13)

Caractéristiques	n	%
<b>Débit théorique d'air neuf à l'échelle de l'immeuble</b>		
Moins de 10 000 m <sup>3</sup> /h	4	31%
Plus de 10 000 m <sup>3</sup> /h	2	15%
Ne sait pas	7	54%
<b>Débit théorique d'air neuf minimal prévu par personne pendant l'occupation des locaux</b>		
Entre 25 et 30 m <sup>3</sup> /h	5	38%
Ne sait pas	8	62%
<b>Type de recyclage d'air par la centrale de traitement d'air (CTA)</b>		
CTA tout air neuf (100% d'air neuf)	8	62%
CTA avec recyclage + free cooling	1	8%
Ne sait pas	4	31%
<b>Emplacement de la prise d'air neuf</b>		
En toiture	9	69%
En façade	7	54%
Dans le sol	0	0%
Autre	0	0%
<b>Types de filtres de l'air entrant en place</b>		
Préfiltres	6	46%
Filtres secondaires	4	31%
Ne sait pas	6	46%
<b>⇒ Si préfiltres, fréquence de remplacement des préfiltres</b>		
En fonction de la perte de charge mesurée	2	33%
Une fois tous les 2 ans ou plus souvent	4	67%
Moins fréquemment que tous les 2 ans	0	0%
Pas de fréquence régulière	0	0%
<b>⇒ Si filtres secondaires, fréquence de remplacement des filtres secondaires</b>		
En fonction de la perte de charge mesurée	1	25%
Une fois tous les 2 ans ou plus souvent	3	75%
Moins fréquemment que tous les 2 ans	0	0%
Pas de fréquence régulière	0	0%

Annexe 6. Fonctionnement du chauffage pendant la semaine d'enquête dans les immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

Caractéristiques	n	%
<b>Le chauffage fonctionne-t-il pendant la semaine d'enquête ?</b>		
Oui	25	86%
Non	4	14%

Annexe 7. Entretien et nettoyage des immeubles de bureaux étudiés (n = 29)

Caractéristiques	n	%
<b>Nettoyage des sols par aspiration ou balayage</b>		
Oui	27	93%
Non	2	7%
<b>⇒ Fréquence de nettoyages des sols par aspiration ou balayage</b>		
Tous les jours	9	33%
2 fois par semaine	13	48%
1 fois par semaine	3	11%
2-3 fois par mois	1	4%
1 fois par mois	1	4%
<b>⇒ Moment de la journée pour le nettoyage des sols par aspiration ou balayage</b>		
Le matin avant l'occupation des bureaux	12	44%
Le soir après l'occupation des bureaux	12	44%
Dans la journée	10	37%
Variable	4	15%
<b>Nettoyage des sols avec des détergents, sprays, lingettes humides ou autres produits</b>		
Oui	26	90%
Non	3	10%
<b>⇒ Fréquence de nettoyage des sols par détergents</b>		
Tous les jours	3	12%
2 fois par semaine	17	65%
1 fois par semaine	4	15%
2-3 fois par mois	1	4%
1 fois par mois	1	4%
<b>⇒ Moment de la journée pour le nettoyage des sols par détergents</b>		
Le matin avant l'occupation des bureaux	13	50%
Le soir après l'occupation des bureaux	9	35%
Dans la journée	10	38%
Variable	4	15%
Autre	1	4%
<b>Fréquence de nettoyage approfondi (shampooinage des moquettes ou cirage)</b>		
1 fois par mois ou plus souvent	2	7%
1 fois tous les 3 mois ou plus souvent	1	3%
1 fois tous les 6 mois ou plus souvent	3	10%

Caractéristiques	n	%
1 fois par an ou plus souvent	5	17%
Moins souvent	10	34%
Jamais	5	17%
Ne sait pas	3	10%
<b>Nettoyage du mobilier à sec (chiffon)</b>		
Oui	<b>18</b>	62%
Non	9	31%
Ne sait pas	2	7%
<b>⇒ Fréquence de nettoyage du mobilier à sec</b>		
Tous les jours	5	28%
2 fois par semaine	5	28%
1 fois par semaine	3	17%
2-3 fois par mois	1	6%
1 fois par mois	4	22%
<b>⇒ Moment de la journée pour le nettoyage du mobilier à sec</b>		
Le matin avant l'occupation des bureaux	5	28%
Le soir après l'occupation des bureaux	11	61%
Dans la journée	5	28%
Variable	4	22%
<b>Nettoyage du mobilier par des détergents, sprays, lingettes humides ou autres produits</b>		
Oui	<b>21</b>	72%
Non	6	21%
Ne sait pas	2	7%
<b>⇒ Fréquence de nettoyage du mobilier par détergents</b>		
Tous les jours	4	19%
2 fois par semaine	11	52%
1 fois par semaine	3	14%
1 fois par mois	3	14%
<b>⇒ Moment de la journée pour le nettoyage du mobilier par détergents</b>		
Le matin avant l'occupation des bureaux	10	48%
Le soir après l'occupation des bureaux	7	33%
Dans la journée	7	33%
Variable	5	24%
Autre	1	5%
<b>Durant l'année précédente, y a-t-il eu des incidents concernant les rongeurs, cafards, fourmis ou autres insectes dans l'immeuble ?</b>		
Oui	<b>10</b>	34%
Non	19	66%
<b>⇒ Localisation des incidents</b>		
Dans les bureaux	7	70%
Au sous-sol ou dans les locaux techniques	7	70%
En extérieur	4	40%

Caractéristiques	n	%
<b>⇒ Traitement pesticides</b>		
Oui	6	60%
Non	3	30%
Ne sait pas	1	10%

Annexe 8. Description générale des espaces de bureaux étudiés (n = 106)

	n	P5	P25	P50	P75	P95	Moyenne	Ecart-type
<b>Surface (m<sup>2</sup>)</b>	103	10	12	18	36	60	25,8	18,8
<b>Hauteur sous plafond (m)</b>	105	2,5	2,5	2,7	2,8	3,5	2,7	0,3
<b>Nombre d'occupants en moyenne</b>	100	1,0	1,0	2,0	3,0	7,5	2,8	2,6

Annexe 9. Type de bureaux des espaces de bureaux étudiés (n = 106)

Caractéristiques	n	%
<b>Bureau paysager / open space</b>		
Oui	24	23%
Non	82	77%

Annexe 10. Revêtement des espaces de bureaux étudiés (n = 106)

Caractéristiques	n	%
<b>Revêtement de sol principal</b>		
Moquette	20	19%
Parquet ou à base de bois (stratifié)	8	8%
Revêtement synthétique (sol plastique)	71	67%
Peinture de sol ou résine	2	2%
Pierre ou carrelage	5	5%
<b>Âge du revêtement de sol principal</b>		
Moins d'un an	3	3%
Plus d'un an	93	88%
Ne sait pas	10	9%
<b>Revêtement(s) mural (muraux) occupant au moins toute une paroi</b>		
Papier peint	5	5%
Peinture	74	70%
Toile de verre	28	26%
Bois, lambris	5	5%
Liège	2	2%
Moquette/textile	0	0%
Pierre/béton	4	4%
Verre/plexiglas	13	12%

Caractéristiques	n	%
<b>Age du revêtement mural le plus récent</b>		
Moins d'un an	10	9%
Plus d'un an	86	81%
Ne sait pas	10	9%
<b>Matériau principal constituant le plafond ou faux-plafond</b>		
Béton/pierre	9	8%
Peinture	12	11%
Dalles de faux-plafond	77	73%
Bois, lambris	0	0%
Toile tendue	0	0%
Autre, préciser	8	8%
<b>Age du revêtement du plafond/faux-plafond</b>		
Moins d'un an	3	3%
Plus d'un an	92	87%
Ne sait pas	11	10%
<b>Traces de moisissures apparentes sur les surfaces</b>		
	2	2%
<b>Taches d'humidité sur les surfaces</b>		
	4	4%

Annexe 11. Aménagements et équipements des espaces de bureaux étudiés (n = 106)

Caractéristiques	n	%
<b>Nombre d'imprimantes</b>		
0	87	82%
1	18	17%
2	1	1%
<b>Nombre de photocopieuses</b>		
0	91	86%
1	12	11%
2 et plus	3	3%
<b>Y a-t-il dans la pièce les appareils/produits suivants :</b>		
Chauffage(s) d'appoint non électriques	9	8%
Humidificateur(s) mobile(s)	3	3%
Epurateur(s) d'air mobile(s)	0	0%
Diffuseur(s) de parfums	2	2%
Autres équipements	23	22%
<b>Tout ou partie du mobilier a-t-il été remplacé par du mobilier neuf au cours des 12 derniers mois ?</b>		
Oui	8	8%
Non	87	82%
Ne sait pas	11	10%
<b>Séparations entre les postes de travail à l'intérieur de la pièce (n = 9)</b>		
Tissu	2	22%
Panneaux de particules, bois, contreplaqué	6	67%

Caractéristiques	n	%
Métal	2	22%
Plastique	0	0%
Verre	2	22%
Autre	1	11%
<b>Plantes vertes (hors plantes artificielles)</b>		
Aucune	58	55%
Une ou deux	35	33%
Trois ou plus	13	12%

Annexe 12. Vitrages et ouvrants des espaces de bureaux étudiés (n = 106)

Caractéristiques	n	%
<b>Possibilité d'ouverture des fenêtres</b>		
Oui	87	82%
Non	19	18%
<b>Type de vitrages extérieurs</b>		
Simple	4	4%
Double	95	90%
Triple	2	2%
Pièce sans fenêtre	4	4%
Valeur manquante	1	1%
<b>Type de menuiseries extérieures</b>		
Bois	15	14%
PVC	24	23%
Aluminium	62	58%
Pièce sans fenêtre	4	4%
Valeur manquante	1	1%

Annexe 13. Activité ou utilisation d'équipements pendant la journée de prélèvements gazeux dans les espaces de bureaux étudiés (n = 106)

Caractéristiques	n	%
<b>Au cours de la journée de prélèvements gazeux :</b>		
Utilisation d'un insecticide	2	2%
Diffusion de parfum(s) d'ambiance	2	2%
Combustion d'encens et/ou de bougies	0	0%
Nettoyage des sols avec produits d'entretien	16	15%
Nettoyage des surfaces avec produits d'entretien	12	11%
Installation de nouveaux mobiliers	0	0%
Installation de nouveaux appareils de bureautique	0	0%
Utilisation d'un chauffage d'appoint non électrique	2	2%
Utilisation d'un épurateur d'air	0	0%
Utilisation d'un déshumidificateur d'air	0	0%
Vapotage	0	0%
Réalisation de travaux (peinture, ponçage, etc.)	0	0%
Autre activité ou autre équipement	3	3%

<b>Les fenêtres de la pièce donnant sur l'extérieur ont-elles été ouvertes au cours de la journée de prélèvements gazeux ?</b>		
Jamais	42	40%
Moins de 30min dans la journée	23	22%
Entre 30min et 1h dans la journée	15	14%
Plus d'1h dans la journée	8	8%
Pas d'ouvrant donnant sur l'extérieur	9	8%
Ne sait pas	9	8%

Annexe 14. Activité ou utilisation d'équipements au cours de la semaine de mesure dans les espaces de bureaux étudiés (n = 106)

<b>Caractéristiques</b>	<b>n</b>	<b>%</b>
<b>Au cours de la semaine de mesure :</b>		
Utilisation d'un insecticide	2	2%
Diffusion de parfum(s) d'ambiance	2	2%
Combustion d'encens et/ou de bougies	0	0%
Installation de nouveaux mobiliers	0	0%
Installation de nouveaux appareils de bureautique	0	0%
Utilisation d'un chauffage d'appoint non électrique	2	2%
Vapotage	0	0%
Réalisation de travaux (peinture, ponçage, etc.)	1	1%
Autre activité ou autre équipement	3	3%