

V2.2026

LIVRE VERT

DE LA CONSTRUCTION ET
RENOVATION SAINES AU LUXEMBOURG



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

Titre de la publication

Livre vert de la construction et rénovation saines au Luxembourg

Éditeur

Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg - Ministère de l'Économie
19-21, Boulevard Royal
L-2449 Luxembourg

Auteur

Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg

Layout

Neobuild GIE (Mme Sara VILLARD)

Juillet 2026



AVANT-PROPOS

Le présent livre vert reflète l'expérience acquise au cours de vingt ans d'expertise professionnelle lors de l'analyse et des mesurages de plus de 4'500 bâtiments au Luxembourg en relation avec des troubles de santé des occupants ainsi que l'expérience d'une douzaine de constructions « saines », tant dans la construction conventionnelle que dans les constructions passives, que ce soit dans le domaine fonctionnel (lieux de travail) ou dans le secteur résidentiel (habitations, logement).

Le présent livre vert se subdivise en 4 parties distinctes. Dans une première **partie A**, le livre vert documente l'importance du sujet à travers le rôle qu'exercent les polluants typiques de la construction sur la santé des occupants et sur l'environnement mais aussi sur un plan socio-économique et met en évidence la nécessité d'une politique de construction saine. La deuxième **partie B** définit et illustre la qualité de l'air intérieur et analyse les différents outils mis en place à l'échelle internationale pour améliorer celle-ci. La troisième **partie C** décrit les instruments élaborés par le ministère de l'Économie du Luxembourg (cellule de la construction durable) dans le cadre de sa stratégie de construction saine et de santé dans le bâtiment. Enfin la dernière **partie D** reprend les annexes techniques relatives à cette stratégie.

Cette version 2.0 date de 2026. Elle intègre certains nouveaux paramètres de facteurs polluants présents dans les environnements intérieurs tels que la lumière artificielle, le bruit et les PFAS - un groupe de polluants à base de fluor appelés « polluants éternels ». Elle tient également compte des évolutions récentes du cadre réglementaire, notamment de la refonte de la directive sur la performance énergétique des bâtiments, de la liste européenne des polluants dans les matériaux EU-LCI ainsi que des aides aux communes en matière de « construction saine ». Finalement, les procédures à suivre en matière d'inventaires-santé concernant le réemploi, l'achat ou la rénovation de bâtiments ou en cas d'incendie viennent compléter cette édition 2.0.

Ralph BADEN

Auteur

Biologiste MSc, Biologiste de l'habitat (Baubiologe)

Expert « qualité de l'air intérieur » et « santé » en rapport avec la construction durable

*Many agencies, professional groups
and organizations have taken actions to reduce indoor pollution,
but these have been limited and are not sufficiently effective in
preventing indoor air pollution”*

Report to the California Legislature : Indoor air pollution in California,
California Air Resources Board, 2005

*“There is no comprehensive program to protect air quality within
residences, schools or public and private buildings”*

California Air Resources Board, 2005

*“...insufficient information exists for health
assessment of 95 % of chemicals that are used to a significant extent in
construction products ...”*

Pacheco-Torgal, University of Minho, Portugal, 2016

*“...indoor air quality must be in the center of eco-efficient
building design...”*

Pacheco-Torgal, University of Minho, Portugal, 2016

ABRÉVIATIONS

MECO - Ministère de l'Économie

BREATHE - Building Related Environment Air & Health

CLAIRE - Clean Air & Environment

H₂E - Healthy Home Experts

LAB² - Luxembourg Association Building Biologists (Biologistes des Bâtiments / BauBiologen)

AAA - Association Assurances Accidents

ABP - Administration des Bâtiments Publics

ASHRAE - American association of heating, refrigerating and air-conditioning engineers

BDE - Brominated Diphenylethers, diphényléthers polybromés

BPCO - BronchoPneumopathie Chronique Obstructive / Chronic Obstructive

COPD - Pulmonary Disease

BREATHE - Building Related Environment Air & Health

BRI - Building Related Illness

CARB - California Air Ressources Board

CCT - Correlated Color Temperature

CEM - Champ ElectroMagnétique

CEM-BF - CEM-Basses Fréquences

CEM- HF - CEM-Hautes Fréquences

CFS - Chronic Fatigue Syndrom

CIRC - Comité International de Recherche sur le Cancer (cf. IARC)

CLAIRE - Clean Air & Environment

CLP - Classification, Labelling and Packaging (CLP) Regulation ((EC) No 1272/2008

CMEI - Conseiller Médical en Environnement de l'Intérieur (France)

CMR - Cancérigène, Mutagène, Reprotoxique

CPD - Construction Products Directive 89/106/EEC

CRI - Color Rendering Index

CRTI-B - Centre de Ressources des Technologies et de l'Innovation pour le Bâtiment

DALY - Disability Adjusted Life Year

DDT - Dichlordiphenyltrichloréthane

DPEB - Directive sur la Performance Energétique des Bâtiments

DEHP - Di-(Ethyl-hexyl) - Phtalate

ECHA - European Chemicals Agency

EHS - ElectroHyperSensitivity

ELD - Energy Labelling Directive 92/75/EEC

ELF	- Extremely Low Frequencies
EPA	- Environmental Protection Agency
EPBD	- Energy Performance of Buildings Directive
EU-LCI	- European List of “Lowest concentration of Interest” values
EuSANH	- European Science Advisory Network for Health
FDS	- Fiche de données de sécurité
GPSD	- General Product Safety Directive 2001/95/EC
H₂E	- Healthy Home Experts
HERVE	- Hygiene Entretien Regulation et Règlementation des Ventilations Mécaniques
HOPE	- Health Optimisation Protocol for Energy-efficient buildings
IAQ/QAI	- Indoor Air Quality / Qualité de l’Air Intérieur
IARC / CIRC	- International Agency for Research on Cancer / Comité International de Recherche sur le Cancer
IEI-CEM	- Intolérance Environnementale Idiopathique attribuée aux Champs ÉlectroMagnétiques
SICEM	- Syndrome d’Intolérance aux Champs Électromagnétiques
ILNAS	- Institut Luxembourgeois de la Normalisation, de l’Accréditation, de la Sécurité et qualité des produits et services
LAB²	- Luxembourg Association Building Biologists (Biologistes des Bâtiments / BauBiologen)
LCI	- Lowest Concentration of Interest
LENOZ	- LEtzebuerger NOhaltegekeets Zertifizeierung
MCS	- Multiple Chemical Sensibility
MEA	- Ministère de l’Energie et de l’Aménagement du territoire
MECDD	- Ministère de l’Environnement du Climat et du Développement Durable
MIT	- Massachussetts Institute of Technology
NTP	- National Toxicology Program
OMS	- Organisation Mondiale de la Santé
ONG	- Organisation Non Gouvernementale
OR	- Odds Ratio
PBT	- Persistent Bioaccumulable Toxic
PCB	- Polychlorated Biphenyls, Biphenyles Polychlorés
PCP	- Pentachlorophenol
PE	- Perturbateur Endocrinien
PNEC	- Plan National Environnement Climat
POP	- Persistent Organic Pollutants
PVC	- Polyvinylchloride
QEI	- Qualité de l’Environnement Intérieur
RDI	- Research Development and Innovation
REACH	- Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals Regulation (EC) No 1907/2006

RF - Retardateurs de Flamme

RPB - Règlement européen relatif aux produits biocides

SBS / SBM - Sick building Syndrome, Syndrome du Bâtiment Malsain

SCENIHR - Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks

SVHC - Substances of Very High Concern

TDHA - Trouble de Déficit de l'Attention avec Hyperactivité

ADD - Attention Deficit Disorder

ADS - Aufmerksamkeits Defizit Syndrom

ADHS - Aufmerksamkeits Defizit Hyperaktivitäts Störung

US - United States of America

VDB - Verein Deutscher Baubiologen

VMC - Ventilation mécanique contrôlée

VO - Valeur d'Orientation

vPvB - very Persistent very Bioaccumulable

WOE - Weight Of Evidence

LISTE DES TABLEAUX

- T 1** - Tableau récapitulatif du nombre de polluants cancérigènes « indoor » (2018)
- T 2** - Substances cancérogènes des bâtiments fonctionnels et résidentiels au Luxembourg
- T 3** - Leucémies infantiles et facteurs environnementaux – Conseil Santé néerlandais, Conseil Supérieur de Santé Belge, EuSANH 2012
- T 4** - Agents chimiques typiques pouvant induire des effets neurologiques ou neurotoxiques selon Daunderer et Grandjean
- T 5** - Contamination des sédiments à différents endroits de trois fleuves allemands par différents RF organophosphorés (Metzger, 2001)
- T 6** - Différence des concentrations en RF organophosphorés dans les affluents et effluents des stations d'épuration (Metzger, 2001)
- T 7** - Facteurs influençant le SBS d'après une méta-étude du « Center for Building Performance and Diagnosis » du MIT (Loftness, 2006)
- T 8** - Exemples de coûts d'assainissement de bâtiments contaminés au Luxembourg (Baden, non publié)
- T 9** - Nombre d'heures de formation requises pour les spécialistes en Finlande (Metiäinen, 2016)
- T 10** - Tableau des fréquences
- T 11** - Récapitulatif des paramètres pris en compte et mesurés ou analysés
- T 12** - Facteurs chimiques par famille de polluants
- T 13** - Facteurs chimiques
- T 14** - Facteurs biologiques
- T 15** - Facteurs physiques
- T 16** - VMC
- T 17** - Exemples d'intensités et de températures typiques de certaines situations
- T 18** - Température de couleur
- T 19** - Exemples d'intensités typiques de certaines sources de bruit
- T 20** - Valeurs limites des bruits extérieurs
- T 21** - Description de 13 bâtiments construits d'après des critères de santé ou d'écologie
- T 22** - Analyses de laboratoire des matériaux de construction
- T 23** - Analyses de laboratoire des matériaux de construction
- T 24** - Corrélation entre analyses laboratoire et FDS
- T 25** - Labels des matériaux analysés en laboratoire
- T 26** - Mesures de routine dans un bâtiment fonctionnel à Copenhague
- T 27** - Comparatif des seuils appliqués dans différents pays
- T 28** - Analyses et mesures de routine dans un bâtiment fonctionnel à Copenhague

LISTE DES FIGURES

- F 1** - Monitoring du CO₂ dans une chambre à coucher en fonction du nombre d'occupants (Baden, 2022)
- F 2** - Incidence annuelle de cancers en Californie (CARB, 2005)
- F 3** - Classification des locaux luxembourgeois analysés selon la présence de contaminants chimiques cancérigènes – CIRC (Baden, 2015)
- F 4** - Incidence de symptômes neurologiques en fonction de la concentration de contaminants peu volatils (biocides, pyréthrinoides, RF organophosphorés dans poussières 7 jours ; n = 340)
- F 5** - Risque de développer de l'asthme en fonction des concentrations de DEHP dans les poussières (µg/g) selon Bornehag 2004
- F 6** - Distribution des retardateurs de flamme dans la Ruhr à Essen-Relinghausen en 2014 (Lawa, 2016)
- F 7** - Distribution des retardateurs de flamme dans les bâtiments au Luxembourg 2009-2015 (Baden)
- F 8** - Bénéfices économiques en relation avec la qualité de l'environnement intérieur (Orisakwe, 2012 adapted from Fisk, 2000)
- F 9** - Les principaux symptômes de morbidité associées à la qualité de l'air intérieur (Jantunen, 2011)
- F 10** - États-Membres européens selon leur morbidité imputable aux expositions de sources « indoor » (Jantunen, 2011)
- F 11** - Potentiel d'économie en DALY/an au bout de 10 ans pour l'UE-26 par les 10 mesures proposées (Jantunen, 2011)
- F 12** - Présence de polluants dans les bâtiments luxembourgeois analysés entre 2009 et 2015 (résultats positifs > limite de détection) (Baden, 2017)
- F 13** - Comparaison des différents seuils limites pour le formaldéhyde
- F 14** - Exemples de résultats dose-réponse des différentes études consultées selon Vandenberg (2012)
- F 15** - Classement des matériaux de construction selon les résultats des analyses de laboratoire (n=107)
- F 16** - Classement des matériaux labellisés selon les résultats des analyses de laboratoire (n=83)
- F 17** - Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives détectées en préanalyse ou en analyse de laboratoire
- F 18** - Logo de la liste positive CLAIRE
- F 19** - Logo de la certification BREATHE
- F 20** - Spectre lumineux
- F 21** - Logo de l'accréditation H₂E
- F 22** - Logo LAB²
- F 23** - Diagramme comparant les taux de pollution de bâtiments conventionnels ou passifs à des bâtiments construits selon les principes de construction saine du présent livre vert (box-plot)
- F 24** - Boîte métallique pour envoi des échantillons liquides ou en poudre
- F 25** - Dispositif d'analyse des émissions en substances volatiles provenant de matériaux de construction

- F 26** - Classement des matériaux de construction selon les résultats des analyses de laboratoire (n=107)
- F 27** - Polluants détectés par les analyses, non mentionnés dans la FDS (classés par fréquence)
- F 28** - Classement des matériaux (en %) selon...
- F 29** - Vérification de la classification FDS par les analyses laboratoire (nombre d'échantillons)
- F 30** - Classification des matériaux suivant origine. Les chiffres dans les barres indiquent le nombre absolu
- F 31** - Classement des matériaux labellisés selon les résultats des analyses de laboratoire (n=89)
- F 32** - Comparaison des produits non-labellisés et labellisés selon les analyses de laboratoires CLAIRE (nombre)
- F 33** - Comparaison des produits non-labellisés et labellisés selon les analyses de laboratoire CLAIRE (%)
- F 34** - Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives détectées en analyse de laboratoire
- F 35** - Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives identifiées en préanalyse
- F 36** - Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives détectées en préanalyse ou en analyse de laboratoire
- F 37** - Fonctionnement du puisard à radon
- F 38** - Puisard
- F 39** - Puisard installé à Beckerich
- F 40** - Effets de santé du CO₂ (Kälte- und Klimaschutz GmbH, Hambourg)
- F 41** - Association entre CO₂ et effets physiologiques (Fisk, 2019)
- F 42** - Association entre CO₂ et effets de perception (Fisk, 2019)
- F 43** - Concentrations en CO₂ : bâtiment fonctionnel à Copenhague
- F 44** - Concentrations en formaldéhyde : bâtiment fonctionnel à Copenhague
- F 45** - Concentrations en COV : bâtiment fonctionnel à Copenhague
- F 46** - Concentrations en PM₁₀ : bâtiment fonctionnel à Copenhague
- F 47** - Corrélations entre différents polluants et le CO₂ (Ramahlo, 2015)
- F 48** - Corrélation entre les particules fines PM_{2,5} et le taux de CO₂ lors de mesures dans de nombreux locaux (Huang, 2021)
- F 49** - Novel Computational tool for indoor air quality (Siilin, 2023)
- F 50** - Évolution du CO₂ extérieur des dernières 400.000 années
- F 51** - Diagramme « Keeling » de la station de mesure Mauna Loa
- F 52** - Novel Computational tool for indoor air quality (Siilin, 2023)
- F 53** - Émissions de différents polluants en fonction des taux de ventilation (Caron, INRS, 2020)
- F 54** - Impact de la ventilation sur la qualité de l'air dans un magasin de sport (Robert, 2018)
- F 55** - Émissions de polluants organiques (COV) en fonction de la ventilation dans des maisons nouvelles aux U.S.A. (Offermann, 2017)
- F 56** - Croquis illustrant la disposition des tables du restaurant et la circulation de l'air de la climatisation sur le lieu de l'épidémie coronavirus de 2019 (Lu et al, 2020)

LISTE DES UNITÉS

Bq/m³ - Becquerel par mètre cube (radioactivité)

CFU/m³ - Colony forming units par cubic meter (molds)

dB (A) - Décibels (bruit)

lx - Lux (lumière)

ppm - Parties par million (« parts per million »)

µg - Microgrammes

µT, nT - Microtesla, Nanotesla (champ magnétique)

UFC/m³ - Unités formant des colonies par mètre cube (moisissures)

°K - Degrès Kelvin (lumière)

% RH - Humidité relative de l'air

V/m - Volts par mètre (champ électrique)

TABLE DES MATIÈRES

ABRÉVIATIONS	1
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES UNITÉS	7
PARTIE A	13
Polluants dans la construction – impacts sanitaires, socio-économiques et environnementaux	13
I. Introduction	13
I.1. Santé et environnement, un droit.....	13
I.2. Le bâtiment passif et la santé ?	19
II. Effets de santé	22
II.1. Données scientifiques et réglementations concernant les aspects de santé	22
II.2. Cancérogénicité	24
II.2.1. Classifications existantes	24
II.2.2. Études de cas	28
II.2.3. Conclusions	31
II.3. Perturbateurs endocriniens	31
II.4. Neurotoxiques développementaux.....	33
II.5. Symptômes neurologiques ou effets neurotoxique.....	34
II.6. Maladies neurodégénératives	36
II.7. Maladies auto-immunes	36
II.8. Allergies et asthme	36
II.9. Irritations des muqueuses, de la peau et troubles respiratoires	37
II.10. Symptomatologies nouvelles ou émergentes	38
II.11. Maladies professionnelles	42
II.12. Glossaire des substances nocives.....	44
II.12.1. Agents chimiques	44
II.12.2. Agents microbiologiques	50
II.12.3. Agents physiques.....	51
III. Impacts environnementaux et économiques	54
III.1. Impact sur l'environnement extérieur	54
III.2. Coûts économiques liés aux maladies	58
III.3. Coûts des assainissements	60
PARTIE B.....	62
Qualité de l'air et construction saine	62
IV. Qualité de l'air intérieur	62

IV.1. La qualité de l'air intérieur selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).....	62
IV.2. La qualité de l'air intérieur selon la Commission Européenne	62
IV.3 : La qualité de l'air intérieur au Luxembourg : analyses dans le bâti.....	66
V. Les outils à disposition	68
V.1. Les valeurs limites ou seuils	68
V.2. Limites des études scientifiques dans l'évaluation des effets nocifs des polluants chimiques et autres en relation avec la construction	70
V.2.1. Effets de santé à court terme, à moyen terme, à long terme	71
V.2.2. Toxicité et nocivité	71
V.2.3. Effets synergiques et cocktail d'exposition	72
V.2.4. Bioaccumulation	72
V.2.5. Décalage ou écart temporel entre expositions et symptômes.....	72
V.2.6. Relation cause à effet non linéaire	73
V.2.7. Sensibilité individuelle	73
V.3. Principe de précaution et prévention	74
VI. Exemples de stratégies internationales en matière de construction saine	75
VI.1. Expérience aux Etats-Unis : « Indoor Air Pollution in California » le rapport du “California Air Resources Board », 2005	75
VI.2. Expérience du Canada : le standard canadien « R-2000 »	77
VI.3. Expérience de la France : le guide « construire sain » à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation	77
VI.4. Expérience de la Suède : « SundaHus »	78
VI.5. Expérience de la Finlande : “Certified Indoor Environment Specialists » et « guidelines for Indoor air quality » par le gouvernement (ministère des affaires sociales et de la santé 545/2015)	79
VI.6. VDB-Zert en Allemagne	79
VI.7. L'expérience de l'Administration des Bâtiments Publics au Luxembourg	80
PARTIE C.....	81
Les outils luxembourgeois relatifs à la construction saine	81
VII. Le modèle de « construction saine » luxembourgeois	81
VII.1. La construction « saine » selon les règles de l'art.....	81
VII.1.1. Planification générale	82
VII.1.2. Installation électrique biologique	82
VII.1.3. Ventilation mécanique contrôlée	83
VII.2. Banque de données « matériaux et produits de construction sains » (liste positive) CLAIRE.....	86
VII.2.1. Étude pilote	88
VII.2.2. Concept CLAIRE : analyse des matériaux/produits de construction.....	91
VII.2.3. Élaboration de la banque de données	92

VII.3. Certification « santé » de la construction, contrôles après achèvement de la construction (BREATHE)	94
VII.3.1. Analyses chimiques	95
VII.3.2. Monitoring du CO et du CO ₂	96
VII.3.3. Monitoring du radon (Bq/m ³)	97
VII.3.4. Analyses mycologiques (UFC/m ³)	97
VII.3.5. Mesurages de ponts thermiques (hiver)	97
VII.3.6. Monitoring de l'humidité relative de l'air (% RH)	98
VII.3.7. Mesurages de champs électromagnétiques (CEM-BF & CEM-HF)	98
VII.3.8. Mesurages de la vitesse (m/s) et des débits d'air (m ³ /h) de la ventilation mécanique	100
VII.3.9. Contrôle de l'encrassement des composantes de la ventilation mécanique	100
VII.3.10. Contrôle du carnet d'entretien et du contrat d'entretien de la ventilation mécanique	100
VII.3.11. La certification BREATHE (Building Related Environment Air + Health)	101
VII.4. Agrément H ₂ E (Healthy Home Experts)	109
VII.4.1. Inventaire « santé » accompagnant l'achat ou la location d'un immeuble	111
VII.4.2. Inventaire « polluants » à la suite d'un incendie	111
VII.4.3. Conseil en construction saine	112
VII.4.4. Réemploi	113
VII.5. Ordre professionnel « Luxembourg Association of Building Biologists - LAB ² »	114
VII.6. Formation information, sensibilisation	115
VII.7. Recherche, Développement, Innovation (RDI)	115
VII.8. Intégration des critères de santé dans le guide pratique des aides communales dans le cadre du FCE « Klimabonus » (version 2025)	115
VII.9. Intégration des critères de santé dans les instruments « LENOZ » et « PRIMEHouse » 2.0	116
VII.10. Intégration des critères de santé dans les instruments de certification de bâtiments fonctionnels	117
VII.11. Guide de la construction et de la rénovation durables du CRTI-B	117
VIII. Retour d'expérience au Luxembourg	117
IX. Conclusion	120
Partie D	121
Liste CLAIRE	121
Liste BREATHE	132
Partie E	144
Annexes	144
Annexe A1 : Mode opératoire de la base de données CLAIRE	144
A1.1. Préanalyse	144
A1.2. Analyses de matériaux de construction	144

A1.2.1. Préparation et envoi	144
A1.2.2. Préparation au laboratoire	145
A1.2.3. Analyse de laboratoire	145
A1.3. Interprétation des résultats d'analyse	146
A1.3.1. Seuils et valeurs d'orientation.....	146
A1.3.2. Classification santé des substances chimiques, matériaux et produits de construction	147
Annexe A2 : Projet Pilote liste positive CLAIRE (CLEAN AIR & ENVIRONMENT).....	149
A2.1. Échantillonnage.....	152
A2.1.1. Analyse de marché par Neobuild.....	152
A2.1.2. Sélection de matériaux	152
A2.1.3. Préanalyse.....	153
A2.1.4. Analyses de matériaux de construction	153
A2.2. Classification santé des substances chimiques.....	156
A2.3. Classification du matériau analysé.....	156
A2.4. Banque de données / liste positive.....	157
A2.5. Analyses et fiches de sécurité et/ou DEP.....	158
A2.5. Comparaison des résultats d'analyse des matériaux biosourcés	161
A2.6. Comparaison des résultats d'analyse des matériaux labellisés ou non labellisés par des labels indépendants.....	161
A2.7. Comparaison des résultats d'analyses par rapport à chaque « label »	163
A2.8. Évaluation des résultats d'analyses en fonction de l'attribution des labels internationaux	166
A2.9. Évaluation des résultats de préanalyses en fonction de l'attribution des labels internationaux....	166
A2.10. Évaluation des matériaux de construction portant des labels internationaux dans le cadre de l'étude-pilote.....	167
Annexe A3 : Factsheet : radon (Rn)	169
Annexe A4 : CO₂ - Qualité de l'air intérieur et ventilation.....	174
A4.1. Qualité d'air intérieur et santé.....	175
A4.2. Qualité d'air intérieur et CO ₂	176
A4.2.1. CO ₂ ou dioxyde de carbone	176
A4.2.2. Effets de santé propres au CO ₂	177
A4.2.3. Effets du CO ₂ sur la performance	179
A4.2.4. CO ₂ indicateur de qualité de l'air intérieur (« Leitparameter »)	180
A4.2.5. Les normes et recommandations en termes de concentrations en CO ₂	185
A4.3 Qualité d'air et ventilation	190
A4.3.1. Influence du taux de ventilation sur la qualité d'air intérieur	190
A4.3.2. Qualité d'air, ventilations et infections biologiques virales ou bactériales	194

A4.4. Conclusions sur la qualité de l'air.....	195
A4.5. Autres considérations complémentaires	196
A4.6. Recommandations pour les bâtiments publics.....	197
Annexe A5 : Recommandation hygiéniques relatives à la ventilation mécanique (Peter KVAS, Ing. Dipl. FH)	199
Littérature.....	210

PARTIE A

Polluants dans la construction – impacts sanitaires, socio-économiques et environnementaux

I. Introduction

Dans les pays industrialisés, l'homme passe de l'ordre de 80 à 90 pourcents de son temps à l'intérieur (ASHRAE, 2010, Al Horr, 2016). Plus de la moitié des adultes passent leur temps sur des lieux de travail non industriels, par exemple dans des bureaux. De même, nos enfants passent une grande partie de leur temps dans les écoles et respirent l'air intérieur de ces bâtiments. Des troubles de santé et de bien-être relatifs à l'environnement intérieur sont fréquents et peuvent avoir un impact substantiel sur la santé humaine. En effet, même si les concentrations de substances nocives sont moins élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur, le temps d'exposition est nettement plus élevé à l'intérieur et donc les doses d'exposition sont de loin plus importantes.

I.1. Santé et environnement, un droit

Selon la constitution de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 1946), la santé est « un état complet de bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité ». Elle représente « l'un des droits fondamentaux de tout être humain, quelles que soit sa race, sa religion, ses opinions politiques, sa condition économique ou sociale ».

La santé environnementale comprend « les aspects de la santé humaine, y compris la qualité de la vie, qui sont déterminés par les facteurs physiques, chimiques, biologiques, sociaux, psychosociaux et esthétiques de notre environnement » (OMS déclaration d'Helsinki 1994).

La santé environnementale, définie donc pour la première fois à la fin du XXe siècle, désigne « ...le champ commun aux hypothèses, connaissances et théories prospectives portant sur les relations possibles entre les variables environnementales (facteurs biogéographiques, pollutions et nuisances environnementales...) mais aussi sur les facteurs concernant la qualité de l'alimentation, de l'environnement intérieur (air, bruit, champ électromagnétique, radioactivité...) et de travail (exposition à des toxiques, une fatigue anormale ou à des facteurs spécifiques de stress)... ».

La santé constituant par conséquent un droit fondamental d'une part et l'environnement intérieur étant reconnu comme un facteur de la santé (environnementale) d'autre part, il est donc tout à fait logique qu'un environnement intérieur « sain » constitue par extrapolation également un droit fondamental.

En 1989, les Ministres de l'environnement et de la santé des Etats membres de l'OMS-Europe, auquel le Luxembourg appartient, se sont réunis pour signer la charte européenne de l'environnement et de la santé (OMS 1989), toujours en vigueur aujourd'hui. Cette charte n'est pas réglementaire mais fait intervenir la responsabilité des Etats signataires. Ils doivent veiller à ce que chacun puisse « bénéficier d'un environnement permettant la réalisation du niveau le plus élevé possible de santé et de bien-être ».

L'Organisation Mondiale de la Santé OMS a édité en 2000 un rapport « The Right to Healthy Indoor air » stipulant que chaque individu a le droit à un environnement intérieur sain, non seulement en ce qui concerne les effets à court terme mais également à long terme.

Cette déclaration se base sur 9 principes fondamentaux :

P1 : « HUMAN RIGHT TO HEALTH »

Chacun a le droit de respirer de l'air intérieur sain.

Commentaire de l'OMS : La qualité de l'air intérieur ne concerne pas seulement la santé mais également la qualité de vie.

P2 : « SELF-DETERMINATION »

Chacun a le droit à l'information adéquate concernant des expositions potentiellement nocives ou nuisibles.

Commentaire : Chacun a le droit d'exiger que les autres respectent son jugement individuel concernant sa propre évaluation en matière d'exposition personnelle et des effets relatifs. Chacun devrait avoir, à un certain degré, son contrôle personnel quant à son environnement intérieur et à sa qualité d'air intérieur. Les autorités publiques devraient recommander des standards minima.

P3 : « DOING NO HARM »

Aucun agent susceptible d'exposer les occupants à un risque de santé non nécessaire ne devrait être introduit dans l'air intérieur.

Commentaire : L'ignorance sur les sujets concernant la qualité de l'air intérieur n'est pas une excuse pour causer du mal.

P4 : « DOING GOOD »

Toute organisation, association, tout groupe ou individu (privé, public ou gouvernemental) associé à la construction et au bâtiment est responsable de préconiser ou d'assurer une qualité de l'air intérieur acceptable pour les occupants.

Commentaire : Ceux qui fournissent, entretiennent ou occupent des environnements intérieurs ont la responsabilité de promouvoir une bonne qualité de l'air intérieur. En cas de risque convainquant en matière de risques sanitaires en relation avec des expositions à l'air intérieur, les autorités compétentes doivent organiser ou initier des actions visant à éviter ou éliminer ces expositions.

P5 : JUSTICE SOCIALE

Le statut socioéconomique des occupants ne doit en rien influencer leur accès à un air intérieur sain.

Commentaire : Toutes les minorités (y compris les groupes sensibles ou vulnérables) ont les mêmes droits à la protection que la population générale.

P6 : RESPONSABILITE – ACCOUNTABILITY

Les organisations pertinentes doivent établir des critères explicites pour l'évaluation et l'accès à la qualité de l'air des bâtiments.

Commentaire : Non seulement les lois et règlements, mais également tous les standards ou lignes directrices (« guidelines ») devraient être appliqués et suivis. Les autorités gouvernementales doivent développer et

adopter des indicateurs d'une qualité de l'air intérieur saine et les rendre accessibles à la population entière. Ces indicateurs doivent inclure l'exposition et l'évaluation des risques des polluants intérieurs. Les gouvernements ont une obligation en matière de recherche et d'information quant aux risques. Les outils d'information concernent les standards d'application, les codes de construction, les prix, les standards de produits consommables et les labels ou encore des contrôles de qualité de l'air intérieur.

P7 : PRINCIPE DE PRÉCAUTION

L'incertitude ne doit pas constituer une raison pour reporter des mesures rentables visant à éviter une exposition.

Commentaire : La prévention est meilleure que la restitution, la réduction ou la restauration non seulement en termes de santé mais également d'un point de vue rentabilité économique. Mieux vaut prévenir que guérir.

P8 : POLLUEUR PAYEUR

Le pollueur est responsable pour toute atteinte à la santé et au bien-être résultant d'une exposition à un air intérieur malsain. Cette responsabilité couvre également la mise en œuvre des actions de réduction des sources de pollution et des mesures d'assainissement requises.

Commentaire : Les arguments économiques, opérationnels ou administratifs sont insuffisants pour ne pas devenir actif contre la pollution de l'air intérieur.

P9 : DURABILITÉ

La santé et l'environnement ne doivent pas être séparés.

En 2022 les Nations Unies ont adopté une résolution sur le droit à un environnement propre sain et durable¹. Selon cette résolution, l'Assemblée générale du 28 juillet 2022 :

1. Considère que le droit à un environnement propre, sain et durable fait partie des droits humains,
2. Constate que le droit à un environnement propre, sain et durable est lié à d'autres droits et au droit international existant,
3. Affirme que la promotion du droit à un environnement propre, sain et durable passe par l'application pleine et entière des accords multilatéraux relatifs à l'environnement, conformément aux principes du droit international de l'environnement,
4. Engage les États, les organisations internationales, les entreprises et les autres acteurs concernés à adopter des politiques, à améliorer la coopération internationale, à renforcer les capacités et à continuer de mettre en commun les bonnes pratiques afin d'intensifier les efforts visant à garantir un environnement.

En septembre 2025 les Nations Unies ont finalement lancé leur « engagement mondial pour un air intérieur sain » ou « global pledge for healthy indoor air »², le premier engagement international reconnaissant un air intérieur sain comme un droit humain.

¹ The human right to a clean, healthy and sustainable environment: resolution adopted by the General Assembly 28 July 2022 UN. General Assembly (76th sess.:2021-2022) <https://digitallibrary.un.org/record/3983329/?v=pdf>

² <https://pandemics.sph.brown.edu/sites/default/files/pdfs/GlobalPledge.pdf>

Les signataires plus de 240 institutions en avril 2026 dont 2 gouvernements (France et Monténégro) s'engagent à :

- Reconnaître l'importance d'un air intérieur sain (« recognize the importance of healthy indoor air to »)
 - Pour respecter les droits humains (« uphold human rights ») comme l'accès à l'air sain et à l'eau saine sont considérés des droits fondamentaux par les Nations Unies depuis 2022
 - Sauvegarder la santé pour tous (« safeguard health for all ») à court et à long terme
 - Améliorer la préparation aux pandémies (« enhance pandemic preparedness ») étant donné que les maladies vectorielles sont surtout transmises dans l'environnement intérieur
 - Renforcer la résilience de l'environnement bâti face au changement climatique (« uplift resilience of the built environment to climate change »)
 - Assurer la santé dans les milieux de travail (« ensure workplace health safety ») en protégeant les travailleurs contre les risques biologiques et les polluants
 - Améliorer l'accessibilité et les soins pour tous (« improve accessibility and care for all »)
- Donner la priorité à la qualité de l'air intérieur et plaider en faveur de mesures concrètes dans ce domaine (« prioritize and advocate for action on indoor air quality »)
- Appeler à la collaboration au-delà des secteurs et des frontières (« collaborate across sectors and borders ») incluant les gouvernements, les organisations non-gouvernementales et le secteur privé
- Partager les réussites et les défis (« share successes and challenges ») sur les actions en matière d'air intérieur sain
- Sensibiliser et responsabiliser le public (« educate and empower the public ») sur l'importance d'un air intérieur sain
- Introduire de nouveaux acteurs et partenaires (« introduce new stakeholders ») afin de renforcer le mouvement et d'accélérer le processus
- De se rassembler (« reconvene ») afin de partager les progrès vers un air intérieur sain

Commentaire : Assurer un air intérieur sain en favorisant la minimisation des impacts environnementaux, contribue à la durabilité. Les programmes publics de santé et d'énergie devraient ainsi être coordonnés.

En conséquence, le Ministère de la Santé luxembourgeois a dès 1994 commencé à développer un service de santé environnementale qui a été plus tard, en 2008 intégré au sein d'une « division de la santé au travail et de l'environnement » et dont la vocation est notamment de faire des prélèvements et mesurages dans les bâtiments résidentiels luxembourgeois dont les occupants souffrent de troubles de santé attribuables au bâtiment.

Il est donc conséquent que le gouvernement, à travers le ministère du logement, s'est donné une loi relative aux critères de salubrité, d'hygiène, de sécurité et d'habitabilité des logements en décembre 2019 qui inclut « expressis verbis », la nocivité des murs et de l'air, l'humidité, la ventilation en stipulant dans le règlement grand-ducal y relatif qu'aucun logement ne peut présenter une contamination de l'air ou des poussières par des contaminants chimiques, des facteurs physiques ou des contaminations par des microorganismes (moisissures)³.

³ MÉMORIAL A - N° 882 du 23 décembre 2019

Loi du 20 décembre 2019 relative aux critères de salubrité, d'hygiène, de sécurité et d'habitabilité

MÉMORIAL A - N° 883 du 23 décembre 2019

Règlement grand-ducal du 20 décembre 2019 déterminant les critères minimaux de salubrité, d'hygiène, de sécurité et d'habitabilité auxquels doivent répondre les logements et chambres donnés en location ou mis à disposition à des fins d'habitation.

De même, le ministère de la famille et de l'intégration prévoyait dès 2013⁴ que les maisons relais devaient être choisies, construites et équipées de sorte que les enfants ne soient pas exposés à des nuisances telles que bruits excessifs, odeurs ou émanations nocives et que les locaux devaient être bien aérés. La même exigence avait été formulée en 2011 au sujet des infrastructures recueillant les enfants, jeunes adultes et famille en détresse⁵.

Déjà en 1998, l'État avait stipulé dans une loi⁶ que les organismes œuvrant dans les domaines social, familial et thérapeutique devaient ... « disposer d'immeubles, de locaux ou de toute autre infrastructure correspondant tant aux normes minima de salubrité et de sécurité qu'aux besoins des usagers ».

Au bout de longues années d'expérience quant à des investigations de bâtiments aussi bien fonctionnels que résidentiels au Luxembourg et à l'étranger suite à des plaintes de troubles de santé des occupants, nous disposons désormais de suffisamment de recul pour pouvoir dresser un constat représentatif sur le degré de contamination de l'air intérieur, de la nature et des concentrations des différents polluants tant chimiques que microbiologiques ou physiques et de leur provenance, donc des sources de pollution internes. Il s'agit donc désormais de passer à l'étape suivante, à savoir la précaution sanitaire et donc la prévention dans la construction ou la rénovation.

C'est une des conclusions du rapport de **l'étude Rifkin** présenté en novembre 2016 (Rifkin, 2016) à la suite de la demande du gouvernement luxembourgeois concernant le bâtiment :

"Luxembourg is also emphasizing the need to ensure a high quality of life in the future by ensuring that buildings assist in providing a healthy and sound environment for the occupants. The Built Environment Working Group emphasizes that quality of life depends, at least in part, on the construction material."

et ...

"Building as comfortable places to live : Protection against uncomfortable temperatures, noise, polluted air, heavy daylight".

Le gouvernement précédent a retenu dans son **accord de coalition 2018-2023**⁷ datant de décembre 2018 en ce qui concerne la construction, les notions de biologie de l'habitat et de santé et de la nocivité des matériaux de construction :

- Logement : augmentation de la qualité urbanistique, de la qualité de vie et de la cohésion dans les quartiers, ainsi qu'amélioration de la qualité dans la construction et de la qualité énergétique, ainsi que **de la biologie de l'habitat en général** (p.31 du document de l'accord de coalition).
- Des initiatives comme la certification écologique pour bâtiments poursuivant **l'objectif d'améliorer la biologie de l'habitat** en général seront soutenues (p. 35).
- Le ministère des Travaux Publics mettra en place une « cellule de compétence pour la construction durable et l'économie circulaire qui œuvrera en faveur d'une **liste de matériaux nocifs** et d'une actualisation du « Guide pour la construction durable et l'économie circulaire (p. 162).

⁴ MÉMORIAL A – N° 199 du 20 novembre 2013

Règlement grand-ducal du 14 novembre 2013 concernant l'agrément à accorder aux gestionnaires de services d'éducation et d'accueil pour enfants ; article 14.

⁵ MÉMORIAL A – N° 187 du 30 août 2011

Règlement grand-ducal du 17 août 2011 concernant l'agrément à accorder aux gestionnaires d'activités pour enfants, jeunes adultes et familles en détresse ; article 23.

⁶ MÉMORIAL A – N° 82 du 24 septembre 1998

Loi du 8 septembre 1998 réglant les relations entre l'Etat et les organismes œuvrant dans les domaines social, familial et thérapeutique ; article 2. B)

⁷https://gouvernement.lu/dam-assets/documents/actualites/2018/12-decembre/Accord-de-coalition-2018-2023.pdf?utm_medium=web-site&utm_source=archdaily.mx

- Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement Durable : Dans le cadre de la « PRIME House », l'évaluation environnementale des matériaux de construction sera complétée par **une évaluation des risques liés à la santé** et par des critères d'économie circulaire (p.171).
- Afin de réussir la transition vers une économie circulaire, un prérequis essentiel sera l'identification et la gestion durable des produits chimiques dans nos produits de consommation. Une meilleure traçabilité des différents produits chimiques pourra aider à identifier les filières d'utilisation et de réutilisation dans un concept d'économie circulaire (**principe de listes positives**) (p. 177).

Et le **Plan National de l'Environnement et du Climat (PNEC)**⁸ élaboré conjointement par le MECDD et le MEA définit le cadre de la politique énergétique et climatique jusqu'en 2030 :

- Développement durable et santé dans le domaine de la construction (p 117)
Outre un ancrage plus fort du développement durable, des aspects tels que la **santé et le bien-être** seront également intégrés lors de la construction de nouveaux bâtiments résidentiels et non résidentiels. Ceci sera mis en œuvre à travers l'intégration d'éléments dans le passeport énergétique national, le certificat de durabilité « LENOZ » et la création d'un nouveau label. **Les matériaux de construction toxiques et nocifs seront interdits et une liste positive des matériaux** de construction contenant des matériaux naturels et écologiques sera établie.
- Subventions étatiques PRIME House pour les bâtiments résidentiels (p. 86-87)
Le régime d'aides PRIME House (loi du 23 décembre 2016 instituant un régime d'aides pour la promotion de la durabilité, de l'utilisation rationnelle de l'énergie et des énergies renouvelables dans le domaine du logement) offre des aides à l'investissement pour la rénovation énergétique et durable des bâtiments résidentiels ainsi que les conseils appropriés et qualifiés en matière d'énergie pour la construction de bâtiments résidentiels durables et l'utilisation d'énergies renouvelables (systèmes solaires photovoltaïques, systèmes solaires thermiques, systèmes à pompes à chaleur, systèmes à granulés de bois et chaudières à copeaux de bois). Le régime d'aides a été prolongé et réformé à plusieurs reprises depuis 2001.

Le régime actuel s'applique jusque fin 2020. Les aspects suivants sont au centre des préoccupations quant à l'évolution et l'amélioration du régime :

- Révision des montants octroyés et adaptation si nécessaire
- Intégration de critères de durabilité supplémentaires, notamment pour promouvoir l'économie circulaire
- Introduction de critères visant à réduire les risques pour la santé dans les bâtiments résidentiels

Le ministère de la santé dans son avis concernant le PNEC du 3 mars 2020 « propose de mettre en valeur via un label les matériaux écologiques favorables à la santé ce qui augmenterait leur visibilité auprès du secteur ». Il faudrait être attentif par rapport aux systèmes de ventilation installés et mal entretenus dans les maisons passives et les bâtiments publics. À ce jour, peu d'informations sont disponibles concernant la fréquence et le type d'entretien requis. Une accumulation d'humidité mènerait au développement de moisissures ayant un impact négatif sur la santé. Des cahiers de charge précis, concernant l'entretien des systèmes de ventilation devraient être formulés et des analyses régulières devraient être réalisées pour garantir une protection de la santé de la population.

⁸<https://environnement.public.lu/content/dam/environnement/actualites/2020/05/Plan-national-integre-en-matiere-d-energie-et-de-climat-du-Luxembourg-2021-2030-version-definitive-traduction-de-courtoisie.pdf>

I.2. Le bâtiment passif et la santé ?

En 2010, le Parlement Européen a adopté une **directive sur la performance énergétique des bâtiments** (directive 2010/31/UE). À la suite de cette directive le Luxembourg a décidé de transposer cette directive dès 2017. À partir de cette date toutes les constructions nouvelles doivent constituer des bâtiments passifs (à l'échelle européenne la transposition de ladite directive doit se faire à partir de 2020). Même si certaines réglementations locales ou régionales existent d'ores et déjà dans certains pays européens, le Grand-Duché de Luxembourg est ainsi le premier État-Membre de l'Union Européenne à avoir transposé ladite directive et donc le premier pays européen à implanter voire standardiser la « construction passive » à échelle nationale.

En 2024, l'Union Européenne a adopté une **refonte de la directive sur la performance énergétique des bâtiments** (DPEB ou EPBD en anglais – Energy Performance of Buildings Directive). Cette directive UE 2024/1275 devra être transposée en droit national avant mai 2026. La refonte intègre la performance de qualité de l'environnement intérieur QEI et de santé voir de bien-être des occupants notamment pour les bâtiments neufs et les bâtiments existants à rénovation importante. La refonte prévoit par ailleurs une surveillance et la régulation de la QEI, des inspections des systèmes de ventilation (VMC) et de climatisation ainsi qu'une intégration de la QEI dans le passeport énergétique et dans les systèmes intelligents « smart building ».

La directive définit et livre le cadre pour intégrer la QEI dans les critères de durabilité et l'efficacité énergétique, mais il incombe aux États Membres de définir les exigences en matière de QEI et de mettre en œuvre pratiquement les outils et instruments visant à assurer une bonne QEI. Le présent Livre Vert pourrait avec les différents instruments développés et décrits en détail présenter donc la solution par rapport à cette exigence.

Différentes études ont été réalisées dans le passé en comparant la qualité de l'air intérieur de bâtiments passifs avec des bâtiments traditionnels, notamment en Belgique, en Suisse en Allemagne ou en Autriche.

L'étude **HOPE au CHUV de Lausanne (Health Optimisation Protocol for Energy-efficient buildings)** sur le lien « Energie-Bien-Être-Santé » dans les bâtiments concluait en 2013 à l'issue d'une enquête de symptômes des occupants dans 64 bureaux et 97 bâtiments résidentiels dont 75% en basse énergie, qu'en moyenne, les occupants des bâtiments à ventilation mécanique avaient plus de symptômes que les occupants de bâtiments à aération manuelle, mais qu'il existait tout aussi des bâtiments à ventilation mécanique sains (Spertini, 2013).

En d'autres termes, même si à cette époque les constructions à basse énergie présentaient un risque accru pour la santé humaine, il est parfaitement possible d'éviter un tel risque pour les occupants dans les bâtiments efficaces énergétiquement.

Une étude belge « **Clean Air Low Energy residences** » (VITO, 2012) focalisant sur l'influence de l'air externe et du système de ventilation (type, usage, maintenance) sur la qualité de l'air intérieur conclut à ce que la qualité de l'air intérieur physico-chimique des maisons à ventilation mécanique était modérément meilleure ou identique aux bâtiments traditionnels (il faut cependant signaler que cette étude se limitait à quelques paramètres bien définis : COV totaux, formaldéhyde, PM 2,5, humidité, bruit, moisissures, ...).

Une étude autrichienne sur les effets de **mesures d'économie d'énergie sur la qualité de l'air intérieur et sur la santé dans le cadre de la construction dans le secteur résidentiel** (Hutter, 2005) conclut que la ventilation mécanique permet une amélioration de la qualité de l'air intérieur en ce qui concerne les polluants extérieurs

comme les grains de pollen, ainsi que des polluants volatils à l'intérieur du bâtiment mais qu'elle est inefficace pour les polluants semi- ou peu volatils qui adsorbent aux poussières.

Une **enquête luxembourgeoise** (Baden, 2013) auprès d'une grande institution européenne (aux sites de Strasbourg, Bruxelles et Luxembourg) utilisant des questionnaires anonymes (1435 réponses) sur le bien-être des salariés a mis en évidence que les salariés occupant des bâtiments à ventilation mécanique avaient moins d'irritations du nez et de la gorge, voire de démangeaisons de la peau que les salariés occupant des bâtiments traditionnels. De plus, le taux de congés de maladies (congé de maladie annuel supérieur à 5 jours) était nettement inférieur pour les bureaux à ventilation mécanique (31%) que pour les bureaux à aération manuelle (36%) ou sans aération (41%). En bref donc moins de symptômes et moins d'absences dans les bâtiments à ventilation mécanique.

Une étude canadienne sur la **santé des occupants de nouvelles maisons à énergie réduite** (Leech, 2004) comparant une cinquantaine de bâtiments traditionnels à une cinquantaine de bâtiments construits sous le standard R-2000 (basses énergies et matériaux non émissifs) conclut à moins de symptômes dans les maisons R-2000 et notamment : « ... si le système de ventilation mécanique fonctionne bien et est régulièrement entretenu et qu'en parallèle les matériaux utilisés sont pauvres en émissions nocives, la qualité de l'air intérieur peut être de meilleure qualité que dans les habitations traditionnelles ».

Il en résulte que la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments passifs n'est pas nécessairement de qualité inférieure (ni supérieure, d'ailleurs) à celle des constructions traditionnelles et ce malgré l'étanchéité plus importante et donc un renouvellement spontané de l'air réduit.

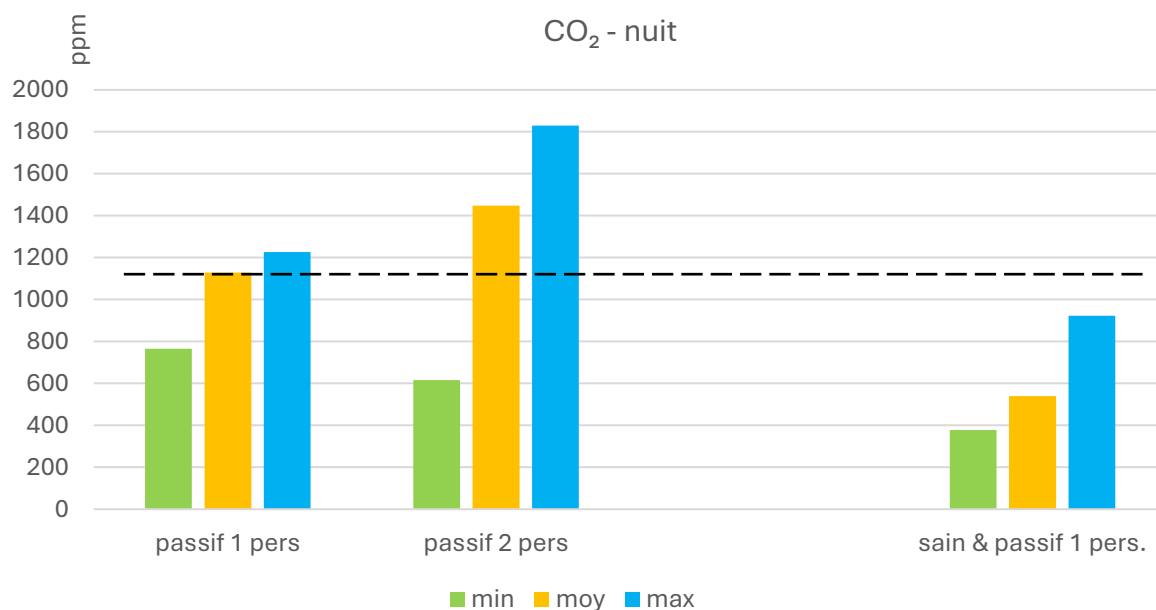
Malgré ce fait, un certain nombre de gens montrent très souvent une réticence par rapport à la construction passive, tout comme ils l'ont éprouvé par rapport aux constructions en basse énergie dans le passé. Cette réticence s'explique du moins en partie par les « erreurs de jeunesse » qui ont été faites dans le passé par les professionnels de la construction, les planificateurs voire les bureaux d'études :

- Au niveau des matériaux de construction utilisés et plus ou moins contaminés (émettant des substances nocives vers l'air intérieur)
- Au niveau de la planification et du calcul des besoins de ventilation qui se focalisaient exclusivement sur les aspects énergétiques en oubliant de tenir compte également des aspects hygiéniques voire sanitaires (accumulation de substances nocives, évacuation d'humidité, apport d'oxygène, ...)
- Au niveau de la technologie de ventilation mécanique (contrôle des débits d'air, oubli de maintenance, flux d'air inadéquats entre pulsion et évacuation, ...). En effet, une ventilation contrôlée réduite et l'étanchéité de l'enveloppe thermique favorisent en partie une accumulation de polluants).

À titre d'exemple, les exigences en renouvellement d'air ont dans le passé été définies essentiellement par rapport au volume du bâti sans tenir compte du nombre de personnes présentes dans un local donné (consommation d'oxygène, production de CO₂ et d'humidité) alors que les besoins hygiéniques s'expriment généralement en volume d'air/heure et par personne.

Ainsi lors d'un monitoring effectué pour une même chambre à coucher d'une construction passive luxembourgeoise et avec le même taux de renouvellement de la VMC, l'accumulation de CO₂, servant d'indicateur de la qualité de l'air intérieur passait de 1130 à 1450 ppm (concentrations moyennes) et de 1230 à 1830 ppm (maximum) au cours de la nuit en fonction du nombre d'occupants (une ou deux personnes) dormant dans la chambre, dépassant donc plus ou moins nettement la valeur seuil recommandée de 1000 ppm (valeur de Pettenkofer, hygiéniste renommé allemand du 19^e siècle).

F 1 : Monitoring du CO₂ dans une chambre à coucher en fonction du nombre d'occupants (Baden, 2022)



Il faut bien préciser que la problématique de « santé » en relation avec la construction ne constitue point une problématique nouvelle émergente avec le mode de construction efficiente en énergie. L'expérience des analyses de l'air intérieur dans les bâtiments en relation avec des troubles ou plaintes de santé des occupants réalisées au sein du ministère de la Santé luxembourgeois montre que la problématique touche au même titre les bâtiments conventionnels que les constructions à basse énergie voire passives. Il est vrai que le sujet des émissions potentielles et donc de contamination de l'air intérieur n'a jamais été abordé de façon cohérente dans le passé. La construction passive via l'enveloppe étanche du bâtiment ne risque tout au plus qu'accroître une problématique existante en amont et négligée dans le passé.

Il s'agit plutôt de profiter de la mise en place du nouveau standard voire de la directive européenne en matière de standard énergétique pour l'adapter ou compléter en termes de santé et de se doter des connaissances, règles et instruments nécessaires à l'intégration cohérente du critère « santé » dans la construction durable.

Le présent livre vert a donc pour but de procurer une guidance en matière de construction saine, permettant une construction durable qui remplit en même temps les exigences en ce qui concerne la santé et le bien-être des occupants.

Cette thématique engendre naturellement la qualité de l'air tant par ses émissions chimiques, par les contaminations mycologiques (moisissures) que par l'exposition aux facteurs physiques (champs électromagnétiques, radon, fibres minérales).

Avant de s'attarder cependant sur la construction et les différents moyens à mettre en place, il convient de faire une mise au point sur les effets de santé des différents agents polluants chimiques et de l'expérience acquise en la matière.

II. Effets de santé

Les effets des différents agents chimiques, biologiques ou physiques sur la santé humaine sont multiples :

- Effets cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques (CMR)
- Effets hormonaux (perturbateurs endocriniens)
- Effets neurotoxiques
- Effets immunotoxiques ou immunosuppresseurs
- Effets sur des maladies neurodégénératives
- Maladies auto-immunes
- Troubles respiratoires : Allergies et asthme
- Effets d'irritations des muqueuses
- Symptomatologies nouvelles ou émergentes
- Autres

Les effets des différentes substances chimiques et des différents polluants physiques voire mycologiques sont notamment repris dans diverses classifications internationales qui servent ainsi de base pour l'évaluation de la nocivité des polluants en question.

II.1. Données scientifiques et réglementations concernant les aspects de santé

En matière de santé, il y a lieu de consulter en première approche les réglementations et classifications existantes tant au niveau national qu'au niveau européen voire international et de les comparer par rapport aux substances susceptibles de contaminer l'air intérieur de nos constructions.

Ces réglementations incluent notamment les instruments suivants :

- REACH / CLP (Registration Evaluation, Authorization of Chemicals / Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures)
- Règlement européen relatif aux produits biocides RPB
- International Chemical Secretariat ChemSec
- Convention de Stockholm - « Persistent organic pollutants »
- Convention de Rotterdam - « Certain Hazardous Chemicals and Pesticides in International Trade »
- Tableau des agents cancérogènes du CIRC / OMS
- Chemicals evaluated for carcinogenic potential par l'US EPA
- Report on Carcinogens du NTP - National Toxicology Program
- Classification européenne CLP (Union Européenne)
- EU Priority List - Perturbateurs endocriniens
- TEDX ou « The Endocrine disruption Exchange » list
- Mundy List - Neurotoxiques développementaux (US)
- EU-LCI List de la Commission Européenne

Le **règlement REACH** vise à renforcer la protection de la santé humaine et de l'environnement contre les risques que peuvent engendrer les produits chimiques.

Le **règlement CLP** a pour objet d'assurer que les dangers que présentent les substances chimiques soient clairement communiqués aux travailleurs et aux consommateurs de l'Union Européenne grâce à la classification et à l'étiquetage des produits chimiques.

Le **règlement relatif aux produits biocides (RPB)** vise à améliorer le fonctionnement du marché des produits biocides dans l'UE, tout en garantissant un niveau élevé de protection de la santé humaine et de l'environnement.

Ces trois législations sont gérées et assurées par l'ECHA, l'agence européenne des substances chimiques (European Chemicals Agency).

En 2022, la réglementation CLP comporte une liste de 224 substances chimiques candidates caractérisées de SVHC (« substances of very high concern »), donc des substances extrêmement préoccupantes à remplacer de préférence par d'autres substances (Contre 205 en janvier 2020 et 181 en mai 2018). Ces substances sont classifiées selon leur potentiel de danger dans les catégories suivantes :

- **CMR** : carcinogènes, mutagènes ou reprotoxiques
- **PBT** : persistants, bioaccumulables et toxiques
- **vPvB** : très persistantes ou très bioaccumulables (« **very Persistent very Bioaccumulable** »)
- **PE** : perturbateurs endocriniens

Les mêmes critères sont en principe repris dans la « **sin list** » éditée par ChemSec (International Chemical Secretary)⁹ en collaboration avec 11 ONG européennes dont HEAL¹⁰) qui estime que le processus REACH est trop lent et qui par sa propre liste et en se basant sur les critères REACH décrits en amont cherche à gagner de la vitesse dans la procédure d'interdire ou de remplacer les substances problématiques du point de vue santé. Ainsi, en avril 2020, 991 substances chimiques étaient reprises sur la « sin list » (contre 913 substances en février 2018).

La **convention de Stockholm sur les POP** (« persistent organic pollutants ») de 2001 ratifiée en 2004, bannit 12 des polluants organiques les plus persistants (d'où le terme de « dirty dozen ») : 9 biocides (aldrine, chlordane, DDT, dieldrine, endrine, heptachlor, hexachlorbenzène, Mirex, toxaphène), les biphényles polychlorés PCBs et les dibenzodioxines et -furanes polychlorés. En 2009, douze autres molécules ont été rajoutées (entre autres les α - et β -hexachlorcyclohexanes, divers diphényléthers polybromés (Penta-BDE, Hexa-BDE, Hepta-BDE, Tetra-BDE, le lindane, le pentachlorbenzène PCP et les dérivés perfluorés. D'autres molécules qui complètent la liste des POPs sont les endosulfanes (en 2011), l'hexabromocyclododécane (2013), le pentachlorophénol ou PCP (2015), le déca-BDE et les chlorparaffines (2017). La dernière adaptation en 2023 porte le total des substances classées « POP » à 35 incluant notamment les composés perfluorés (2019 et 2022).

La **convention de Rotterdam** ("Rotterdam Convention on the Prior Informed Consent Procedure for Certain Hazardous Chemicals and Pesticides in International Trade") de 1998 ratifiée en 2002 interdit l'utilisation d'un nombre de substances chimiques et notamment de pesticides parmi lesquelles le DDT, la dieldrine, les endosulfanes, l'heptachlor, le lindane, le tributylétain, le PCP, certains diphényléthers polybromés (octa-, hepta-, hexa- et penta-BDE) ou encore les PCBs et l'amiante (chrysotile, amosite, crocidolite, ...) qui constituent des polluants typiques de l'air intérieur.

⁹ ChemSec – the International Chemical Secretariat – est une ONG indépendante qui lutte pour la substitution de produits chimiques toxiques par des alternatives moins nocives

¹⁰ HEAL : Health and Environment Alliance (confédération des ONG actives en santé environnementale)

La **liste européenne EU-LCI** constitue une liste de polluants chimiques susceptibles d'émaner des matériaux de construction. La liste est établie par la Commission européenne et base sur le concept de « lowest concentration of interest » ou « LCI », donc la plus faible concentration d'intérêt ou concentration minimale d'intérêt.

Les seuils correspondent aux seuils au-dessus desquels des effets de santé ont été observés en cas d'exposition inhalatrice (donc par respiration). Les émissions se basent sur des tests en chambre test après 28 jours (cf. norme EN 16516), donc des conditions expérimentales bien définies (pouvant cependant dévier plus ou moins fortement des conditions réelles dans un bâtiment). Ces valeurs ne constituent pas des valeurs guides en matière de qualité de l'air intérieur mais ont plutôt un caractère informatif.

La liste est dynamique et les informations y relatives dans le livre vert édition 2026 se réfèrent à la version de 2023 (« 2023 List of « Lowest Concentration of Interest (LCI) values »).

II.2. Cancérogénicité

II.2.1. Classifications existantes

Les agents, susceptibles d'être cancérogènes pour l'homme font l'objet de plusieurs types de classifications dont celle de l'Union Européenne, celle du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) ou encore les classifications américaines par l'agence de l'environnement EPA et par le National Toxicology Program (NTP).

Tableau des agents cancérogènes du CIRC / OMS

Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), en anglais « International Agency for Research on Cancer (IARC) » qui siège à Lyon est une agence de recherche sur le cancer, créée en 1965 par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui est l'institution spécialisée pour la santé publique de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Le rôle du CIRC est de diriger et de coordonner la recherche sur les causes du cancer en réalisant des études épidémiologiques sur l'incidence du cancer et en publiant des monographies sur les risques cancérogènes pour l'homme constitués par divers agents, mélanges et expositions. La classification internationale, établie par le CIRC et reprise par l'OMS s'applique à l'environnement général au sens large.

Les résultats sont repris dans un tableau (agents cancérogènes). Les agents sont sous-classés dans 5 catégories :

- **Classe 1** : cancérogène certain chez l'homme (indications suffisantes de cancérogénicité pour l'homme)
- **Classe 2A** : probablement cancérogène pour l'homme (indications limitées ou insuffisantes de cancérogénicité chez l'homme et indications suffisantes de cancérogénicité chez l'animal de laboratoire)
- **Classe 2B** : potentiellement cancérogène pour l'homme (indications limitées de cancérogénicité chez l'homme, et d'indications insuffisantes de cancérogénicité chez l'animal de laboratoire ou indications insuffisantes de cancérogénicité pour l'homme, mais indications suffisantes de cancérogénicité pour l'animal de laboratoire)
- **Classe 3** : inclassable (indications insuffisantes chez l'homme et insuffisantes ou limitées chez l'animal de laboratoire)
- **Classe 4** : probablement non cancérogène pour l'homme (indications suggérant une absence de cancérogénicité chez l'homme ainsi que chez l'animal de laboratoire)

Classification européenne CLP (Union Européenne)

La classification européenne constitue une référence réglementaire dans l'environnement professionnel (directive 67/548/CEE modifiée relative à la classification, l'emballage et l'étiquetage pour les substances dangereuses). Elle ne concerne que les substances chimiques.

- **Catégorie 1A** : cancérogènes pour l'homme (suffisamment d'éléments pour établir l'existence d'une relation de cause à effet entre l'exposition de l'homme à de telles substances et l'apparition d'un cancer)
- **Catégorie 1B** : substances assimilées à des substances cancérogènes pour l'homme (suffisamment d'éléments pour justifier une forte présomption de causalité entre l'exposition de l'homme à de telles substances et la survenue d'un cancer)
- **Catégorie 2** : substances préoccupantes pour l'homme en raison d'effets cancérogènes possibles. Cette catégorie comporte 2 sous-catégories :
 - Les substances suffisamment étudiées, mais pour lesquelles il n'existe pas d'effets tumorigènes suffisants pour entraîner le classement dans la catégorie 1B. Des expériences complémentaires ne seraient pas susceptibles d'apporter d'autres informations pertinentes pour la classification.
 - Les substances insuffisamment étudiées : les données disponibles sont inadéquates, mais préoccupantes pour l'homme. Cette classification est provisoire et des expériences complémentaires sont nécessaires avant de prendre une décision finale.

Chemicals evaluated for carcinogenic potential par l'US EPA

L'US EPA est une association gouvernementale américaine appelée « Environmental Protection Agency » indépendante destinée à la protection de l'environnement et de la santé humaine. Créée en 1970, elle a pour but d'assurer le « Clean Air Act » donc la loi concernant la qualité de l'air et d'assurer une bonne qualité de l'air en guise de protection de l'environnement et de la santé humaine.

La classification américaine en matière de cancérogénicité se subdivise en deux systèmes de classifications distincts en fonction de l'époque de classement "weight of evidence for carcinogenicity (EPA WOE) ».

Les guidelines de 1986 :

- **Group A** : "Human Carcinogen" évidence suffisante pour conclure sur un effet cancérigène chez l'homme
- **Group B1** : "Probable Human Carcinogen" évidence limitée, mais pas concluante au stade actuel
- **Group B2** : "Probable Human Carcinogen" évidence inadéquate et loin d'être concluante au stade actuel
- **Group C** : "Possible Human Carcinogen" évidence limitée sur un effet cancérigène chez l'animal en absence de données sur l'homme, non concluante au stade actuel
- **Group D** : "Not Classifiable as to Human Carcinogenicity" aucune évidence actuelle quant à des effets cancérigènes chez l'homme

Les guidelines de 2005 :

- **CH** : carcinogenic to humans
- **LH**: likely to be carcinogenic to humans
- **InI**: inadequate information

Report on Carcinogens du NTP- National Toxicology Program américain

Le « National Toxicity Program » est un programme du département américain de la Santé et des Services humains (U.S : Department of Health and Human Services). Le 14^e rapport sur les carcinogènes a été publié en novembre 2016 (NTP, 2016). Le NTP catégorise les substances en deux classes :

- Classe 1 “Known to be human carcinogens”
- Classe 2 “Reasonably anticipated to be human carcinogens”

T 1 : Tableau récapitulatif du nombre de polluants cancérigènes « indoor » (2018)

CLASSIFICATION	CIRC/OMS	UE/CLP	US-EPA	NTP
Cancérogène certain	15	8	10	13
Cancérogène probable	5	13	20	20
Cancérogène potentiel	23	12	4	
Incertain	27		12	
Total	43/70*	33	34/46*	33

* CIRC/OMS et US-EPA : (sans/avec les incertains)

Ces substances cancérigènes ont été retrouvées régulièrement dans les bâtiments fonctionnels et résidentiels au Luxembourg dans les années passées, soit en provenance des matériaux de construction soit des meubles ou produits de nettoyage et d'entretien.

T 2 : Substances cancérigènes des bâtiments fonctionnels et résidentiels au Luxembourg

GROUPE	SUBSTANCE	CIRC OMS	CLASSIFICATION CLP	US EPA	NTP
COV AROMATIQUES	Benzène	1	C1A, M1B	CH (2005)	1
	Toluène	3	R2	InI (2005)	
	Ethyl-benzène	2B		D (1986)	
	Xylène	3		InI	
	Styrène	2B			2
TERPÈNES	Limonène	3			
COV HALOGÉNÉS	Perchloroéthylène	2A	C2	LH (2005)	2
	Trichloroéthylène	1	C1B, M2	CH	1
	1,4-dichlorobenzène	2B	C2	C (1986)	2
	Vinylchloride	1	C1A	CH	1
	Epichlorhydrine	2A	C1A	B2 (1986)	2
ÉTHERS DE GLYCOL	Butoxyéthanol	3			
	Butoxypropanol	3			
ALDÉHYDES	Formaldéhyde	1	C2	B1 (1986)	1
	Acéthaldéhyde	2B	C2	B2	2
ISOCYANATES	Toluène-2,4-diisocyanate TDI	2B	C1B		2
BIOCIDES	Chlorothalonil	2B	C2		
	4,4'-DDE	/		B2	
	4,4'-DDT	2B	C2		2
	Dieldrine	3	C2		
	Lindane	1		B2	2

GROUPE	SUBSTANCE	CIRC OMS	CLASSIFICATION CLP	US EPA	NTP
	Naphtalène	2B	C2	C (1986)	2
	Pentachlorophénol	2B	C2	LH (2014)	2
	Tetrachlorvinphos	3			
	Dichlorvos	2B		B2	
	Heptachlor	2B		B2	
	Hexychlorobenzène	2B		B2	
PYRÉTHRINOÏDES	Perméthrine	3			
	Deltaméthrine	3			
	Fenvalérate	3			
	Piperonyl Butoxide	3			
RF ORGANOPHOSPHORÉS	TCEP	3			
	TdCPP	/			
PHTALATES	Benzylbutylphthalate	3	R1B		
	Dibutylphthalate			D (1986)	
	DEHP	2B	R1B	B2	2
PCB	Biphényles polychlorés PCB	2A		B2	2
MYCOTOXINES	Aflatoxines	1		C	1
	Fusarium moniliforme (Fumonisin)	2B			
	Fusarium graminearum, (Zearalenone, DON)	3			
	Fusarium sporotrichoides (T-2 toxin)	3			
	Ochratoxin A	2B			2
HAP	Acénaphthène	3		D	
	Fluorène	3		D	
	Fluoranthène	3		D	
	Phénanthrène	3		D	
	Anthracène	3		D	
	Pyrène	3		D	
	Benzo(a)anthracène	2B	C1B	B2	2
	Chrysène	2B	C1B, M2	B2	
	Benzo(b)fluoranthène	2B		B2	2
	Benzo(k)fluoranthène	2B	C1B	B2	
	Benzo(e)pyrène	3	C1B		
	Benzo(a)pyrène	1	C1B, M1B, R1B	CH	2
	Indeno (1,2,3-c,d) pyrène	2B		B2	2
	Dibenzo(a,h) anthracène	2A	C1B	B2	2
MÉTAUX LOURDS	Antimoine	3	C2		
	Arsenic	1	C1A	A 1986	1
	Beryllium	1	C1B	LH	1
	Cadmium	1	C1B, M2, R2	B1	1

GROUPE	SUBSTANCE	CIRC OMS	CLASSIFICATION CLP	US EPA	NTP
	Cobalt	2B	C1B, M2, R1B		2
	Chrome	3	C1B	InI (Cr III)	1
				CH (VI)	
	Fer	4			
	Lithium	/			
	Mercure	3 (elem)	R1B	D (elementary) C (methyl-Hg)	
		2B (methyl-Hg)			
	Nickel	1	C2	A	1
	Plomb	2A	C2, R1A	B2	2
	Selenium	3			
	Strontium	1	C1B		
	Titane	4			
	Vanadium	4			
AGENTS PHYSIQUES	Amiante	1	1A	A	1
	Radiation gamma	1	1A	A	1
	Radon	1	1A	A	1
	Champs électriques ELF	3			
	Champs magnétiques ELF	2B			
	Champs magnétiques statiques	3			
	Fréquences radio Champs électromagnétiques	2B			

Dans les quatre cas de figure, les agents sont classés d'après les données disponibles selon le degré de preuve de cancérogénicité atteint sur l'homme et les animaux. Ces classifications sont remises à jour au fur à mesure de l'évolution des connaissances.

Ainsi, le CIRC a récemment classé le styrène comme cancérogène certain chez l'homme (mai 2018) à la suite nouvelles données scientifiques publiées en avril 2018 au « Lancet ». De même, les PCBs et le formaldéhyde (en 2014) sont désormais classés comme cancérogènes (classe 1 du CIRC).

II.2.2. Études de cas

Étude sur les leucémies en Belgique / Pays-Bas

Le Conseil de Santé néerlandais et le Conseil Supérieur de Santé belge ont publié en 2012 un rapport sur les leucémies infantiles liées aux facteurs environnementaux (EuSANH¹¹, 2012) mettant en évidence un lien établi entre les leucémies infantiles et la radiation ionisante (p.ex. le radon), un lien possible avec une exposition aux pesticides, au benzène, au PCBs, au formaldéhyde, aux plastifiants ou aux champs électromagnétiques ainsi qu'un lien incertain pour le styrène. Ces résultats émanent soit d'expositions professionnelles soit d'expositions résidentielles.

¹¹ European Science Advisory Network for Health

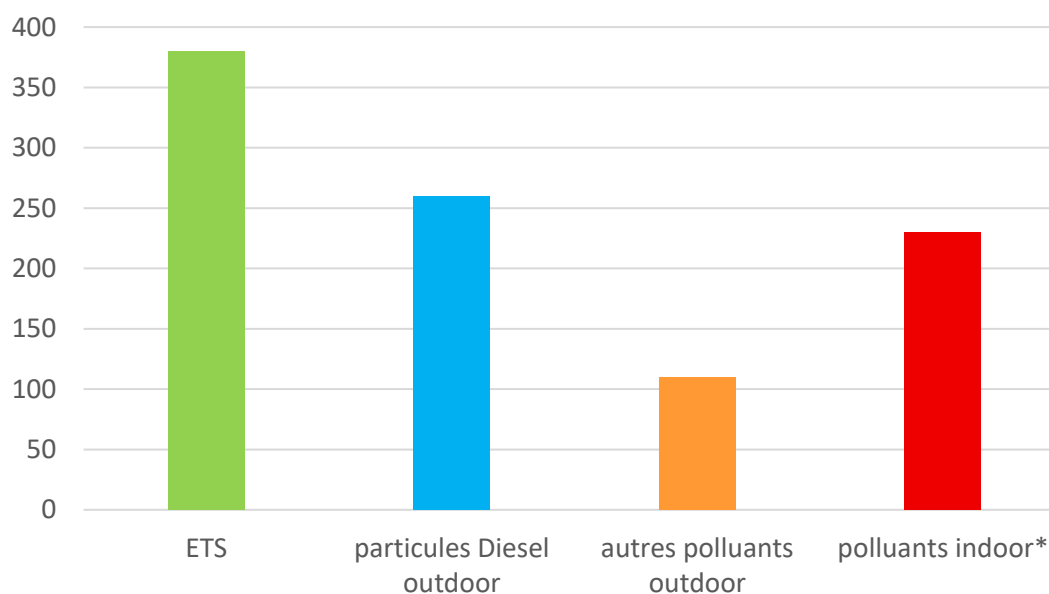
T 3 : Leucémies infantiles et facteurs environnementaux – Conseil Santé néerlandais, Conseil Supérieur de Santé Belge, EuSANH 2012

SOURCE	CONTEXTE	EXPOSITION	ODDS RATIO [1]	95% CI	NOMBRE D'ÉTUDES
Radiation ionisante		postnatale	1.63	1,43-1,85	1
Insecticides	travail	parents	1.43	1,06-1,92	3
	résidentiel	grossesse	2.05	1,8-2,32	8
	résidentiel	enfance	1.61	1,33-1,95	7
	travail	mère prénatale	2.72	1,47-5,04	6
Pesticides	travail	mère prénatale	2.09	1,51-2,88	16
	résidentiel	grossesse	1.54	1,13-2,11	11
	résidentiel	enfance	1.38	1,12-1,7	9
	résidentiel	grossesse	2.04	1,54-2,68	5
	travail	mère prénatale	2.64	1,4-5	6
	travail	mère prénatale	2.64	1,47-4,74	4
Herbicides	travail	mère prénatale	3.62	1,28-10,3	2
	résidentiel	grossesse	1.61	1,2-2,16	5
ELF chps magnétiques	résidentiel	> 0,4 μ T	2.1	1,3-3,3	9
Couverture chauffante	résidentiel	prénatale	1.6	1,1-2,3	1
	résidentiel	postnatale	2.8	1,5-5,0	1

Rapport californien « CARB » - EPA Californie

Le « California Air Resources Board » (CARB 2005) a publié en 2005 un rapport sur la pollution intérieure en Californie sous la tutelle de l'EPA de Californie, estimant l'incidence de cancers dus aux pollutions de l'air intérieur à 230 cancers supplémentaires par an pour la Californie et donc dans un même ordre de grandeur que les cancers dus aux particules Diesel (260 cas supplémentaires par an) et nettement supérieur à l'incidence due aux polluants de l'air extérieur (110 cas/an).

F 2 : Incidence annuelle de cancers en Californie (CARB, 2005)



*ETS = environmental tobacco smoke / * polluants indoor = polluants typiques de l'intérieur

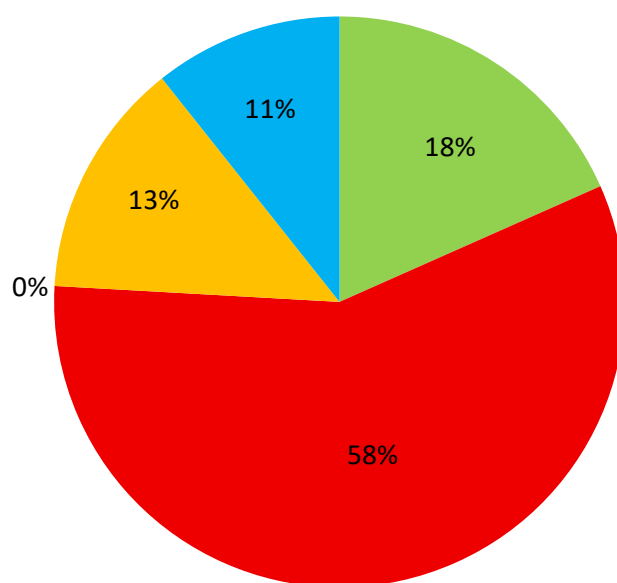
Encore faut-il remarquer que ces estimations portent sur quelques polluants intérieurs seulement, en l'occurrence le formaldéhyde, le dichlorobenzène, le tri- et le perchloréthylène, le benzène, le butadiène, le styrène, le benzo(a)pyrène et le DEHP, un phtalate. Notamment les cas imputés au radon (1500 cas/an) n'y sont pas inclus.

Le rapport conclut que « ... des carcinogènes sont régulièrement trouvés dans la plupart des habitations (carcinogens are routinely found in most homes) ... ». L'agence de protection environnementale américaine US-EPA a classé le radon en première et la pollution intérieure autre que le radon en quatrième position des 13 problématiques nationales environnementales en matière de risque de carcinogénicité (US-EPA, 1987).

Luxembourg

Cette affirmation du CARB s'aligne avec l'expérience des analyses réalisées au Luxembourg entre 2009 et 2014 par le ministère de la santé luxembourgeois dans presque 365 locaux au Luxembourg (tous types confondus : habitations, bureaux, structures pour enfants, etc.) qui ont révélé la présence de substances cancérigènes dans 58% des bâtiments analysés (classe 1 CIRC/OMS, cancérigènes certains pour l'homme). Viennent s'ajouter 13% de locaux présentant des contaminants par des substances potentiellement cancérigènes (classe 2B). Si ces résultats ne sont en aucun cas à considérer comme représentatifs pour le monde de la construction au Grand-Duché (étant donné que les analyses ont pour la plupart été effectuées à la suite de troubles ou des plaintes de santé des occupants), ils mettent néanmoins en évidence un risque réel en matière « d'exposition à des agents cancérigènes ».

F 3 : Classification des locaux luxembourgeois analysés selon la présence de contaminants chimiques cancérigènes – CIRC (Baden, 2015)



- non-cancérigène
- cancérigène pour l'homme (groupe 1)
- probablement cancérigènes (groupe 2A)
- potentiellement cancérigènes (groupe 2B)
- non-classifiable (groupe 3)

(n = 365)

II.2.3. Conclusions

Il en résulte que de nombreux agents cancérigènes actuellement établis selon les différentes listes en vigueur et résultant des données scientifiques et épidémiologiques sont susceptibles d'être utilisés lors de la construction ou rénovation voire de l'entretien des immeubles et devraient être évités. De plus, les listes ne sont ni exhaustives comme le montrent les divergences entre les listes CIRC, US-EPA et EU-CLP, ni complètes comme le montrent les récentes adaptations de classement du styrène et des PCBs ou encore du formaldéhyde. A noter qu'il n'existe par définition pas de seuils ou limites au-dessous desquels le risque peut être négligé pour des substances cancérigènes de sorte que ces agents ou substances devraient être bannis complètement dans la construction.

Le Plan National Cancer 2014-2018 du ministère de la Santé luxembourgeois estime que :

« ...la prévention du cancer passe aussi par la prévention de la pollution intérieure au niveau de l'habitat, le lien étant aujourd'hui démontré entre matériaux de construction ou rénovation et certains types de cancer. La population et les professionnels de la construction et rénovation doivent être mieux impliqués dans la prévention ... ».

et

« ... afin de fédérer tous les acteurs de la construction et de la rénovation autour du principe de prévention de la pollution de l'habitat par l'utilisation de matériaux cancérigènes, des campagnes de sensibilisation doivent être mises en œuvre, des formations et conférences doivent être proposées et des spécifications publiées... »

D'autre part, le Plan National Cancer prévoit des cahiers de charge spécifiant les produits cancérigènes à ne pas utiliser pour les bâtiments publics ainsi que des événements autour de l'habitat et de matériaux de construction et de rénovation voire des spécifications sur les matériaux les moins nocifs en matière de cancer.

Les actions prévues à cette fin, consistent notamment dans « la prévention de la pollution indoor inductrice de cancers (action 3.2.2) » en :

- Établissant avec l'Administration des Bâtiments Publics un cahier des charges pour la construction ou la rénovation évitant les matériaux contenant des produits cancérigènes,
- Sensibilisant l'ordre des architectes sur les risques liés à l'utilisation de matériaux de construction ou de rénovation contenant des produits cancérigènes.
- Informant la population sur les risques d'utilisation de matériaux contenant des produits cancérigènes dans l'habitat.

Le deuxième Plan Cancer 2020-2024 rappelle les mesures contre la pollution indoor du premier PNC.

II.3. Perturbateurs endocriniens

Les perturbateurs endocriniens agissent sur l'équilibre hormonal et provoquent des effets indésirables sur la santé en altérant des fonctions telles que la croissance, le développement, le comportement et l'humeur, l'utilisation et le stockage de l'énergie, la fonction de repos (le sommeil), l'hémodynamique et la circulation sanguine, ou encore les fonctions sexuelles et reproductrices.

De plus les perturbateurs endocriniens sont capables d'induire des cancers hormono-dépendants (certaines formes de tumeurs du sein, de l'utérus ou des ovaires, de testicules et de prostate).

Ces molécules agissent à de très faibles doses (comparables aux concentrations physiologiques des hormones) ; elles sont sources de maladies émergentes (en partie liées au mode de vie) et ont parfois un impact sur la

descendance (donc les générations futures) notamment via des effets épigénétiques (modification souvent irréversible de l'expression génétique). Les approches réglementaires classiques basées sur les seuils toxicologiques sont remises en question vu les effets à très faibles doses, les interactions synergiques, les périodes vulnérables pour l'homme et les effets dose-dépendantes non linéaires.

L'Union Européenne a édité dès 2000 une liste prioritaire concernant les perturbateurs endocriniens (EU Priority List des PE) regroupant plus de 560 substances et se basant notamment sur la réglementation REACH et CLP.

Cette liste subdivise les différentes substances en 3 catégories :

- **Catégorie 1** : substances à activité endocrinienne bien documentée par au moins une étude sur des organismes vivants. Priorité absolue est donnée à ces substances pour des études complémentaires (actuellement 194 substances).
- **Catégorie 2** : substances sans évidence suffisante mais avec évidence d'activité biologique liée à une perturbation endocrinienne.
- **Catégories 3a et 3b** : substances sans indication de propriétés de perturbation endocrinienne dont l'évaluation est impossible faute de données.

À noter que la liste est provisoire et dynamique et sera complétée au fur et à mesure de la disponibilité de données scientifiques.

Exemples de substances présentes dans les bâtiments (catégorie 1) :

- Biocides et pyréthrinoïdes : DDT, PCP, lindane, méthoxychlor, resméthrine, deltaméthrine, acide borique, TBTO
- Phtalates/plastifiants : BBP, DEHP, DBP, DEP
- Solvants : nonylphénol, styrène, hexachlorbenzène, benzo(a)pyrène BAP
- Autres : PCB, Bisphénol A

Ces substances (catégorie 1) sont par ailleurs reprises également dans la liste des substances indésirables de l'Agence de Protection de l'Environnement danoise (Danish Environmental Protection Agency's List of Undesirable Substances LOUS) de 2010.

D'autres substances à effets perturbateurs endocriniens rapportées sont les pyréthrinoïdes, les pesticides organochlorés, les retardateurs de flamme ou diphényléthers polybromés PBDE, certains hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP ainsi que certains métaux lourds comme le chrome Cr, le manganèse Mn, le plomb Pb ou encore le mercure Hg.

Le **TEDX** ou « **The Endocrine disruption Exchange** » est un institut de recherche sans profit. Le TEDX se dote de méthodes de revues systématiques développées par le programme national de toxicologie américain (US National Toxicology Program) publiant les résultats de leurs recherches dans des revues scientifiques (« peer-reviewed scientific journals »). En juin 2018, la liste TEDX renfermait 1431 substances différentes.

Le Parlement Européen a adopté en 2019 une résolution (basant sur un rapport « Endocrine Disruptors : from Scientific Evidence to Human Health Protection » B. Demeneix & R. Slama, 2019) estimant que la régulation européenne en matière de perturbateurs endocriniens était insuffisante et demandant à la Commission Européenne de mettre en place des réglementations plus cohérentes en matière de perturbateurs endocriniens en Europe dans le but d'assurer la protection de la santé humaine et de l'environnement.

En ce qui concerne les analyses réalisées au Grand-Duché de Luxembourg, seuls 40% des bâtiments analysés ne présentaient pas de contamination par des substances reconnues comme perturbateurs endocriniens d'après la liste prioritaire de l'Union Européenne, 55% des bâtiments présentaient des contaminations par des substances classées comme perturbateurs évidents – catégorie 1 (Baden, 2015). Ici encore il faut bien spécifier que ces résultats concernent des bâtiments « à problèmes de santé pour les occupants » et ne sont pas à considérer comme représentatifs pour l'ensemble des bâtiments au Luxembourg.

Conclusions

Les perturbateurs endocriniens largement présents dans les bâtiments sont d'autant plus problématiques en termes de santé humaine que les effets hormonaux ont typiquement lieu à des doses très faibles (absence de relation dose à effets) et touchent des groupes de population et de groupe d'âges sensibles (femmes enceintes, fœtus, nouveau-nés et bébés, adolescents en puberté, ...) de sorte que des valeurs limites ou seuils d'exposition ne sont scientifiquement pas tolérables.

Les pathologies-types résultant d'une exposition aux perturbateurs endocriniens consistent dans des malformations du développement, certains cancers hormono-dépendants, certains cas de diabète de type 2, d'obésité ou d'autisme. De plus, un abaissement de l'âge de la puberté ou une baisse de la fertilité masculine et féminine peuvent être observés (IGAS, 2017, Demeneix, 2019).

La commission Européenne a adopté en novembre 2018 une communication (Commission, 2018) visant à réduire autant que possible l'exposition des citoyens et de l'environnement aux perturbateurs endocriniens.

II.4. Neurotoxiques développementaux

En 2009, l'Agence de Protection de l'Environnement américaine EPA a établi un programme de screening et de priorisation de substances chimiques toxiques pour le développement du système nerveux chez l'homme et les mammifères en général (neurotoxiques développementaux, neurotoxiques ou toxiques développementaux) sur base d'une revue de la littérature scientifique appelé « Mundy list » (Mundy, 2009).

Les substances sont regroupées dans trois catégories en fonction du degré d'évidence :

- **Catégorie 1** : absence d'évidence (soit absence de données soit données concluant à une absence d'effets)
- **Catégorie 2** : évidence minimale : une seule étude d'un seul laboratoire concluant à des effets
- **Catégorie 3** : évidence substantielle : des études concluant à des effets provenant de plusieurs laboratoires distincts

Exemples de substances présentes dans les bâtiments :

Catégorie 3 :

- Biocides et pyrèthrinoïdes : lindane, chlorpyrifos, heptachlor, parathion, tebuconazol, parathion, dieldrine, alléthrine, bioalléthrine, cyperméthrine, deltaméthrine, perméthrine
- Phtalates/plastifiants : DEHP
- Solvants : benzène, toluène, éthoxyéthyl-acétate
- Métaux lourds : aluminium Al, arsenic As, cadmium Cd, plomb Pb, mercure Hg
- Autres : PCB, Bisphénol A, PBDE, monoxyde de carbone

Catégorie 2 :

- Biocides et pyrèthrinoïdes : DDT, fenvalérate, endosulfane, endrine, dichlorvos, cyfluthrine,

- Solvants : n-hexane, éthoxyéthanol
- Autres : formaldéhyde

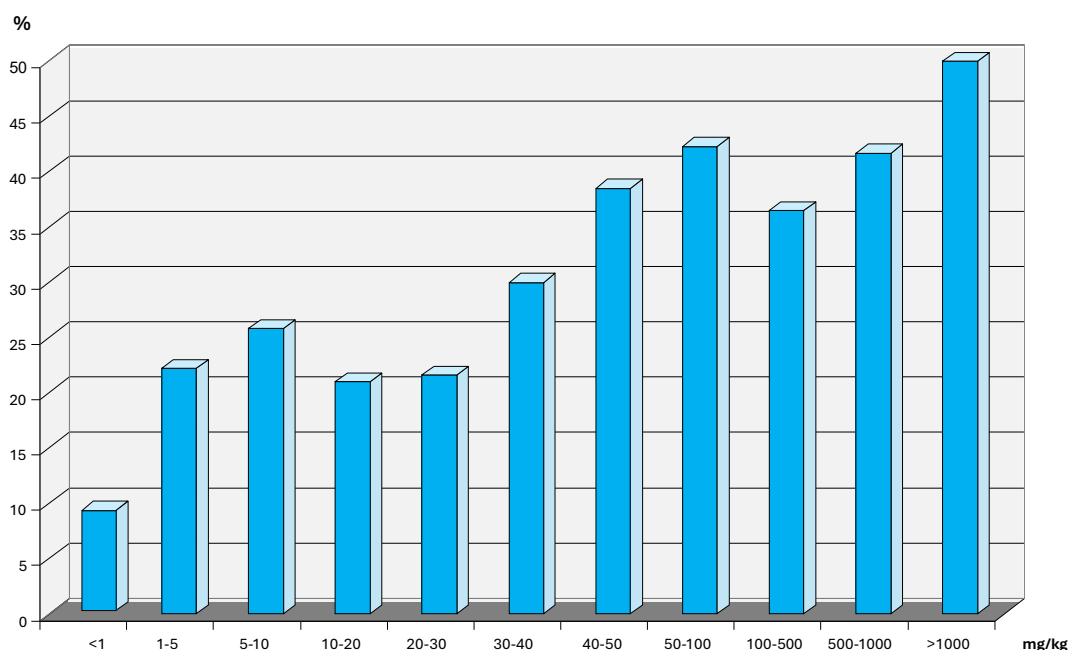
Selon les résultats des analyses réalisées au Luxembourg (Baden, 2015) seul 29% des bâtiments analysés ne présentaient pas contamination par des neurotoxines développementales, 63% des bâtiments étant même contaminés par des substances classées comme neurotoxines développementales à évidence substantielle (catégorie 3 de la liste Mundy de l'EPA).

De même, seuls 16% des locaux analysés étaient exempts de polluants appartenant à l'une des trois listes concernant les substances cancérigènes, les perturbateurs endocriniens ou les neurotoxines développementales. 50% des locaux analysés présentaient des contaminations à des cocktails substances figurant à la fois sur les trois listes citées.

II.5. Symptômes neurologiques ou effets neurotoxique

Les effets neurotoxiques sont multiples et diversifiés en passant de simples maux de tête, vertiges, nausées, de troubles de concentration, de la nervosité & irritabilité, de douleurs musculaires et articulaires, de fourmillements de membres jusqu'à des états dépressifs, de la fibromyalgie (une forme de rhumatisme ou encore des syndromes dits de « trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH ; en anglais : attention-deficit disorder, ADD ; en allemand ADS et ADHS). Les résultats d'analyses réalisées au Luxembourg (Baden, 2015) dans 340 bâtiments mettent en évidence une augmentation quasi linéaire des symptômes neurologiques des occupants en fonction de la contamination cumulative des poussières par des polluants biocides, pyréthrinoïdes ou retardateurs de flamme organo-phosphorés.

F 4 : Incidence de symptômes neurologiques en fonction de la concentration de contaminants peu volatils (biocides, pyréthrinoïdes, RF organophosphorés dans poussières 7 jours ; n = 340)



Agents chimiques typiques pouvant induire des effets neurologiques ou neurotoxiques selon le médecin-toxicologue allemand Max Daunerer (Daunerer 1990 et 1995) et le médecin environnemental et épidémiologiste chercheur danois Philippe Grandjean, publiée en 2006 au « Lancet » (Grandjean, 2006).

T 4 : Agents chimiques typiques pouvant induire des effets neurologiques ou neurotoxiques selon Daunderer et Grandjean

AGENT CHIMIQUE	DAUNDERER	GRANDJEAN
COV (de manière globale)	x	
Acétaldéhyde	x	
Alcools	x	
Aluminium (ML)	x	x
Arsenic (ML)	x	x
Barium (ML)		x
Benzène (COV)	x	x
Biocides (de manière globale)	x	
Biphényles polychlorés PCBs	x	x
Bismuth (ML)		x
Cadmium (ML)	x	
Chlorpyrifos (biocide)		x
Cyclohexane (COV)		x
Cyperméthrine (pyréthrinaïde)		x
DDT (biocide)		x
Deltaméthrine (pyréthrinaïde)		x
Dichlorvos (biocide)		x
Dieldrine (biocide)		x
Diéthylenglycol		x
Endosulfanes (biocide)		x
Endrine (biocide)		x
Etain (ML)		x
Ethoxyethanol		x
Ethylacétate		x
Ethylenglycol		x
Fenvalerate (pyréthrinaïde)		x
Formaldéhyde	x	
Glyphosate (herbicide)		x
Hexachlorobenzène (biocide)		x
Hexane (COV)		x
Lindane (biocide)		x
Manganèse (ML)		x
Mercure (ML)	x	x
Métaux lourds (ML) (de manière globale)	x	
Nickel (ML)		x
PBDEs		x
Pentachlorophénol PCP (biocide)		x
Perchloréthylène (COV)		x
Phénol	x	x
Plomb (ML)	x	x
Propoxur (biocide)		x

AGENT CHIMIQUE	DAUNDERER	GRANDJEAN
Pyréthrinoïdes (de manière globale)	x	
Pyridine		x
Retardateurs de flamme organo-phosphorés (OPFR) (de manière globale)	x	
Styrène (COV)	x	x
Toluène (COV)	x	
Tributylphosphate TBP (OPFR)		x
Trichloréthylène (COV)		x
Triphénylphosphate TPP (OPFR)		x
Vinylchloride (COV)	x	x
Xylenes (COV)		x

II.6. Maladies neurodégénératives

Une maladie neurodégénérative correspond à une pathologie progressive qui affecte le cerveau ou plus globalement le système nerveux, entraînant la mort des cellules nerveuses. Les plus célèbres et les plus fréquentes sont la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson mais il en existe d'autres. Les maladies neurodégénératives sont le plus souvent irréversibles.

Diverses études mettent en évidence des relations causes à effets entre différentes maladies neurodégénératives et des expositions environnementales (Reis, 2019) :

- Sclérose en plaques et sclérose latérale amyotrophique : métaux lourds, biocides
- Pseudo-parkinsonisme : biocides, solvants
- Maladie d'Alzheimer : aluminium, mercure
- Hypo- & hyperthyroïdies : métaux lourds

II.7. Maladies auto-immunes

Les maladies auto-immunes sont des maladies lors desquelles le système immunitaire se dresse contre les cellules propres du corps. Notamment la sclérose en plaques et la sclérose latérale amyotrophique peuvent être considérées comme maladies auto-immunes étant donné que le système immunitaire attaque la couche de myéline (protéine) autour des nerfs. D'autres maladies auto-immunes incluent la fibromyalgie (rhumatisme des articulations pouvant être provoquée ou induite par le mercure) l'arthrite rhumatoïde ou polyarthrite chronique, le syndrome de Guillain-Barré, l'hyper- et l'hypothyroïdie (Hashimoto), le psoriasis et la névrodermite ainsi que les allergies et l'asthme. La plupart de ces pathologies peuvent être provoquées, induites ou du moins amplifiées par des facteurs environnementaux, à l'image de pesticides, de solvants ou de métaux lourds.

II.8. Allergies et asthme

L'allergie constitue une réponse exagérée du système immunitaire par rapport à un facteur environnemental ou allergène (au sens large) inoffensif. Les symptômes allergiques se manifestent par des irritations des yeux, du nez (rhinite allergique), de la peau (exéma, dermatite, névrodermite) ou encore des voies respiratoires (asthme). Des études ont montré que les pollens peuvent être chimiquement modifiés par la présence de polluants chimiques dans l'air extérieur de sorte que des allergènes normalement confinés à l'intérieur du

grain de pollen sont exprimés à la surface et peuvent de ce fait induire des allergies. De même, les allergies à la poussière ou aux acariens pourraient s'expliquer par le fait que de nombreux polluants semi- ou peu volatils adsorbent et se fixent sur les particules de poussières ou les excréments des acariens. L'allergie serait dès lors induite par des poussières chimiquement modifiées par des polluants.

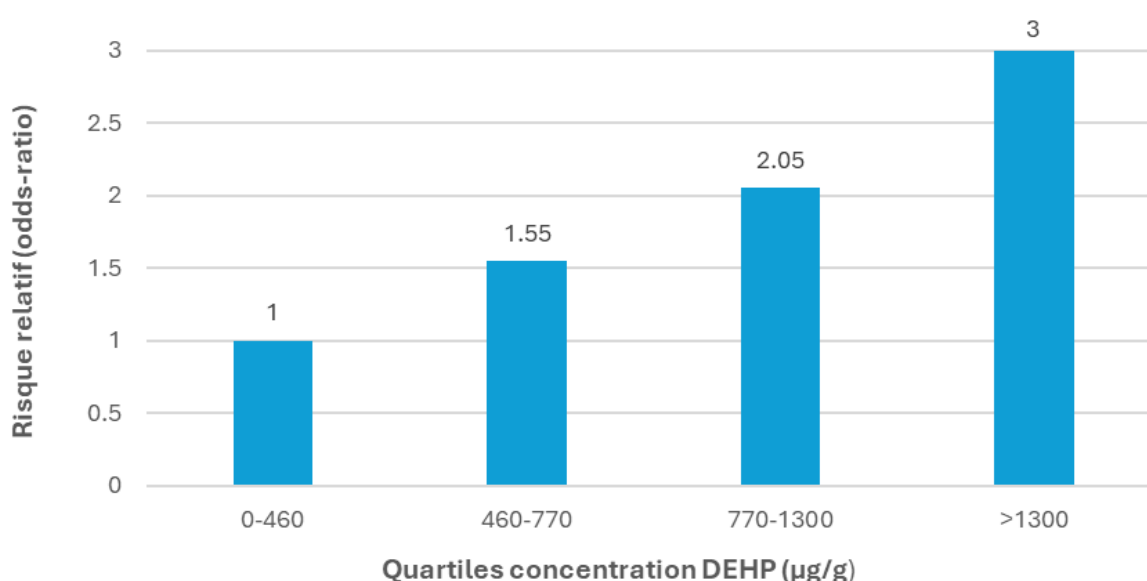
En termes de polluants « intérieurs », notamment les terpènes ou solvants « naturels » sont connus pour leurs effets allergiques et de sensibilisation. Certains phtalates rendant le plastique flexible sont connus pour induire de l'asthme (Bornehag, 2004). Une étude présentée par l'association des Allergologues à l'Université de Lille en 2009 (Baden, 2009) sur 64 patients asthmatiques, dont le domicile a été analysé au Luxembourg a mis en évidence des contaminations des poussières dans 75% des domiciles et notamment par des retardateurs de flamme (46%), des pyréthri-noïdes (42%) et des biocides (29%), des moisissures (29%) ou du formaldéhyde (25%), presque la moitié des domiciles présentent de véritables cocktails de substances polluantes.

II.9. Irritations des muqueuses, de la peau et troubles respiratoires

Les muqueuses et les voies respiratoires sont les premières touchées du fait qu'elles entrent directement en contact avec les polluants chimiques ou mycologiques dans l'air. Il n'est donc pas étonnant que de nombreux agents irritent les muqueuses, notamment les yeux, le nez ou encore la peau (démangeaisons, névrodermites) ou provoquent des symptômes allergiques (rhinites, ...).

De même les affectations des voies respiratoires telles que la toux, les bronchites ou encore l'asthme constituent des symptômes typiquement induits ou renforcés par les expositions aux polluants « indoor ». Ainsi une étude suédoise (Bornehag, 2004) comparant les concentrations de poussières en phtalates des chambres à coucher d'enfants asthmatiques à des enfants sans symptômes a mis en évidence que le risque de développer de l'asthme triple (x 3) si l'enfant (1-6 ans) est exposé au DEHP un phtalate omniprésent dans les bâtiments, ceci pour des concentrations > 1300 µg/g (voir F5).

F 5 : Risque de développer de l'asthme en fonction des concentrations de DEHP dans les poussières (µg/g) selon Bornehag 2004



Agents chimiques typiques pouvant induire des **irritations des muqueuses ou de la peau** selon le médecin-toxicologue allemand Max Daunderer qui fût le toxicologue-dirigeant lors des accidents de Bophal en Inde (isocyanates) et de Seveso en Italie (dioxines) et qui s'est spécialisé par la suite dans le domaine de la médecine environnementale (Daunderer 1990 et 1995) :

- Certains COV
- Terpènes
- Éthers de glycol
- Formaldéhyde et autres aldéhydes
- PCP, lindane (biocides)
- Arsenic, plomb (métaux lourds)

Agents chimiques typiques pouvant induire des **affectations des voies respiratoires** (Daunderer 1990 et 1995) :

- Formaldéhyde et autres aldéhydes
- Isocyanates
- PCP, lindane (biocides)
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP
- Retardateurs de flamme organo-phosphorés (tris-phosphates)
- Arsenic
- Radon

II.10. Symptomatologies nouvelles ou émergentes

Certaines maladies liées à l'exposition dans les bâtiments sont relativement nouvelles et ont fait leur apparition durant les dernières décennies.

Sick building syndrom (SBS) ou syndrome du bâtiment malsain (SBM)

Le syndrome du bâtiment malsain est un syndrome décrivant une combinaison de symptômes ou de maladies médicalement inexplicables et associés à un bâtiment, par exemple à un lieu travail (immeubles de bureaux, ateliers). Ce syndrome, décrit pour la première fois dans les années 1970, semble lié au caractère neuf des bâtiments et peut donc être associé aux matériaux de construction, au mobilier, aux systèmes de ventilation ou de climatisation, aux équipements électriques et électroniques ou encore au développement de microorganismes en relation avec des problèmes d'humidité. Un groupe d'experts de l'OMS a défini dès 1983 le SBS comme une « combinaison de symptômes atypiques incluant céphalées, fatigue, irritations des yeux, des narines, sécheresse de la peau, troubles de concentration chez les personnes travaillant dans des lieux confinés ». En 1984 un rapport de l'OMS estimait que ce syndrome prenait localement l'apparence d'épidémies touchant jusqu'à 30% des bâtiments nouvellement construits ou rénovés. Le SBS peut apparaître dans des immeubles conformes à toutes les normes existantes selon le rapport de l'OMS.

Un groupe de travail OTAN/Commission Européenne a défini en 1992 le SBS comme un « complexe de symptômes atypiques sans qu'une maladie définie avec des paramètres pathologiques puisse être diagnostiqué clairement. Cinq groupes de symptômes décrivent les plaintes principales à l'intérieur des bâtiments : irritations sensorielles, symptômes neurologiques, irritations cutanées, hypersensibilités non spécifiques et dysesthésies olfactives et gustatives » (COST, 1992).

Les symptômes correspondant au SBS sont non spécifiques :

- Irritations des yeux (sensation d'yeux secs ou brûlants et larmoyants)
- Irritation du nez (avec sensation de muqueuses sèches ou sécrétions au contraire trop fluides)
- Irritation de la gorge (raclements de gorge, avec ou sans toux, avec parfois difficulté à déglutir)
- Peau sèche, démangeaisons cutanées, avec éventuels érythèmes, eczéma
- Rarement : gêne ou trouble discret à l'audition
- Nez bouché ou gêne à respirer par le nez, plus rarement : sensation d'oppression de la poitrine et exceptionnellement : difficultés respiratoires sérieuses (asthmatiformes, œdème évoquant alors des réactions allergiques et un choc anaphylactique)
- Modifications sensorielles plus subtiles tels qu'étourdissements, vertiges, difficulté à se concentrer ou à mémoriser, qui peuvent parfois faire évoquer l'effet neurotoxique
- Problèmes de santé plus ou moins diffus et non spécifiques allant de maux de tête récurrents à des réactions d'hypersensibilité à une odeur ou impliquant le goût, une hypersensibilité à l'électricité (EHS) ou d'autres sens, en passant par la fatigue et l'apathie.

Ces facteurs sont reconnus par de nombreuses études comme étant à l'origine du SBS de manière générale : l'utilisation croissante de matériaux synthétiques pour la construction, le mobilier et les produits de consommation et la réduction des échanges d'air résultant des efforts en termes d'efficacité énergétique (Molhave 1990 et 1992 et Järveholm 1993).

Gebbers, un chercheur de l'Institut Environnemental de l'hôpital cantonal de Lucerne (Gebbers, 2003) cite parmi les causes principales - d'après de nombreuses études - le manque d'aération et les ventilations mécaniques contrôlées, mais également les matériaux de construction, les produits de nettoyage, les imprimantes, les moquettes et les revêtements de sol synthétiques, les pesticides ou biocides et les moisissures.

Building related illness (BRI)

À l'opposition du SBS, le BRI décrit selon Gebbers « toutes les maladies dans l'acceptation classique (étiologies et symptômes) pouvant être dues aux bâtiments et plus précisément à un environnement spécifique par exemple des infections (légionellose pulmonaire), des maladies oncologiques (radon, amiante) et allergiques (acariens, moisissures) » (Gebbers, 2003).

Il s'agit donc en d'autres termes généralement de réactions allergiques ou de symptômes spécifiques et cliniquement définis (toux, douleurs musculaires, rhumes) et dus à une cause bien particulière propre au bâtiment et connue (par exemple la légionellose par des bactéries du système de climatisation ou les rhinites allergiques ou asthmes dues à des spores de moisissures dans le cas de tâches de moisissures à cause de ponts thermiques).

Multiple Chemical Sensitivity (MCS)

L'hypersensibilité chimique multiple (multiple chemical sensitivity ou MCS en anglais) est une affection chronique caractérisée par des symptômes que les personnes qui en souffrent, attribuent à des expositions de bas niveau à des composés chimiques. Les substances les plus couramment citées incluent les produits parfumés, les pesticides, les plastiques, les tissus synthétiques, la fumée, le pétrole et ses dérivés et les émanations de peinture. Les symptômes sont généralement vagues et non spécifiques, comme la nausée, la fatigue chronique, les vertiges et les migraines, mais incluent aussi communément de l'asthme ou encore des inflammations de la peau, des articulations, des voies gastro-intestinales et des voies respiratoires.

On peut caractériser l'hypersensibilité chimique multiple comme une « maladie chronique et récurrente causée par l'incapacité d'une personne à tolérer un produit chimique ou une classe de produits chimiques. » Alors que l'OMS tarde à reconnaître l'MCS, celle-ci est reconnue par le Parlement Européen (depuis 2012) ainsi que par l'Administration de la Sécurité Sociale aux Etats-Unis.

En 1987, un expert en médecine et en épidémiologie américain, le professeur Mark Cullen établit sept critères concernant le MCS, reconnus par la suite comme les critères Cullen (Cullen, 1987) :

- La maladie est acquise en relation à une exposition documentée
- Les symptômes sont multi-organes (affectent plus d'un organe)
- Les symptômes se reproduisent et diminuent de façon prévisible en réponse à un stimulus
- Les symptômes se manifestent lors d'expositions à des substances chimiques de différentes classes structurales et de mode d'action toxicologiques divergents
- Les symptômes se manifestent lors d'expositions qui sont démontrables (quoique des expositions faible dose)
- Les expositions induisant les symptômes sont très faibles, c.à.d. nettement inférieures aux expositions « moyennes » connues pour induire des réponses humaines défavorables
- Les symptômes ne peuvent être expliqués par un test de fonctionnement d'un organe connu

Une autre définition a été établie lors d'une conférence américaine en 1999 avec les critères suivants : (MCS Consensus Conference) :

- Une maladie ou état chronique
- Des symptômes qui réapparaissent de façon reproductible
- Multi-organes (symptômes affectant différents organes)
- En réponse à des doses faibles d'exposition
- En réponse à des substances chimiques multiples et sans lien entre-elles
- L'état (maladie) s'améliore ou disparaissent si l'on évite les polluants responsables

Ces critères ont été complétés en 2005 par le chercheur allemand Michael Lacour (Lacour, 2005) par les critères en aval :

- Une détérioration significative fonctionnelle ou de style de vie pendant au moins 6 mois
- Des symptômes affectant le système nerveux central en association avec un auto-diagnostic de MCS
- Les symptômes doivent affecter à la fois le système nerveux central et au moins un autre organe ou système d'organes

En ce qui concerne les causes de MCS, différents facteurs peuvent être associés à son développement selon le « Danish research centre for chemical sensitivities » qui était un institut financé par le ministère de l'Environnement danois mais qui était intégré dans le département de dermatologie et d'allergologie de l'hôpital universitaire de Copenhague (le centre a été fermé en 2013) :

- Les symptômes peuvent apparaître par suite d'une exposition accidentelle à des doses élevées de solvants ou de pesticides
- Les symptômes peuvent apparaître à la suite d'une exposition chronique à des doses faibles par exemple des substances chimiques émettant à l'intérieur des bâtiments ou de surfaces traitées par exemple avec des fongicides/biocides

- D'autres facteurs comme des infections ou le stress des traumatismes physiques ou psychiques peuvent également jouer un rôle dans le développement de l'MCS

Très souvent il n'est pas possible d'identifier une exposition spécifique comme cause.

Electro Hyper Sensitivity (EHS)

L'Electro Hyper Sensitivity (EHS) ou hypersensibilité électromagnétique fait référence aux personnes qui souffrent de symptômes en présence de champs ou d'ondes électromagnétiques. L'EHS se traduit par une variété de symptômes non-spécifiques divergeant d'une personne à l'autre. Les symptômes incluent des symptômes cutanés (rougeurs, « tingling burning sensations ») et des symptômes neurasthéniques et végétatifs (fatigue chronique, troubles de concentration, vertiges, nausées, palpitations cardiaques ou perturbations du tube digestif).

Cette pathologie est parfois aussi appelée intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (ou IEI-CEM) ou syndrome d'intolérance aux champs électromagnétiques (SICEM). Les réactions d'électrosensibilité s'accompagnent de processus biochimiques bien définis et décrits dans la littérature scientifique. Ainsi des analyses cliniques (Belpomme, 2018 et 2020) ont révélé des changements cellulaires chez les patients EHS sous exposition : migration des cellules basophiles – une composante du système immunitaire - vers la peau avec sécrétion d'histamine (substance sécrétée lors de réaction allergiques), de mélatonine et de sérotonine, calcitonine, somatostatine, protéines de stress et d'autres biomarqueurs. Ces altérations biochimiques et immunologiques qui sont par ailleurs similaires aux expositions aux rayons UV ou aux rayons ionisants (radioactivité) apportent la preuve que le phénomène EHS est bien physique et réel.

Les estimations quant à la prévalence divergent de quelques personnes par million (étude de surveillance des centres médicaux de santé au travail jusqu'à quelques pourcents - Suède 2,6-3,2% (2006), Autriche 3,5% (2001), Suisse 5% (2006), Californie 3,2%/2002), Canada 3% (2006) avec une tendance vers un accroissement du nombre de cas parallèle à l'augmentation de l'exposition.

L'OMS (OMS, 2005) décrit le phénomène d'hypersensibilité électromagnétique comme un ensemble de symptômes attribuables à l'exposition à des champs électromagnétiques parmi lesquels on peut mentionner des symptômes dermatologiques (rougeurs, picotements et sensations de brûlure), des symptômes neurasthéniques et végétatifs (fatigue, lassitude, lourdeur dans la tête, irritation des yeux, difficultés de concentration, maux de tête, angoisses, acouphènes, vertiges, étourdissements, nausées, palpitations cardiaques et troubles digestifs).

Les effets des champs électromagnétiques se différencient en effets thermiques et en effets non thermiques ou athermiques. Alors que les effets biologiques sont indéniables pour ces derniers, la discussion porte actuellement sur la pathogénicité de ces effets biologiques athermiques donc sur la question si ces effets biologiques induisent des maladies.

Le Centre international de Recherche sur le Cancer CIRC (IARC en anglais) a classé les champs magnétiques de basses fréquences ainsi que les champs électromagnétiques de hautes fréquences comme potentiellement cancérogènes (classe 2B). De même, le Conseil de Santé néerlandais et le Conseil Supérieur de Santé belge ont publié en 2012 un rapport sur les leucémies infantiles liées aux facteurs environnementaux (EuSANH, 2012) mettant en évidence un lien possible avec une exposition aux champs magnétiques de basses fréquences.

Intolérance environnementale Idiopathique (IEI)

Les deux phénomènes MCS et EHS sont parfois regroupés sous le terme de IEI ou intolérance environnementale Idiopathique considérant à la fois les polluants chimiques et les facteurs physiques tels que les champs électromagnétiques.

En 1996, un programme (ICPS, 1996) sous la tutelle de l'OMS, de l'UNEP (UN Environmental Program) et de l'ILO (UN Labour Organisation), appelé IPCS (International Programme on Chemical Safety) a proposé à l'occasion d'une conférence à Berlin de changer le terme de MCS en IEI ou intolérance environnementale idiopathique en raisonnant que le terme de MCS indiquait une relation cause à effet entre les symptômes et les substances chimiques, relation non établie aux yeux des experts de la conférence.

L'intolérance Environnementale idiopathique (IEI) serait définie comme :

- Une maladie acquise avec de nombreux symptômes récurrents
- Associée à divers facteurs environnementaux tolérés par la majorité des gens
- Non expliquée par des pathologies médicales ou psychologiques/psychiques connues

Chronic Fatigue syndrome (CFS)

Il s'agit d'une fatigue chronique excessive tant sur le plan corporel que sur le plan mental accompagnée de douleurs musculaires et d'autres symptômes. Concrètement, ce syndrome se traduit par une dérégulation des systèmes nerveux, immunitaires et hormonaux reconnue par l'OMS (ICD-10) et qui toucherait de 1 à 3 % de la population totale. Bien que les causes demeurent inconnues, et que 80 % des cas semblent être d'origine bactérienne ou virale, certains polluants typiques de l'environnement intérieur comme les COV, certains biocides ou insecticides, différents métaux lourds et des agents conservateurs pourraient également contribuer au développement du CFS.

Autres

Bon nombre des substances chimiques typiquement utilisées dans la confection de matériaux et de produits de construction sont classés mutagènes ou reprotoxiques¹². Finalement des effets épigénétiques c'est-à-dire des modifications de l'expression génétique plus ou moins irréversibles peuvent être observés avec différents agents chimiques comme certains métaux lourds, certains biocides (ex. méthoxychlor) voir certains perturbateurs endocriniens comme le bisphénol A.

II.11. Maladies professionnelles

Par définition, une maladie professionnelle est une maladie qui a sa cause déterminante dans l'activité professionnelle. Les maladies professionnelles sont généralement des affections persistantes, c'est-à-dire des entraves à la capacité de travail dont souffrent des travailleurs particuliers ou des groupes précis de travailleurs à la suite de leur activité professionnelle. Ce sont des affections qui ne seraient pas survenues ou du moins pas survenues de la même façon en l'absence d'exposition liée au travail. Elles sont la conséquence directe d'une exposition plus ou moins prolongée à un risque (physique, chimique ou microbien) ou à des conditions de travail spécifiques (bruit, vibrations, postures de travail...) dans le cadre de l'exercice habituel d'une profession.

¹²Les substances cancérigènes, mutagènes –donc provoquant des mutations génétiques pouvant induire des cancers – et reprotoxiques sont regroupés sous le terme de « substances CMR »

Les maladies dues à une exposition professionnelle sont à l'origine des valeurs limites dans le secteur du travail qui en absence de seuils ou limites en matière de qualité de l'air intérieur sont souvent mentionnées. En effet, les polluants en relation avec la construction et l'occupation des bâtiments tant résidentiels que fonctionnels sont en partie les mêmes qu'en exposition professionnelle bien que les concentrations diffèrent sensiblement.

Au Luxembourg la reconnaissance des maladies professionnelles tombe sous la compétence de l'Association Assurances Accidents (AAA). Les maladies professionnelles sont reprises dans des listes non exhaustives, listes qui peuvent donc s'agrandir au fil du temps.

Liste des tumeurs professionnelles reconnues au Luxembourg en relation avec une exposition sur le lieu de travail (situation 1989) par des polluants qui sont également susceptibles de contaminer l'air intérieur au sein des bâtiments résidentiels ou fonctionnels :

- Leucémies par le benzène, le toluène (COV)
- Leucémies et cancer du poumon par des substances radioactives
- Cancer du mésothéliome par l'amiante
- Cancer hépatique par le PVC
- Cancer de la peau, du rein ou du poumon par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

D'autres maladies professionnelles reconnues concernent les polluants suivants (d'après le règlement grand-ducal du 2 octobre 1992, dernier état 1998) et la liste de la chambre des Salariés Luxembourg (CSL, 2019) :

- COV
- Pesticides
- Hydrocarbures halogénés
- Benzène et similaires,
- Styrène
- Substances organo-phosphorées
- Isocyanates
- Anthracène (appartenant au HAP)
- Amiante
- Métaux lourds (plomb, mercure, chrome, cadmium, manganèse, arsenic, nickel, aluminium)

D'autre part, le naphthalène et le pyrèthre sont interdits sur le lieu du travail selon la loi du 17 juin 1994 et le règlement grand-ducal du 30 juillet 1994 prévoit des limitations sévères lors de la production pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, le benzène et les monomères du PVC.

Jurisprudences de maladies professionnelles en relation avec des contaminations de l'air intérieur du bâtiment.

En 2013, une secrétaire d'un bâtiment scolaire luxembourgeois s'est fait attester une incapacité de travail partielle permanente à la suite d'une maladie professionnelle pour cause de « syndrome d'hypersensibilité chimique multiple » par l'AAA en rapport avec une exposition à des éthers de glycol et à un retardateur de flamme, le TBEP contenus dans un produit de décapage du parquet appliqué en 2008 dans son bureau. La patiente souffrait d'une perte de 20% de sa capacité respiratoire, de sinusites à caractère allergique récidivantes (attestées par le médecin ORL traitant) et d'exéma de la peau. L'exposition a été constatée et attestée de façon quantitative par une analyse de la qualité de l'air intérieur.

De façon similaire, le tribunal du contentieux de l'incapacité de F-Toulouse en juillet 2015 a réévalué le taux d'incapacité de 50-85 % pour une personne se disant électrosensible ce qui lui permet de prétendre à percevoir l'allocation adulte handicapé.

D'autres cas de maladies professionnelles ont été prononcées en France pour des agriculteurs exposés à des pesticides similaires aux biocides pouvant émaner de poutres ou moquettes traitées à l'intérieur des bâtiments.

II.12. Glossaire des substances nocives

Agents pollueurs à prendre en compte en matière de qualité de l'air et de l'environnement intérieurs. En matière de polluants ou facteurs de pollution susceptibles de porter préjudice à la santé des occupants des bâtiments, il faut distinguer entre les polluants chimiques, les agents microbiologiques, en l'occurrence les moisissures et les facteurs physiques. Il importe de prendre en compte un maximum de facteurs susceptibles de nuire à la santé si l'on veut avoir la garantie d'une absence d'exposition lors de l'occupation du bâtiment et donc éviter des effets négatifs sur la santé humaine.

II.12.1. Agents chimiques

Selon les techniques de prélèvement ou d'échantillonnage les agents chimiques se subdivisent en composés organiques volatils (COV) qui sont prélevés dans l'air et les composés organiques semi- ou peu volatils (COSV) qui sont normalement analysés au moyen de poussières récoltées.

Du point de vue chimique, fonctionnel et toxicologique, les substances chimiques se subdivisent en familles qui sont décrites de façon succincte :

II.12.1.1. COV ou composés organiques volatils

Les substances volatiles se subdivisent en deux grandes classes, les composés organiques volatils ou COV d'une part et les aldéhydes d'autre part. Les COV se subdivisent en plusieurs sous-groupes en fonction notamment de leur composition chimique :

II.12.1.1.1. COV classiques, à savoir les aromates et les aliphatiques

- Les composés aromatiques sont parfois encore appelés les BTX, du fait que le benzène, le toluène et les xylènes sont des substances typiques appartenant à ce groupe.
- Les composés aliphatiques, notamment les alcanes, les alcènes et les cycloalcanes.

Les aromates et les aliphatiques constituent les solvants que l'on retrouvait classiquement dans les peintures et les colles à solvants et qui sont toujours présentes dans le mazout ou l'essence.

Les COV sont normalement assimilés par voie inhalatrice. Comme ils sont liposolubles, ils passent facilement les membranes lipidiques des cellules nerveuses ou neurones et pénètrent dans le cerveau où ils ont un effet narcotique en bloquant le système nerveux central. Les symptômes types sont ainsi des vertiges, des nausées, des abasourdissements et des abattements ou encore des maux de tête.

En principe, ces troubles de santé sont réversibles ; en effet, les COV sont métabolisés via le foie et éliminés par les reins. Des expositions chroniques à longues durées sont cependant capables d'induire des dégâts irréversibles au niveau du foie, des reins ou encore du système nerveux. Certains COV sont classés cancérigènes à l'image du benzène, de l'éthylbenzène et du styrène, entre autres. Les COV aliphatiques ou alcanes provoquent des irritations de la peau et des muqueuses et peuvent être allergisants.

II.12.1.1.2. Paraffines

Les paraffines sont des cocktails ou mélanges d'alcane originares du pétrole. Ils sont liquides, huileux ou solides et hydrophobes, donc insolubles dans l'eau. En conséquence on les utilise notamment pour l'imprégnation de textiles, de papiers, de bois ou de métaux pour les protéger contre l'humidité et la corrosion (métaux). Certaines laques, vitrifications, isolants et produits d'entretien contiennent des paraffines. En termes de santé, les paraffines sont peu étudiées. Des effets de dessiccation de la peau sont connus en rapport avec une utilisation de paraffines dans des produits cosmétiques. De plus, des dégâts cellulaires ont été montrés dans des études sur des animaux, de même qu'une accumulation dans certains organes cibles, notamment le foie, les reins et les ganglions lymphatiques.

II.12.1.1.3. Composés organiques halogénés

Les composés organiques halogénés, sont des COV équipés d'un ou de plusieurs atomes de chlore généralement. Comme ils ont des propriétés de « dégraissant », les COV halogénés sont communément utilisés comme dégraissants sur le chantier ou dans les nettoyages à sec. Le tri- et le tétrachloroéthylène (ou perchloréthylène) sont classés cancérigènes.

II.12.1.1.4. Terpènes

Les terpènes sont naturellement présents dans les résines de bois, notamment dans certains conifères. Ils sont utilisés comme « solvants » naturels dans de nombreux produits écologiques ou naturels ou encore comme huiles essentielles ; ainsi le limonène a l'odeur du lemon/citron, les pinènes ont l'odeur du pin/bois. Néanmoins, ces terpènes peuvent avoir un effet allergisant voir irritant ou sensibilisant (muqueuses). D'autre part, ils peuvent réagir avec l'oxygène de l'air ou avec l'ozone pour générer des aldéhydes.

II.12.1.1.5. Éthers de glycol

Les éthers de glycol sont un groupe de solvants volatils à semi-volatils qui se mélangent facilement avec l'eau tout comme avec les graisses, d'où leur utilisation comme agents conservateurs dans les produits de peintures à base d'eau, les peintures à dispersion et certains produits de nettoyage ou colles. Les éthers de glycol ont un effet allergène et irritant. Ils sont classés comme nocifs par inhalation, par voie buccale et par voie cutanée. Parmi les symptômes typiques, il faut signaler les irritations des voies respiratoires, de la peau et des yeux ainsi que des vertiges.

D'autre part, certains éthers de glycol sont reprotoxiques ou toxiques pour les reins ou le fœtus ou peuvent provoquer des anémies c'est-à-dire une diminution du taux de globules rouges voire des globules blancs, donc des cellules intervenant dans les réponses immunitaires.

Alors que les hydrocarbures classiques et notamment les hydrocarbures aromatiques et aliphatiques ont tendance à s'évaporer rapidement (endéans deux à trois semaines généralement) et peuvent donc être éliminés rapidement par une aération adéquate, les éthers de glycol ont tendance à s'évaporer beaucoup plus lentement et peuvent ainsi contribuer à une contamination de l'air à moyen terme (plusieurs mois, voire une année).

II.12.1.1.6. Siloxanes

Les siloxanes utilisés notamment dans des produits cosmétiques ou alimentaires, mais également dans la construction sont des substances chimiques relativement peu étudiées en ce qui concerne leurs effets de santé potentiels. En termes de matériaux de construction on les retrouve notamment en tant que lubrifiant dans les peintures ou laques, dans certains produits de nettoyage d'entretien ou dans des textiles ou encore en raison de leurs propriétés hydrophobes dans les silicones. Ils sont volatils et classés comme persistants

(groupe des vPvB – very persistent very bioaccumulative) selon l’agence européenne des substances chimiques ECHA – European Chemicals Agency (annexe XIII REACH). Certains siloxanes sont reconnus être reprotoxiques (D4 - octaméthylcyclotetrasiloxane), toxiques pour le foie (D4) ou les poumons (D5 - décaméthylcyclopentasiloxane) ou encore les reins. L’Union Européenne a également reconnu le D4 comme reprotoxique (EU 1272/2008).

II.12.1.1.7. Phénols

Les phénols sont utilisés notamment dans les résines artificielles (phénoplastes) et dans certains plastiques, dans des peintures ou comme pesticides. Ils sont irritants pour la peau. D’autre part, les phénols constituent des poisons nerveux pouvant notamment provoquer des maux de tête, des nausées ou des vertiges. Ils sont toxiques pour les reins et le foie et suspectés d’être mutagènes. L’exposition aux phénols se fait par inhalation, par ingestion ou par voie transcutanée (donc par la peau).

II.12.1.1.8. Alcools

Les alcools sont des solvants qui provoquent des symptômes neurologiques classiques comme les maux de tête, les vertiges ou les nausées. À exposition chronique ils sont également hépatotoxiques étant donné que les alcools lipophiles sont métabolisés au niveau du foie. Du fait que les alcools sont très volatils et s’évaporent rapidement, les effets de santé sont temporaires et transitoires.

II.12.1.1.9. Esters et éthers

Les esters et éthers sont utilisés comme solvants dans les laques et les colles notamment les produits à dispersion (à base d’eau). Ils sont irritants notamment pour les yeux et peuvent avoir des effets neurologiques, généralement réversibles.

II.12.1.1.10. Cétones

Les cétones sont des solvants présents dans des laques ou peintures. Ils sont irritants notamment pour les yeux et peuvent avoir des effets neurologiques, généralement réversibles.

II.12.1.1.11. Isothiazolinones

Les isothiazolinones sont utilisés comme conservateurs dans les peintures et colles liquides à base d’eau en raison de leurs propriétés bactéricides et fongicides. Ils sont irritants pour les muqueuses et la peau.

II.12.1.1.12. Isocyanates

Les isocyanates sont des composantes du polyuréthane (PU ou PIR). En effet, les mousses en PU s’obtiennent par une réaction chimique entre les isocyanates et les polyols. On les retrouve également dans les peintures et colles à base de polyuréthane. Les isocyanates ont des effets irritants pour les muqueuses et la peau. Ils sont allergisants et peuvent provoquer de l’asthme. Les isocyanates émanent surtout à des températures supérieures à 150-200°C de sorte qu’un risque à température ambiante se limite à la manipulation et la fabrication des mousses et se limite donc en principe aux travailleurs.

II.12.1.2. Aldéhydes

Les aldéhydes constituent le deuxième groupe de substances volatiles, étant donné que leur détection par analyse chimique se distingue de celle des COV décrits en amont (chromatographie en phase gazeuse GC/MS pour les COV, HPLC pour les aldéhydes). L’aldéhyde le mieux connu est le formaldéhyde qui est classiquement utilisé comme désinfectant ou conservateur dans les produits cosmétiques. D’autres champs d’utilisation sont les colles, les bois agglomérés, les parquets lamellés, certaines peintures ou vernis. Parmi les autres aldéhydes, il faut citer notamment le nonanal et l’hexanal qui sont typiques dans certains produits «

écologiques » notamment des peintures et des colles ou encore l'acétaldéhyde classé cancérigène tout comme le formaldéhyde. D'autre part, les aldéhydes peuvent être générés par l'oxydation des terpènes ou des acides gras insaturés de certains linoléums au contact avec l'air ou avec l'ozone (provenant de l'extérieur ou de certaines imprimantes). Les réactions immédiates en cas d'exposition aux aldéhydes se manifestent par des irritations des yeux, du nez et des muqueuses, des maux de tête et plus rarement des nausées, des troubles de concentration et une irritabilité. Une exposition chronique peut provoquer des allergies, des troubles des voies respiratoires, une toux irritative voir des inflammations du système nerveux ou des reins. Le formaldéhyde et l'acétaldéhyde sont classés cancérigènes pour l'homme.

II.12.1.3. COSV ou composés organiques peu ou semi-volatil

Les substances semi-volatiles se retrouvent aussi bien dans l'air que sur les poussières où elles adsorbent. Si théoriquement, on peut les analyser aussi bien par des prélèvements d'air que par des prélèvements de poussières, on se limite généralement aux prélèvements de poussières étant donné que les résultats sont plus fiables et représentatifs et les prélèvements plus faciles à réaliser (ce type de prélèvement est d'ailleurs décrit et accepté par les DIN VDI allemandes (VDI, 1994). De plus, les banques de données permettant de comparer les concentrations dosées se basent essentiellement sur des analyses de poussières.

II.12.1.3.1. Biocides

Les biocides sont utilisés pour préserver différents matériaux organiques comme le bois, le cuir ou les tissus contre les insectes (insecticides) ou les moisissures (fongicides). Certains biocides sont interdits dans différents Etats Membres de l'Union Européenne à l'image du pentachlorophénol ou PCP (interdit en Allemagne, en Belgique, au Luxembourg), du lindane (interdit en Suisse) ou du DDT (interdit selon la convention POP de Stockholm).

La plupart des biocides agissent sur le système nerveux ou sur le système immunitaire. De plus ils sont souvent irritatifs pour les muqueuses et les voies respiratoires. Un nombre important des biocides habituels est persistant, lipophile et bioaccumulable.

II.12.1.3.2. Pyréthrinoïdes

Les pyréthrinoïdes ont fait leur apparition dans les années 90 où ils ont successivement remplacé les biocides. Les pyréthrinoïdes sont des insecticides typiquement utilisés pour protéger les tapis et les moquettes contre les mites. De même, le bois ou le cuir peuvent être traités avec des pyréthrinoïdes. D'autre part, les produits contre les insectes comme les sprays, les électro-évaporateurs ou encore les anti-poux et –puces sont souvent à base de pyréthrinoïdes. Les pyréthrinoïdes ressemblent à un insecticide naturel, le pyrèthre présent dans les chrysanthèmes. Mais au contraire du pyrèthre, les pyréthrinoïdes synthétiques qui sont généralement halogénés sont stables dans le temps, non biodégradables, persistants et peuvent donc s'accumuler dans l'organisme humain.

Parmi les symptômes types, il faut citer des démangeaisons de la peau, des fourmillements des bras et des jambes ou au contraire une perte de sensations, des maux de tête, des vertiges et des nausées, des abattements et des dépressions ou encore une hypersensibilité des voies respiratoires. Du fait du contact avec la peau, les pyréthrinoïdes peuvent provoquer des réactions allergiques. Une exposition chronique peut nuire au système nerveux.

II.12.1.3.3. Retardateurs de flamme polybromés ou diphenyléthers polybromés (BDE) ou (PBDE)

Les diphenyléthers polybromés sont essentiellement utilisés comme retardateurs de flamme dans les appareils électriques et électroniques. Certains BDE sont repris dans la liste des POP de la convention de Stockholm. Depuis 2006, l'Union Européenne (2003/11/EG et 2002/95/EG9, a limité l'utilisation des polybromodiphenyléthers (PBDE) qui sont reconnus pour certains d'être cancérigènes et d'avoir un effet hormonal (perturbateurs endocriniens).

II.12.1.3.4. Retardateurs de flamme organo-phosphorés

Il s'agit d'une famille de molécules qui sont chimiquement voisines du Sarin. Comme pour le Sarin, les organophosphates réagissent sur l'organisme humain en bloquant irréversiblement une enzyme, l'acétylcholinestérase qui intervient dans la transmission du flux nerveux d'un neurone vers l'autre. L'agence américaine de la protection de l'environnement EPA reconnaît une polyneuropathie (maladie du système nerveux) induite par l'exposition chronique aux organo-phosphates : OPICN et OPIDN (organophosphorous induced chronic/delayed neuropathy). Les retardateurs de flamme organo-phosphorés sont utilisés non seulement en tant que retardateurs de flamme mais encore comme plastifiants. Le TBEP est utilisé dans les vitrifications de revêtements de sol et dans certains produits d'entretien et de nettoyage pour ses propriétés d'anti-dérapant et pour son caractère de brillance.

Les trisphosphates ont un effet toxique sur le système nerveux. Les effets immédiats d'une intoxication sont des irritations de la peau et des muqueuses (yeux, nez, muqueuses) ainsi que des troubles du système respiratoire. Une intoxication chronique sur plusieurs années provoque des effets sur le système nerveux et le système immunitaire avec comme symptômes des infections répétées, de la fatigue ou encore des symptômes typiques d'une intoxication par des biocides. Certains retardateurs de flamme organo-phosphorés sont reconnus comme cancérigènes, à l'image du TCEP ou du TDCPP.

Selon l'institut allemand BGVV (deutsches Bundesinstitut für Gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin) les retardateurs de flamme organophosphorés devraient être évités à l'intérieur des bâtiments ainsi que dans les textiles.

II.12.1.3.5. Phtalates

Les phtalates sont des molécules qui donnent son élasticité au plastique et notamment au PVC (polyvinylchloride). Ainsi la teneur en phtalate pour un PVC élastique peut monter jusqu'à 80% en poids. Certains phtalates sont reconnus pour avoir des effets hormonaux sur le corps humain. C'est pourquoi on les classifie comme perturbateurs endocriniens. D'autre part, ils peuvent engendrer des effets sur le système nerveux central ou sur le système immunitaire. L'un des principaux représentants, le DEHP peut provoquer de l'asthme. Le DEHP est interdit dans les jouets pour enfants de moins de 3 ans à l'échelle européenne.

II.12.1.3.6. Biphényles polychlorés ou BPCs (PCB en anglais)

Les biphényles polychlorés ou « PCBs » sont une famille de substances chimiques (209 congénères) thermostables et hydrophobes qui ont été utilisés dans des systèmes ouverts (joints de dilatation pour éléments en béton, ...) ainsi que dans des systèmes fermés (huile hydraulique, condensateurs, ...). Depuis les années 70 ils sont interdits dans les systèmes ouverts et depuis les années 80 même dans les systèmes fermés. En effet ils sont classés comme probablement cancérigènes et repris dans la liste des POPs de la convention de Stockholm. Les « PCBs » sont par ailleurs immunosuppresseurs, liposolubles et bioaccumulables et sont considérés comme des perturbateurs endocriniens (effets hormonaux).

II.12.1.3.7. Hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP sont un groupe de polluants caractéristiques des combustions incomplètes. Les sources de pollution typiques de l'air intérieur sont les étanchéités bitumineuses et le goudron ainsi que tout matériau contaminé par le carboléum ou créosote qui était un biocide utilisé à large échelle dans les années 60.

L'exposition aux HAP passe par l'inhalation, par l'ingestion ou encore par la voie transcutanée (peau) du fait que les HAP sont lipophiles. Les HAP dégraissent la peau, provoquent des irritations des voies respiratoires, du tube digestif et des yeux. Plusieurs HAP sont cancérogènes pour l'homme. En Allemagne, l'utilisation de produits à base de goudron est interdite à l'intérieur des bâtiments (Teerölverbotsordnung, 1991).

II.12.1.3.8. PFAS

Les PFAS ou substances per- et polyfluoro alkylées constituent un groupe très hétérogène de molécules fluorées qui ont des propriétés antiadhésives, imperméabilisantes, antitaches ou retardateurs de feu. En raison de leur persistance, ils sont souvent appelés « polluants éternels » ou « forever chemicals ». Dans la construction, on les retrouve typiquement dans les peintures, laques, colles, revêtements de sol élastiques et moquettes, vitrifications, antitaches et dans les meubles, les tapis ou encore le cuir. Les symptômes typiques incluent les troubles du système immunitaire, les effets négatifs sur le développement fœtal et infantile, sur le cholestérol et l'obésité, sur le foie, la thyroïde ou le système cardiovasculaire. Certains congénères sont reconnus comme perturbateurs endocriniens (pseudo-hormones) ou comme cancérogènes (cancer des reins et des testicules). Ainsi le PFOA (ou APFO - acide perfluorooctanoïque) est classé « cancérogène reconnu pour l'homme – classe 1 » et le PFOS (acide perfluorooctanesulfonique) est classé comme « potentiellement cancérogène pour l'homme – classe 2B par le CIRC. Certains PFAS sont repris sur la liste des candidats « substances of very high concern (SVHC) » de la réglementation REACH/CLP européenne.

II.12.1.4. Métaux lourds

Alors que certains métaux lourds sont bénéfiques pour l'organisme humain à l'image du fer (responsable du transport d'oxygène dans le sang) ou encore du zinc qui est indispensable à plus de 300 réactions enzymatiques chez l'être humain notamment en rapport avec une stimulation du système immunitaire, d'autres métaux lourds sont néanmoins toxiques pour l'homme à l'image du plomb ou du nickel. Certains métaux lourds sont toxiques sous certaines formes chimiques ou valences et non ou moins toxiques sous d'autres formes, à l'image de l'arsenic (l'arsenic organique en faible quantité est inoffensif par opposition à l'arsenic inorganique, notamment sous forme As (III) trivalent) ou encore du chrome hautement toxique sous forme hexavalente Cr (VI) à l'inverse de la forme trivalente du Cr (III). L'aluminium qui n'est pas un métal lourd au sens propre peut également, sous certaines formes être nocif (forme ionique ou métallique). Finalement, certains métaux lourds peuvent être bénéfiques ou toxiques en fonction de la dose ; ainsi le cuivre à faible dose est indispensable pour stimuler le système immunitaire ou favoriser la synthèse d'hémoglobine permettant le transport d'oxygène vers le cerveau. À fortes doses cependant le même cuivre provoque une cirrhose du foie irréversible chez les bébés et nourrissons.

Parmi les métaux lourds « toxiques », il faut citer :

- Plomb : un neurotoxique (saturnisme) qui s'accumule dans les os humains et provenant des anciennes peintures au plomb ou encore des tuyaux d'eau potable en plomb
- Nickel : provoque de l'exéma de la peau et qui est déclaré cancérogène (classe 1)
- Manganèse : un neurotoxique (favorisant le parkinsonisme) présent par exemple dans certains toners d'imprimantes

- Arsenic : toxique sous forme inorganique, provoquent de l'exéma de la peau sous sa forme inorganique
- Mercure : un neurotoxique cancérigène (classe 1) présent notamment dans les ampoules basses énergie
- Barium : lampes fluorescentes
- Chrome hexavalent : cuir

II.12.1.5. Monoxyde de carbone CO

Le monoxyde de carbone est un gaz inodore généré lors de combustions incomplètes (chauffages à combustion), dans les gaz d'échappement de voitures dans les garages par exemple mais aussi lors de la fermentation des pellets dans le lieu de stockage. Le monoxyde de carbone est un gaz toxique inodore qui provoque des maux de tête et des vertiges et qui peut même entraîner la mort par asphyxie. L'accumulation de monoxyde de carbone par des combustions (boilers à gaz) ou des gaz d'échappement de voitures constitue donc un danger de mort pour les personnes exposées et donc les occupants des bâtiments concernés.

II.12.1.6. Dioxyde de carbone CO₂

Le dioxyde de carbone est un gaz inodore généré lors des combustions mais également produit par l'homme lors de la respiration cellulaire. De ce fait le dioxyde de carbone est un bon indicateur du taux de renouvellement de l'air puisqu'il est constamment émis en présence humaine. Une accumulation de CO₂ dans l'air indique une mauvaise aération ce qui favorise également – du moins partiellement - une accumulation potentielle d'autres substances nocives, en l'occurrence des COV. D'autre part, bien que produit par l'homme lors de la respiration, le CO₂ est un gaz nocif qui provoque à des taux élevés des maux de tête et des vertiges et à des taux supérieurs de la tachycardie et finalement un arrêt respiratoire et donc la mort. Il faut cependant remarquer que ces effets nocifs corrélerent à des concentrations nettement supérieures aux valeurs usuelles observées dans les bâtiments même en cas d'aération ou de ventilation inadéquates.

En conclusion le CO₂ est plutôt un bon indicateur du renouvellement de l'air que de la qualité de l'air intérieur comme le décrit l'annexe A4.

II.12.2. Agents microbiologiques

Il existe différents agents microbiologiques, donc des polluants en relation avec des microorganismes susceptibles de contaminer l'air intérieur et de porter préjudice à la santé humaine. Les microorganismes concernés sont les bactéries ainsi que les moisissures et les levures, ces deux derniers constituant le groupe des « champignons » microscopiques.

Les bactéries peuvent former des spores ou libérer des endotoxines. Les endotoxines constituent des polysaccharides qui sont des composantes des membranes bactériennes qui sont uniquement libérées à la mort des bactéries.

Les moisissures émettent des spores mais également des mycotoxines et des COV mycologiques appelés communément des MCOV.

Les spores de moisissures constituent la façon asexuée des moisissures à se reproduire. À ce titre les spores sont libérées dans l'air ambiant à la recherche de milieux favorables au développement de moisissures (endroits humides). Il en résulte que les concentrations en spores de l'air ambiant intérieur peuvent considérablement accroître en cas de contamination par des moisissures et porter ainsi préjudice à la santé des occupants.

Les mycotoxines sont des substances toxiques que les moisissures vivantes secrètent pour éliminer d'autres microorganismes (compétition entre espèces). Ainsi la pénicilline est un antibiotique sécrété par les moisissures du genre *Penicillium* spp. qui tue les bactéries pouvant entrer en compétition avec la moisissure.

Les MCOV sont responsables de l'odeur typique du moisi déjà à des concentrations très minimes et apparemment non nocives dans les concentrations habituelles.

Les levures sont des microorganismes ou champignons microscopiques mais à aspect lisse (au contraire de l'aspect filamenteux des moisissures). Les levures se reproduisent également en libérant des spores dans l'air ambiant.

Les moisissures et les levures provoquent des mycoses (par contact direct), des mycoallergies (allergies contre les spores de moisissures) ou encore des mycotoxicoses (intoxication par des mycotoxines). Alors que les mycoses concernent la peau, les yeux, les voies respiratoires mais également le cœur, le foie, les reins, les intestins ou encore le système nerveux central, les allergies aux spores sont à l'origine de rhinites, de toux voire de vomissements et de diarrhées. Les mycotoxines peuvent être cancérigènes, toxiques pour le foie (hépatotoxique), les reins (néphrotoxique) ou encore pour le système nerveux (neurotoxiques).

La croissance de microorganismes est toujours due à une humidité élevée du substrat. En effet les bactéries tout comme les moisissures et les levures nécessitent deux facteurs limitants pour se développer ; un substrat organique (bois, papier/carton, plastique, peintures organiques, poussières, ...) et de l'humidité stagnante. Prévenir la croissance microbienne signifie donc éviter des fissures dans les murs ou les toitures, la remontée d'humidité ascensionnelle par effet de capillarité, des fuites, des ponts thermiques qui permettent à l'humidité de condenser en hiver, de l'humidité persistante lors de la construction (notamment pendant la chape et l'enduit intérieur) ou encore des phénomènes de condensation au niveau du système de ventilation mécanique ainsi qu'assurer une aération ou ventilation adéquate des locaux.

II.12.3. Agents physiques

Parmi les agents physiques, on différencie des polluants sous forme de particules, de gaz ou encore d'ondes pouvant soit être générés à l'intérieur du bâtiment, voir même par les matériaux et produits de construction mêmes, soit pénétrer de l'extérieur vers le bâtiment.

II.12.3.1. Radon

Le radon est un gaz radioactif présent dans la terre ainsi que dans certains matériaux de construction (cf. annexe 2 fiche technique concernant le radon).

Les zones à risques au Luxembourg concernent plutôt le nord du pays, en l'occurrence l'Oesling en raison de l'origine schisteuse (ardoises) des sols comme le montre une étude de mesurage de la Division de la Radioprotection DRP du ministère de la Santé luxembourgeois entre 1991 à 2017 qui a mis en évidence des taux supérieurs aux niveau de référence (300 Bq/m³) dans 5 % des maisons investiguées.

Bien que certains matériaux de construction puissent également émettre du radon, la contamination en provenance de tels matériaux de construction est généralement négligeable (de l'ordre d'une vingtaine de Bq/m³) par rapport au radon provenant de la terre.

En ce qui concerne la santé humaine, le radon émet des rayons alpha qui ne peuvent pas passer la barrière de la peau mais qui peuvent être inhalés et provoquer des cancers de poumon. Ainsi l'OMS (2009) conclut que 5 à 14 % des cas de cancers du poumon seraient attribuables à la pollution intérieure au radon. Une exposition à 100-200 Bq/m³ augmenterait le risque individuel de développer un cancer de poumon de l'ordre

de 20% (par rapport à une exposition inférieure à 100 Bq/m³) et de 8% supplémentaires par tranche de 100 Bq/m³ en plus.

II.12.3.2. Radioactivité

D'autre part, certains matériaux de construction peuvent émettre des rayonnements radioactifs autres que des rayons alpha, en l'occurrence des rayons bêta et surtout gamma soit par leur origine volcanique (donc en provenance de l'intérieur de la terre) à l'image des pierres granit, basalte ou de la pierre ponce (Bims en allemand), soit parce que le produit ou matériau de construction renferme des déchets radioactifs provenant des hauts-fourneaux (béton, plâtre industriel, ...).

II.12.3.3. Particules fines

Dans la littérature scientifique les particules fines de différentes tailles (PM10, PM2,5 et PM1,0 pour des tailles inférieures à 10 µm, 2,5 µm ou 1 µm) sont souvent mises en relation avec différentes pathologies, notamment du système respiratoire et du système circulatoire. Ces études se limitent cependant le plus souvent à la pollution extérieure où ces particules fines correspondent à des particules Diesel ou encore des particules métalliques ou HAP provenant du trafic routier.

En effet, les particules fines constituent un groupe chimiquement très hétérogène et concernent des molécules très différentes en termes d'effets sur la santé. En l'occurrence les particules fines à l'intérieur des bâtiments sont souvent associées aux poussières normales, aux particules de métaux lourds en provenance des imprimantes à laser ou encore aux poussières de plâtre, de ciment ou de bois en cas de rénovation ou de construction nouvelle, donc des particules fines de loin moins agressives (à l'exception des particules de toner des imprimantes). D'autre part, les spores de moisissures ou de levures ainsi que les pollens de plantes constituent également des particules fines.

Il vaut donc mieux identifier les particules fines au moyen d'une analyse chimique que de se fier simplement aux mesurages des taux de particules fines si l'on ne connaît pas exactement la source de contamination (et donc l'identité chimique).

II.12.3.4. Fibres d'amiante ou fibres minérales

Certains matériaux de construction contiennent des fibres minérales dont une fraction, appelée la fraction alvéolaire est susceptible d'être inhalée et de nuire aux alvéoles pulmonaires et autres tissus avoisinants. Ceci est vrai pour l'amiante qui est interdit au Luxembourg et qui n'est plus utilisée aujourd'hui mais également pour certaines fibres minérales comme la laine de roche ou la laine de verre comme on la retrouve dans certains isolants ou papier peints. De telles fibres sont susceptibles d'engendrer des tumeurs pulmonaires ou des tissus adjacents (à l'image de l'asbestose et du mésothéliome décrits pour l'exposition à l'amiante).

II.12.3.5. Champs électromagnétiques de basses et de hautes fréquences

Les champs électriques et magnétiques de basses fréquences sont généralement dus à l'approvisionnement en électricité (fréquence 50 Hz) soit à l'extérieur (ligne aériennes, conduites sous-terraines, transformateurs, ...), soit à l'intérieur du bâtiment (installation électrique, gaines électriques, appareils électroménagers, ...). Alors que les champs électriques sont généralement déviés vers le sol par les murs des bâtiments (principe de la cage de Faraday), les champs magnétiques en revanche ne sont pas déviés ou atténués par les murs et sont donc plus problématiques dans le contexte de la construction.

Les champs électromagnétiques de hautes fréquences sont générés en première ligne par tous les moyens de communication hors fils, soit de sources intérieures telles que les Wifi, les téléphones sans fils DECT, les

smartphones ou encore certains outils du « smarthome », soit de sources externes (antennes GSM, Tetra, LTE, 5G, Wifi et DECT des voisins).

Les champs magnétiques de basses fréquences tout comme les champs électromagnétiques de hautes fréquences sont classés comme potentiellement cancérigènes (classe 2b) par le CIRC et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). D'autres effets nocifs notamment d'ordre neurologique sont également discutés.

Ainsi les champs électriques et magnétiques de basses fréquences réduisent la synthèse de mélatonine par l'homme, une hormone régulant le rythme circadien et les biorythmes en général et principalement synthétisée pendant la phase de repos et de régénération. Les symptômes types décrits dans la littérature scientifique concernent les troubles de sommeil, la fatigue chronique, les perturbations du rythme jour et nuit, des affectations du système immunitaire, des maux de tête et des migraines ou encore des raideurs musculaires. Les champs électromagnétiques de hautes fréquences sont susceptibles d'influencer les pompes ioniques des membranes cellulaires (pompes Ca^{2+}), de provoquer la formation de stress oxydatif et nitrosatif et la synthèse de radicaux libres au niveau des cellules (effets non thermiques). A des expositions plus élevées viennent s'ajouter des effets thermiques, donc des effets accompagnant le réchauffement des tissus humains.

II.12.3.6. La lumière artificielle

La lumière naturelle influence notre rythme circadien ou rythme jour-nuit, en somme notre horloge biologique. Elle influence ainsi la circulation sanguine, la production de certaines hormones comme l'hormone de croissance (GH) et la mélatonine, le métabolisme cellulaire et le niveau de cortisol, un marqueur de stress. La mélatonine agit notamment comme hormone de croissance, comme antioxydant, comme stimulant du système immunitaire ou encore comme anti-inflammatoire.

La lumière artificielle (lampes) se différencie de la lumière naturelle par plusieurs paramètres, à savoir le spectre de la lumière (donc les différentes longueurs d'ondes dont la lumière se compose, en somme les couleurs de l'arc-en-ciel), la température de la lumière (lumière froide ou chaude/ ambiante), l'intensité de la lumière et le cas échéant le taux de scintillement (« flicker index ») qui varie en fonction du type de source lumineuse. Ainsi les tubes néon ou lampes fluorescentes scintillent typiquement. De même certaines lampes LED peuvent présenter un tel scintillement.

D'autre part, certains types de lampes peuvent générer des champs électromagnétiques de basses et de hautes fréquences (p.ex. dans le cas d'un transformateur) ou encore des ultrasons.

En conclusion, une mauvaise source de lumière artificielle ou lampe se caractérise par les paramètres suivants:

- Spectre de longueurs d'ondes discontinu,
- Mauvaise intensité (« illuminance »), soit trop sombre soit éblouissante
- Lumière « dure » ou « froide » (température de couleur corrélée ou « correlated color temperature (CCT) »)
- Indice de rendu de couleurs (CRI ou « Color Rendering Index ») non naturel
- Taux élevé d'ondes UV et du taux de lumière bleue
- Délai de temps jusqu'au développement de l'intensité finale de la lumière (quelques minutes)
- Scintillement « flickering »
- Émission ondes ultrasons
- Émission de champs électromagnétiques de basses ou de hautes fréquences
- Émission de polluants chimiques (p.ex. mercure, retardateurs de flamme, ...)
- Émission d'odeurs

II.12.3.7. Le bruit

Le bruit correspond à un ensemble d'ondes de fréquences diverses qui se propagent à travers l'air (gaz), l'eau (fluides) ou encore les solides comme le sol ou les murs. Le bruit est caractérisé par le son qui se différencie en son perceptible par l'oreille humaine (16 Hz à 20 kHz) ainsi que par les infrasons (< 16 Hz) et les ultrasons (> 20 kHz). On distingue le bruit aérien (porté par l'air) et le bruit solidien qui se compose de vibrations transmises à la construction comme p.ex. le bruit de pas.

Même si les infra- et les ultrasons ne sont en principe pas audibles, ils restent néanmoins perceptibles par l'homme. D'autre part, les ultrasons sont audibles pour les chiens et les chats qui « entendent » les bruits à concurrence de 45 kHz et 64 KHz respectivement. Les oiseaux en revanche « entendent » les infrasons.

Les sources typiques pour les infrasons sont les installations techniques « indoor » ou « outdoor » comme les éoliennes ou encore les VMC (ventilateurs à rotation lente, instabilités et turbulences de l'air et des courants d'air, vibrations des moteurs, des caissons ou des gaines, effets de résonance de gaines trop longues, ...). Les ultrasons peuvent être générés par des moteurs à rotation rapide ou encore par des pièces électroniques par exemple dans différents types de lampes ou lumières artificielles ou encore des détecteurs de mouvement à ultrasons. Les effets de santé en relation avec le bruit concernent d'abord la santé psychique et l'augmentation de stress ou les pertes de concentration, l'anxiété ou les dépressions. D'autre part, le bruit augmente les risques cardio-vasculaires tels que l'hypertension ou encore des perturbations du rythme cardiaque. D'autres symptômes incluent les maux de tête, les vertiges et les nausées. En 2018, l'Organisation mondiale de la santé a classé le bruit comme « un risque environnemental majeur pour la santé physique et mentale » en Europe.

III. Impacts environnementaux et économiques

Les impacts des polluants chimiques ne se résument point au caractère de santé humaine et ne se limitent pas à la seule exposition durant l'occupation du bâtiment tant résidentiel que fonctionnel, mais constituent bien de facteurs de durabilité et d'économie circulaire.

III.1. Impact sur l'environnement extérieur

La problématique des matériaux/produits de construction contaminés et pollués ne se limite pas au seul aspect de santé des occupants voire des ouvriers et artisans lors de la construction, mais trouve ses impacts également dans l'écologie plus précisément la pollution de l'environnement.

En effet, la différenciation entre « santé humaine » et « qualité de l'air intérieur » (exposition durant l'occupation du bâtiment) d'une part et la pollution de l'environnement extérieur tant à la production, l'application ou mise en œuvre voir la démolition ou déconstruction d'autre part, constitue une différenciation artificielle dans le sens où il s'agit d'un facteur temps (donc pollution intervenant à des temps différents) et des cibles divergentes (ouvriers et artisans, occupants, faune et flore, écosystèmes), bien au contraire les polluants néfastes pour les uns le sont également pour les autres.

Les substances nocives pour l'homme le sont bien évidemment également pour la nature, plus précisément pour la flore et la faune, et ce sur tout le cycle d'utilité de la construction :

- Lors de la production de matériaux et composants
- Lors de la construction du bâtiment
- Pendant l'usage du bâtiment
- Lors de la déconstruction (déchets, recyclage, « downcycling »)

Lors de la production

La production de matériaux synthétiques génère des produits secondaires et notamment des substances écotoxiques. A titre d'exemple, les réactions de polymérisation (par exemple les plastiques comme le PVC) ou encore les processus de vulcanisation (mousses polyuréthanes) libèrent des substances toxiques pour l'environnement et l'homme lors de la fabrication. La synthèse de biocides ou retardateurs de flamme chlorés ou bromés libère souvent des dioxines et furannes comme produits secondaires.

Lors de la construction

La manipulation des matériaux et produits de construction génère des émissions, notamment par le réchauffement dû à une scie ou une perceuse, réchauffement qui augmente encore d'avantage le taux d'émissions. La découpe des matériaux ou l'utilisation de produits génère par ailleurs des déchets contaminés chimiquement.

Finalement l'application de produits liquides (peintures, colles, accrocheurs, ...) libère des solvants soit classiques soit alternatifs ainsi que d'autres additifs et notamment des conservateurs fongicides (isothiazolinones).

Pendant l'usage

De nombreux matériaux de construction contaminés émettent soit temporairement soit en permanence des substances nocives susceptibles de nuire à la santé des occupants mais polluant également l'environnement par suite du relargage dans la nature. Ceci est notamment vrai pour les substances persistantes à l'image des retardateurs de flamme (RF) organophosphorés chlorés ou non ou encore des biocides.

Ainsi une étude allemande de l'université de Stuttgart (Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart) publiée en 2001 (Metzger, 2001) a mis en évidence la contamination des eaux de surface, des sédiments des fleuves ainsi que des eaux souterraines par des RF, substances utilisées notamment à grande échelle dans le domaine de la construction voir de la production des matériaux et produits de construction. Les analyses des sédiments dans les fleuves (Danube, Neckar, Rhin) ont mis en évidence des taux élevés, notamment en TCEP, TPP, TEHP et surtout en TCPP (concentration pouvant atteindre plusieurs milligrammes par kg de sédiment).

T 5 : Contamination des sédiments à différents endroits de trois fleuves allemands par différents RF organophosphorés (Metzger, 2001)

	TBP	TCEP	TCPP	TDCP	TPP	TCP	TEHP	SOMME
	µg/kg							
Danube	<	<	574	<	24		487	1085
		25	170	<		<		195
	23	128	919	<	116	<	19	1205
Neckar	<	120	874	<	20	12	36	1062
	<	62	879	12	61	28	36	1078
	<	12	583		41	18	56	710
	19	35	402	<	36	<	38	530
	<	<	<	<	18	13		31
	18	188	1257	40	54	53	52	1662

	TBP	TCEP	TCPP	TDCP	TPP	TCP	TEHP	SOMME
Rhin	<	<	44	<	<	<	<	44
	<		362	<	<		53	415
	<	<	320	<	<			320

< Inférieur à la limite de détection de 20 µg/kg de substance sèche

En ce qui concerne les origines de ces contaminations, le même institut a mis en évidence le degré de pollution des eaux de rejet des stations d'épuration communales en Allemagne par des RF organophosphorés persistants à des taux moyens de 1,7 µg/litre (concentration maximale pour une station d'épuration 4,6 µg/l), taux qui peuvent monter en moyenne jusqu'à 8,1 µg/l (max 13,6 µg/l) pour les stations d'épuration récoltant également les eaux usées de sites industriels.

De plus les différences entre les teneurs en RF organophosphorés en amont et en aval des stations d'épuration montrent que d'une part, les polluants organophosphorés ne sont pas éliminés, du moins pas de façon adéquate au niveau de la station et que ce sont effectivement les eaux usées provenant entre autres des bâtiments résidentiels et fonctionnels qui sont à la base de la pollution des eaux de surface, des sédiments et des eaux souterraines.

T 6 : Différence des concentrations en RF organophosphorés dans les affluents et effluents des stations d'épuration (S.E.) (Metzger, 2001)

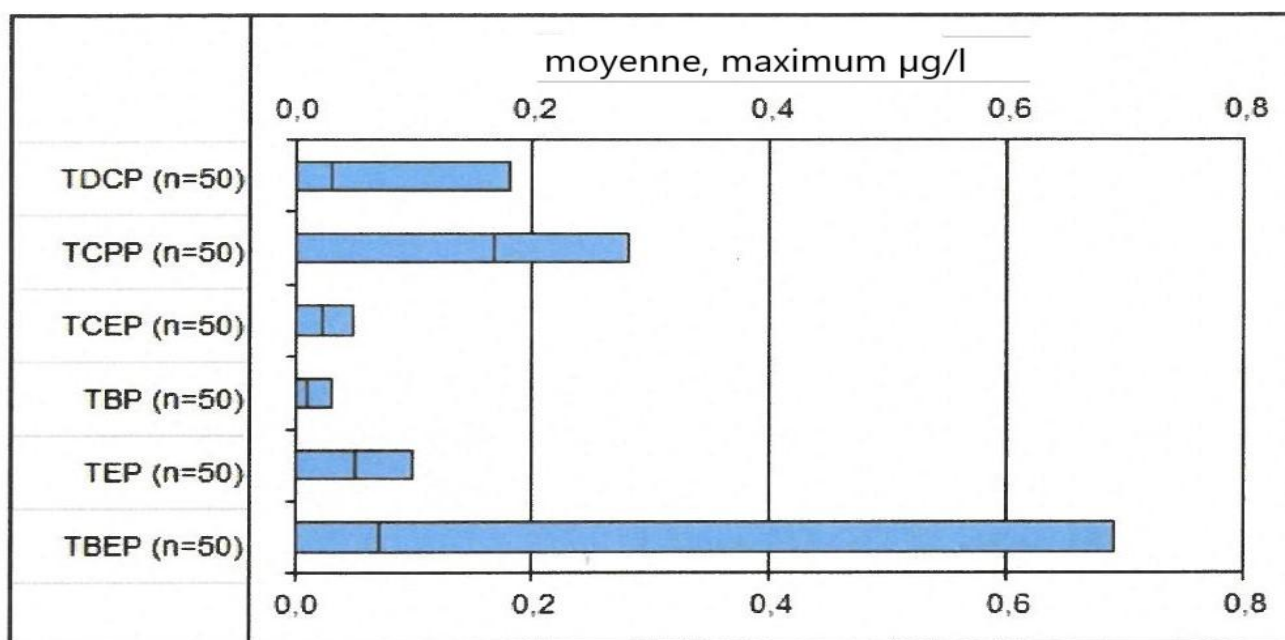
	AMONT S.E.	AVAL S.E.
	µg/l	
Offenbourg	0.1	0.48
Freiburg	0.06	0.16
Lahr*	0.1	1.39
Göppingen	0.87	1.09
Karlsruhe	<	0.16
Pforzheim	0.08	0.13

En estimant l'utilisation d'eau à 200 litres par jour et par personne, avec un taux de contamination d'une personne sur dix et en tenant compte d'une métabolisation partielle du TdCPP, les auteurs concluent à ce qu'une personne exposée élimine plus de 2 mg de TdCPP par jour contribuant ainsi à une pollution des eaux superficielles. Une amélioration de la situation et donc une diminution de cette pollution passe inévitablement par une diminution de la contamination des bâtiments (et par conséquent des occupants exposés) donc à une réduction de l'utilisation de tels produits dans les matériaux de construction.

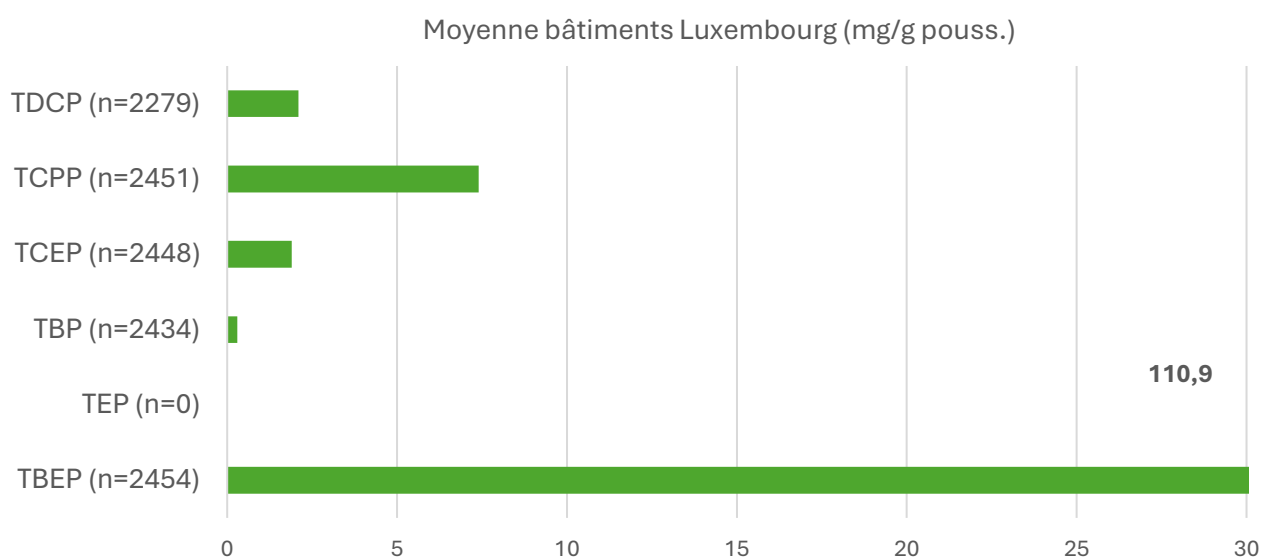
Une étude allemande plus récente (Lawa, 2016) confirme la présence de différents polluants, en l'occurrence le bisphénol A et les retardateurs de flamme organo-phosphorés dans le Rhin et la Ruhr, un effluent du Rhin.

De plus une juxtaposition des teneurs en RF organophosphorés dans la « Ruhr » (tableau F6) et des concentrations mesurées dans les bâtiments au Grand-Duché du Luxembourg (tableau F7), met en évidence des distributions similaires permettant de conclure que les pollutions des cours d'eau sont vraisemblablement originaires des contaminations des bâtiments.

F 6 : Distribution des retardateurs de flamme dans la Ruhr à Essen-Relinghausen en 2014 (Lawa, 2016)



F 7 : Distribution des retardateurs de flamme dans les bâtiments au Luxembourg 2009-2015 (Baden)



Parmi les biocides, une étude allemande (« Landesamt für Umwelt und Geologie » und « Landesanstalt für Landwirtschaft » de la Saxe a mis en évidence des contaminations fréquentes de certains fleuves et ruisseaux (Elbe, Spree, ...) par le DDT, l'hexachlorobenzène, l'hexachlorocyclohexane, l'atrazine et le tributylétain (Rohde, 2005), biocides utilisés typiquement dans les bâtiments. Un autre problème concerne le lavage des biocides (algicides) et des RF contenus dans les enduits extérieurs ou les isolants des façades. Ainsi des essais suisses ont démontré que par étage et par année 200 grammes de terbutryne, un herbicide ou algicide interdit en Europe, sont lavés et donc extraits des façades pour polluer notamment les eaux de surface environnantes.

Lors de la déconstruction

La contamination des matériaux de construction ou des systèmes de construction hypothèque le traitement des déchets qui ne peuvent plus être traités comme déchets inertes et déposés sur des décharges.

Une analyse de l'eau souterraine réalisée par l'université de Strasbourg en 2001 (Metzger, 2001) à proximité d'une décharge de matières inertes en Allemagne a mis en évidence une contamination par un RF organophosphoré (TCEP) à raison de 0,37 µg/l). Etant donné qu'on retrouve les RF organophosphorés typiquement dans certains matériaux de construction indique que la contamination des eaux souterraines est du moins en partie causée par le dépôt de matériaux de construction sur les décharges après la déconstruction. De même les lixiviats des décharges analysées lors de cette étude présentaient des concentrations élevées en organophosphorés (TBP ad 4,25, TCEP ad 5,56 et TCPP ad 76 µg/ml).

Par ailleurs le **recyclage** et la **réutilisation** de matériaux contaminés s'avère problématique du fait que la transformation du matériau initial en un matériau secondaire recyclé n'élimine pas les polluants initiaux mais les conserve, notamment s'il s'agit de substances persistantes comme les biocides, les retardateurs de flamme, les phtalates, les métaux lourds et d'autres. Ainsi les matériaux « secondaires » provenant du recyclage peuvent parfaitement émettre des substances nocives qui n'ont pourtant aucune fonction dans le matériau en question. A titre d'exemple le cas d'une contamination d'une habitation au Luxembourg par deux biocides, le DDT interdit au Luxembourg et le lindane interdit en Suisse et provenant d'une rénovation avec application d'un papier peint cellulosique (« Raufasertapete »), papier peint avec label écologique. En effet, le papier peint en question étant un produit recyclé, les copeaux de bois lui donnant sa structure ou relief étaient contaminés au DDT et au lindane, tous les deux persistants et provenant vraisemblablement de poutres en bois d'une vieille charpente voir de pylônes téléphoniques ou électriques à l'extérieur et traités avec un biocide-fongicide-insecticide.

Par conséquent, un matériau initialement contaminé est limité dans l'usage après recyclage. Tout au plus on peut prétendre à un downcycling, donc la production d'un matériau moins noble que le matériau de départ.

III.2. Coûts économiques liés aux maladies

La mauvaise qualité de l'environnement intérieur et les troubles de santé qui en découlent ont des effets non négligeables sur le plan économique et ce à plusieurs niveaux : visites médicales et médicaments, congés de maladie et invalidités, pertes de productivité (contamination du lieu de travail), réorientations professionnelles, assainissements etc.

Ainsi une méta-étude du « **Center for Building Performance and Diagnosis** » au « Massachusetts Institute of Technology (MIT) » (Loftness, 2006) sur les maladies liées aux bâtiments aux États-Unis estime à 750 \$ par an et par personne, les coûts directs (visites de médecins, médicaments) qui incombent aux bâtiments malsains, soit une baisse de 5% en productivité. Viennent s'ajouter les coûts indirects tels que les pertes de productivité, les congés de maladie, les pertes de temps de travail ou encore les changements de carrière (20% de changements de carrière dans le secteur privé, chacun coutant en moyenne 25.875 \$).

Ainsi l'éviction de matériaux émanant des substances nocives pourrait, selon 8 études évaluées permettre une baisse de 14 à 85% des troubles des voies respiratoires voire des symptômes de « sick building ».

T 7 : Facteurs influençant le SBS d'après une méta-étude du « Center for Building Performance and Diagnosis » du MIT (Loftness, 2006)

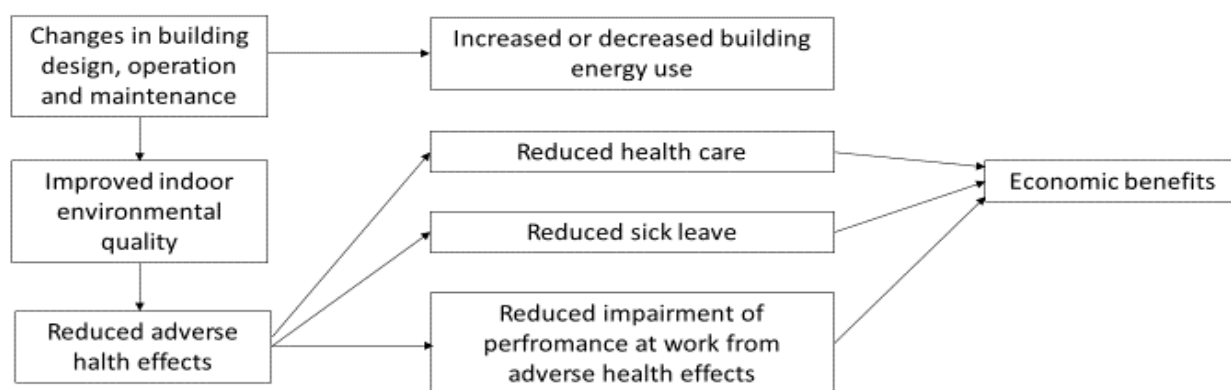
DOMAINE	NOMBRES D'ÉTUDES	SYMPTÔMES	BAISSE POSSIBLE DE SYMPTÔMES	AMÉLIORATION POTENTIELLE DE LA PRODUCTIVITÉ
Ventilation	7	Voies respiratoires, allergies	10-90%	1,7-11%
Température ambiante	14	Maux de tête, SBS		0,2-7%
Lumière	12	Maux de tête	27-74%	27-88%
Substances nocives / matériaux	8	Voies respiratoires, SBS	14-85%	
Ergonomie, meubles	7		48-84%	
Type et surface de bureau	3	Affectation gorge et nez	35-40%	
Plantes	1	SBS	21%	2.20%

Au total, une amélioration de l'environnement intérieur pourrait donc avoir pour effet d'améliorer la productivité de l'ordre de 3 à 18%. De même un environnement de travail sain et naturel pourrait contribuer selon cette méta-étude à une diminution du nombre de congés de maladies de 9 à 71% (variations selon les études consultées).

Une autre étude américaine du "**Lawrence Berkeley National Laboratory et de l'EPA** » sur les bénéfices et les coûts d'une amélioration de la qualité de l'environnement intérieur dans les bureaux américains (Fisk, 2011) publiée au «International Journal of Indoor Environment and Health » conclut à un potentiel d'économie financière de plus de 40 milliards de \$ par année par 4 mesures simples visant à améliorer la qualité de l'air intérieur telles que réduire l'humidité, adapter les taux de ventilation à plus de 10 ou 15 litres/seconde par personne, équiper les systèmes de ventilation par des économiseurs , ceci en jouant sur trois facteurs : l'amélioration de la performance de travail, la réduction des symptômes de SBS et la minimisation des congés de maladies (court terme).

L'auteur a repris ces conclusions dans un graphique mettant en évidence le potentiel de bénéfice économique provenant de la maintenance ou du design des bâtiments en passant par une amélioration de la santé et de la productivité ainsi que par une diminution des absences de travail et des coûts de traitement médicaux.

F 8 : Bénéfices économiques en relation avec la qualité de l'environnement intérieur (Orisakwe, 2012 adapted from Fisk, 2000)



Le même chercheur avait publié en 1997 une méta-étude « Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments » concluant qu'il existait de très fortes présomptions que les caractéristiques des bâtiments et les environnements intérieurs étaient responsables d'une augmentation significative des maladies respiratoires, des allergies et de l'asthme, des symptômes SBS et d'une baisse de la performance des salariés (Fisk, 1997). Ainsi rien qu'aux Etats-Unis, les économies annuelles potentielles (y compris un gain de productivité) s'estiment à 6-19 milliards de \$ pour les maladies respiratoires, 1-4 milliards de \$ pour les allergies et l'asthme, 10-20 milliards de \$ pour les SBS et 12-125 milliards de \$ en termes de gains de productivité dues à une meilleure performance des travailleurs. Surtout les allergies et l'asthme ainsi que le SBS seraient en partie imputables à des sources de pollution chimique intérieures et donc aux matériaux et produits de construction.

Déjà en 1983, l'**Organisation Mondiale de la Santé** avait estimé à 30 % la part de bâtiments malsains (SBS) parmi les bâtiments nouvellement construits ou rénovés.

Une **enquête américaine US-EPA en Californie** (CARB, 2005) estimait à 18,2 milliards de dollars par an le coût économique engendré par la pollution de l'air intérieur et basant sur 5 facteurs pris en compte (CO, COV-cancer, radon, moisissures et SBS).

Le « **California Air Resources Board** » (Indoor Air Pollution in California, 2006) conclut à 45 milliards l'impact économique annuel dû à la pollution de l'air intérieur dans les habitations, les écoles et les bâtiments fonctionnels ou bureaux (non-industrial workplaces) en Californie.

L'**Observatoire de la qualité de l'air** français (Anses, CSTB & OQAI, 2014) conclut à des coûts de l'ordre de 18,2 millions d'euros par an pour les seuls polluants benzène, radon, trichloréthylène, monoxyde de carbone et particules fines en France.

Et selon une étude du **ministère de la santé italien** en 2001, le coût économique engendré par la pollution de l'air intérieur avoisinerait les 110 millions d'Euros de coûts médicaux directs par an pour les seuls polluants radon, benzène et monoxyde de carbone (Kephalopoulos, 2006).

III.3. Coûts des assainissements

Le constat de polluants dans les bâtiments induit des assainissements afin de neutraliser ou enlever les sources de pollution intérieures dans le but de réduire la contamination et de rétablir une qualité de l'air intérieur adéquate.

Ces assainissements sont chers notamment si les sources de contamination concernent les matériaux de construction comme le prouvent quelques chiffres d'assainissements réalisés au Luxembourg dans le passé.

T 8 : Exemples de coûts d'assainissement de bâtiments contaminés au Luxembourg (Baden, non publié)

TYPE DE BÂTIMENT	ANNÉE	AGENT CONTAMINANT	MATÉRIAUX CONTAMINÉ	CONCERNÉS	ASSAINISSEMENT	COÛT (€)
Administratif	2010	DDT, TBEP, plomb, mercure	Papier peint, parquet, peinture	Bureaux sur 4 étages	Remplacement papier peints muraux et parquet	50 000 pour 2 bureaux
	2011	Champs magnétique 50 Hz	Groupe électrogène dans la cave	Un bureau open space	Plaque métal spécifique dans faux plancher	7 500
École	2006	Cyperméthrine, TBEP	Vitrification parquet	50 salles de classe	Ponçage et huilage parquet	600 000

TYPE DE BÂTIMENT	ANNÉE	AGENT CONTAMINANT	MATÉRIAUX CONTAMINÉ	CONCERNÉS	ASSAINISSEMENT	COÛT (€)
	2011	TBEP, amiante	Sol en linoleum, plaques en dessous	Deux étages	Remplacement revêtement de sol	500 000
Administration communale	2009	Dichlofluanide	Charpente bois	Bureaux sous toiture	Isolation par membrane spécifique, revêtement en plaque de plâtre	70 000
	2009	TBEP, HAP	Vitrification parquet, colle parquet	4 bureaux en Rez de chaussé	Remplacement parquet	110 000
Musée	2012	Humidité, moisissures	Ponts thermiques murs le long des fenêtres	Tout le bâtiment	Isolation thermique	Fermeture 10 semaines*

* Pas d'estimation du coût d'assainissement, mais pertes commerciales dues à la fermeture

Viennent s'ajouter d'éventuels frais d'évacuation de déchets problématiques à l'image de l'amiante, les relogements temporaires pendant la phase d'assainissement voire les pertes économiques à la suite de la fermeture et la non-productivité durant l'assainissement.

On peut donc conclure que l'impact économique impacté aux bâtiments malsains et à l'utilisation de matériaux et produits de construction émanant des substances nocives est considérable. En d'autres termes assurer une meilleure qualité des matériaux et produits de construction en matière de substances chimiques nocives permet de réaliser des économies substantielles tant en ce qui concerne la santé des occupants que la productivité et l'absentéisme des salariés ou encore les assainissements.

Finalement l'assainissement de bâtiments peu âgés ou rénovés génère non seulement des déchets problématiques car pollués mais l'assainissement constitue un gâchis de matériaux contraire à toute notion de durabilité.

PARTIE B

Qualité de l'air et construction saine

IV. Qualité de l'air intérieur

Vu le fait que l'homme passe la plus grande partie de son temps (de l'ordre de 80 à 95% de la journée à l'intérieur de bâtiments, la qualité de l'air intérieur influence notablement sa santé et son bien-être. Ainsi une étude publiée au Lancet en 2020 classe la pollution de l'intérieur en 10^e position sur une liste de 87 facteurs de risque pour la santé dans 204 pays (Murray, 2020).

IV.1. La qualité de l'air intérieur selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

L'Organisation Mondiale de la Santé OMS (WHO en anglais) a édité en 2010 des « Guidelines for Indoor Air quality » concernant une sélection de polluants, en l'occurrence le benzène, le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, le naphtalène, le dioxyde d'azote, les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP, le radon ainsi que le tri- et le tetrachloréthylène comme polluants problématiques en rapport avec l'air intérieur WHO (2010). En 2009, l'OMS a par ailleurs publié des « guidelines for Indoor Air quality » en matière d'humidité et de moisissures (WHO, 2010).

IV.2. La qualité de l'air intérieur selon la Commission Européenne

La Direction Générale Santé et Consommateurs (DG Sanco)¹³ de la Commission Européenne préconisait en 2011 que « une bonne qualité de l'air intérieur est très importante pour la santé de la population et plus particulièrement pour les groupes vulnérables tels que les bébés et enfants, les personnes âgées ou encore les patients souffrant de maladies respiratoires ou allergiques....

En raison des échanges continus d'air, la qualité de l'air intérieur dépend largement de la qualité de l'air extérieur mais également des émissions par le bâtiment et son équipement comme les matériaux de construction et de surface, le mobilier, l'équipement de chauffage et de ventilation ou encore les émissions des produits de nettoyage ».

« Having clean air indoor is very important for the health of the population as a whole and it becomes particularly important for the vulnerable groups like babies, children and the elderly or people already suffering from, e.g. respiratory or allergic diseases.... Because of the continuous air exchange, i.e. replacement of spent indoor air with fresh outdoor air, indoor air quality depends largely on outdoor air quality, but it depends also on a number of other variables including emissions from the building and its equipment, such

¹³ Re baptisée en DG Santé (santé et sécurité alimentaire) en 2014

as construction and surfacing materials, furnishings, heating and ventilating equipment, emissions from the use of consumer products for cleaning...” (Jantunen, 2011).

Les cadres politiques européens qui ont un impact plus ou moins direct sur la qualité de l'air intérieur sont :

- REACH – Registration, Evaluation & Authorization of Chemicals ; EC 1907/2006 (impact sur matériaux de construction, appareils électriques, objets décoratifs, produits de nettoyage et d'entretien)
- ELD - Energy Labelling Directive ; 92/75/EEC (applications de chauffage et d'électricité)
- CPD – Construction Products Directive 89/106/EEC (matériaux de construction, humidité & moisissures-fuites & condensation)
- GPSD – General Product Safety Directive ; 2001/95/EC (applications de chauffage et d'électricité, mobilier, décoration, produits de nettoyage et d'entretien)
- EPBD Energy Performance of Buildings Directive ; 2002/91/EC (humidité & moisissures-fuites & condensation, applications de chauffage et d'électricité)

Un grand nombre d'études et de programmes ont été réalisés au sujet de la qualité de l'air et des problèmes de santé y relatifs notamment en partenariat avec la Commission Européenne, notamment :

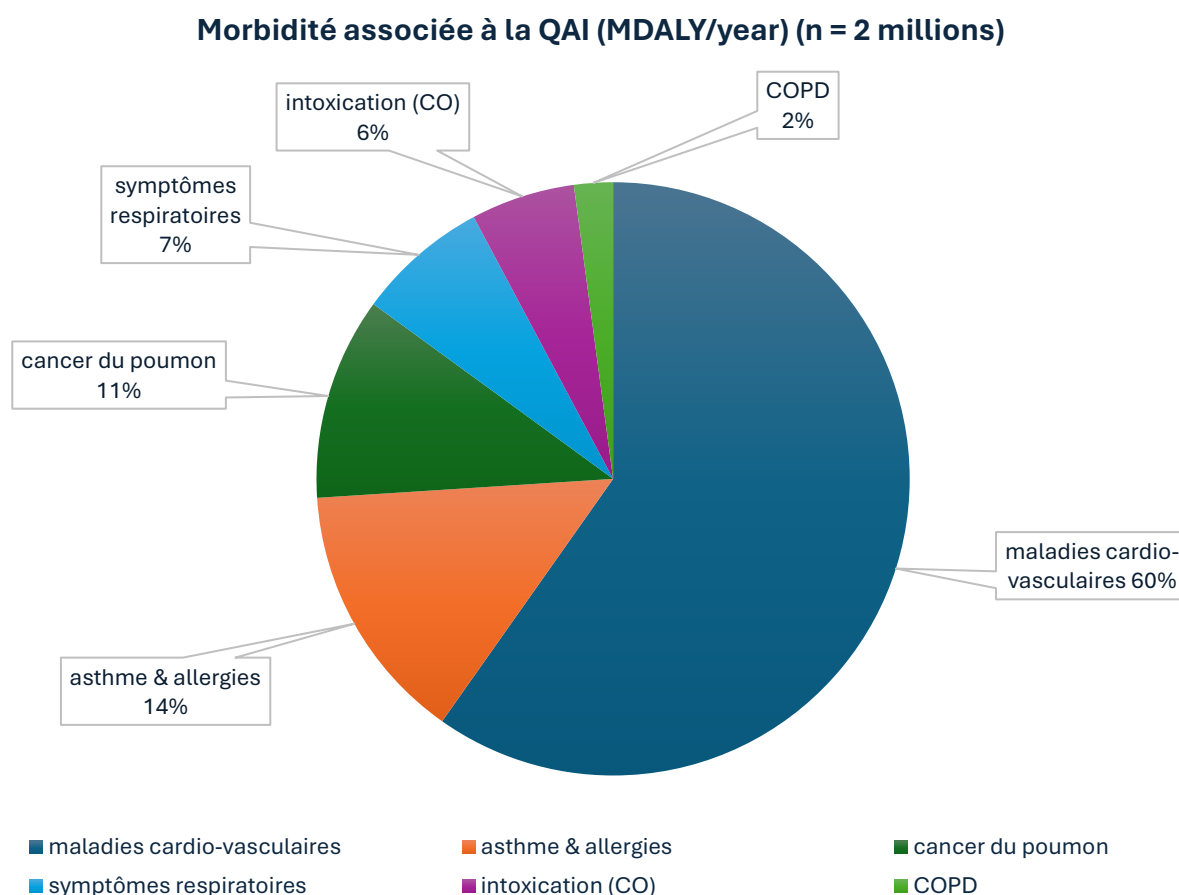
- THADE Towards Health Air in Dwellings in Europe (2003),
- IndEx – Critical Appraisal of setting and implementation of indoor exposure limits in EU (2004),
- SCHER Opinion on IAQ (2007),
- EnVIE – Indoor Air Quality and Health Effects (2008),
- IAQ ranking/VITO (2008),
- EXPOLIS (1998),
- AIRMEX (2008),
- PEOPLE (2005),
- EU Radon Mapping (2005),
- HESE (2005),
- HOPE (2005),
- SYNPHONIE (2014),
- BUMA, INTARESE, HEIMTSA, OfficAir, etc.

IAIAQ - Promoting actions for healthy indoor air

Le rapport « IAIAQ - Promoting actions for healthy indoor air » (Jantunen, 2011) fait état de plus de 2 millions (2.155 millions) d'années en bonne santé imputables à une mauvaise qualité de l'air intérieur qui sont perdues chaque en Europe (EU-26), soit 3% de la charge de morbidité européenne pour toutes les maladies confondues (burden of disease). Les pathologies concernées sont les maladies cardiovasculaires, l'asthme et les allergies, le cancer du poumon, les troubles respiratoires et les bronchopneumopathies chroniques obstructives BPCO¹⁴ et les intoxications au monoxyde de carbone.

¹⁴ COPD - Chronic obstructive pulmonary disease en anglais

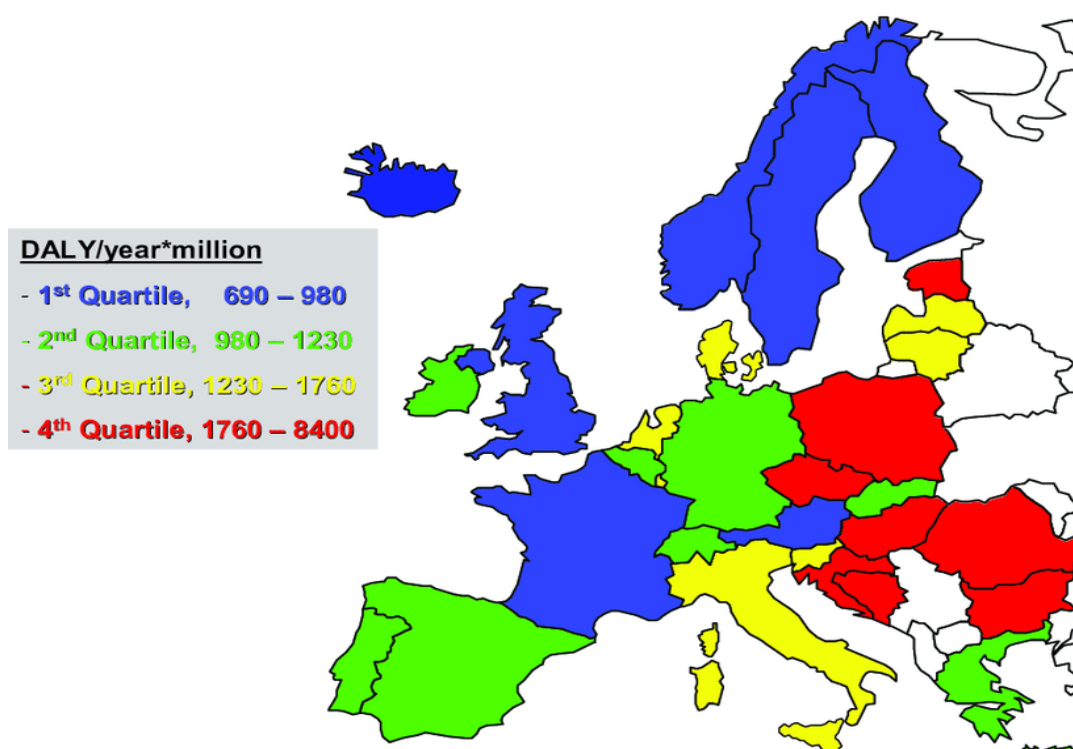
F 9 : Les principaux symptômes de morbidité associées à la qualité de l'air intérieur (Jantunen, 2011)



Le rapport a subdivisé les différents États-Membres en 4 classes en fonction du nombre des années en bonne santé perdues attribuable aux expositions à des sources de pollution “indoor”. Le Luxembourg figure dans la troisième classe (1230-1760 millions d’années perdues ou MDALY¹⁵/year par million d’habitants).

¹⁵ DALY Disability-adjusted life year

F 10 : États-Membres européens selon leur morbidité imputable aux expositions de sources « indoor » (Jantunen, 2011)



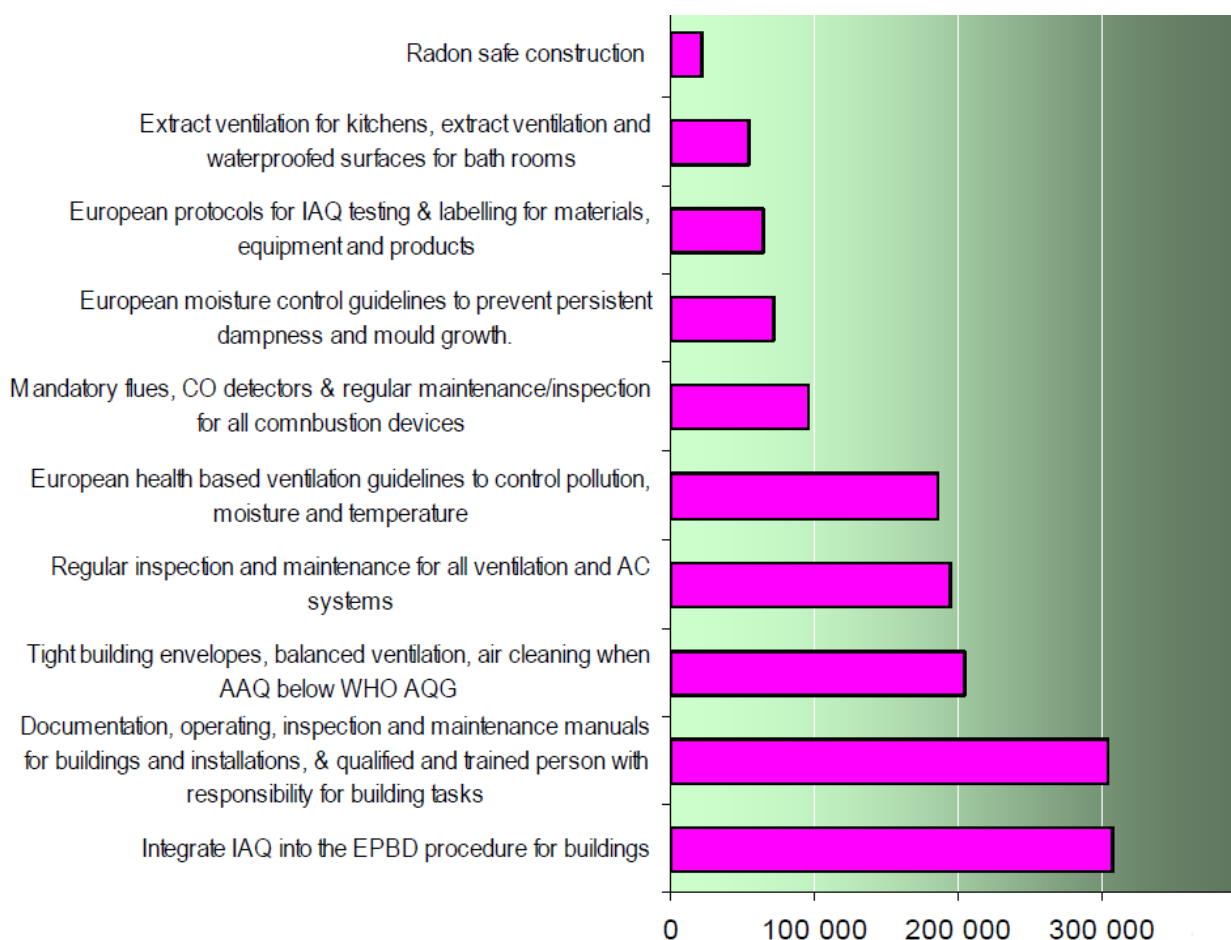
Selon les auteurs il existe deux stratégies de base pour contrôler voire maîtriser la pollution de l'air intérieur : le contrôle des sources de pollution et la ventilation avec ou sans filtration.

“There are two basic strategies to control indoor air pollution: (1) source control and (2) ventilation with or without filtration.” (Jantunen 2011).

En conséquence le rapport IAIAQ présente 10 mesures permettant à réduire la pollution “indoor” et donc à augmenter la qualité de l'air intérieur et réduire les effets de santé néfastes pour les occupants :

- Intégrer les aspects de qualité de l'air intérieur dans les procédures « Energy Performance of Buildings Directive EPBD ».
- Fournir une documentation systématique et assurer une maintenance adéquate pour les bâtiments et les installations.
- Prévoir des enveloppes étanches aux bâtiments, une ventilation équilibrée et des systèmes de purification d'air si les conditions extérieures sont mauvaises (par rapport aux « guidelines » de l'OMS).
- Prévoir des inspections et maintenances régulières pour les ventilations et climatisations
- Développer des « guidelines » basées sur la santé pour les ventilations
- Prévoir et installer des détecteurs de CO.
- Prévoir des « guidelines » de contrôle de moisissures afin d'éviter l'humidité et les moisissures.
- Développer des protocoles pour tester la QAI, labelliser les matériaux et produits de construction et des équipements.
- Prévoir des évacuations d'air pour les cuisines, les salles de bains ainsi que des surfaces étanches à l'eau.
- Tenir compte du radon lors de la construction.

F 11 : Potentiel d'économie en DALY/an au bout de 10 ans pour l'UE-26 par les 10 mesures proposées (Jantunen, 2011)

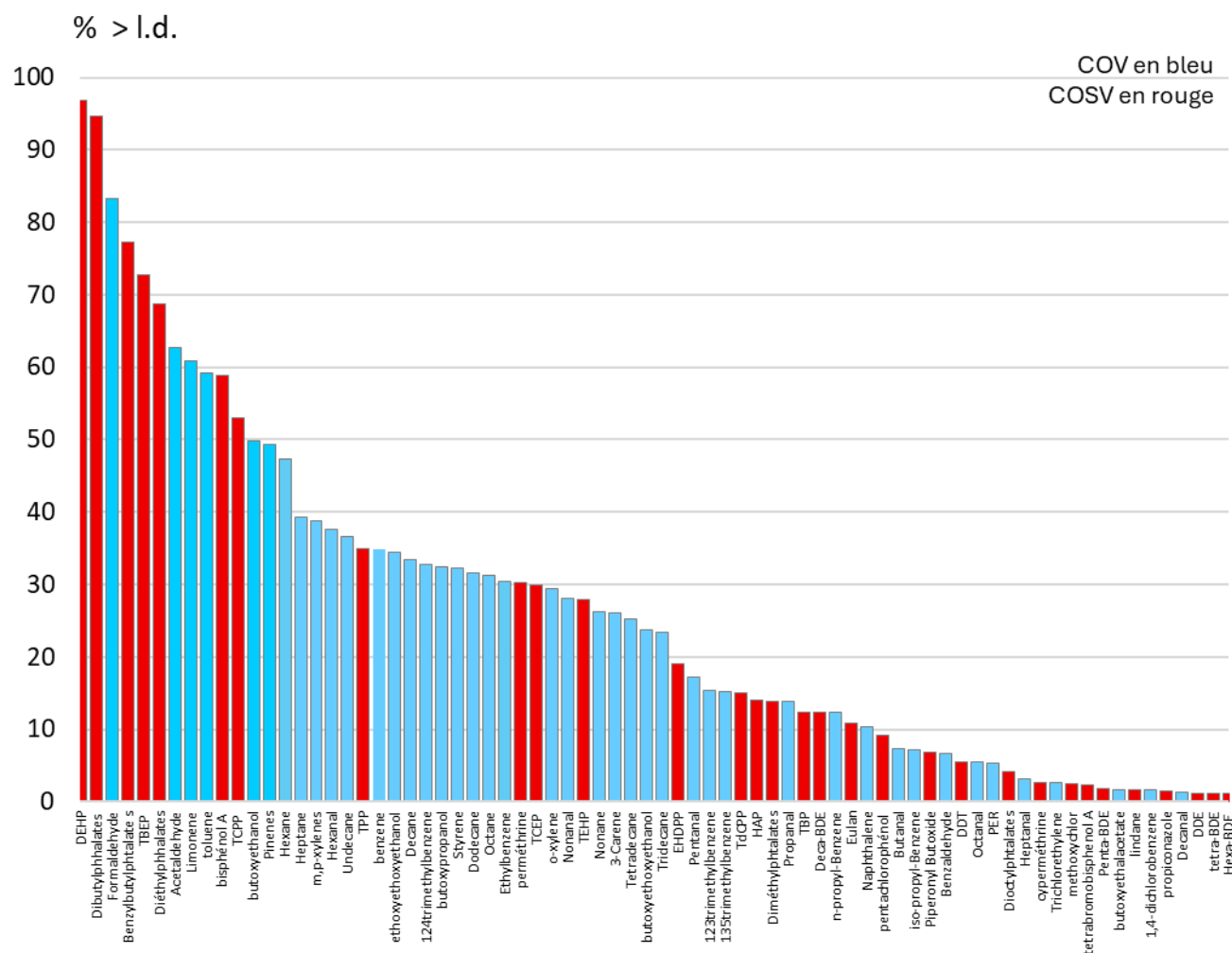


IV.3 : La qualité de l'air intérieur au Luxembourg : analyses dans le bâti

La qualité de l'air intérieur est bien étudiée au Luxembourg étant donné que le ministère de la Santé a développé et mis à disposition, dès 1994 un service réalisant des analyses de bâtiments en relation avec des troubles de santé des occupants. Ainsi, entre 2009 et 2015, 425 bâtiments ont été analysés, en majeure partie des bureaux (59%) des écoles ou structures recueillant les enfants et les jeunes (21%) et les habitations¹⁶ (15%).

¹⁶ Il s'agit en principe des habitations des salariés qui se plaignent de troubles de santé où les analyses ont été réalisées en parallèle au domicile et sur le lieu du travail.

F 12 : Présence de polluants dans les bâtiments luxembourgeois analysés entre 2009 et 2015 (résultats positifs > limite de détection) (Baden, 2017)



Les résultats montrent que la contamination de l'air intérieur dans les bâtiments ne concerne pas seulement les substances volatiles détectées dans l'air (en bleu dans le graphique) mais au même titre les substances peu ou semi-volatiles (en rouge) détectés dans les poussières et qui sont en plus persistantes et bioaccumulables.

Selon ces résultats, les polluants les plus souvent détectés ne sont pas les COV classiques (BTX pour benzène, toluène et xylènes) typiquement présent dans les peintures et colles à base de solvants ou encore les biocides et les retardateurs de flamme ou diphenyléthers polybromés mais les phtalates dans les matériaux en plastique, les éthers de glycol (comme conservateurs dans les colles et peintures à base d'eau dits de dispersion, les produits d'entretien) et les retardateurs de flamme organophosphorés dans les vitrifications, les mousses à base de polyuréthane (PU et PIR) ou encore dans les produits de nettoyage et d'entretien (Baden, 2017).

En effet les COV classiques sont pratiquement absents dans les écoles, les habitations et les bureaux. En revanche les COV « écologiques »¹⁷ tels que les terpènes et les aldéhydes sont nettement plus présents dans les habitations et les écoles tandis que les éthers de glycol sont ubiquitaires dans tous les types de bâtiments.

Les biocides et les pyréthrinoides semblent être spécifiques dans les logements et habitations à l'image de la perméthrine et l'Eulan alors que le bisphénol A est typique pour les salles de classe tout comme les phtalates, notamment le DEHP. En ce qui concerne les retardateurs de flamme tant polybromés qu'organophosphorés, on les retrouve en priorité dans les écoles (vitrifications des sols en linoléum) et dans les bureaux (boîtiers des ordinateurs, copieurs ou imprimantes).

V. Les outils à disposition

Afin d'évaluer et de garantir la santé des occupants relatives à la qualité de l'air intérieur, un certain nombre d'outils sont en place à l'échelle européenne :

V.1. Les valeurs limites ou seuils

Afin de protéger le consommateur et donc l'occupant d'un bâtiment, des valeurs limites existent, du moins pour certaines substances.

Il existe trois types de valeurs limites :

Les limites légales

Les limites légales (« Grenzwerte » en allemand) émises par l'Union Européenne ou par les législations nationales sont les seules valeurs à caractère obligatoire. Ces limites légales sont très rigoureuses et statiques et difficiles à adapter en fonction de l'acquisition de nouvelles données scientifiques.

Les valeurs d'orientation

À l'inverse les valeurs d'orientation émises par différentes institutions ou associations généralement indépendantes sont très flexibles et rapidement adaptables ou modifiables, mais n'ont en principe aucun poids légal.

Les recommandations ou « valeurs guides » par des organismes officiels

Les recommandations (« Richtwerte » en allemand) ou les valeurs guides par des organismes officiels (par exemple par l'OMS) n'ont certes pas de base légale mais elles profitent néanmoins de l'autorité de l'association en question.

Alors qu'il existe des limites légales pour l'exposition professionnelle (code du travail), c'est-à-dire des salariés qui manipulent des produits chimiques, l'exposition liée à l'air intérieur n'est guère règlementée ni pour le lieu de travail (bureaux) ni pour le secteur résidentiel ou encore les espaces publics. D'autre part, ces limites pour l'exposition professionnelle prenant en compte des expositions mono-factorielles à court terme et limitées dans le temps (8 heures par jour, 5 jours par semaine) constituent un compromis économique entre la santé du salarié et la productivité de l'entreprise. De ce fait, ces limites ne sont guère applicables ou transférables aux expositions cocktail, prolongées dans le temps et touchant des groupes de personnes plus

¹⁷ Typiquement utilisées dans les produits « écologiques ». Il s'agit en l'occurrence des certains aldéhydes comme l'hexanal ou le nonanal, les éthers de glycol en tant que conservateurs dans les produits à dispersion (utilisant l'eau comme solvant) ou encore des terpènes présents naturellement dans les huiles à essence, les résines du bois et utilisés dans les peintures écologiques.

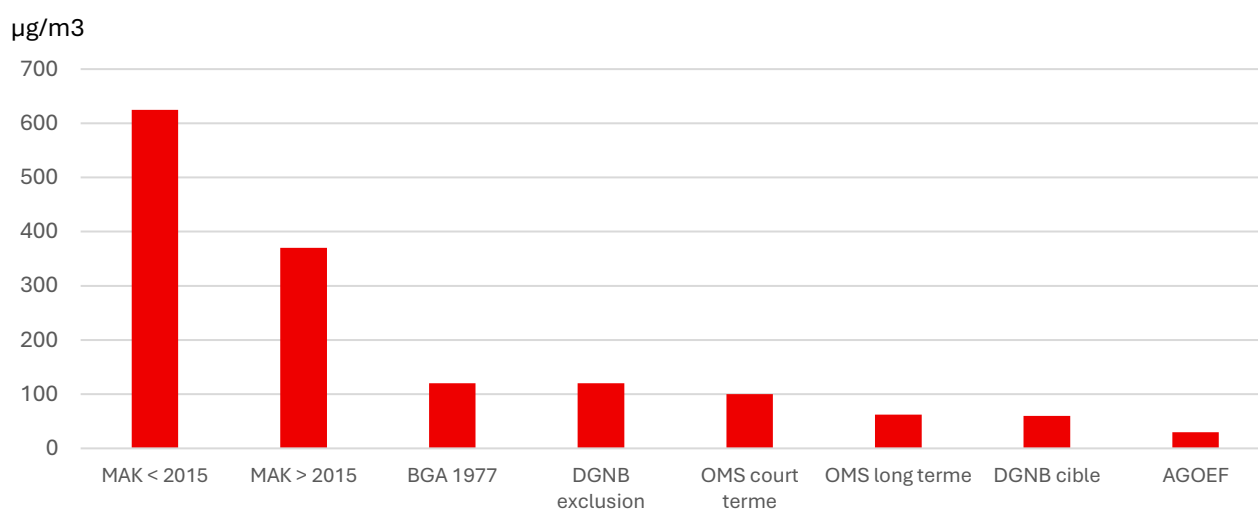
vulnérables (bébés, enfants, femmes enceintes, vieilles gens, personnes malades) dans le secteur résidentiel ou certains espaces publics (écoles, foyers, crèches, hôpitaux, maisons de retraite, ...).

Il convient dès lors de recourir à des valeurs d'orientation et nettement plus sévères que les valeurs limites légales pour autant qu'elles soient représentatives et retraceables dans la construction et notamment pour les habitations.

La divergence des différents seuils peut être illustrée à travers l'exemple du formaldéhyde, molécule bien connue et étudiée pour ses effets sur la santé allant des irritations des yeux, du nez et des voies respiratoires (toux) jusqu'à son potentiel cancérigène (cancer du pharynx) qui lui a valu d'être classé comme cancérigène sûr pour l'homme en 2014 par le CIRC.

La valeur limite pour l'exposition professionnelle (« Maximale Arbeitskonzentration MAK ») était jadis de 0,5 ppm (soit 620 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour être réduite en 2015 à 0,3 ppm (370 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La limite préconisée par le « Bundesgesundheitsamt » allemand en 1977 était de 0,1 ppm (125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). L'OMS recommande 0,08 ppm soit 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (valables pour les expositions à court terme) et 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit 0,05 ppm (exposition à long terme) en précisant qu'il n'est pas exclu que des personnes sensibles présentent des symptômes même pour des expositions inférieures à ces seuils. La certification pour bâtiments allemande DGNB (« Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen ») prévoit une limite d'exclusion de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (en cas de dépassement, une certification est impossible) et une valeur cible (« Zielwert ») de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'AGOEF allemand (« Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschung ») se référant sur les répartitions statistiques dans les bâtiments allemands s'est prononcée pour une valeur d'orientation de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ soit 0,02 ppm.

F 13 : Comparaison des différents seuils limites pour le formaldéhyde



Le seuil pour les irritations du nez est de 0,08 ppm (ou 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), celui pour les irritations des yeux est de 0,01 ppm (soit 12,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Une large étude australienne a mis en évidence que l'incidence (nouveaux cas) de l'asthme chez les enfants passe de 16% pour des expositions inférieures à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 44% pour des expositions supérieures à 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (39% d'incidence pour des concentrations entre 20 et 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Par conséquent, seules les valeurs seuils de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les expositions à longue durée, les valeurs cibles du DGNB ou encore la valeur d'orientation AGOEF sont de nature à assurer du moins partiellement l'absence des symptômes décrits ci-dessus.

V.2. Limites des études scientifiques dans l'évaluation des effets nocifs des polluants chimiques et autres en relation avec la construction

Classiquement, les effets toxiques et nocifs de substances chimiques voir d'autres facteurs physiques ou biologiques sont établis au moyen d'études scientifiques soit des études expérimentales soit de l'observation de la population (épidémiologie) voire encore d'un mélange des deux.

Une analyse un peu plus détaillée de ces deux types d'instruments met en évidence les limites à chacun d'entre eux :

- Les **études expérimentales**, réalisées généralement en laboratoire et dans des conditions bien définies, consistent dans l'exposition expérimentale donc artificielle de cellules de culture, d'animaux de laboratoire voir de l'homme à des doses connues de polluants et qui sont assimilés via un « pathway » déterminé vers le sujet ; oralement par ingestion, à travers la peau ou transcutané, par injection ou encore par inhalation. Généralement il s'agit d'expositions monofactorielles (un seul polluant à la fois) et une observation à durée déterminée et limitée (l'espérance de vie des cellules en culture ou des animaux de laboratoire étant relativement courte). De plus les effets de santé considérés doivent être quantifiables, des troubles tels que vertiges, nausées, maux de tête etc. sont plus difficiles à considérer du fait qu'une cellule, voire un animal ne saurait renseigner sur de tels symptômes.
- Les **études épidémiologiques** correspondent à l'observation de la population réelle sur un intervalle de temps plus ou moins prolongé. Il existe deux types d'observations ; soit on observe une population qui est exposée à un polluant et on détermine combien de sujets développent des symptômes par comparaison à une population non exposée, soit on compare le « mode de vie » de sujets atteints de symptômes par rapport à des sujets non atteints de symptômes. Ainsi, afin d'étudier les effets de la fumée de cigarettes sur l'homme on pourrait donc soit observer les fumeurs et constater la fréquence de cancers de poumon ou de crises cardiaques dans ce groupe de population (par opposition aux non-fumeurs). Ou encore on peut faire une enquête rétrospective auprès des personnes atteintes d'un cancer de poumon et étudier quel taux de ces patients étaient des fumeurs.

Si les études épidémiologiques présentent l'avantage de porter sur des laps de temps beaucoup plus importants et donc sur les effets à longue durée, il apparait néanmoins souvent difficile d'estimer à juste titre l'exposition subie au cours des décennies précédant l'apparition de symptômes. Ainsi une très importante étude par l'Union Européenne visant à étudier le risque pour certaines formes de cancer en relation avec l'utilisation des téléphones sans fil GSM, l'étude INTERPHONE (2010) a porté sur l'information depuis quand les personnes atteintes de deux types de cancer (gliomes et neurinomes acoustiques) disposaient de GSM et sur l'information subjective si elles l'avaient utilisé peu ou beaucoup dans le passé (absence de critères objectifs voir de quantification de l'exposition subie).

Le "Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks" SCENIHR (2013) de la Commission Européenne a énuméré les restrictions suivantes quant aux études épidémiologiques sur les effets de santé dans un opinion préliminaire (rapport) sur les effets de santé potentiels de l'exposition aux champs électromagnétiques :

- Pour les études épidémiologiques, les expositions sont très souvent difficiles à estimer, voir à mesurer (intensité et timing, multi-expositions et expositions combinées, ...)
- Publication sélective de résultats : les grandes études qui coûtent cher ont plus de chance d'être publiées
- D'autre part, la chance d'être publié est plus grande si l'hypothèse initiale est confirmée par les résultats
- Les outils statistiques sont arbitraires ; ainsi on estime que les résultats sont statistiquement significatifs si l'hypothèse d'erreur est inférieure à 5% (p 0,05). Or il s'agit d'une valeur totalement arbitraire qui pourrait tout aussi bien être de 10 ou de 1% (p 0,1 ou p 0,01) ce qui signifierait que des résultats statistiquement significatifs avec une probabilité de 95% ne le seraient plus avec une probabilité de 90 ou au contraire de 99%.
- Le pouvoir statistique dépend de la taille de l'échantillon ; plus une étude est petite, plus l'effet doit être grand pour être détecté (significativité statistique), un effet moins net mais substantiel risque de ne pas être détecté si la taille de l'échantillon est petite

Il en résulte que les études sont donc à considérer avec prudence, il faut en connaître les limites. D'autres facteurs peuvent s'avérer limitatifs et par conséquent difficiles à intégrer dans les études scientifiques.

V.2.1. Effets de santé à court terme, à moyen terme, à long terme

En termes d'effets sur la santé, il faut faire la distinction entre les effets à courte durée ou immédiats (irritations, troubles respiratoires, phénomènes d'allergies, maux de tête, vertiges, ...), les effets à moyenne durée (développement de sensibilités ou allergies, névrodermites, ...) et les effets à longue durée (développement de maladies neurodégénératives ou auto-immunes, cancers, perturbateurs endocriniens, ...). Alors que les premiers effets peuvent généralement plus ou moins facilement être mis en relation avec l'exposition et donc le facteur polluant à l'intérieur du bâtiment, ceci devient de plus en plus difficile avec un écart croissant entre l'exposition et la réaction, en l'occurrence la manifestation des symptômes.

Les effets à long terme sont difficiles voire souvent impossibles à mettre en évidence au moyen des études expérimentales (espérance de vie limitée des animaux de laboratoire, durée limitée des études et de leur financement) voir même épidémiologiques (durée limitée des études et de leur financement, expositions non retraçables, ...).

V.2.2. Toxicité et nocivité

Un effet à court terme voir immédiat et spontané peut ainsi être repris sous le terme de toxicité voir de **toxicité aigüe**, alors que les effets à long terme qui se développent progressivement et se manifestent de façon insidieuse doivent être caractérisés par le terme de nocivité, générant notamment des **effets chroniques**. À titre d'exemple, on parle de toxicité pour l'alcool en cas d'une intoxication aigüe pouvant entraîner un coma éthylique voir même la mort. En revanche, une exposition et une consommation chronique à faibles doses induira à long terme une cirrhose du foie voire certaines formes de cancer (foie, tube digestif, œsophage, sein). Or la majorité des études sont limitées dans le temps et ne tiennent compte que des effets toxiques et des expositions à court terme.

V.2.3. Effets synergiques et cocktail d'exposition

Les études expérimentales étudient généralement un effet spécifique d'un seul agent polluant isolément. Les interactions entre les différents polluants en cas d'exposition simultanée, les effets cocktail voire les effets synergiques ne sont pas pris en compte. De tels effets synergiques sont par exemple connus entre l'exposition à l'amiante et le fait de fumer. Ainsi un fumeur exposé à l'amiante, court un risque significativement plus élevé de développer un cancer du poumon en cas d'exposition qu'un non-fumeur ou qu'un fumeur non-exposé. En ce qui concerne la qualité de l'air intérieur, les polluants lipophiles sont capables d'altérer les membranes cellulaires et de favoriser ainsi le passage de polluants hydrophiles qui seraient normalement retenus par les membranes lipidiques cellulaires. De même, les champs électromagnétiques de hautes fréquences ont pour effet de perméabiliser la barrière hémato-encéphalique et de favoriser le passage de substances neurotoxiques vers le système nerveux, en l'occurrence le cerveau. En d'autres termes la présence d'un polluant permet à d'autres polluants de franchir certaines barrières et de devenir ainsi plus nocif.

V.2.4. Bioaccumulation

De nombreuses substances chimiques sont capables de s'accumuler dans les tissus adipeux ou dans certains organes. On caractérise de telles substances de « bioaccumulatrices ». Ainsi, à titre d'exemple, le plomb est bien connu pour s'accumuler dans les os. De façon générale, cette bioaccumulation concerne d'abord les substances lipophiles (qui « aiment » donc la graisse et tendent à s'accumuler dans les tissus adipeux) surtout si elles sont persistantes (notamment les molécules halogénées, donc équipées de chlore, de fluor ou de brome) telles les biocides, pyréthrinoïdes, les PCBs ou certains retardateurs de flamme. A noter que certains organes, en l'occurrence le foie, le cerveau et le système nerveux en général sont riches en cellules adipeuses. Cette accumulation se fait sur des années voire des décennies et ne saurait par conséquent être prise en compte dans les études scientifiques que de manière très incomplète. Néanmoins c'est justement ce mécanisme de bioaccumulation qui explique pourquoi certaines personnes au bout d'une exposition de longue date (des dizaines d'années) développent des symptômes ou troubles de santé difficiles à remédier du fait qu'il est alors très compliqué de détoxifier l'organisme humain et d'éliminer à posteriori les polluants accumulés.

V.2.5. Décalage ou écart temporel entre expositions et symptômes

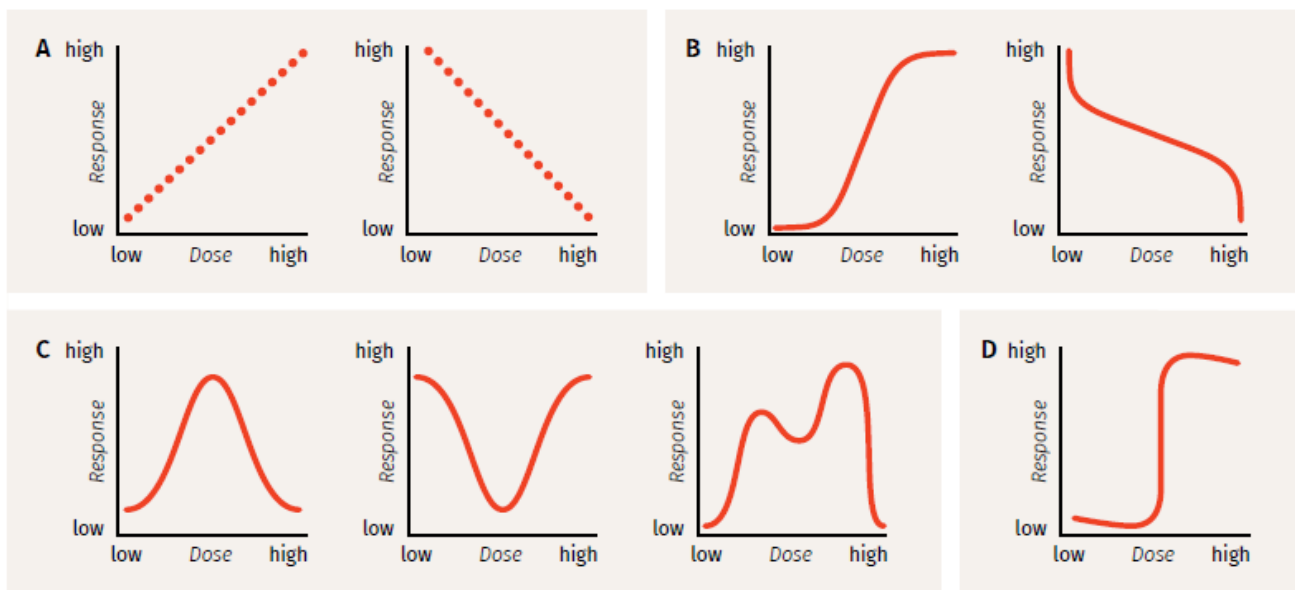
Alors que certains effets de santé sont immédiats (asthme, allergie, irritations des muqueuses) voire très rapprochés de l'exposition proprement dite, un décalage plus ou moins long peut exister pour d'autres types de symptômes ou de maladies telles que les tumeurs ou les maladies neurodégénératives ou le temps de latence peut facilement dépasser des décennies d'années.

Un cas plus complexe encore est le cas des perturbateurs endocriniens où les effets (qui surgissent beaucoup plus tard dans la vie) peuvent différer selon le temps d'exposition. Ainsi les expositions prénatales, donc du fœtus dans le ventre de sa mère ont le plus souvent leur répercussion à des stades beaucoup plus tardifs comme la puberté ou encore la ménopause chez la femme. A titre d'exemple, l'exposition prénatale au bisphénol A (contenu dans certains plastiques) favorise d'après les études scientifiques l'obésité chez l'adolescent ou chez l'adulte, ceci en transformant des cellules souches destinées à devenir des cellules osseuses vers des cellules adipeuses (ce phénomène est décrit sous le terme d'épigénétique, c'est-à-dire d'une altération souvent irréversible de l'expression de nos gènes).

V.2.6. Relation cause à effet non linéaire

Une étude publiée en 2012 (Vandenberg) intitulée « Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals : Low-Dose Effects and Non-monotonic Dose Responses » évaluant quelque 845 études réalisées, a mis en évidence l'absence d'une relation linéaire entre la dose et l'effet telle que la toxicologie la présume suivant la thèse « c'est la dose qui fait le poison » (Paracelsus, 1538). Cette absence de « dose à effet » notamment constatée pour les perturbateurs endocriniens signifierait selon l'étude de Vandenberg que les effets de légères doses ne peuvent être déduits des effets observés à des doses élevées ce qui exigerait des changements fondamentaux dans notre approche scientifique quant au mode de réalisation des études à risque concernant les polluants chimiques et autres.

F 14 : Exemples de résultats dose-réponse des différentes études consultées selon Vandenberg (2012)



V.2.7. Sensibilité individuelle

La sensibilité individuelle très divergente d'une personne à l'autre s'explique par deux facteurs distincts :

- D'une part, l'accumulation d'exposition tant par la fréquentation d'endroits différents (lieu de travail, résidence) mais également dans le temps (exposition prénatale, résidence d'enfance, résidence actuelle) voir les habitudes individuelles (fumeurs ou sportif, hobby/loisir impliquant des produits chimiques, régime alimentaire) diffère d'une personne à l'autre de sorte que l'exposition est unique pour chaque individu.
- D'autre part, chaque individu a un potentiel génétique de détoxification qui lui est propre et qui permet de plus ou moins bien détoxifier les substances polluantes ingérées, ou inhalées. En effet cette détoxification se fait en deux étapes par des enzymes ou protéines dont la synthèse est définie génétiquement. Normalement les deux phases sont synchronisées par la présence simultanée des enzymes qui interviennent dans les deux phases. Si au contraire l'individu présente plus d'enzymes de la première phase et moins d'enzymes de la phase 2, il risque d'accumuler les produits intermédiaires des polluants ingérés ou inhalés sans pour autant pouvoir les évacuer par la phase 2 déficiente. Or ces produits intermédiaires ou polluants transformés s'avèrent plus toxiques encore que le polluant d'origine ce qui explique une sensibilité accrue aux polluants concernés.

Si le potentiel de détoxification est individuel et génétique (et par conséquent fixe), l'exposition est-elle variable de sorte qu'une personne sensible génétiquement peut parfaitement éviter toute exposition ou du moins la réduire au strict minimum afin de minimiser les risques relatifs de subir les symptômes en conséquence, faute de pouvoir détoxifier les polluants en question.

À titre d'exemple, certaines personnes ont des troubles de sommeil si elles boivent un café avant de se coucher ou même après avoir bu une tasse de café pendant l'après-midi. En fait, ils ont un mauvais potentiel de détoxification pour la caféine ce qui est génétique et visible à partir d'une simple analyse sanguine. Comme ils ne peuvent pas changer leur génome, la seule solution est de ne pas boire de café avant d'aller se coucher, en somme éviter l'exposition.

Conclusion

Il en résulte que les effets de santé chroniques et à long terme ne peuvent guère être étudiés de sorte que les effets connus et décrits se limitent à des effets plus ou moins aigus, toxiques plutôt que nocifs, à court ou moyen terme en exposition mono-factorielle à des concentrations très souvent divergentes des expositions réelles dans l'environnement intérieur.

La particularité des maladies de l'environnement consiste dans le fait que qu'elles ne sont pas fonction d'une charge polluante toxicologiquement parlante (absence de relation entre la dose et l'effet) ainsi que dans le fait qu'elles s'accompagnent d'une perte de spécificité par rapport aux substances capables de déclencher les réactions. Les facteurs de susceptibilité individuelle constituent le cofacteur décisif.

Les études scientifiques pour autant qu'elles existent, sont insuffisantes pour garantir une absence d'effets potentiels des substances chimiques utilisées dans certains matériaux de construction et retrouvés par la suite dans l'air intérieur.

V.3. Principe de précaution et prévention

Les troubles de santé décrits, les limites des connaissances scientifiques, l'absence de seuils et valeurs limites ou guides fiables ou non, la multitude des facteurs polluants potentiels et l'expériences des bâtiments analysés au Luxembourg au fil des dernières vingt années justifie pleinement l'application du principe de précaution et plus précisément une approche de prévention en matière de polluants tant chimiques que mycologiques et physiques dans la construction de nouveaux bâtiments voir la rénovation des bâtiments existants.

Principe de précaution sanitaire

Le principe de précaution tel qu'il a été défini par l'UNESCO dans le rapport COMEST se base sur trois piliers, à savoir :

- Une recherche systématique de surprises notamment en ce qui concerne les effets à long terme (« thinking the unthinkable »)
- Une réponse aux premiers indices ou signaux (« early warnings »)
- Un focus sur la plausibilité de risque plutôt que sur des évidences scientifiques « dures »

Et le Conseil de l'Europe en 2011 conclut : « ...Il faut appliquer le principe de précaution et revoir les valeurs seuils car le fait d'attendre d'avoir des preuves scientifiques et cliniques solides avant d'intervenir peut entraîner des coûts sanitaires et économiques très élevés ... » (dans le contexte de la discussion sur les champs électromagnétiques émis par les antennes GSM et les portables).

La prévention concernant les expositions chimiques, mycologiques ou physiques passe donc nécessairement par l'éviction la plus complète possible d'agents polluants dans la construction et la rénovation de bâtiments d'autant plus que la construction passive devenue standard en 2017 voit l'étanchéité des constructions augmentée, les échanges par l'aération naturelle réduits et remplacés par une ventilation mécanique. Différents outils ou instruments s'apprêtent à appliquer ce système de précaution sanitaire et donc la prévention dans la construction saine, en l'occurrence :

- Sensibilisation du public et des maîtres d'ouvrage en particulier
- Sensibilisation et formation des professionnels de la santé (architectes, corps de métier, bureaux d'ingénieurs)
- Conseils en construction saine
- Établissement de règles de l'art en matière de « construction saine » pour les systèmes de ventilation mécanique
- Établissement de règles de l'art en matière de construction saine » pour les installations électriques
- Banque de données « santé » pour matériaux et produits de construction
- Surveillance chantier en matière d'utilisation des matériaux et produits
- Contrôles (analyses et mesurages) du bâtiment après achèvement (certification « santé »)
- Subsides et encouragements à différents niveaux (fabricants, maîtres d'ouvrage, certification)

VI. Exemples de stratégies internationales en matière de construction saine

Certains pays ont d'ores et déjà thématisé les aspects de construction saine soit en complément soit indépendamment du volet « efficacité énergétique » :

VI.1. Expérience aux Etats-Unis : « Indoor Air Pollution in California » le rapport du «California Air Resources Board », 2005

En 2005/2006, le « California Air Resources Board » (CARB) sous le gouverneur Arnold Schwarzenegger et le secrétaire de l'Agence de Protection Environnementale californienne (California EPA) Alan C. Lloyd a établi un rapport sur la pollution de l'air intérieur en Californie.

Selon ce rapport (révisé par des experts scientifiques de l'Université de Californie), la pollution de l'intérieur provoque des effets de santé significatifs, notamment des troubles respiratoires (y compris l'asthme), des cancers et des mortalités prématurées et coûtent l'état de Californie de l'ordre de 45 milliards de dollars chaque année. Ces impacts seraient cependant évitables. Ainsi l'EPA californienne et l'EPA américaine classent les polluants de l'intérieur et leurs sources dans la catégorie « high risks ».

Outre les polluants primaires, le rapport mentionne également des polluants secondaires générés par l'oxydation de substances (terpènes, acides gras insaturés). De même le rapport mentionne des études mettant en évidence l'exposition à des polluants semi ou peu volatils (à l'image de l'étude NOPES – Non-Occupational Pesticide Exposure Study 1990 ou NHEXAS National Human Exposure Assessment Survey, 1999). Le rapport déplore l'absence de réglementations adéquates à garantir une qualité de l'air intérieur suffisante.

Selon les experts la façon la plus efficace pour éviter ou réduire la pollution intérieure consiste dans l'utilisation de matériaux et produits de construction à émission basse ou mieux à émission zéro. Assurer une ventilation adéquate vient en deuxième et l'utilisation de filtres (p.ex. HEPA) et purificateurs d'air (p.ex. ionisateurs) en troisième position.

« Minimizing indoor emissions is generally more effective than removing them after emission has occurred » (Kelly, Indoor Air quality Symposium, Sacramento, 2000)

Une telle reformulation des produits chimiques pourrait facilement être accomplie par les fabricants avec un impact minimal sur le consommateur et surtout avec des surcoûts mineurs.

Selon le « Board » il existe 5 méthodes qui permettent de réduire la pollution de l'air intérieur :

1. Contrôle des sources (matériaux de construction, objets usuels de consommation) c'est la méthode la plus efficace
2. Ventilation naturelle ou mécanique (moins efficace)
3. Maintenance régulière et adéquate des bâtiments
4. Éducation du public et des professionnels
5. Appareils de purification et de nettoyage de l'air

En matière de limitation de la pollution d'air intérieur les experts du « Board » proposent les solutions suivantes (« options to mitigate indoor air pollution ») :

1. Créer un système de management en matière de qualité de l'air intérieur ; établissement de références (guidelines), limites d'exposition ou d'émission concernant l'air intérieur
2. Établir des limites d'émissions pour les matériaux et produits de construction
3. Exiger des mises à disposition de matériaux de construction, de meubles et de produits usuels de la part des fabricants pour des tests d'émission par des laboratoires indépendants et certifiés par l'Etat et mise à disposition des résultats au public
4. Traiter les bâtiments où peuvent séjourner des enfants tels que les écoles, les crèches, maisons relais et habitations de façon prioritaire
5. Développer des « guidelines » en matière de qualité de l'air intérieur pour les habitations, les écoles et les bureaux permettant d'identifier des « best practices »
6. Amender le code de construction en termes de qualité de l'air intérieur et de ventilation adéquate pour garantir la qualité de l'air intérieur
7. Développer des programmes d'éducation et de formation pour les professionnels y compris les professionnels de la santé, les enseignants, les gestionnaires des bâtiments
8. Favoriser la recherche en matière de qualité de l'air intérieur
9. Financer un programme innovant en matière de « clean air technology » pour la qualité de l'air intérieur

Selon le rapport, des centaines de substances ont été identifiées comme polluants de l'air intérieur et sont notamment repris sur la liste « Prop 65 list – Proposition 65, the Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act of 1986 » qui définit le niveau de risque de même que les valeurs moyennes et les percentiles 90 pour les différents polluants intérieurs (plus de 750 substances sur la liste).

VI.2. Expérience du Canada : le standard canadien « R-2000 »

Le Ministère des Ressources Naturelles canadien a établi en partenariat avec la « Canadian Home Builder's Association » un programme volontaire, appelé R-2000 en complément au standard purement énergétique « Energy Star » visant au-delà de la performance énergétique également un accroissement de confort et un environnement plus sain et donc une amélioration de la qualité de l'air intérieur de leurs bâtiments. La certification R-2000 s'adresse en premier lieu aux bâtiments résidentiels (maisons isolées, maisons jumelées, les maisons en rangée et les habitations, immeubles résidentiels à logements multiples duplex, triplex et les immeubles d'appartements).

« Les maisons neuves homologuées R-2000 sont les meilleures de leur catégorie en efficacité énergétique, ce qui comprend des niveaux élevés d'isolation, des caractéristiques en matière de qualité de l'air et des mesures de protection de l'environnement. Ceci se traduit par des économies d'énergie, un confort accru et un environnement plus sain pour le propriétaire ». D'après le Ministère des Ressources Naturelles, « le meilleur moyen d'améliorer la qualité de l'air ambiant est de réduire ou d'éliminer les sources de pollution. Les constructeurs peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air en choisissant des matériaux appropriés ».

Le programme R-2000 se base sur 5 axes :

1. Un standard avec les spécifications techniques
2. Une assurance « qualité »
3. Une certification
4. Un « training & licensing » des professionnels de la construction (« builders & service providers »)
5. L'information des consommateurs

Les maisons R-2000 sont construites par des constructeurs formés et accrédités par le gouvernement du Canada, évaluées, inspectées et testées par un conseiller en efficacité énergétique (tiers indépendant) et certifiées par le gouvernement du Canada :

« Seul les constructeurs agréés R-2000 peuvent construire des maisons R-2000. Pour être admissible à la certification R-2000 dans le cadre de la norme R-2000, une maison doit être bâtie par un constructeur qualifié et agréé R-2000. Les constructeurs R-2000 doivent inscrire, bâtir et certifier une maison de démonstration R-2000 avant d'obtenir leur accréditation ».

VI.3. Expérience de la France : le guide « construire sain » à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation

Le ministère de l'égalité des territoires et du logement et le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ont élaboré un guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation intitulé « Construire sain » en 2013. Selon ce guide deux approches permettent d'atteindre l'objectif de construction saine : la réduction des émissions à la source d'une part et l'évacuation par l'aération et donc la gestion des pollutions d'autre part.

Les précisions portent sur un certain nombre de polluants, en l'occurrence l'amiante, les particules fines (PM10 et PM2,5), le radon, certains COV, le dioxyde d'azote (qui est un polluant extérieur), le monoxyde et le dioxyde de carbone, certains pesticides et certains COSV à savoir les retardateurs de flamme polybromés, les

composés perfluorés et les phtalates. D'autres facteurs pris en compte concernent les moisissures et l'humidité.

En termes de polluants chimiques, le guide préconise :

- Des valeurs-guides pour l'air intérieur pour quelques polluants isolés, à savoir le formaldéhyde et le benzène,
- Un étiquetage des produits de construction, le label « A+ » portant sur certains COV dans les cloisons, revêtements de sol, isolant, peintures, vernis, colles et adhésifs destinés à un usage intérieur,
- Une surveillance de la qualité de l'air intérieur dans certains établissements recevant du public par des contrôles réguliers.

D'autre part, le guide donne également des recommandations en matière de systèmes mécaniques de ventilation (conduits rigides, équipements accessibles positionnement des bouches d'insufflation d'air, balayage des locaux, choix des matériaux, filtres, tests et réception et entretien).

La nouvelle réglementation environnementale prévoit par ailleurs des contrôles de la qualité de l'air intérieur dans les nouveaux bâtiments (www.inies.fr). Finalement les ministères français ont lancé avec différents partenaires (CSTB, alliance HQE, AFNOR, ...) une base de données pour matériaux de construction renseignant sur les performances environnementales et sanitaires.

VI.4. Expérience de la Suède : « SundaHus »

Il s'agit d'une société privée, fondée en 1990 et destinée à la consultance en vue d'une amélioration de la qualité de l'environnement intérieur lors d'une construction ou d'une rénovation. La société publie et tient à jour une banque de données concernant les matériaux de construction dans laquelle les matériaux sont classés en 5 catégories en fonction de leur teneur en substances nocives.

"No one wants to construct buildings with hazardous substances ; unfortunately, we cannot always avoid them. SundaHus Material Data provides full support in making environmentally conscious material choices, i.e., to avoid products containing hazardous substances and to document product choices. SundaHus Material Data provides the opportunity to monitor the contents of a building over time through reliable product documentation".

Cette banque de données se base sur les réglementations du Parlement et du Conseil européen, et de l'Agence Chimique suédoise :

« The SundaHus Assessment Criteria are mainly based on the rules of the European Parliament and Council Regulation (EC) No 1272/2008 and the Swedish Chemicals Agency's priority guide PRIO, as well as the Swedish Chemicals Agency's Classification and Labelling Regulations (KIFS 2005 :7)".

VI.5. Expérience de la Finlande : «Certified Indoor Environment Specialists » et « guidelines for Indoor air quality » par le gouvernement (ministère des affaires sociales et de la santé 545/2015)

En 2015 le ministère des affaires sociales et de la santé finlandais a arrêté une nouvelle législation sur la santé liée à l'habitation et aux qualifications exigées pour la certification des spécialistes en environnement intérieur (Metiäinen, 2016). La réglementation porte sur les définitions, le « risk assessment – évaluation des risques », les instructions pour mesurer, échantillonner et analyser, la ventilation mécanique (volumes d'air et vitesse), le bruit, le CO₂ et le CO, le formaldéhyde, les COV les particules fines, les fibres minérales et l'amiante, les moisissures et la qualification requise pour les experts certifiés. Ainsi les experts doivent présenter une formation de base, une formation spécifique et de l'expérience pratique, en tout un cycle de formation d'une trentaine d'heures. La réglementation différencie entre trois types de spécialistes ; les « specialists for healthy buildings » SHB, les « indoor air specialists » IAS et les « moisture damage construction specialists » MDCS.

T 9 : Nombre d'heures de formation requises pour les spécialistes en Finlande (Metiäinen, 2016)

MODULE	SHB	IAS	MDCS
Building Physics	5	5	5
Research methods for buildings	4	2	5
Construction methods	2		4
Building construction	1	1	1
Legislation	2	1	2
Ventilation & air condition	3	3	3
Total for building construction	17	12	20
Indoor air quality			
1. chemical	3	3	3
2. biological & microbial	5	5	2
Research methods			
1. chemical	1	1	0.5
2. biological & microbial	2	2	0.5
Health effects	2	2	1
Total for indoor environment	13	13	7
Total	30	25	27
Thesis	15	Report	Report

VI.6. VDB-Zert en Allemagne

La certification allemande est une initiative de l'association des biologistes de l'habitat (« Verband deutscher Baubiologen – VDB »). La certification se base sur des mesurages et analyses de l'air intérieur du bâtiment fini ou nouvellement construit et notamment les COV et le formaldéhyde, les biocides, les phtalates et les retardateurs de flamme, les moisissures, le radon, les champs électromagnétiques de basses et de hautes fréquences et l'efficacité de l'aération au moyen d'un gaz traceur.

La banque de données Wecobis initiée dans le cadre d'une initiative de recherche constitue une base de données dynamique pour matériaux de construction et tient compte des aspects environnementaux et sanitaires. Elle est gérée conjointement par le ministère de l'intérieur, de la construction et pour la patrie (« Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat ») et la chambre des architectes en Bavière (www.wecobis.de).

VI.7. L'expérience de l'Administration des Bâtiments Publics au Luxembourg

L'Administration des Bâtiments Publics (ABP) a développé depuis 2014/2015 une approche de précaution sanitaire relative à l'utilisation de matériaux visant à réduire les impacts sur la santé des futurs occupants desdits bâtiments publics.

Dans une première phase, l'ABP fait une sélection des matériaux à vérifier en tenant compte de quantité (surface ou volume) du matériau en question ainsi que de l'endroit et de l'utilisation du local afin d'estimer le risque potentiel d'exposition et la nécessité de procéder à une analyse plus détaillée. Ainsi l'ABP demande aux entreprises de soumettre une documentation des matériaux/produits envisagés ; fiches techniques, fiches de sécurité, labels, tests en chambre climatique ou autres s'il y en a. Sur base de ces documents une sélection des matériaux est faite et ces données sont reprises dans une base de données interne et non publique.

Dans une deuxième étape, un local « test » est construit sur le chantier avec les matériaux et produits destinés à être utilisés pour la construction du bâtiment. Un prélèvement d'air est pris au bout de 28 jours dans ce local « test » pour analyse au laboratoire. Finalement, en fin de chantier une analyse de l'air est réalisée qui sert de contrôle par rapport aux entreprises.

L'ABP a procédé à une vingtaine de projets réalisés de cette manière durant les deux dernières années. En général ces résultats du bâtiment achevé corrélaient bien avec les résultats des locaux « test ».

L'élaboration d'une « liste positive » (voir plus loin) faciliterait considérablement la tâche et pourrait constituer un élément complémentaire dans les procédures de l'ABP.

En résumé les initiatives décrites se basent essentiellement sur trois voire quatre facteurs indispensables à garantir une qualité de l'air intérieur saine en rapport avec la construction ; la promotion des matériaux peu ou non-émissifs, la certification « santé » du bâtiment en passant par des analyses et mesures de contrôle et la formation d'experts en la matière. Un quatrième volet concerne finalement les aspects hygiéniques des systèmes d'aération et de ventilation. La troisième partie (partie C) du présent livre vert concerne la description des outils luxembourgeois servant à la mise en application de ces facteurs et qui tiennent compte des particularités du secteur de la construction et de l'immobilier au Luxembourg.

Les outils luxembourgeois relatifs à la construction saine

VII. Le modèle de « construction saine » luxembourgeois

Le modèle de construction saine élaboré pour le Luxembourg et proposé dans ce livre vert repose sur les piliers suivants :

1. Règles de l'art de la construction saine
2. Banque de données « matériaux et produits de construction sains » (liste positive) CLAIRE¹⁸
3. Certification de la construction finie BREATHE¹⁹
4. Agrément (ou accréditation) H₂E²⁰
5. Ordre professionnel LAB²¹
6. Conseil accompagnant la construction/rénovation
7. Formation, information et sensibilisation
8. Recherche – RDI²²
9. Intégration des critères de santé dans les instruments « Lenoz » et « PrimeHouse » version 2023
10. Intégration des critères de santé dans les instruments de certification de bâtiments fonctionnels (ex : DGNB-Luxembourg »)

Ce modèle propose une approche holistique qui adresse aussi bien les acteurs du secteur que les clients finaux. Il repose sur les meilleures pratiques observées au niveau national et international et compte remédier à un certain nombre de défauts de systèmes de gestion existants de la qualité de l'air. Le degré de mise en œuvre des piliers varie, le MECO s'emploie actuellement à déployer les bases sur lesquelles le modèle peut être lancé, en collaboration avec des acteurs publics et bureaux privés. La mise en place progressive de piliers de support va consolider le modèle au fur et à mesure.

VII.1. La construction « saine » selon les règles de l'art

Afin de réduire ou d'éviter des éventuels impacts négatifs en matière de santé dans la construction, un certain nombre de consignes sont à respecter : ceci concerne notamment la planification générale, l'installation électrique et surtout la conception et l'installation du système de ventilation mécanique. Ces consignes devraient par conséquent être repris dans un guide de construction durable et certaines consignes pourraient le cas échéant et à moyen terme même constituer partie intégrante d'un code de construction.

¹⁸ CLAIRE - Clean air & Environment

¹⁹ BREATHE - Building Related Environment Air + HEalth

²⁰ H₂E - Healthy Home Experts

²¹ LAB² - Luxembourg Association Building Biologiste (Biologistes des Bâtiments / BauBiologen)

²² RDI - Research Development and Innovation

VII.1.1. Planification générale

Nuisances extérieures

Les emplacements des locaux à séjour prolongé (pièces de vie) sont à planifier à l'abris des sources de nuisances externes détectées (fumiers, champs labourés, trafic intense, stations d'essence ou sites industriels, antennes GSM, ...) en évitant au mieux tout accès direct (portes, fenêtres) dans ces directions.

Radon

Vue l'étanchéité du bâtiment, un puisard devrait être installé de façon systématique en-dessous de la première dalle (cave) et qui pourrait le cas échéant (si l'on observe une accumulation de radon au sein du bâtiment fini) être complété par un ventilateur permettant de dévier le radon et d'empêcher toute pénétration de radon radioactif vers l'intérieur du bâtiment (cf. fiche radon en annexe). Pour la même raison (radon), l'installation d'un puits canadien (tuyaux ensevelis dans la terre et réchauffant directement l'air y circulant) est à éviter au moins dans toute zone à risques concernant le radon (cf. cartes géographiques de la Division de la Radioprotection du ministère de la santé).

Nuisances internes

Comme le garage est une source de polluants (COV classiques), il convient de prendre des précautions afin d'éviter toute migration des COV volatils du garage vers les locaux à séjour prolongés, situés à côté ou au-dessus du garage ; détachements des garages, membranes spécifiques étanches, système de ventilation propre au garage (ventilation décentralisée), etc. Il en est de même pour certains locaux générant des substances nocives à l'image du chauffage à combustion, d'ateliers ou autres.

Prévention contre moisissures

Les moisissures nécessitant de l'humidité pour se développer, il convient dès la planification de prendre les mesures adéquates pour empêcher toute infiltration d'humidité (y compris toute humidité ascensionnelle par capillarité) ou encore prévoir les mesures adéquates pour éviter tout pont thermique induisant des phénomènes de condensation en période hivernale.

Infrastructures à risque

Parmi les infrastructures potentiellement à risque, il faut citer l'installation électrique et le système de ventilation mécanique :

VII.1.2. Installation électrique biologique

Un certain nombre d'éléments permettent la réduction substantielle des champs électromagnétiques et ainsi l'exposition des occupants, à savoir

- Planification de l'arrivée d'électricité et du caisson à fusibles loin des locaux à séjour prolongé aussi bien en distance horizontale qu'en distance verticale
- Utilisation de câbles blindés spécifiques en tresse entourés d'une feuille aluminium et d'une terre séparée
- Utilisation de boîtiers électro-conductibles (p.ex. en graphite) avec terre séparée
- Utilisation de biorupteurs pour les chambres à coucher
- Alternativement aux biorupteurs : domotique
- Pour personnes électrohypersensibles (EHS) : prévoir des filtres pour le smart mètre

- Pour les systèmes photovoltaïques :
 - Placer l'onduleur de la photovoltaïque loin des pièces à vie et aussi près du caisson à fusible que possible
 - Éviter le cas échéant la remontée d'« électricité sale » ou « dirty power » moyennant des filtres en amont de l'onduleur (électronique) ou en favorisant un onduleur à transformateur (attention champs magnétiques puissants)

VII.1.3. Ventilation mécanique contrôlée

Étant donné l'étanchéité du bâtiment, la ventilation mécanique constitue le principal facteur d'échange d'air entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment favorisant ainsi l'apport d'air frais (oxygène), l'évacuation d'air vicié (dioxyde de carbone, polluants éventuels et humidité) tout en évitant des pertes énergétiques excessives. Afin que le système de ventilation mécanique contribue à améliorer de façon efficiente la qualité de l'air intérieur, un certain nombre de « règles de l'art » sont à respecter. En effet, alors que pour les bâtiments fonctionnels de telles règles et consignes sont établies du moins en partie (ITM, 2011, 1996 et 1991), elles font pratiquement complètement défaut dans le cadre des bâtiments résidentiels.

Les critères concernant la ventilation mécanique en termes de santé, sont la qualité de l'air, l'hygiène du système (maintenance) et le confort. Les consignes en matière de ventilation mécanique indispensables à un fonctionnement adéquat en respect avec la santé des occupants concernent la conception, le montage, le choix des matériaux, la mise en service et la maintenance continue.

Planification-conception

- Choisir un emplacement du local technique de sorte à minimiser la longueur des trajets notamment en ce qui concerne l'apport d'air frais et la distribution d'air frais vers les locaux de séjour et qui permet une distribution aussi rectiligne que possible (évitant des courbes à angle aigu) et donc central par rapport aux locaux à desservir et accessible pour l'entretien
- Éviter de préférence de multiplier les conduites à diamètre réduit parallèles et préférer une seule conduite à diamètres plus élevé (moins de pertes de pression, entretien plus facile et moins cher, moindre encrassement)
- Limiter les vitesses d'air maximales : tronçon principal 4-6 m/s, tronçon intermédiaire 3-4 m/s, tronçon terminal 1,5-2 m/s
- Découpler le chauffage de la ventilation (afin d'éviter des humidités relatives de l'air trop basses en hiver)
- Prévoir l'apport d'air frais dans les locaux à séjour prolongé (chambres, salon, bureau, ...), l'évacuation de l'air vicié dans les locaux d'utilité (cuisine, WC, salle de bain, corridor, ...)
- Prévoir un renouvellement total de l'air de l'ordre de 0,5 fois le volume habitable
- Prévoir pour la centrale de ventilation une capacité de réserve d'au moins 25% (éviter que la centrale fonctionne en plein régime et fasse trop de bruit)
- Équilibrage par étage entre les volumes de pulsion d'air frais et d'évacuation d'air vicié
- Éviter une sous-pression pour la cave ou l'étage directement au contact de la terre (afin d'éviter une aspiration de radon radioactif)
- Placement de l'aspiration d'air frais à l'extérieur au-dessus du niveau de neige en hiver et de rebondissement des eaux de pluie, de préférence à une hauteur supérieure à 3 mètres de haut et hors zone d'influence de polluants (cheminées, compostages, sortie de garage des voisins, extrait air vicié propre ou voisin, parking, route à trafic intense, étables, écuries, ...)

- Distance entre aspiration d'air frais et extraction d'air vicié au moins 8 mètres et de préférence pas sur la même face du bâtiment (éviter un court-circuitage)
- Respecter un débit minimal hygiénique de 0,35/h et de 30 m³/h par personne (donc prévoir des débits plus élevés)
- Calcul des débits nécessaires sur base du volume du local ET du nombre de personnes (30m³/h par personne)
- Ne pas dépasser les 25 m³/h et les 2 m/s pour une bouche de pulsion ou d'extraction
- Éviter des puits canadiens dans les zones à risques de radon
- Prévoir un écoulement du condensat accessible pour l'entretien au niveau de la centrale de ventilation et de l'échangeur thermique
- Prévoir un flux entre les locaux recevant de l'air frais et les locaux avec extraction d'air vicié (portes non étanches)
- Éviter des échangeurs thermiques à roues de récupération ou enthalpiques (condensation vers les conduites à pulsion)
- Prévoir des trappes d'accès au système de ventilation mécanique afin de garantir l'accès pour l'entretien et la maintenance
- Prévoir des silencieux
- La construction d'une cheminée doit avoir un système de ventilation/aération (apport d'air frais et évacuation de la fumée) séparé et indépendant du système de ventilation mécanique de l'air intérieur

Installation-montage / choix des matériaux

- Préférer des matériaux rigides aux matériaux souples qui risquent de s'endommager lors de l'entretien
- Éviter des matériaux (synthétiques) contaminés par des polluants chimiques, notamment des phtalates ou des retardateurs de flamme organophosphorés (ou autres)
- Éviter toute utilisation de colles ou d'huiles dans le contexte des conduites d'air
- Préférer les conduites lisses et antistatiques à l'intérieur (moins d'encrassement)
- Préférer des conduites circulaires (faciles à monter et à isoler, moins de pertes de pression) ou ovales, aplaties aux conduites rectangulaires (angles morts, encrassement)
- Éviter des conduites trop longues (> 8 mètres)
- Éviter des courbures trop serrées à angle aigu (inférieur à 90°)
- Éviter une succession de coudes au niveau d'une même gaine de ventilation
- Éviter des conduites trop peu étroites (diamètres inférieurs à 10 cm) afin de permettre le passage de brosses ou autres lors du nettoyage
- Éviter des vis pénétrantes ou autres obstacles à l'intérieur des conduites d'air
- Isolation thermique des conduites d'air, notamment des conduites qui assurent une communication entre l'intérieur et l'extérieur (air frais et air vicié) afin d'éviter des condensations à l'intérieur des conduites et à la surface extérieure
- Ne pas exposer les composantes du système de ventilation mécanique et notamment les conduites à des poussières ou à de l'humidité lors du transport et du stockage intermédiaire sur le chantier
- Boucher aussitôt les extrémités des conduites d'air lors de la phase chantier afin d'éviter tout encrassement par des poussières de construction ou d'infiltration d'eau ou de neige
- Éviter la mise en service provisoire de la ventilation mécanique pendant la phase chantier (en effet, la VMC n'est pas conçue pour permettre le « séchage » de l'air ambiant)

- Préférer un emplacement des bouches d'aération (pulsion et extraction) hors zones de repos et permettant une libre circulation de l'air ; éviter de préférence des emplacements à ras le sol
- Choisir les emplacements des bouches d'aération de sorte à garantir un brassage complet de l'air d'un local

Filtres

- Filtres pour l'air frais F7 précédé d'un filtre G3 ou G4
- Filtres F7 en filtres-poches (« Taschenfilter ») ou filtres à caisson (« Kassetten- oder Plisseefilter ») qui possèdent une surface filtrante plus grande qu'un simple filtre simple
- Filtre grossier G3 ou G4 pour l'air vicié
- Système équipé d'une alarme indiquant la nécessité de changement de filtre (au mieux moyennant une sonde de différence de pression)
- Prévoir un treillis grossier (mailles 10 mm) à la prise d'air frais (éviter encombrement par feuilles mortes, gros débris, accès petits animaux – rongeurs, oiseaux, grands insectes)

Mise en service - réglage

- Débits d'air les plus proches possibles des débits calculés lors de la conception, mais toujours plus élevé que les débits minimums exigés,
- Ouvrir les bouches de pulsion et d'extraction le plus possible (limite les pertes de pression et le bruit)
- Éviter que le ventilateur ne tourne au maximum (énergie, bruit)
- Mesurer les débits réels avec toutes les bouches en position ouverte
- Mesurage soit dans la section droite d'un conduit par petite sonde en conduit ou mieux au niveau de la bouche d'air par compensation avec grille ou anémomètre hélice avec stabilisateur
- Régler ensuite la ventilation centrale en fonction de la bouche à trajet le plus défavorable (le plus de pertes de pression calculées) qui doit rester ouverte
- Régler/fermer ensuite les autres bouches individuellement
- Vérifier les débits réels après le réglage (mesurages au niveau de la bouche)
- Régler ensuite le ventilateur jusqu'aux débits calculés lors de la conception
- Les mesurages doivent se faire moyennant des appareils calibrés par un technicien habilité et formé

Maintenance

L'entretien concerne en principe toutes les composantes du système de ventilation, outre la centrale proprement dite notamment les filtres, les conduites d'air (aussi bien la pulsion que l'extraction) les bouches d'air (pulsion et extraction), l'échangeur thermique et les tuyaux d'évacuation de condensat.

- Fournir un mode d'emploi ou manuel d'utilisation avec consignes d'entretien
- Afin de garantir une maintenance adéquate, le groupe de ventilation doit être accessible moyennant des ouvertures d'accès, en limitant le nombre d'obstacles entre deux accès successifs au nombre d'un seul obstacle (clapet, filtre, silencieux), en évitant les coudes inférieurs à 90° ou en limitant le nombre de coudes de 45-90° au nombre maximal de quatre.
- Fournir un carnet d'entretien avec calendrier et contrat d'entretien sur une durée d'au moins 2 ou mieux de 5 ans
- Prévoir des inspections annuelles régulières
- Prévoir une première inspection 3 mois après achèvement du chantier

À chaque inspection

- Inspection optique incluant l'ensemble des filtres et des conduites d'air (au moyen d'une caméra endoscopique), des bouches d'aération, de l'échangeur thermique et de toute autre composante du système de ventilation
- Mesurage des poussières dans les conduites (Dtest de la « JADCA Japanese Air Duct Cleaners Association », VDI 6022 Blatt 1.1 & 1.3, DIN EN 15780)
- Mesurages activité microbienne au niveau des filtres, des conduites, de l'échangeur thermique (mesurage ATP, ADP et AMP par luminescence, cf... HACCP)
- Désinfection de l'échangeur thermique au moyen d'un désinfectant alimentaire
- Vider et inspecter les écoulements de condensat
- Remplacement des filtres si contaminés (mesurages positifs) ; laver ou passer les filtres à l'aspirateur sont des procédures inefficaces non recommandables et par conséquent à éviter
- Vérifier les débits après chaque travail d'entretien
- Les mesurages doivent se faire moyennant des appareils calibrés par un technicien habilité et formé en la matière
- Tous les résultats des mesurages et entretiens effectués sont à noter dans le carnet d'entretien

L'hygiène adéquate de l'ensemble des composantes des VMC est une condition absolue quant au bon fonctionnement de la ventilation mécanique. Ceci concerne la qualité de l'air intérieur d'une part, puisque les encrassements notamment microbiens risquent de contaminer l'air intérieur. D'autre part l'encrassement de certaines composantes (comme les filtres, les bouches d'aération, ...) favorise des pertes de pression et réduit par conséquent les échanges d'air et donc aussi bien l'apport d'air frais (oxygène) que l'évacuation de l'air usé ou vicié (CO₂, humidité, ...). Finalement, ces colmatages réduisent également la performance énergétique (compensation des pertes de pression par augmentation de la performance des moteurs des VMC).

De nombreuses questions en matière d'hygiène des VMC ne sont actuellement pas élucidées, notamment en ce qui concerne les procédures, les composantes à nettoyer, les fréquences d'entretien, les désinfectants et les outils de nettoyage admissibles ou encore les outils adéquats pour documenter l'entretien en question.

Un projet-pilote HERVE²³ initié en collaboration avec Neobuild et portant notamment sur 50 bâtiments avec VMC qui sont suivis par les experts accrédités H₂E ou des ramoneurs ayant été formés en matière d'inspection et d'hygiène des systèmes de ventilation mécaniques permettra de dresser un constat et de définir les consignes adéquates en matière des exigences hygiéniques des VMC d'ici 2027/2028.

VII.2. Banque de données « matériaux et produits de construction sains » (liste positive) CLAIRE

La minimisation de l'exposition à des polluants chimiques et donc qualité de l'air intérieur adéquate et saine, est réalisée via l'utilisation de matériaux et de produits de construction ou d'entretien exempts de substances chimiques susceptibles de porter atteinte à la santé et au bien-être des occupants. En principe une bonne qualité de l'air intérieur peut-être générée par deux facteurs ; l'absence d'émissions et donc de matériaux ou produits polluants ou encore une ventilation soit naturelle soit mécanique qui permet d'évacuer les polluants en temps réel.

²³ HERVE - Hygiène Entretien Régulation et Réglementation des VEntilations mécaniques

Néanmoins, le rapport californien du « California Air Resources Board » sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments stipule que « ... minimiser les émissions des matériaux et produits de construction est généralement plus efficace que d'enlever lesdites émissions après leur libération ("Minimizing indoor emissions is generally more effective than removing them after emission has occurred" ; Kelly, 2000). D'autres études (Offermann, 2012 ; Huangfu 2021) ont montré que la ventilation n'est souvent pas efficace pour différentes raisons : substances peu volatiles, adsorbant sur les poussières fines, équilibre entre émission et dilution par ventilation, saturation de la phase gazeuse au contact immédiat de la phase liquide ou solide, ...). Il en résulte que la première mesure à assurer une qualité de l'air saine est de minimiser voire d'annuler le taux d'émission et donc d'utiliser des matériaux et produits de construction pauvres ou mieux exempts de polluants chimiques.

En effet, seul le choix des matériaux et produits de construction **exempts** de substances nocives garantit l'absence de polluants ou de contaminations de l'air intérieur. Ainsi la construction « saine » passe inévitablement par les choix de matériaux/produits dans une banque de données adéquate.

Pourquoi une banque de données « santé » des matériaux et produits de construction ?

En effet, il existe de nombreux labels (« blauer Engel », « Baubook » autrichien, oekobau.dat allemand, A+ français, AgBB allemand, DICI danois, M1 finlandais, natureplus allemand, etc.) qui incluent la santé dans d'autres critères notamment énergétiques et écologiques (matériaux de construction recyclables, besoins énergétiques lors de la production ou du recyclage). Même si ces labels considèrent également le critère "santé", celui-ci n'intervient que très incomplètement dans le calcul du score intervenant dans l'établissement du label.

Quatre critiques sont notamment à formuler :

1. Les critères de santé se limitent souvent surtout aux substances volatiles, en l'occurrence les COV ou « solvants classiques » (BTX etc.). Or ce sont plutôt les substances peu ou semi-volatiles qui sont nocives à long terme (neurotoxiques, cancérigènes, perturbateurs endocriniens et donc similaires aux hormones) comme les biocides, les retardateurs de flamme, les phtalates, les PCBS et les HAPs, les métaux lourds etc. (à titre d'exemple, aucun des labels mentionnés en amont ne considère les retardateurs de flamme organo-phosphorés non chlorés qui sont pourtant des dérivés chimiques du SARIN).
2. Les matériaux ou produits labellisés sont pauvres et non pas exempts en émissions. La concentration de l'air ambiant dépend dès lors de la quantité de matériau par volume de local et peut en conséquence être très variable.
3. Les limites pour les émissions se font par un test en chambre climatique sous des conditions expérimentales divergentes de la situation dans le futur bâtiment (notamment en ce qui concerne les rapports entre surface de matériau et volume de la pièce/chambre climatique, taux d'aération continue, température et humidité qui influencent l'émanation, etc.). Ainsi une analyse des critères AgBB allemand spécifie que « ... des expériences montrent que même si les critères de l'AgBB sont respectés, des troubles de santé peuvent apparaître » (Ilvonen, 2017). La Commission Européenne a même défini un local de référence européen de 12 m² (CEN/TS 16516) pour réaliser des tests d'émission en complément aux tests en chambre climatique afin de remédier à cette situation.
4. La fusion entre les critères écologiques, énergétiques et la santé permet de récupérer un matériau mauvais pour la santé par des critères écologiques ce qui fait qu'en fin de compte le label ne garantit pas le respect de la santé (or de nombreux maîtres d'ouvrage sont justement intéressés par l'aspect de santé). La santé ne devrait pas être compensable par l'écologie et vice-versa.

La liste positive (banque de données) « matériaux et produits de construction sains » se focalise exclusivement sur des critères de santé et se voit donc complémentaire aux critères écologiques et énergétiques. Elle vise à identifier des matériaux ou produits **exempts** de substances toxiques ou nocives qui pourraient dans le cadre de l'utilisation habituelle desdits matériaux contribuer à la contamination de l'air intérieur et donc porter préjudice à la santé des utilisateurs ou des occupants. La banque de données concerne non pas des types de matériaux ou de produits mais des matériaux/produits de fabricants, donc des marques. En effet, chaque type de matériaux/produits peut être contaminé tout comme la plupart des matériaux peuvent également être produits sans ajout de substances nocives.

La banque de données se veut être une liste positive, promouvant les matériaux et produits exempts de polluants chimiques nocifs. C'est pourquoi uniquement ces matériaux/produits exempts de substances nocives ou exempts de substances à effets « graves » pour la santé humaine sont accessibles au public dans la banque de données.

En revanche, les experts H²E (Healthy Home Expert) et biologistes de l'habitat (voir accréditation) voire les professionnels de la construction auront un accès plus complet sur la base de données.

VII.2.1. Étude pilote

Réalisation de l'étude pilote

Dans une première phase, durant les années 2021 et 2022, le MEA et Neobuild ont procédé à l'analyse d'une centaine de matériaux ou produits de construction relatifs à la mise en évidence d'éventuelles substances nocives contenues dans le matériau en question et susceptibles de contaminer l'air intérieur et de porter ainsi préjudice à la santé et au bien-être des occupants.

Le but ultime est de classer les matériaux de construction en fonction de leur impact potentiel sur la santé et le bien-être des occupants et de réaliser une « liste positive » de matériaux de construction non nocifs au service des futures maîtres d'ouvrage et des professionnels de la construction voir au système étatique de subvention dans le cadre de constructions durables.

La méthodologie exacte est décrite dans l'étude pilote détaillée qui se trouve en annexe A3 avec notamment la description de la récolte et de l'échantillonnage, de l'analyse proprement dite et des critères d'évaluation et d'interprétation des résultats de laboratoire. De même les différents labels internationaux appliqués par certains matériaux y sont décrits de façon succincte. Les critères d'évaluation sont également repris dans la description des analyses pour la liste positive sous le point **7.2.2.**

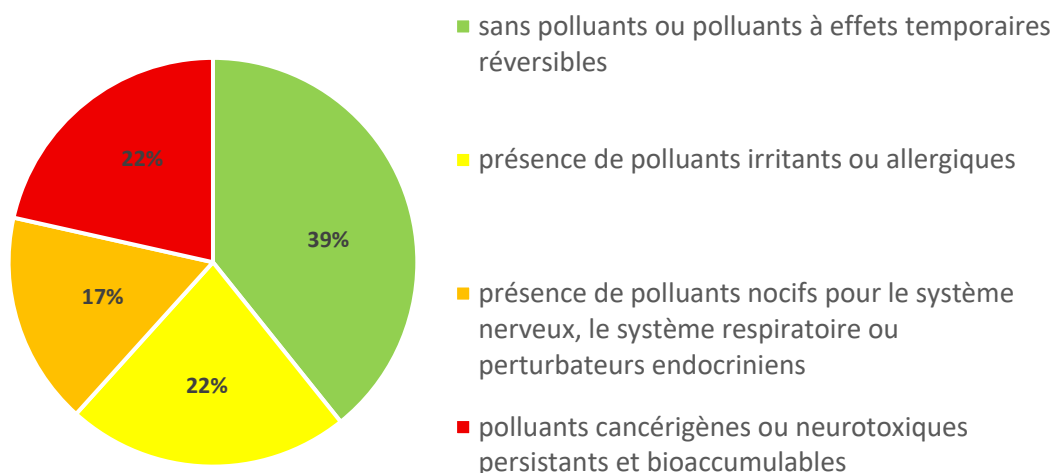
Résultats et conclusions de l'étude pilote

Les résultats des analyses de laboratoire ainsi que la consultation des fiches de données des fabricants permettent de dresser un bilan provisoire et de tirer les conclusions suivantes :

- 1. 39 % des matériaux préanalysés (fiches de données) et analysés par la suite en laboratoire se sont révélés impropres à la construction saine.**

Ces produits constituent donc des matériaux à ne pas mettre en œuvre en vue d'une précaution sanitaire. Viennent s'ajouter une trentaine de matériaux écartés sur base de préanalyse. Plus d'un échantillon sur cinq est contaminé par un polluant appartenant à la classe « rouge », et donc à éviter absolument dans le sens d'une précaution sanitaire par rapport aux occupants des bâtiments.

F 15 : Classement des matériaux de construction selon les résultats des analyses de laboratoire (n=107)



Les polluants les plus détectés concernent les éthers de glycol (14) et les isothiazolinones (11), tous les deux des conservateurs dans les peintures ou colles à dispersion ainsi que deux aldéhydes classés cancérigènes, le formaldéhyde (7) et l'acétaldéhyde (9). Parmi les métaux lourds, l'arsenic (5) et le plomb (5) ont été retrouvés le plus souvent. Si les isothiazolinones ne constituent pas de surprise étant donné que les matériaux classés en jaune en préanalyse ont été acceptés pour les analyses de laboratoire, la présence de formaldéhyde et d'acétaldéhyde, des éthers de glycol et du plomb est plus interpellant, étant donné que les matériaux renfermant ces polluants auraient dû être écartés lors de la préanalyse si les données concernant les matériaux s'étaient avérées exactes. À noter que les éthers de glycol à cause ni de leur température d'ébullition élevée ainsi que les retardateurs de flamme organophosphorés (2 échantillons) n'ont pas besoin d'être mentionnés sur les fiches de sécurité.

2. La consultation ni des fiches de sécurité ni d'autres documents fournis par les fabricants ne constituent une garantie en matière de construction saine.

En effet pour plus de la moitié des matériaux analysés, les résultats des analyses ne correspondaient pas avec les déclarations des fiches de sécurité. En effet, dans 54 % des cas, les résultats des analyses de laboratoires mettent en évidence des substances nocives pour la santé qui ne sont pas mentionnées dans les fiches de sécurité ou des DEP (déclaration environnementale de produit). 39 % de ces matériaux se sont même révélés impropres (orange ou rouge) à la construction saine suivant les analyses de laboratoire.

3. L'origine biosourcée (minérale ou organique) ne donne pas de garantie en termes de santé et d'absence de substances nocives émissives

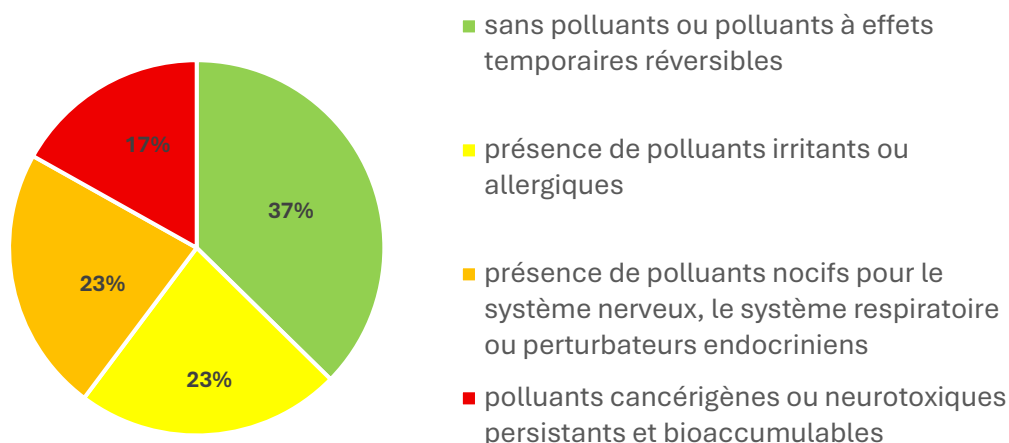
La différence entre les matériaux biosourcés et les non-biosourcés est relativement limitée en termes de santé. Pour les deux catégories, le pourcentage des matériaux défavorables (orange et rouge) avoisine les 40 %, donc les matériaux qui peuvent être utilisés sans risque majeur pour la santé des occupants dépassent légèrement les 60 %. En conclusion et selon les résultats d'analyse, l'origine biosourcée (minérale ou organique) ne constitue pas de garantie en termes de santé.

4. Les labels sont pour la plupart insuffisants pour garantir le respect des aspects de santé et ne s'avèrent pas mieux que les « non-labels ».

Parmi les produits portant des labels européens, 31 (37 %) sont confirmés par les analyses de laboratoire être sans polluants nocifs pour la santé des occupants, 19 autres (23 %) renferment des polluants irritatifs voir

allergisants. 33 matériaux labellisés analysés en laboratoire (soit 40 %) sont clairement contaminés de sorte à ne pas garantir l'absence de troubles de santé chez les occupants.

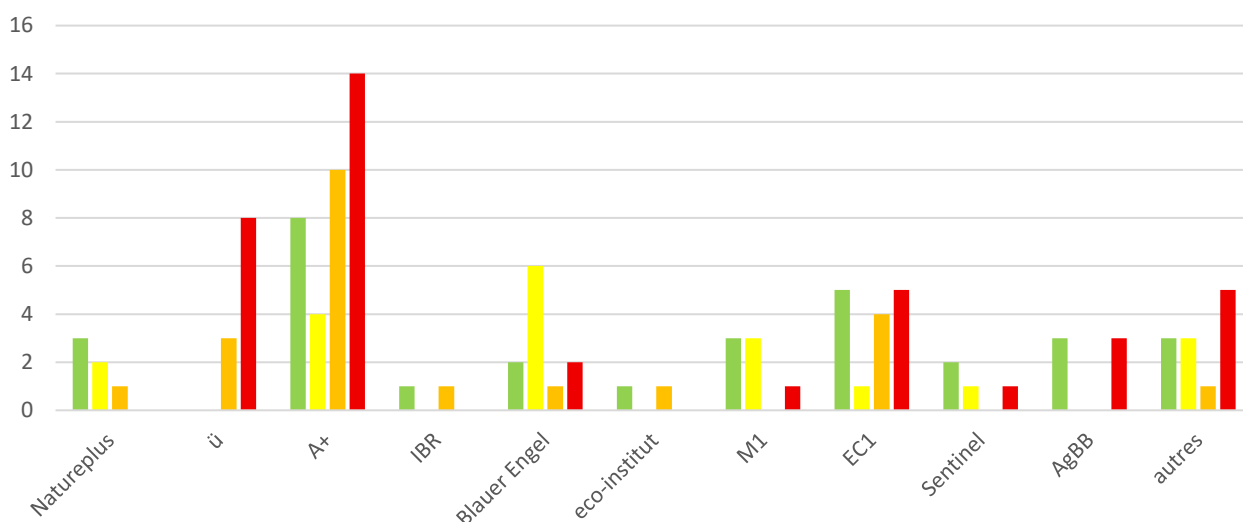
F 16 : Classement des matériaux labellisés selon les résultats des analyses de laboratoire (n=83)



Sur base des analyses de laboratoire, la classification « santé » des matériaux ne diffère pas considérablement entre les matériaux labellisés (60 % des matériaux favorables, 40 % inaptes en termes de précaution sanitaire) et les non-labellisés (65 % des matériaux favorables, 35 % inaptes).

5. Les différents labels internationaux sont très hétérogènes avec de grandes différences par rapport aux exigences en matière de santé.

F 17 : Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives détectées en préanalyse ou en analyse de laboratoire



Selon l'étude pilote, aucun des labels internationaux ne saurait donner une garantie infaillible d'absence de substances nocives dans ledit matériau de construction et en l'occurrence de construction saine. En ce qui concerne p. ex. A+ (36 matériaux) et EC1 (15) les résultats apparaissent complètement aléatoires dans la mesure où les matériaux labellisés peuvent ou non renfermer des substances nocives. Pour « Blauer Engel » (11) et M1 (7) la tendance est plus positive envers les matériaux sains. Pour Natureplus (6), eco-INSTITUT (2) et IBR (2), les matériaux ne contiennent au moins pas de substances nocives « rouges ». Il faut cependant

remarquer que les nombres de matériaux analysés avec ces labels étaient trop faibles pour permettre une évaluation statistique.

Ces conclusions confirment le bien-fondé et la nécessité d'une liste positive comme proposée dans le cadre de la méthodologie « construction saine ».

De manière plus générale, on constate l'hétérogénéité des labels « santé » en matière d'émissions de substances nocives pour la santé. Les labels ne sont absolument pas comparables entre eux en termes d'influence potentielle sur la santé des occupants de bâtiments.

De ce fait il y a nécessité pour un pays comme le Luxembourg qui met en œuvre des matériaux de construction des différents pays, de procéder à une uniformisation des données concernant les aspects de santé en passant par une méthodologie analytique commune, afin d'éviter de comparer « des pommes et des poires ». Une liste positive permet de comparer les matériaux de construction d'origines différentes selon une méthodologie harmonisée.

VII.2.2. Concept CLAIRE : analyse des matériaux/produits de construction

En conclusion de l'étude pilote réalisée, un concept concernant l'élaboration d'une banque de données ou « liste positive » concernant des matériaux ou produits de construction exempts de substances susceptibles de porter préjudice à la santé et au bien-être des futurs occupants a été développé et élaboré. Ce concept est décrit dans les deux points suivants.

Avant de procéder à l'élaboration de la banque de données proprement dite, une étude de marché a été réalisé par la société NEOBUILD afin de déterminer les principaux matériaux et produits de constructions en utilisation au Luxembourg et ainsi de mieux cibler la banque de données.

Dans une première étape les informations concernant le matériau ou produit en question sont collectionnés et consultés : fiches techniques, fiches de sécurité, informations supplémentaires des fabricants, fiches écologiques, autres. Sur base de ces informations, les matériaux ou produits contaminés sont écartés. Pour les autres matériaux ou produits, des échantillons sont collectionnés et envoyés à un laboratoire chimique pour analyse.

Les analyses de substances semi-volatiles et de métaux lourds sont réalisées directement dans l'échantillon ; pour les analyses de COV et d'aldéhydes, l'échantillon est placé pendant 7 jours dans un récipient étanche métallique ou en verre dans des conditions bien déterminées et un échantillon de l'air de ce récipient est pris à l'aide d'une pompe active via des tubes de prélèvement selon des modalités bien précises (cf. annexe A2).

Les substances chimiques analysées appartiennent aux groupes suivants²⁴ :

- COV (composés organiques volatils) aromatiques
- COV aliphatiques
- Cycloalcanes
- Paraffines
- COV halogénés
- Terpènes
- Éthers de glycol

²⁴ Les substances appartenant aux différents groupes décrits sont reprises en détail dans le glossaire

- Esters
- Cétones
- Alcools
- Siloxanes
- Phénols
- Aldéhydes
- Biocides et pyréthriinoïdes
- Retardateurs de flammes organophosphorés
- Diphényléthers polybromés
- Phtalates
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- Biphényles polychlorés (PCB)
- Isothiazolinones
- Métaux lourds
- Autres

Les substances sont classifiées selon un code couleur en fonction de leur nocivité :

Vert : absence de toute substance nocive émissive connue ou présence de COV classiques s'évaporant totalement en 2-3 semaines (ne posant donc pas de problèmes à moyen terme) et provoquant des troubles de santé réversibles et transitoires tels que nausées, maux de tête, vertiges

Ex : alcanes, alcènes (COV aliphatiques), paraffines, certains, alcools, cétones

Jaune : présence de substances irritantes ou allergisantes pour des personnes sensibles (allergies)

Ex : terpènes, aldéhydes, isothiazolinones

Orange : présence de substances capables d'engendrer des troubles neurologiques ou respiratoires ou perturbateurs endocriniens

Ex : éthers de glycol, phtalates, certains COV, certains HAP, certains biocides, certains métaux lourds

Rouge : présence de substances cancérigènes (CMR), neurodégénératives. Ces substances sont généralement persistantes, bioaccumulables (PBT, vPvB) et les effets de santé sont irréversibles

Ex : biocides, pyréthriinoïdes, retardateurs de flamme, certains HAP cancérigènes, PCB, formaldéhyde et acétaldéhyde, certains COV cancérigènes (benzène, ...), certains métaux lourds (Ni, Pb, Hg, ...)

La classification des substances ou groupes de substances selon les codes couleurs est reprise en détail dans la liste des agents chimiques nocifs dans la Partie D - Liste CLAIRE, avec en marge de chaque substance individuellement le code de couleur respectif.

VII.2.3. Élaboration de la banque de données

Les matériaux ou produits de construction sont ensuite classés dans une des quatre couleurs correspondant au polluant (substance nocive) le plus nocif ou toxique mis en évidence. Ainsi la présence d'un polluant cancérigène (code couleur rouge) engendre automatiquement que le matériau est classé « rouge », l'absence de polluants rouges ou oranges avec une présence d'un terpène (code couleur jaune) engendre que le matériau est classé « jaune », etc.

Finalement, lorsque le produit ou matériau analysé ne contient aucune des substances nocives ou paramètres problématiques recherchés ou encore des polluants à effets réversibles et transitoires, il est coloré en vert, indiquant que le matériau/produit peut être utilisé en toute sécurité.

À l'inverse, lorsque le matériau/produit est coloré en rouge ou en orange, des risques pour la santé des utilisateurs ou occupants ne peuvent être exclus étant donné que le matériau/produit en question est susceptible d'émettre des polluants nocifs. Lorsque ces émissions se limitent à des polluants peu agressifs qui peuvent néanmoins s'avérer problématiques pour des personnes sensibles ou vulnérables, le matériau/produit est codé en jaune. Les matériaux sont donc repris sous le code couleur qui leur a été attribué dans une banque de données accessible partiellement au public (matériaux verts et jaunes) et dans leur totalité à certains groupes de professionnels de la construction ou de la biologie de l'habitat (accréditation H₂E).

Comme la composition des matériaux et produits peut changer (et ne correspond pas nécessairement à la fiche de sécurité respective) des analyses d'échantillons doivent être réalisées régulièrement pour les matériaux/produits appartenant aux codes de couleur verts ou jaunes, assurant par là un contrôle continu.

F 18 : Logo de la liste positive CLAIRE



Le fabricant pourra utiliser le code couleur pour étiquetage des matériaux ou produits relatifs qui restent néanmoins la propriété du MECO ou de l'organisme réalisant les analyses relatives.

VII.3. Certification « santé » de la construction, contrôles après achèvement de la construction (BREATHE)

De nombreuses certifications existantes (DGNB, HQE, MinEnergie, LEED, BREEAM, WELL, ...) se limitent aux substances organiques volatiles notamment les COV et le formaldéhyde qui se dosent facilement dans l'air intérieur. En revanche, les substances organiques peu ou semi-volatiles sont beaucoup moins souvent citées ou considérées. Or, c'est justement à ce niveau que figurent la plupart des molécules organiques bio-accumulatrices et à effets irréversibles neurotoxiques, cancérigènes ou autres. Il en est de même pour les moisissures (favorisant de l'asthme et des allergies), le radon (gaz radioactif) et l'amiante (provoquant tous les deux le cancer du poumon) ou encore les champs électromagnétiques de basses et de hautes fréquences.

La documentation en termes de « construction saine » et donc un contrôle du succès de mission de conseil en biologie de l'habitat passe par des mesurages et analyses de contrôle de la qualité de l'air et de l'environnement intérieur une fois la construction achevée. Ces contrôles sont d'autant plus importants qu'ils permettent d'adapter de façon continue les critères et de garantir ainsi une de qualité adéquate des différents aspects de « construction saine », tout en tenant compte de l'évolution du marché de la construction et l'émergence probable de nouvelles substances dans les nouveaux produits.

Les contrôles effectués après la fin de chantier permettent en outre de certifier l'aspect « santé » de la construction et de valoriser ainsi le bâtiment en question.

En ce qui concerne les analyses et mesurages de contrôle, le moment d'intervention est d'une importance absolue du fait que les maîtres d'ouvrage tiennent à emménager les lieux aussitôt le bâtiment achevé. Le fait d'intégrer des meubles ou de vivre dans les locaux peut influencer dans une certaine mesure la qualité de l'air intérieur (émissions de produits de nettoyage, « air fresheners » ou ionisateurs, bougies, cigarettes, meubles, ...). D'autre part les conditions de réalisation de mesurages ou de prélèvement (humidité, température, aération manuelle, ...) ne sont plus standardisées. Il est donc primordial de réaliser notamment les analyses de contrôle chimiques entre l'achèvement du chantier et l'emménagement des occupants, mais dans un mode de fonctionnement normal (chauffage et ventilation en fonction).

Les contrôles par analyses et mesurages incluent les paramètres suivants :

- Analyses chimiques (substances volatiles, semi-volatiles et métaux lourds)
- Monitoring de CO et de CO₂
- Monitoring de radon
- Analyses mycologiques
- Mesurages de ponts thermiques (en hiver)
- Monitoring de l'humidité relative de l'air
- Mesurages de champs électromagnétiques (basses et hautes fréquences)
- Mesurages de la vitesse et des débits d'air de la ventilation mécanique
- Contrôle de l'encrassement des composants de la ventilation mécanique
- Contrôle du carnet d'entretien et du contrat d'entretien de la ventilation mécanique

Tous les prélèvements et mesurages se font selon les procédures de l'accréditation H₂E (et dans des conditions de prélèvements standardisés) qui se basent en principe sur la dernière version SBM (Standard

Baubiologischer Messtechnik) en vigueur (SBM-2015 en 2020) et le guide des investigations biologiques concernant l'intérieur des bâtiments (VDB-Richtlinien zur Vorgehensweise bei baubiologischen Untersuchungen in Gebäuden, 3e Version, 2018) de l'ordre professionnels des experts « Baubiologen – Verband Deutscher Baubiologen – VDB).

VII.3.1. Analyses chimiques

Les analyses chimiques se font, soit au moyen de prélèvements d'air (COV et aldéhydes), soit par des prélèvements de poussières (COSV et métaux lourds) selon les procédures de l'accréditation H²E et dans des conditions de prélèvement standardisées et bien définies. En effet, les conditions de prélèvement doivent être standardisées afin que les résultats soient interprétables et comparables, soit aux valeurs d'orientation ou aux valeurs limites, soit d'un bâtiment à l'autre. Ceci concerne notamment le mode et la fréquence d'aération ou de ventilation ainsi que l'âge des poussières en cas de prélèvements de poussière. De même, la manière de réaliser les prélèvements et les conditions atmosphériques (température ambiante, humidité relative de l'air, température externe) sont à noter puisque les émissions de substances chimiques aussi bien que le développement de spores de moisissures sont dépendantes de ces conditions ambiantes.

Les **analyses chimiques** (cf. liste agents chimiques dans la Partie D - liste BREATHE) concernent essentiellement les COV (aromatiques, aliphatiques, cycloalcanes, paraffines, COV halogénés, terpènes, éthers de glycol, esters, alcools, cétones, phénols, siloxanes), les aldéhydes, les COSV (biocides, pyréthrinoides, retardateurs de flamme organophosphorés, diphényléthers polybromés, phtalates, PCB, HAP, isothiazolinones) et les métaux lourds.

Les prélèvements se font dans les locaux à séjour prolongé ; salon, chambres à coucher, chambre à jouer, bureau ou autres. Le nombre de locaux à analyser est fixé en fonction de l'hétérogénéité et la représentativité des matériaux et produits de construction utilisés. En principe, on prévoit deux locaux à séjour différents – salon et chambre à coucher - en fonction de la variation des matériaux de construction d'un local vers l'autre (revêtement de sol, plafond, enduit ou papier peint, ...).

Prélèvements d'air

Ces prélèvements concernent les COV, d'une part, et les aldéhydes, d'autre part. Les prélèvements sont faits de façon active moyennant une pompe à flux continu, permettant des flux à faible volume.

La pompe est déposée sur une surface inerte²⁵ à hauteur du nez, c'est-à-dire, à hauteur d'une table en salon ou d'un bureau, à hauteur d'une table de nuit ou d'une chaise dans une chambre à coucher ou une chambre à jouer (lieu exact à décrire dans le rapport).

Les locaux concernés ne doivent pas être aérés (aération ou ventilation manuelle) au moins 12 heures avant les prélèvements proprement dits, sans pour autant dépasser les 24 heures (de préférence une aération 12 heures avant le prélèvement). En revanche, la ventilation mécanique pour autant que le bâtiment en dispose reste en mode opératoire normal (position intermédiaire de la ventilation mécanique). Les portes des locaux restent fermées (sauf ouverture sporadique pour entrer ou sortir du local). La liste des substances volatiles y compris les valeurs guides à appliquer sont repris dans la Partie D - liste BREATHE.

²⁵ Il existe des tables spécifiques inertes

Prélèvements de poussières

Ces prélèvements concernent les substances organiques semi- ou peu volatiles appelés COSV et les métaux lourds. Les prélèvements de poussières âgées de sept jours sont faits par aspiration du local moyennant un aspirateur habituel.

Le prélèvement se fait en aspirant l'ensemble de la surface du sol d'un seul local tout en évitant de passer avec l'aspirateur sur des câbles plastiques ou rebords métalliques. Chaque local devra être aspiré au moyen d'un réservoir, filtre ou sachet séparé afin d'éviter toute contamination d'un local vers l'autre. Un mélange de plusieurs locaux aspirés par un même sachet est à éviter. Entre deux locaux et avant tout échantillonnage, l'aspirateur doit aspirer « à blanc » pendant quelques minutes afin d'éliminer tout reste de poussières.

La liste des substances semi-volatiles y compris les valeurs guides à appliquer sont repris dans la Partie D - liste BREATHE.

Les **analyses proprement dites** sont faites dans un laboratoire accrédité et accepté par l'organisme de certification. Les analyses sont faites selon les normes techniques en vigueur :

- COV en GC/MS (gaz chromatography /mass spectrometry)
- Aldéhydes en HPLC (high performance liquid chromatography)
- COSV en GC/MS (gaz chromatography /mass spectrometry)
- Métaux lourds en ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry)
- PFAS en LC-MS/MS (liquid chromatography / mass spectrometry)

Les analyses sont quantitatives et exprimées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les COV et les aldéhydes, en mg/kg de poussière pour les COSV, en $\mu\text{g}/\text{g}$ de poussières pour les métaux lourds (ou équivalents) et en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de poussières pour les PFAS. Les limites de détection sont indiquées dans la liste des substances chimiques présentée dans la Partie D - liste BREATHE.

VII.3.2. Monitoring du CO et du CO₂

CO – monoxyde de carbone (en ppm)

Un mesurage de monoxyde de carbone est indiqué uniquement dans le cas où le bâtiment héberge un système à combustion (chauffage à combustion, cheminée, etc.) en marche²⁶ ou un stockage de pellets dans les locaux immédiatement concernés ainsi que dans les locaux adjacents. Les mesurages se font le cas échéant au moyen d'un appareil électronique en phase de combustion. Les fenêtres restent fermées (éviter la ventilation manuelle), la ventilation mécanique est à maintenir en fonctionnement normal.

CO₂ – dioxyde de carbone (en ppm)

Endroits à analyser : chambres à coucher.

Les mesurages du CO₂ se font APRÈS emménagement des occupants, puisque l'homme est la principale source d'émission de CO₂. Le CO₂ est mesuré par des appareils électroniques permettant d'enregistrer les concentrations mesurées à intervalles réguliers sur une période d'au moins 5 jours (fréquence de mesure au moins toutes les 5 minutes). Le nombre de personnes séjournant dans la chambre à coucher pendant la nuit doit être noté. Les fenêtres restent fermées (éviter la ventilation manuelle), la ventilation mécanique est à

²⁶ En marche depuis au moins 1 heure

maintenir en fonctionnement normal. Les résultats reflètent les taux moyens, les valeurs maximales ainsi que le temps de dépassement des seuils de 1000 ppm pendant la période nocturne.

VII.3.3. Monitoring du radon (Bq/m^3)

Endroits à analyser : chambre ou salon, cave (en simultané, afin de pouvoir comparer les résultats).

Le radon se mesure sur un temps prolongé de 14 jours (pour obtenir une valeur moyenne) alors que le bâtiment est en mode normal d'occupation ou de ventilation (VMC en marche). Les meilleurs moments pour effectuer de telles mesures sont les saisons intermédiaires (printemps, automne). En effet, les taux de radon dans les bâtiments sont maximaux en période hivernale (et jusqu'à cinq fois supérieurs aux autres saisons) pour différentes raisons : concentrations plus élevées dans le sol, réduction de l'aération naturelle par les occupants, poussées thermiques. Le radon se mesure en continu, soit à l'aide de charbon actif, soit à l'aide de dosimètres électroniques. Les résultats reprenant les moyennes sont à exprimer en Bq/m^3 .

VII.3.4. Analyses mycologiques (UFC/m^3)

Les prélèvements se font dans les locaux à séjour prolongé ; salon, chambres à coucher, chambre à jouer, bureau ou autres. Le nombre de locaux peut se résumer à deux pièces. Un prélèvement témoin de l'air extérieur doit être pris simultanément étant donné qu'en fonction des variations saisonnières, des concentrations plus ou moins élevées peuvent se présenter à l'extérieur.

Les prélèvements concernent les spores de moisissures et sont faits de façon active moyennant une pompe spécifique (impacteur) sur deux milieux de culture (boîtes Petrie) distincts (de préférence malte et DG 18). Les prélèvements d'air se font à hauteur du nez ; sur une table en salon ou dans un bureau, sur une table de nuit ou une chaise dans une chambre à coucher, ou une chambre à jouer (lieu exact à décrire dans le rapport).

Les locaux concernés ne doivent pas être aérés (aération ou ventilation manuelle) au moins 12 heures avant les prélèvements proprement dits, sans pour autant dépasser les 24 heures (de préférence une aération 12 heures avant le prélèvement). En revanche, la ventilation mécanique, pour autant que le bâtiment en dispose, reste en mode opératoire. Les portes des locaux restent fermées (sauf ouverture sporadique pour entrer ou sortir du local). L'interprétation des résultats se fait par comparaison des spores de moisissures (spores totales) avec l'extérieur d'une part et la comparaison de chaque espèce ou genre de moisissures avec l'extérieur d'autre part selon les guides du « Umweltbundesamt » (UBA, 2017) ou du « Landesgesundheitsamt Baden-Wurtemberg » allemands (LGA Baden-Wurtemberg, 2004). Les résultats du laboratoire sont à annexer au rapport.

VII.3.5. Mesurages de ponts thermiques (hiver)

Les mesurages de ponts thermiques sont à réaliser en hiver à températures externes froides (au moins inférieures à $+5^\circ\text{C}$) et obligatoirement en situation de chauffage normal d'au moins 20°C à l'intérieur (soit une différence de température intérieur/extérieur d'au moins 15°C) de préférence le matin (simulation d'une utilisation normale du bâtiment). La température externe, de même que la température et l'humidité relative de l'air à l'intérieur du local concerné sont à noter, de même que l'heure approximative des mesurages (à 30 minutes près).

Les mesurages se font soit par thermomètre infrarouge, soit par thermographie (photographie thermique) à l'intérieur du bâtiment et portent sur les points sensibles (coins murs extérieurs, saillies balcons, etc.) et les photos doivent être jointes au rapport.

VII.3.6. Monitoring de l'humidité relative de l'air (% RH)

Endroits à analyser : chambres à coucher, salon.

L'humidité relative de l'air est monitorée par des appareils électroniques permettant d'enregistrer les concentrations mesurées à intervalles réguliers sur une période d'au moins 3 jours (fréquence de mesure au moins toutes les 5 minutes). Le nombre de personnes séjournant dans la chambre à coucher pendant la nuit est à noter. Les fenêtres restent fermées (éviter la ventilation manuelle), la ventilation mécanique est à maintenir en fonctionnement normal. Les résultats sont à exprimer en % et reflètent les taux moyens, les valeurs minimales et maximales.

Les courbes de variation sont à joindre au rapport. Comme l'humidité relative de l'air varie en fonction de la température intérieure, celle-ci est à monitorer en parallèle et simultanément.

VII.3.7. Mesurages de champs électromagnétiques (CEM-BF & CEM-HF)

Les champs électromagnétiques se subdivisent en trois paramètres à mesurer de façon individuelle et indépendante : les champs électriques et magnétiques de basses fréquences et les champs électromagnétiques de hautes fréquences :

Champs électriques de basse fréquence (Volt/mètres)

Endroits à analyser : lits.

Les mesurages se font en principe de manière indépendante du potentiel de la terre (« erdpotentialfrei »). Alternativement des mesurages contre le potentiel de la terre peuvent être acceptés moyennant l'apport de preuve adéquate du potentiel de la terre utilisée. Les mesurages systématiques concernent les chambres à coucher (effets sur la santé impliquant la synthèse nocturne de mélatonine) et plus particulièrement les lits (séjour prolongé). Les mesurages se font au moins aux quatre coins extérieurs du lit. Dans le cas de moteurs électriques, de matelas à eau ou de câbles électriques passant sous le lit ou à proximité des lits, des mesurages supplémentaires sont à effectuer. En cas de dépassement des seuils correspondant aux valeurs guides, les sources émettrices sont à rechercher et à localiser au moyen de mesurages complémentaires.

Les valeurs d'orientation applicables basent sur celles du standard allemand de biologie de l'habitat SBM en vigueur (version actuelle « Standard baubiologischer Messtechnik, SBM-2015 »).

Champs magnétiques de basse fréquence (nanotesla)

Endroits à analyser : lits.

Les mesurages se font en principe par des sondes tridimensionnelles. Les mesurages systématiques concernent les chambres à coucher (effets sur la santé impliquant la synthèse nocturne de mélatonine) et plus particulièrement les lits (séjour prolongé). Les mesurages se font aux quatre extrémités du lit. Dans le cas de moteurs électriques, de matelas à eau ou de câbles électriques passant sous le lit ou à proximité des lits, des mesurages supplémentaires sont à effectuer.

En cas de dépassement des seuils correspondant aux valeurs guides, les sources émettrices sont à rechercher et à localiser au moyen de mesurages complémentaires.

En cas de variations des seuils mesurés (valeurs non stables), ou en cas de sources émettrices externes (transformateurs lignes à haute tension, conduites sous-terraines, etc.) un mesurage prolongé sur un laps de temps de 7 jours au moins est à effectuer pour un point de mesurage dans une des chambres à coucher (normalement la chambre se trouvant le plus proche de la source émettrice) avec enregistrement des données (fréquence de mesurage toutes les dix minutes ou plus court).

Les valeurs d'orientation applicables se basent sur celles du standard allemand de biologie de l'habitat SBM en vigueur (version actuelle « Standard baubiologischer Messtechnik, SBM-2015 »).

Champ électromagnétique de hautes fréquences

Les mesurages se font en principe par des appareils permettant de capter les champs électromagnétiques à pulsation (temps de réponse suffisamment courts). Sont admis pour mesurer les appareils à spectre large (« Breitbandmessgerät ») ou encore les « spectrumanalyser » permettant de se positionner sur une bande de fréquences bien spécifique. Comme les ondes émises sont polarisées, les mesures sont faites en pivotant l'antenne de l'appareil de mesure autour de son axe (« Schwenkmodus »).

Les mesurages systématiques concernant les locaux à séjour prolongé, en l'occurrence les chambres à coucher, le salon, les bureaux, etc. Les mesurages se font en mode « max hold » c'est-à-dire que la valeur maximale mesurée pendant le temps de mesurage (quelques minutes) est retenue. En cas de fluctuations des valeurs, les mesurages sont à répéter avec un écart de temps minimal de 10 minutes.

L'appareil de mesure doit couvrir les fréquences de 1 MHz jusqu'à 10 GHz et notamment les bandes de fréquences suivantes.

T 10 : Tableau des fréquences

NOM	FRÉQUENCE (MHz)	FRÉQUENCE (GHz)	TECHNO.	UTILISATION
Réseaux analogues CT			1G	Téléphonie mobile
Tetra	400	0.4		Téléphonie mobile secours
5 G	760	0.7	5G	Divers
GSM	900	0.9	2G	Téléphonie mobile
DCS	1800	1.8	2G	Téléphonie mobile
UMTS	2100	2.1	3G	Téléphonie mobile
LTE & LTE-Advanced	800 & 1800 & 2600	0,8 & 1,8 & 2,6	4G	Téléphonie mobile
DECT	1900	1.9		Téléphone sans fil domestique
5 G	3600	3.6	5G	Divers
Wifi/Wlan	2400 & 5000 & 5800	2,4 & 5 & 5,8		
Radar		1-2,8 & 3-35		
Bluetooth	2400 & 3500	2,4 & 3,5		
WiMax	2400	2.4		
Babyphones		1,9 & 2,4		
DVB-T	700	0.7		Télévision digitale
DAB+	1500	1.5		Radio digitale
DMB	1500	1.5		Radio digitale

Les résultats des mesurages sont à afficher en Volt/mètre (V/m) ou en milliVolt/mètre (mV/m) avec affichage de la date et de l'heure des mesurages (alternativement en $\mu\text{W}/\text{m}^2$).

Les valeurs d'orientation applicables se basent sur les recommandations Bionitiative (2012) et luxembourgeoises de 3 V/m ainsi qu'accessoirement sur le standard allemand de biologie de l'habitat SBM en vigueur (version actuelle « Standard baubiologischer Messtechnik, SBM-2015 »).

VII.3.8. Mesurages de la vitesse (m/s) et des débits d'air (m^3/h) de la ventilation mécanique

La ventilation mécanique doit assurer un certain échange d'air (minimum hygiénique) sans pour autant donner lieu à des courants d'air. La vitesse de l'air, donc la vitesse et les débits d'air ou volumes d'air sont donc à vérifier au moyen des appareils de mesure adéquats, de préférence dans tous les locaux mais au moins dans le salon et les chambres à coucher. La ventilation mécanique doit être en mode normal (position 2 sur les 3 positions possibles). Les débits sont à comparer aux débits d'air calculés ou théoriques.

VII.3.9. Contrôle de l'encrassement des composants de la ventilation mécanique

L'encrassement de la ventilation mécanique concerne en premier lieu les composants suivantes :

- L'apport d'air frais (gaine principale)
- Les filtres
- L'échangeur thermique
- Les gaines (pulsion et extraction)
- Les bouches d'aération - pulsion et extraction

Outre une inspection visuelle par endoscope, des mesurages des poussières dans les gaines et des pré-analyses biologiques (moisissures, bactéries) sont à prévoir pour l'ensemble des composants : le mesurage de poussières se fait au moyen d'un Dtest développé par la JADCA (« Japanese Air Duct Cleaners Association ») et conforme à la DIN EN 15780 en affichage direct. Les résultats sont exprimés en g/m^2 . Les préanalyses biologiques se font au moyen de la détermination quantitative de l'ATP, de l'ADP et de l'AMP intra- et extracellulaire par luminescence (test enzymatique utilisé en HACCP) en affichage direct. Les résultats sont exprimés en RLU (« relative light units »).

VII.3.10. Contrôle du carnet d'entretien et du contrat d'entretien de la ventilation mécanique

Comme l'inspection du travail et des mines ITM (Ministère du Travail) (ITM, 2011, 1996 et 1991) préconise un carnet d'entretien obligatoire concernant les ventilations mécaniques contrôlées pour les bâtiments fonctionnels, en l'occurrence les lieux de travail, un tel carnet d'entretien correspond également aux règles de l'art en matière de bâtiments résidentiels.

Le carnet d'entretien doit mentionner les données et informations suivantes :

- Date et résultats des essais d'acceptation avant la mise en service de l'installation
- Date et résultats des contrôles de débits d'air et de vitesse effectués lors de la mise en service
- Dates et rapports des derniers travaux d'entretien effectués
- Date du prochain entretien prévu

D'autre part, un contrat d'entretien sur au moins 2 ans (mieux 5 ans) est à présenter mentionnant la surveillance et l'entretien régulier des éléments suivants de l'installation :

- Contrôle visuel et inspection de l'ensemble des composantes et notamment de l'échangeur thermique, des filtres, des gaines de pulsion d'air frais et d'extraction de l'air vicié
- Désinfection de l'échangeur thermique (y compris le désinfectant à utiliser qui doit être de qualité alimentaire)
- Remplacement des filtres

VII.3.11. La certification BREATHE (Building Related Environment Air + Health)

L'ensemble des analyses et mesurages réalisés (points 1-7) donnent lieu à une certification de la qualité de l'air et de l'environnement intérieur en matière de santé.

F 19 : Logo de la certification BREATHE



L'accréditation prévoit 4 catégories selon la présence ou l'absence de polluants chimiques, physiques ou biologiques :

- **BREATHE bronze**
- **BREATHE argent**
- **BREATHE or**
- **BREATHE platine**

T 11 : Récapitulatif des paramètres pris en compte et mesurés ou analysés

PARAMÈTRES	POLLUANTS GROUPE	MÉDIUM	MÉTHODE	LOCAUX
Chimiques	COV	Air	Analyse laboratoire	Salon, chambre(s)
	Aldéhydes	Air	Analyse laboratoire	Salon, chambre(s)
	SCOV	Poussières	Analyse laboratoire	Salon, chambre(s)
	Métaux lourds	Poussières	Analyse laboratoire	Salon, chambre(s)
	CO ₂	Air	Monitoring	Salon, chambre(s)
	CO*	Air	Mesure	Locaux à combustion, stockage pellets
	Radon	Air	Monitoring	Rez-de-chaussée, cave
Biologiques	Spores de moisissures	Air/surface		Salon, chambre(s), autres

PARAMÈTRES	POLLUANTS GROUPE	MÉDIUM	MÉTHODE	LOCAUX
Physiques	Champ électrique BF		Mesure	Chambre(s) à coucher
	Champ magnétique BF		Mesure	Chambre(s) à coucher
	Champ électromagnétique HF		Mesure	Salon, chambre(s)
	Humidité relative	Air	Monitoring	Salon, chambre(s)
	Ions positifs et négatifs	Air	Monitoring	Salon ou chambre
VMC	Vélocité	Bouches de ventilation	Mesure	Salon, chambre(s)
	Débits d'air	Bouches de ventilation	Mesure	Salon, chambre(s)
	Encrassement poussières	Bouches de ventilation, conduites, filtres, échangeurs thermiques, autres	Mesure	Salon, chambre(s)
	Encrassement moisissures	Bouches de ventilation, conduites, filtres, échangeurs thermiques, autres	Mesure	Salon, chambre(s)
	Contrat d'entretien		Contrôle document	
	Carnet		Contrôle document	

Les critères se basent sur l'ensemble des mesurages et analyses chimiques, biologiques et physiques réalisés et évalués selon les clés suivantes :

T 12 : Facteurs chimiques par famille de polluants

GROUPE DE SUBSTANCES	UNITÉ	BREATHE PLATINE	BREATHE OR	BREATHE ARGENT	BREATHE BRONZE
Aromates	µg/m3	<40	<80	<160	<320
Aliphatés	µg/m3	<70	<150	<300	<600
Alcools	µg/m3	<90	<180	<360	<700
Ethers de glycol	µg/m3	<25	<50	<100	<200
Hydrocarbures halogénés	µg/m3	<2	<3	<6	<12
Esters	µg/m3	<25	<50	<100	<200
Aldéhydes	µg/m3	<45	<90	<180	<360
Siloxanes	µg/m3	<10	<25	<50	<100
Terpènes	µg/m3	<40	<75	<150	<300
Cétones	µg/m3	<55	<110	<220	<440
COV totaux	µg/m3	<300	<500	<1000	<2000
Biocides	mg/kg	<1	<3	<5	<10

GROUPE DE SUBSTANCES	UNITÉ	BREATHE PLATINE	BREATHE OR	BREATHE ARGENT	BREATHE BRONZE
Pyréthrinoïdes	mg/kg	<1	<3	<5	<10
Retardateurs de flamme organophosphorés chlorés	mg/kg	<1	<5	<10	<20
Retardateurs de flamme organophosphorés non-chlorés	mg/kg	<10	<50	<100	<200
Retardateurs de flamme polybromés	mg/kg	<1	<5	<10	<20
HAP	mg/kg	<1	<3	<5	<10
PCB	mg/kg	<1	<3	<5	<10
Phtalates	mg/kg	<100	<500	<1000	<2000

T 13 : Facteurs chimiques

	UNITÉ	BB PLATINE	BB OR	BB ARGENT	BB BRONZE
Substances chimiques CLASSE 4	µg/m³; mg/kg; g/mg	< ld	< 1 mg/kg ou 10 µg/m³	< VO 1	< VO 2
Substances chimiques CLASSE 3	µg/m³; mg/kg; g/mg	< 1mg/kg, 10 µg/m³ ou ld	< VO 1	< VO 2	> VO 2
Substances chimiques CLASSE 2	µg/m³; mg/kg; g/mg	< VO 1	< VO 2	> VO 2	> VO 2
Substances chimiques CLASSE 1	µg/m³; mg/kg; g/mg	< VO 2	< VO2	> VO 2	> VO 2
CO	ppm	< 3	< 8	< 24	< 80
CO ₂	ppm	< ext + 200	< ext + 600	< ext + 1100	< ext + 1600

Pour chaque paramètre les concentrations ou valeurs sont comparées aux valeurs d'orientation VO 1 reprises dans le fichier dans la Partie D - liste BREATHE. La VO 2 correspond au double de la valeur d'orientation VO 1 (VO 2 = 2 x VO 1), « ld » correspond à la limite de détection. Si le seuil VO 1 ou VO 2 est inférieur à 1 mg/kg (poussières) ou 10 µg/m³ (air), le critère est à remplacer par le critère « < 1 mg/kg ou 10 µg/m³ ».

T 14 : Facteurs biologiques

	UNITÉ	BB PLATINE	BB OR	BB ARGENT	BB BRONZE
Spores de moisissures *	Inspection visuelle	Absence de contamination intérieure	Absence de contamination intérieure	Absence de contamination intérieure	Contamination intérieure peu probable
Rapport interne/externe	CFU/m³	< 1,2	< 1,5	< 1,5	< 2

	UNITÉ	BB PLATINE	BB OR	BB ARGENT	BB BRONZE
Humidité relative	%	40-60	40-60	>30/<70	>20/<80

*selon définition LGA et UBA allemands

T 15 : Facteurs physiques

	UNITÉ	BB PLATINE	BB OR	BB ARGENT	BB BRONZE
Rn	Bq/m ³	< 60	<100	< 200	< 300
CEM-BF* électrique (50 Hz)	V/m	< 1	< 5	< 10	< 50
CEM-BF* magnétique 50 Hz	nT ou µT	< 20	< 100	< 200	<500
HF	V/m	< 0,2	< 0,6	< 1,0	< 3
Ions	ions/cm ³	>1000	>500	200-500	100-200
Rapport ions négatifs/positifs		> 1	> 1	> 0,8	> 0,5

Les facteurs marqués en vert sont à mesurer sans pour autant que ceux-ci interviennent dans la certification de façon pénalisante.

*CEM – BF = champ électromagnétique basses fréquences

T 16 : VMC

	UNITÉ	BB PLATINE	BB OR	BB ARGENT	BB BRONZE
Débits d'air	m ³ /h*pers	> 30	> 25	> 23	> 20
Vélocité	m/sec	< 2,0	< 2,5	< 3,0	> 3,5
Poussières	g/m ²	4	4	5	8
Microorganismes	RLU	< 3000	< 5000	< 10 000	< 20 000
Carnet		Oui	Oui	Oui	Non
Contrat entretien	Durée (ans)	5 ans	3 ans	2 ans	1 an

Dans le cas où les résultats de certains paramètres sont défavorables au point à ne pas satisfaire aux critères susmentionnés (dépassant les valeurs de référence ou d'orientation), il est loisible aux occupants (constructeurs, maître d'ouvrage, ...) de refaire ces mesures après assainissement sans pour autant devoir réévaluer l'ensemble des paramètres et de compléter le dossier par les nouvelles valeurs tout en décrivant de façon détaillée les assainissements relatifs qui ont permis ces adaptations de résultats. Cette certification BREATHE pourra par ailleurs constituer un élément de preuve dans le cadre de la loi et du règlement grand-ducaux sur l'hygiène des bâtiments destinés à la location.

Paramètres mesurables sans pour autant qu'ils intègrent la certification BREATHE.

Certains paramètres mesurables à l'aide d'instruments de mesure physiques peuvent être mesurés et comparés aux recommandations respectives sans pour autant être intégrés dans la certification BREATHE pour différentes raisons :

- Soit, ils ne correspondent pas à la construction même et sont donc facilement échangeables par la suite (comme par exemples les lampes et donc la lumière artificielle)
- Soit parce qu'à l'heure actuelle on ne dispose pas suffisamment de recours en matière des effets de santé ou des seuils correspondants (ions, bruit, lumière artificielle)

- Soit parce que les paramètres reflètent d'une certaine subjectivité en dehors des paramètres mesurables (bruit)

Lumière artificielle

La lumière artificielle se distingue de la lumière naturelle par plusieurs paramètres mesurables techniquement :

- Le spectre des longueurs d'ondes
- L'intensité (« illuminance »)
- La température (« CCT » ou « Correlated Color Temperature »)
- L'indice de rendement des couleurs (« CRI » ou « Color Rendering Index »)
- Indice, fréquence et pourcentage de scintillement (« flicker index, frequency and pourcentage »)
- Ultrasons
- Taux de lumière UV

Les normes internationales varient fortement et sont plus ou moins restrictives. Elles concernent essentiellement les lieux de travail à l'image de la norme européenne EU 12464-1²⁷ ou de la norme américaine « ANSI/NEMA standard²⁸ ». Ainsi la norme européenne inclut l'intensité de lumière, la température et le taux de scintillement pour les différents types de lieux de travail y compris les salles de classe. En revanche, les logements ne sont pas repris.

Spectre

Le **spectre** de la lumière naturelle se compose de l'ensemble des longueurs d'ondes correspondant aux couleurs de l'arc-en-ciel avec des pourcentages pour chaque longueur d'ondes variables au cours de la journée (la fraction rouge est plus élevée le matin et le soir, la fraction bleue plus élevée vers midi). Le spectre de la lumière naturelle peut être décrit comme un spectre continu. Les lumières artificielles en revanche peuvent présenter des spectres très divergents selon le type de source de lumière. Ainsi les ampoules classiques et les lampes halogènes sont relativement proches de la lumière naturelle (spectres continus) alors que les lampes à économie se composent de quelques longueurs d'ondes isolées seulement, formant un spectre discontinu. Comme les spectres discontinus diffèrent largement de la lumière naturelle (soleil), les lampes à spectre discontinu comme les tubes fluorescents sont à éviter dans la mesure du possible et lampes à spectres continus comme les LED et les OLED²⁹ sont à préférer.

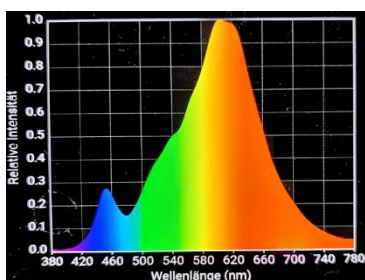
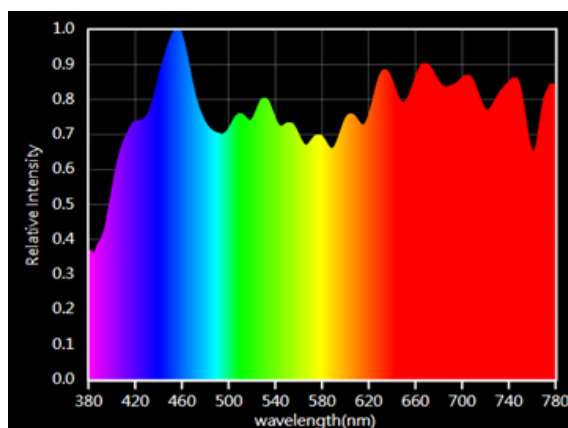
²⁷ DIN EN 12464-1 Light and lighting – lighting of work places – Part 1: Indoor work places; English version EN 12464-1:2021

²⁸ ANSI C78.377-2024: American National Standard for electric Lamps – specifications for the Chromaticity of solid-State Lighting Products, 2024

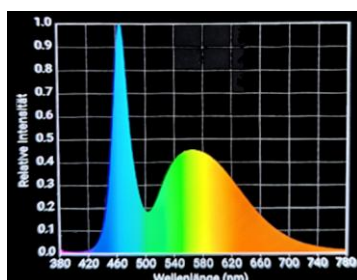
²⁹ Organic Light Emitting diode

F 20 : Spectre lumineux

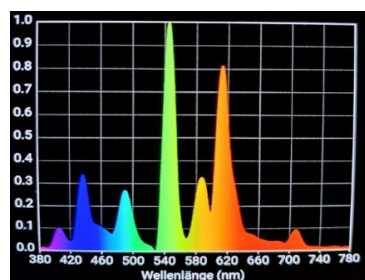
Spectre continu de la lumière naturelle - soleil



Spectre d'une lampe OLED



Spectre d'une lampe LED



Spectre d'une lampe à tube fluorescent

Intensité

L'**intensité** (en lux ou lx) correspond à l'éclairement d'une surface qui reçoit d'une manière uniformément répartie un flux lumineux d'un lumen par mètre carré. Une intensité trop basse favorise une mauvaise vue et en conséquence une fatigue des yeux alors qu'une intensité trop élevée provoque des éblouissements au niveau des yeux. À l'intensité s'ajoute le contraste entre différents points qui favorisent par des écarts trop importants des éblouissements ou au contraire un instant d'aveuglement du fait que les pupilles nécessitent un moment pour s'adapter. Les seuils ou recommandations en intensité varient en fonction de l'utilisation des locaux de sorte qu'une recommandation générale n'est guère possible. Ainsi, la recommandation DIN EN 12464-1 préconise pour les bureaux 300-500 Lux, pour les écoles au moins 300 Lux, les hôpitaux au moins 500 Lux, les salons de logements 100 à 300 Lux en fonction des activités.

T 17 : Exemples d'intensités et de températures typiques de certaines situations

	INTENSITÉ	TEMPÉRATURE
Chevet de nuit	10 lx	2.200 K
Logement	50 lx	2.600 K
Lampe de bureau	200 lx	2.800 K
Bureau	300 lx	4.000 K
Bureau bien éclairé	400 lx	6.000 K
Extérieur nuageux (été)	6.000-25.000 lx	6.500 K
Extérieur ensoleillé (été)	60.000-100.000 lx	5.500 K

Température de couleur (« CCT » ou « Correlated Color Temperature »)

La **température** de la lumière indique si la lumière est plutôt claire et bleuâtre stimulante (5000-6500 Kelvin), parfois caractérisé comme une lumière « froide » ou « dure » ou plutôt jaune à orange (2700-3000 K) correspondant à une lumière « chaude » ou « ambiante » en passant par une lumière blanche (3500-4000 K).

T 18 : Température de couleur

	TEMPÉRATURE	LUMIERE NATURELLE	LUMIERE ARTIFICIELLE
Couleur froide	10.000 K	Ciel bleu	
	9.000 K		
	8.000 K		
	7.000 K		Tube fluorescent
Lumière de jour, midi	6.000 K	Ciel ennuagé	LED blanc froid
	5.000 K		Flash électronique
	4.000 K		LED blanc chaud
Couleur chaude	3.000 K	Crépuscule	Lampe halogène
	2.000 K	Lueur de bougie	
	1.000 K		

Indice de rendu des couleurs IRC (« CRI » en anglais)

L'IRC rend compte de la capacité d'une source de lumière artificielle à restituer les nuances de couleur d'une surface ou d'un objet. L'indice est exprimé en valeur de 0 à 100, 100 correspondants à la lumière de jour. Des valeurs supérieures à 95 sont donc à préférer.

« Flicker »

Le « **flicker index** » ou scintillement est un phénomène lié à la variation de l'intensité de la lumière pour une fréquence donnée. Ce scintillement peut soit être visible pour l'œil (< 100 Hertz) ou au contraire être invisible (fréquences > 100 Hz). Même si cette fréquence est trop élevée pour être perçue à l'œil nu, elle peut néanmoins induire des effets de santé tels que maux de tête, fatigues ou autres problèmes de santé. Les causes de scintillement sont nombreuses et passent du type de production de lumière (lampes fluorescentes, LED, ...) jusqu'aux gradateurs de lumière en passant par les transformateurs ou les commandes électroniques des lampes. Un indice « flicker » de 1 signifie que 50% des personnes perçoivent le scintillement. Par conséquent tout scintillement est à éviter voire à minimiser dans la mesure du possible.

Le standard japonais³⁰ préconise un pourcentage de scintillement maximal de 5%. Le standard allemand de biologie de l'habitat (SBM-2024) recommande des pourcentages maximaux de 1 à 2 % notamment dans les fréquences basses (< 3000 Hz).

Bruit audible (son)

En ce qui concerne le bruit audible, seule l'intensité de bruit est mesurable de manière objective à l'aide d'un sonomètre (en décibels) de même que les fréquences. D'autre part l'origine du bruit (la source) joue

³⁰ DENAN law, norm JIS C8105-1 :2010 + amendment 1 (2013)

également un rôle. Ainsi la musique bien que forte en intensité (donc en dB(A)³¹) peut être perçue comme agréable alors qu'un robinet qui goutte régulièrement peut être perçu comme gênant, même si le sonomètre ne montre que des faibles augmentations en intensité. C'est la subjectivité du bruit qui n'est cependant pas mesurable physiquement.

Il n'existe cependant pas de seuils légaux notamment pour des bruits en provenance de sources intérieures. À titre d'exemple, le tableau suivant informe sur des intensités typiques relatives à certaines sources de bruit.

T 19 : Exemples d'intensités typiques de certaines sources de bruit

SOURCE	dB(A)
PC, mouche	10
Respiration	20
Robinet qui goutte	20
Chuchotement	30
Nuit environs calme	30
Réfrigérateur	40
Pluie	40-50
Conversation	50-60
Musique radio	50-60
Bruit bureau	70
Tondeuse à gazon	70
Trafic routier	80-90
Tracteur-moteur	90
Train	100
Concert "rock" ou "disco"	110
Scie	110
Marteau piqueur	120
Avion jet (à 7 m)	130
Arme à feu	160

À noter que l'échelle des décibels est une échelle logarithmique et qu'une augmentation de 3 dB correspond à un dédoublement de l'intensité, 10 dB à un facteur 10 et 20 dB à un facteur 100. En matière de santé le seuil de 80 dB(A) correspond au seuil à partir duquel des dommages irréversibles sur l'ouïe peuvent apparaître. En matière de prévention, des intensités de 45 à 49 dB(A) sont à respecter pour les logements.

Au Luxembourg, les valeurs limites³² suivantes concernent les bruits externes dans les espaces environnant les habitations.

T 20 : Valeurs limites des bruits extérieurs

TYPE DE ZONE	JOURNÉE (7-22 h)	NUIT (22-7 h)
Hôpitaux, zones de récréation	45 dB(A)	35 dB(A)
Zones rurales calmes	50 dB(A)	35 dB(A)
Zones urbaines, trafic réduit	55 dB(A)	40 dB(A)

³¹ Il existe également des échelles en dB(C), dB(G) et dB(Z), les lettres indiquant des facteurs de correction appliqués en fonction des fréquences. L'échelle en dB(A) correspond au mieux à l'ouïe humaine et donc au risque de développer des troubles auditifs.

³² Règlement grand-ducal du 13 février 1979 concernant le niveau de bruit dans les alentours

TYPE DE ZONE	JOURNÉE (7-22 h)	NUIT (22-7 h)
Tones urbaines, trafic moyen	60 dB(A)	45 dB(A)

En biologie de l'habitat allemand (SBM-2024), les valeurs inférieures à 25 dB(A) sont considérées comme non problématiques, les taux de 25-35 dB(A) comme anomalie faible, 35-45 dB(A) comme anomalie forte et des valeurs supérieures à 45 dB(A) comme anomalie extrême.

Infrasons et ultrasons

Les infrasons et les ultrasons se mesurent par des analyseurs audio et acoustiques qui joignent les fonction sonomètre, analyseur de spectre et vibromètre idéalement.

VII.4. Agrément H₂E (Healthy Home Experts)

Afin de garantir la qualité adéquate d'une part mais également d'assurer la comparabilité des résultats indispensable à l'acquisition de données et de conclusions, il est indispensable d'assurer une méthodologie commune. Ainsi l'association des biologistes de l'habitat allemands (VDB) a édité un guide allemand (« Richtlinien ») dès 2018.

Au Luxembourg, la qualité et la comparabilité sont assurées par une méthodologie sous forme d'un agrément H₂E assuré par l'Etat et organisée avec Neobuild GIE.

Cette méthodologie porte notamment sur les paramètres suivants :

- Conditions de prélèvement
- Modes opératoires
- Réalisation des prélèvements ou de mesurages
- Collaborations avec des laboratoires analytiques accrédités
- Compatibilité des appareils d'échantillonnage ou de mesurage
- Interprétations des résultats
- Présentation des rapports
- Liste des appareils
- Procédures regroupant l'ensemble des points énumérés ci-dessus
- Formation initiale des certificateurs
- Examen et certificat H₂E
- Formations continues (Neobuild organise avec le MECO au moins deux formations continues par année) ; d'autres formations à l'étranger sont acceptées moyennant validation par le MECO
- Participation à des « Ringversuche »
- Processus collaboratif d'amélioration continue
- Retour d'expérience générique pour les besoins de la collectivité

De même, la profession de biologiste de l'habitat (« Baubiologe ») n'est pas reconnue ou protégée officiellement au Luxembourg (en 2020), de sorte que chacun peut utiliser la dénomination sans pour autant prouver la présence d'une formation adéquate. En Allemagne, les formations par des instituts spécialisés (IBR et IBN - instituts de biologie de l'habitat de Rosenheim et de Neubeuern) sont reconnus par l'Etat (« staatlich anerkannter Fernlehrgang mit Nahunterricht und Abschlussprüfung »). En France, la formation est assurée par un diplôme interuniversitaire (DIU) de 5 universités (Paris, Strasbourg, Brest, Montpellier et Toulouse) et se solde par un diplôme de CMEI ou « conseiller médical de l'environnement intérieur » (De Blay, 2003). En

Espagne, la formation par l'institut de biologie de l'habitat espagnol IEB se solde par un diplôme de « master » de l'université de Lleida en Catalogne.

Il est donc indispensable d'assurer la qualité professionnelle et scientifique des futurs « conseillers en biologie de l'habitat » luxembourgeois via une formation de base, des formations continues, des participations à des congrès scientifiques nationaux et internationaux et des échanges réguliers. Cette formation est assurée et certifiée par l'agrément H₂E.

La formation et donc l'agrément H₂E sont ouverts aux professions académiques de base suivantes :

- Architectes, ingénieurs
- Conseillers en énergie
- Professions de santé
- Professions scientifiques (biologistes, chimistes, ingénieurs, ...)
- Professions de métrologie

Le MECO se réserve le droit de procéder à des dérogations.

L'agrément à la suite de la formation initiale est valide pour une durée de trois ans. Elle est renouvelée pour deux ans soit sur certificat de participation à des formations continues (au moins 2 sur une durée de deux ans) ou sur présentation de au moins 6 rapports personnels réalisés au cours de la dernière année et validés par le MECO. D'autres formations nationales ou internationales peuvent être pris en compte comme formations continues moyennant une validation/dérogation par le MECO.

L'agrément est nominal donc par personne ayant suivi la formation et ne peut être transféré endéans d'une entreprise vers une personne tierce.

L'agrément est sous la tutelle du MECO et délivré par le ministre ayant l'énergie dans ses compétences.

F 21 : Logo de l'accréditation H₂E



L'agrément H₂E permet notamment :

- Protection de la profession de « biologiste de l'habitat »
- Plateforme d'échange entre certificateurs accrédités/membres
- Assurance de qualité de l'expertise par les membres
- Assurance qualité de la formation
- Trancher en cas de litige
- Plateforme d'échange entre membres

Workshops pour membres

- Plateforme d'information (formations à l'étranger, congrès internationaux, appareils de mesure nouveaux, ...)

Les missions des experts accrédités H₂E ne se limitent pas à l'application des instruments CLAIRE et BREATHE décrits en amont mais engendrent également l'expertise « santé » et « qualité de l'environnement et de l'air intérieur » dans les cas suivants :

VII.4.1. Inventaire « santé » accompagnant l'achat ou la location d'un immeuble

Alors que la construction neuve se base essentiellement sur les conseils concernant la planification et la mise en œuvre de matériaux de construction sains, voire la mise en œuvre d'une VMC selon les règles de l'art en matière de santé (voir chapitre suivant), la rénovation et la décision d'achat ou de location peuvent être précédées d'un inventaire « santé » visant à identifier l'ensemble des facteurs capables de porter préjudice à la santé des futures occupants et de proposer des conseils d'assainissement ou de remède visant à éliminer ces facteurs de sorte à éviter tout risque pour la santé.

Un tel inventaire porte notamment sur les facteurs polluants suivants (liste non exhaustive) :

- Amiante³³ (surtout dans les bâtiments construits avant 1999 voire 2005³⁴)
- Tuyauteries d'eau contenant du plomb
- Peintures au plomb³⁵ (blanc de plomb) surtout dans les bâtiments construits avant les années 80-90) sur les murs, les radiateurs, les conduites métalliques et autres : ce type de peinture utilisé surtout avant 1949 n'a été interdite de toute commercialisation qu'en 2008 (France)
- Humidité (moisissures) notamment en relation avec une humidité ascensionnelle (vieux bâtiments, cf. cache-misères), de fuites de tuyaux (eau, chauffage, installations sanitaires comme les mitigeurs, les robinets, les évacuations, etc.) ou d'infiltrations d'eau de pluie
- Biocides (insecticides, fongicides) dans les bois (portants ou non) comme les poutres, les charpentes, etc.
- Présence de sources de champs électromagnétiques de basses et de hautes fréquences
- Mesure du monoxyde de carbone (CO)

À la suite de cet inventaire seulement, des conseils adéquates en matière de rénovation ou d'assainissement peuvent logiquement être faits (cf. chapitre suivant).

VII.4.2. Inventaire « polluants » à la suite d'un incendie

Un inventaire particulier est à prévoir pour des bâtiments ayant fait l'objet d'un **incendie** et dont le feu a été éteint au moyen d'eau ou de mousse extinctrice. Alors que les mousses sont susceptibles de contenir des PFAS, donc des polluants perfluoroalkylés réputés comme « polluants éternels » en raison de leur persistance, l'eau présente un double risque.

³³ En France un « état d'amiante » ou « diagnostic d'amiante » doit être réalisé en cas de vente d'un logement dont le permis de construire a été délivré avant le 1^{er} juillet 1997 (date d'interdiction de l'utilisation de l'amiante en France) à remettre à l'acheteur sous forme de dossier de diagnostic technique DDT) De même en cas de location le propriétaire doit tenir à disposition du locataire un dossier technique d'amiante DTA s'il s'agit d'un immeuble collectif construit avant 1997.

³⁴ La directive européenne 1999/77/CEE de 1999 interdit l'amiante dans tous les États Membres à partir de 2005.

³⁵ En France un « constat de risque d'exposition au plomb » ou CREP est obligatoire au frais du bailleur pour toute construction datant d'avant 1949 en cas de vente ou de location.

Premièrement l'humidité persistante des matériaux de construction organiques favorise le développement de moisissures.

Deuxièmement l'eau, en pénétrant à l'intérieur des matériaux peut, le cas échéant transporter des molécules corrosives.

Ceci est notamment le cas pour le chlore (issu de la brulure de matériaux chlorés avec comme exemple le PVC) qui peut faire corroder l'armature du béton armé et déstabiliser la statique du bâtiment. D'autre part, les molécules chlorées risquent lors d'un feu de générer des dioxines et des furanes polychlorés (dibenzo-p-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzofuranes (PCDF)) en fonction de la température du feu. Ainsi la brulure de molécules chlorées à des températures de 200 à 450°C favorisent la synthèse de dioxines alors qu'à des températures supérieures à 850°C, les dioxines sont détruites. Cependant le refroidissement progressif des températures lors de l'extinction d'un feu passe inévitablement par la tranche favorable à la synthèse desdites dioxines et furanes.

En conclusion, l'inventaire « santé » après un incendie passe par les polluants suivants :

- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont générés lors de toute combustion incomplète (c-à-d. en situation de manque d'oxygène) et qui sont cancérigènes (analyses de poussière et/ou de frottis)
- Résidus chlorés (frottis)
- Dioxines et furanes (analyse de l'air par pompe active) ces analyses sont nécessaires si des résidus chlorés ont été constatés dans les frottis
- PFAS (analyses de poussière et/ou frottis) en cas d'extinction par des mousses
- Moisissures en relation avec l'eau mise en œuvre pour éteindre le feu

Les missions d'inventaire décrits sont à réaliser par des experts en la matière tels que par exemple les experts ayant subi une formation spécifique combinée à un agrément (H₂E ou équivalent).

VII.4.3. Conseil en construction saine

Il s'agit d'une mission de conseil accompagnant le projet de construction ou de rénovation de la planification en passant par les soumissions, la phase chantier jusqu'à l'achèvement du bâtiment et éventuellement les analyses et mesures de contrôle pour l'attribution de la certification santé. Cette mission vise par ailleurs à assurer que les conditions et prémisses pour atteindre une certification « santé » dans le cadre BREATHE, LENOZ ou PrimeHouse sera garantie.

Ainsi l'expert conseillera notamment en matière de choix de matériaux « sains » (cf. CLAIRE), de planification et de réalisation de la VMC selon les règles de l'art en matière d'hygiène, de l'électroinstallation « biologique » et pourra le cas échéant s'élargir jusqu'au choix du mobilier ou des produits de nettoyage et entretien.

Cette mission engendre notamment :

- Information et sensibilisation des maîtres d'ouvrage
- Assistance aux architectes et bureau d'études
- Conseils lors de la planification
- Intégration des critères « santé » dans les bordereaux de soumission
- Information et sensibilisation des différents corps de métiers
- Contrôle des matériaux mis en œuvre (p.ex. cohérence CLAIRE) et travaux sur chantier
- Éventuellement échantillonnage et analyses de matériaux (pouvant ensuite intégrer CLAIRE)

- Participation aux réunions de chantier

Cette mission est à réaliser par des experts ayant subi une formation spécifique combinée à un agrément (H₂E ou équivalent).

VII.4.4. Réemploi

Le réemploi, tant le recyclage ou la réutilisation³⁶ d'un matériau de construction héberge le risque de remettre en circulation des polluants dangereux pour la santé des occupants. En effet bonne partie de ces matériaux ont été mis en œuvre initialement il y a des décennies et traitées de maintes fois durant leur existence. À l'époque de nombreux polluants interdits depuis étaient en application comme le pentachlorophénol, le DDT, le plomb, le créosote, les PCB ou encore l'amiante. Comme il s'agit de molécules persistantes, les matériaux traités sont toujours contaminés malgré l'âge et risquent donc d'émaner et de polluer l'air intérieur lors du recyclage ou du réemploi.

Le « Guide pour l'élaboration de l'inventaire des matériaux de construction lors de la déconstruction d'un bâtiment » réalisé par le LIST³⁷ en 2022 pour la « Umweltverwaltung » préconise que « les matériaux polluants et les déchets dangereux doivent être identifiés » et que « les matériaux contaminés doivent être éliminés dans le respect des règles adéquates » sans cependant entrer dans les détails. Le guide stipule que « ...une étude sur les polluants doit être réalisée dans les bâtiments avant leur démantèlement par des experts indépendants... »

Une telle étude ou inventaire « santé » des matériaux destinés au réemploi porte en conséquence sur l'ensemble des polluants persistants connus et notamment :

- Les biocides, insecticides, fongicides et les pyréthriinoïdes dans les bois (poutres, charpentes, portes, cadres fenêtres, ...) les cuirs et les textiles (tapis et moquettes, ...)
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) contenues dans les traitements de bois au créosote (traverses de chemin de fer, poutres, charpentes, ...) ou dans les bitumes et les colles à goudron (anciens parquets, ...)
- Les PCB ou biphenyles polychlorés utilisés dans les joints entre les éléments de béton, comme biocide dans les bois (poutres, charpentes, ...) ainsi que dans les transformateurs, les condensateurs ou encore les lampes fluorescentes
- Le plomb dans les peintures ou encore les tuyauteries des installations sanitaires (eau, chauffage, ...)
- L'amiante (isolations tuyaux de chauffage, plaques isolantes derrière les radiateurs, colles amiantes, revêtements de sol « cushion-floors » des années 60 ainsi que de nombreuses autres applications
- Les retardateurs de flamme polybromés ou organophosphorés dans les bois, les revêtements de sol (vitrifications, ...) les mousses et isolants PU ou PIR, les papier-peints (fibres de verre, ...)
- Les phtalates utilisés dans les plastiques et notamment le PVC
- Le bisphénol contenu dans certains plastiques (polycarbonates, duroplastiques, ...) les résines époxy, certaines colles, peintures et laques (p.ex. des peintures pour métaux)
- Les PFAS dans certaines peintures, colles, moquettes, revêtements de sols élastiques, vitrifications et autres applications antitaches, ignifuges, antiadhésives, imperméabilisantes

³⁶ Loi du 21 mars relative à la gestion des déchets

³⁷https://environnement.public.lu/content/dam/environnement/documents/offall_a_ressourcen/d%C3%A9chets-inertes/guide-de-la-deconstruction-2022/aev-guide-deconstruction-crtib-list-luxembourg.pdf

- Le formaldéhyde dans les bois agglomérés, les parquets laminés, les panneaux à base de bois, les colles
- Les fibres synthétiques minérales³⁸ (isolants en laine de roche ou de verre, ...)

L'inventaire confirmé par des analyses soit de laboratoire soit au moyen d'instruments permettant de détecter les polluants instantanément et sur site (p.ex. XRF, spectrométrie, photométrie) servira de base quant aux décisions comment mettre en œuvre les matériaux respectifs.

En effet, en ce qui concerne le réemploi des matériaux et produits de construction ou du mobilier, il y a lieu de différencier quant à la nouvelle destination du matériau d'une part et la possibilité de modifier le matériau de sorte à empêcher toute émanation de substances nocives contenues dans le matériau.

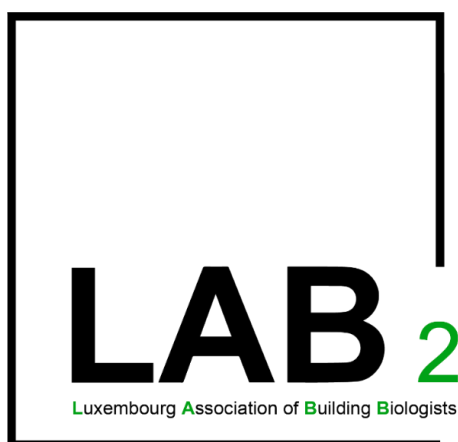
Ainsi, les matériaux ou produits peuvent être réemployés en fonction de leur contamination :

- Sans réserve à l'extérieur (sous condition d'éviter tout effet négatif sur l'environnement extérieur)
- En fonction de la nature et de la concentration de polluants dans des locaux non destinés à un séjour prolongé (local technique ou sanitaire, hall de passage, etc.)
- En fonction de la nature et de la concentration de polluants à l'intérieur mais sans contact direct ou indirect avec l'air ambiant intérieur (séparation)
- Sans réserve à l'intérieur du bâtiment pour autant que les surfaces de contact permettant une émanation de polluants est imperméabilisée
- Sans réserve si les matériaux sont exempts de tout polluant capable d'émaner et de contaminer l'air intérieur

VII.5. Ordre professionnel « Luxembourg Association of Building Biologists - LAB² »

Afin de permettre un échange entre les futurs biologistes de l'habitat et une protection de leur profession, il est indispensable que ceux-ci se fédèrent ou s'associent sous forme d'une association ordre professionnel. Ainsi les experts à l'étranger ont créé leurs propres associations à l'image du « vdb » allemand (« Verein deutscher Baubiologen ») ou de l'association des CMEI en France (Conseillers médicaux en environnement intérieur).

F 22 : Logo LAB²



³⁸MMMFF ou « man made mineral fibers »

Ce regroupement indépendant des certificateurs agréés (Luxembourg Association des Biologistes du Bâtiment – BauBiologen – Building Biologists) dénommé « LAB² » permet les échanges entre certificateurs d’une part et la centralisation des résultats anonymisés d’autre part, une autorité par rapport aux certificateurs et assure une cohésion du groupe, une information et une défense des intérêts :

- Protection de la profession «de « biologiste de l’habitat »
- Défense des intérêts des membres
- Plateforme d’échange entre membres
- Contacts avec MECO et Neobuild

VII.6. Formation information, sensibilisation

Les formations et informations continues visent notamment le secteur de la construction et sont assurées via les institutions établis et d’ores et déjà en place (Neobuild, IFSB, CDC, chambre des métiers, OAI, ...) moyennant des certificats de participation ou des tests d’acquis.

De même une sensibilisation adéquate sera assurée par les mêmes interlocuteurs pour le public ainsi que pour les professionnels de la construction.

VII.7. Recherche, Développement, Innovation (RDI)

Étant donné que le secteur de la construction est évolutif et dynamique d’une part et que les évaluations de matériaux de construction voir de types de construction ne sont soumis à aucune régulation couplée à des études en matière d’effets de santé ou de bien-être, il est indispensable de créer, de favoriser ou de promouvoir des structures de RDI en la matière permettant d’avoir rapidement des éléments de réponse nécessaires à l’évaluation de la thématique et à l’adaptation des outils ou instruments en vigueur décrits dans le présent document.

Ainsi la création d’un « observatoire de la qualité de l’air intérieur » réunissant des acteurs étatiques aussi bien que des acteurs du terrain comme décrit en amont permettrait de focaliser la RDI et optimiser des collaborations avec d’autres instituts de recherche dans le domaine de la construction saine.

VII.8. Intégration des critères de santé dans le guide pratique des aides communales dans le cadre du FCE « Klimabonus » (version 2025)

Le nouveau régime d’aides à l’investissement³⁹ pour les communes (à partir de 2025) visant entre autres la promotion de la construction durable et financés par le Fonds climat énergie (FCE) prévoit quatre mesures qui touchent à la qualité de l’air intérieur et à la santé voire le bien-être des occupants, à savoir :

- **Mesure 12** : Élaboration et suivi d’un contrat et d’un carnet d’entretien des ventilations mécaniques contrôlées (VMC).

Cette mesure se compose d’inspections régulières complétées par des vérifications des réglages des flux d’air (débits d’air, vitesses de l’air sur l’ensemble des bouches de pulsion et d’extraction), de mesures de l’encrassement en poussières et en microorganismes et de la documentation des

³⁹Guide pratique Pacte-Climat
www.klima-agence.lu/sites/default/files/2025-07/FCE_Guide%20pratique_20250715_0.pdf

résultats dans un carnet d'entretien. Le cas échéant des nettoyages, voire des désinfections sont à prévoir.

Un programme ou projet-pilote « HERVE » initié en 2023 par Neobuild GIE et le ministère de l'économie détermine les procédures à suivre.

Cette mesure est subsidiée à raison de 80% avec un plafond de 12000 Euros.

- **Mesure 13 :** consultation d'un biologiste de l'habitat lors de projets de construction ou de rénovation

Cette mesure subsidiée à 100% équivaut à 15 heures avec un plafond de 2.500 Euros.

- **Mesure 14 :** mesures et analyses de contrôle après achèvement de la phase chantier pour les nouvelles constructions, les rénovations majeures ou les assainissements essentiels.

Les analyses et les mesurages correspondent à la méthodologie BREATHE décrite dans la partie C du présent Livre Vert.

Cette mesure reprend l'équivalent de 10 heures plus les analyses de laboratoire à 100% avec un plafond de 3000 Euros.

- **Mesure 15 :** Monitoring des paramètres de santé et de bien-être dans les salles de classe communales

La mesure comporte le monitoring (micro-capteurs) de différents paramètres (CO₂, température, humidité, formaldéhyde, COV totaux, particules fines et ultrafines), les mesurages des débits et des vitesses de l'air (s'il y a une VMC) ainsi que des analyses de COV, d'aldéhydes et de COSV.

Le FCE reprend 100% des frais équivalent à 4x4 heures (4 séries de mesures) plus les analyses de laboratoire et le rapport jusqu'à concurrence de 8.500 Euros (2.800 Euros par local)

L'ensemble de ces mesures s'adresse à des experts qualifiés en biologie de l'habitat, à l'image de la formation H₂E décrite dans la partie C du présent Livre Vert, soit d'une formation « entretien hygiène des VMC » offerte par le centre de compétences en collaboration avec Neobuild et le ministère de l'économie (mesure 12).

VII.9. Intégration des critères de santé dans les instruments « LENOZ » et « PRIMeHouse » 2.0

Les critères de « santé » et de « construction saine » seront intégrés dans les instruments LENOZ du ministère du logement et de PRIMeHouse du ministère de l'environnement, du climat et du développement durable. Ces critères de santé sont subdivisés en critères clés et critères secondaires, les premiers constituant des « conditio sine qua non », donc des critères obligatoires, les deuxièmes des critères secondaires ou accessoires. Les critères concernent notamment l'électro-installation, les systèmes de ventilation, les matériaux et produits de construction exempts de substances nocives (en l'occurrence la liste positive CLAIRE) et les analyses- et mesures- contrôles après achèvement du bâtiment (en l'occurrence la certification BREATHE). Les méthodologies se basent sur l'accréditation H₂E.

Il faudra par conséquent des biologistes de l'habitat habilités et compétents pour mener à bien les missions prévues et décrites dans les instruments LENOZ (ministère du logement) et PRIMeHouse (ministère de l'environnement, du climat et du développement durable). Ces instruments reposent donc essentiellement sur

- La liste positive CLAIRE

- La certification BREATHE
- L'agrément H₂E (ou similaire)
- Les formations et formations continues
- Mission de conseil en biologie de l'habitat

VII.10. Intégration des critères de santé dans les instruments de certification de bâtiments fonctionnels

La même approche que pour le secteur résidentiel, à savoir l'intégration des critères de construction saine moyennant CLAIRE, BREATHE et H₂E pourra être appliquée dans le secteur des bâtiments fonctionnels et être intégrée en forme d'un « package health » dans une certification de durabilité soit existante soit dans une certification de durabilité à mettre au point.

Ces différents outils et notamment la liste positive CLAIRE pourrait par ailleurs constituer un outil précieux pour les besoins de l'Administration des Bâtiments Publics et d'autres promoteurs publics et être utilisés dans les soumissions publiques.

VII.11. Guide de la construction et de la rénovation durables du CRTI-B

Le CRTI-B dont une des missions comprend la promotion et le développement du secteur de la construction durable au Luxembourg a été chargé en 2021 par le Ministère de l'énergie d'une refonte du « Guide de la construction et de la rénovation durables ». En effet un tel guide avait été créé initialement en 2008, la dernière révision date de 2010. Le nouveau guide destiné aux planificateurs et maîtres d'ouvrage et visant à leur mettre à disposition les principes holistiques d'une approche de durabilité en relation avec leur projet de construction devrait être public en 2022. Ce nouveau « guide de la construction et de la rénovation durables » intégrera les aspects de santé et de construction saine décrits dans le présent livre vert.

Le CRTI-B (Centre de Ressources des Technologies et de l'Innovation pour le Bâtiment) est une plate-forme neutre et ouverte pour tous les intervenants de l'acte de construire et cherche à améliorer la productivité et la compétitivité des acteurs de la construction. Le CRTI-B a entre autres objectifs de définir, de documenter, d'introduire et de tenir à jour des standards en matière de dossiers de soumission régissant les marchés des projets de construction.

VIII. Retour d'expérience au Luxembourg

L'expérience de quatre bâtiments construits au Luxembourg au fil des dernières années selon les principes des outils et instruments décrits en amont et comparées à des bâtiments construits suivant des critères écologiques (« green buildings ») comme l'utilisation de matériaux biosourcés recyclables ou déconstructibles montre l'effet qu'une telle intégration des notions de santé et de construction saine peuvent avoir. En effet, un certain nombre de bâtiments ont été réalisées au Luxembourg en version « construction saine » dans le passé grâce à la combinaison des différents outils à disposition, en l'occurrence la mission de conseil en biologie de l'habitat accompagnant la construction et reposant sur l'application des règles de l'art décrites en amont, le choix des matériaux et produits de construction selon le principe d'une liste positive et donc moyennant des analyses en amont de la construction et permettant de favoriser des matériaux exempts de polluants nocifs.

T 21 : Description de 13 bâtiments construits d'après des critères de santé ou d'écologie

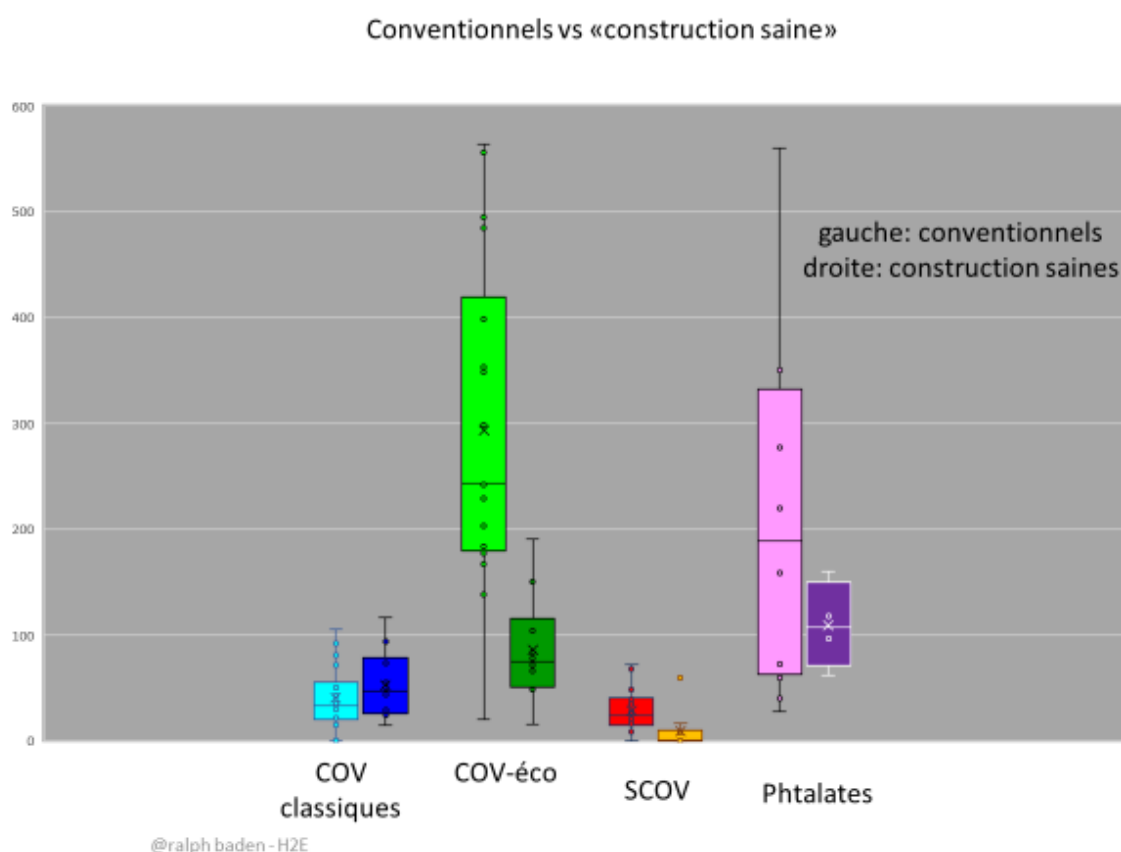
NUMÉRO	LOCALITÉ	VOCATION	LOCAUX ANALYSÉS	MEUBLÉ	PASSIFS	TYPE DE CONSTRUCTION	CONSTRUCTION Saine	ANNÉE DE CONSTRUCTION	ANNÉE DES ANALYSES
1	Rodenbourg	Maison	1	Non	Non	Briques	Oui	2005	2005
2	Hostert	Maison	2	Oui	Non	Briques	Oui	2009	2009
3	Kayl	Bureau	1	Non	Oui	Bois	Non	2011	2011
4	Luxembourg	Maison	3	Oui	Non	Briques	Oui	2011	2011
5	Junglinster	Maison	2	Oui	Oui	Bois	Non	2010	2012
6	Wincrange	Maison	3	Oui	Oui	Bois	Non	2011	2012
7	Ettelbruck	Maison	2	Oui	Oui	Bois	En partie	2012	2013
8	Bettembourg	Bureau	4	Non (1 oui)	Oui	Bois	En partie	2014	2014
9	Burmerange	Maison	3	Oui	Oui	Briques/béton	Oui	2015	2015
10	Redange	Maison	2	Oui	Oui	Briques	Non	-	2019
11	Beckerich	Maison	2	Oui	Oui	Briques	Non	-	2019
12	Bastogne	Maison	2	Oui	Oui	Briques	Non	-	2019
13	Luxembourg	Résidence	2	Oui	Oui	Béton	En partie	2019	2020

Des analyses et mesurages selon la certification de « construction saine » BREATHE ont permis de documenter ses projets et de les comparer à d'autres constructions.

Ainsi pour une douzaine de constructions, les bâtiments passifs ou conventionnels (à gauche pour chaque pair) ont été comparés à des bâtiments en « construction saine » (à droite pour chaque pair) selon les principes décrits dans le présent livre vert. La contamination de l'air a été analysée pour quatre groupes de polluants et les résultats des bâtiments conventionnels ont été comparés à ceux des bâtiments « sains ».

Les 4 groupes de polluants sont les solvants classiques regroupant les aromates et aliphatés, les hydrocarbures halogénés, les solvants dits écologiques (terpènes, éthers de glycol, aldéhydes) utilisés comme substituants des solvants classiques dans les produits écologiques ou à dispersion, le groupe des COSV ou solvants organiques semi-volatils comme les biocides, pyréthrinoides ou les retardateurs de flamme et finalement le groupe des phtalates.

F 23 : Diagramme comparant les taux de pollution de bâtiments conventionnels ou passifs à des bâtiments construits selon les principes de construction saine du présent livre vert (box-plot)⁴⁰



À part les COV classiques (en bleu) où les taux de polluants sont plus ou moins similaires voir légèrement plus élevés pour les « constructions saines »⁴¹ mais basses en concentrations (les COV classiques ont tendance à s'évaporer rapidement en 2-3 semaines et ne contribuent donc pas à une contamination prolongée), les différences sont nettement en faveur des constructions saines pour l'ensemble des trois autres groupes de polluants et notamment pour les COV dits écologiques (en vert) et les COSV (rouge-orange). De même les contaminations en phtalates (rose-violet) sont visiblement inférieures dans les constructions saines.

Ces résultats portant donc sur une douzaine de bâtiments réalisés au Luxembourg mettent en évidence la « plus-value » en termes de santé et de bien-être des différentes interventions relatives à la biologie de l'habitat indépendamment du fait qu'il s'agisse de bâtiments conventionnels ou passifs et soulignent le bien-fondé des différentes mesures ou piliers décrits dans le présent livre vert sur la construction saine.

En d'autres termes la mission d'un biologiste de l'habitat accrédité H²E pouvant recourir aux instruments ou outils présentés permet de considérablement minimiser l'exposition et donc tout risque de santé en relation avec la construction.

⁴⁰ box-plot ou boîte-à-moustaches

Le rectangle marque le deuxième et le troisième quartile et renferme donc 50% des valeurs constatées, les traits (antennes ou whiskers) se prolongent jusqu'au percentiles 5 et 95 et engendrent donc 90% des valeurs. Le trait horizontal marque la médiane (50% des valeurs constatées sont inférieures et 50% supérieures à cette valeur médiane) et le x correspond à la moyenne des valeurs mesurées. Les petits « o » correspondant à des valeurs mesurées.

⁴¹ En biologie de l'habitat, les produits à solvants classiques aliphatiques sont préférés aux produits de dispersion renfermant des solvants écologiques et notamment des éthers de glycol en raison de la volatilité plus élevée d'une part et leur nocivité moins élevée (cf LD 50) d'autre part des aliphatiques.

IX. Conclusion

L'expérience au Luxembourg durant les 20 ans d'analyses dans le bâti existant relatif à des troubles de santé des occupants met en évidence l'importance de la qualité de l'air intérieur en relation avec la construction.

D'autre part, les études montrent que les efforts réalisés dans le passé en matière d'efficacité énergétique et de « green building » n'ont pas ou pas suffisamment traité le sujet de la qualité de l'air intérieur et de la santé voir du bien-être des occupants.

Il est par conséquent primordial de considérer les aspects de santé et de bien-être lors de la construction et de se doter ou munir des outils et instruments nécessaires à la réalisation de cette tâche.

Les outils décrits (CLAIRE, BREATHE, H₂E, règles de l'art de la construction saine) devraient permettre d'unir l'efficacité énergétique, l'écologie et la santé dans le bâtiment et de contribuer de cette façon à une démarche de construction durable de tout point de vue. L'intégration dans les outils existants ou en voie de développement comme le système de certification et de primes dans le secteur résidentiel (PRIMEHouse et LenoZ) ou dans le guide de la construction et de la rénovation durable du CRTI-B permet de sensibiliser directement tant les maîtres d'ouvrages que les architectes et autres professionnels de la construction en matière de santé et de construction saine voir de les orienter vers une construction durable.

En fin de compte s'engager dans la durabilité et notamment dans la santé des bâtiments ne constitue pas seulement un investissement dans sa propre santé et celle des générations futures mais également un investissement économique tant dans la productivité des employés que dans la valeur évolutive de l'immobilier avec un rendement rapide dans quelques années.

Pour le dire dans les termes des auteurs de « Healthy Buildings » (Allen et Macomber, 2020) : les objectifs du bâtiment sain sont une augmentation de la performance humaine, de la performance d'affaires et de la performance sociale :

«... Healthy Building strategies are Healthy People strategies and therefore Healthy Business strategies, they can lead us together to a Healthy Planet... »

Partie D

Liste CLAIRE

	Substances à effets temporaires et réversibles (maux de tête, vertiges, nausées) ou absence de substances nocives
	Substances irritantes ou allergisantes, non bio-accumultrices
	Substances neurotoxiques, toxiques pour le système respiratoire ou perturbateurs endocriniens
	Substances cancérogènes (CMR), neurodégénératives irréversibles (persistantes et bio-accumulatrice (PBT, vPvB))
	Absence de connaissance d'effets nocifs à l'état actuel

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
COV ALIPHATIQUES		n-hexane	110-54-3	oui	30	x
		n-heptane	142-82-5	oui	30	x
		n-octane	111-65-9	oui	30	
		n-nonane	111-84-2	oui	30	
		n-décane	124-18-5	oui	30	
		n-undécane	1120-21-4	oui	30	
		n-dodécane	112-40-3	oui	30	
		n-tridécane	629-50-5	oui	30	
		n-tétradécane	629-59-4	oui	30	
		n-pentadécane	629-62-9	oui	30	
		n-hexadécane	544-76-3	oui	30	
		heptadécane	629-78-7	oui	30	
		octadécane	593-45-3	oui	30	
		nonadécane	629-92-5	oui	30	
		2-méthylpentane	107-83-5	oui	30	
		3-méthylpentane	96-14-0	oui	30	
		2-méthylhexane	591-76-4	oui	30	
		3-méthylhexane	589-34-4	oui	30	
		2,3-diméthylpentane	565-59-3	oui	30	
		2,2,4-triméthylpentane	540-84-1	oui	30	
		2,3-diméthylheptane	3074-71-3	oui	30	
		pentaméthylheptane	13 475-82-6	oui	30	
		heptaméthylnonane	4390-04-9	oui	30	
		méthylcyclopentane	96-37-7	oui	30	
		cyclohexane	110-82-7	oui	30	x
		méthylcyclohexane	108-87-2	oui	30	x
		Alcanes nonane-tétradécane	mixture		30	
		1-heptène	592-76-7	oui	30	
		1-octène	111-66-0	oui	30	

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHÉ	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		1-nonène	124-11-8	oui	30	
		1-décène	872-05-9	oui	30	
		1-undécène	821-95-4	oui	30	
		1-dodécène	112-41-4	oui	30	
		1-tridécène	2437-56-1	oui	30	
		isobutène trimère	7756-94-7	oui	30	
		vinylcyclohexène VCH	100-40-03	oui	30	
		4-phénylcyclohexène	4994-16-5		30	
		isodécènes	mixture			
COV AROMATIQUES		benzène	71-43-2	oui	30	
		toluène	108-88-3	oui	30	x
		éthylbenzène	100-41-4	oui	30	x
		m/p-xylènes	108-38-3/106-42-3	oui	30	x
		o-xylène	65-47-6	oui	30	x
		n-propylbenzène	103-65-1	oui	30	x
		iso-propylbenzène	98-82-8	oui	30	x
		1,2,3-triméthylbenzène	526-73-8	oui	30	x
		1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	oui	30	x
		1,3,5-triméthylbenzène	108-67-8	oui	30	x
		o-éthyltoluène	611-14-3	oui	30	x
		m-éthyltoluène	620-14-4	oui	30	
		p-éthyltoluène	622-96-8	oui	30	
		p-cymène	99-87-6	oui	30	x
		1,2,4,5-tétraméthylbenzène	95-93-2	oui	30	x
		1,4-diéthylbenzène	105-05-5	oui	30	
		n-butylbenzène	104-51-8	oui	30	x
		1,4-diisopropylbenzène	100-18-5	oui	30	x
		styrène	100-42-5	oui	30	x
		a-méthylstyrène	98-83-9	oui	30	x
		4-phénylcyclohexène	4994-16-5	oui	30	x
		indane	496-11-7	oui	30	
		indène	95-13-6	oui	30	x
		1,2,3,4-tétrahydronaphthalène	119-64-2	oui	30	
HAP		naphthalène	91-20-3	oui	30	x
		1-méthyl-naphthalène	90-12-0	non	30	
		2-méthyl-naphthalène	91-57-6	non	30	
		diméthyl-naphthalène	575-41-7 571-58-4	non	30	
		acénaphthène	83-32-9	oui	30	
		acénaphthylène	208-96-8	oui	30	
		fluorène	86-73-7	oui	30	
		phénanthrène	85-01-8	oui	30	
		anthracène	191-26-4	oui	30	

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		diisopropylnaphthalène (DIPN)	38640-62-9	non	30	
		Somme C9-C15-alkylbenzènes				
HAP		naphthalène	91-20-3	oui	3	x
		acénaphthylène	208-96-8	oui	3	
		acénaphthène	83-32-9	oui	3	
		fluorène	86-73-7	oui	3	
		phénanthrène	85-01-8	oui	3	
		anthracène	191-26-4	oui	3	
		fluoranthène	206-44-0	oui	3	
		pyrène	129-00-0	oui	3	
		benz(a)anthracène	92-24-0	oui	3	
		chrysène	218-01-9	oui	3	
		benzo(b)fluoranthène	205-99-2	oui	3	
		benzo(k)fluoranthène	207-09-9	oui	3	
		benzo(a)pyrène	50-32-8	oui	3	
		dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3	oui	3	
		benzo(g,h,i)perylène	191-24-2	oui	3	
		Indenon(1,2,3-c,d)pyrène	193-39-5	oui	3	
		somme HAP selon EPA				
ESTERS		méthylacétate	79-20-9	oui	30	
		éthylacétate	141-78-6	oui	30	
		propylacétate	109-60-4	oui	30	
		isopropylacétate	108-21-4	oui	30	x
		n-butylacétate	123-86-4	oui	30	x
		iso-butylacétate	110-19-0	oui	30	x
		2-éthylhexylacétate	103-09-3	oui	30	x
		n-butylformiate	592-84-7	oui	30	x
		méthylacrylate	96-33-3	oui	30	x
		n-butylacrylate	141-32-2	non	30	x
		iso-butylacétate	110-09-3	oui	30	
		2-éthylhexylacrylate	103-11-7	non	30	x
		méthylméthacrylate	80-62-6	oui	30	x
		méthylbenzoate	93-58-3	oui	30	
		diméthylsuccinate	106-65-0	oui	30	x
		diméthylglutarate	1119-40-0	oui	30	x
		diméthyladipate	627-93-0	oui	30	x
		diisobutylsuccinate	925-06-4	non	30	x
		diisobutylglutarate	71195-64-7	non	30	x
		diisobutyladipate	141-04-8	non	30	
		dibutylmaléate	105-76-0	non	30	x
		texanol	25265-77-4	oui	30	x
		texanoldiisobutyrate (TXIB)	6846-50-0	oui	30	x
		3-méthoxybutylacétate	4435-53-4	non	30	

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
CÉTONES		acétone	67-64-1	oui	30	x
		méthyléthylcétone (MEK), butanone	78-93-3	oui	30	x
		2-pentanone / méthylpropylcétone	107-87-9	oui	30	
		2-hexanone / méthylbutylcétone MBK	591-78-6	non	30	
		méthylisobutylcétone MIBK	108-10-1	oui	30	x
		2-heptanone	110-43-0	oui	30	
		3-heptanone	106-35-4	oui	30	
		2-octanone	111-13-7	oui	30	
		cyclohexanone	108-94-1	oui	30	x
		acétophénone	98-86-2	oui	30	x
ALCOOLS		1-propanol	71-23-8	oui	30	
		2-propanol	67-63-0	oui	30	
		1-butanol	71-36-3	oui	30	x
		iso-butanol	78-83-1	oui	30	x
		1-pentanol	71-41-0	oui	30	x
		1-hexanol	111-27-3	oui	30	x
		2-éthyl-1-hexanol	104-76-7	oui	30	x
		1-nonanol	143-08-8	oui	30	
		1-décanol	112-30-1	oui	30	
		alcool benzylique	100-51-6	oui	30	x
PHÉNOLS		phénol	108-95-2	oui	30	x
		2-méthylphénol / o-crésol	95-48-7	oui	30	
		3,4-méthylphénol / m/p-crésol	108-39-4, 106-44-5	oui	30	
		2,6-Di-tert.-butyl-4-méthylphénol / butylhydroxytoluène	128-37-0	non	30	x
SILOXANES		hexaméthylcyclotrisiloxane D3	541-05-9		30	
		octaméthylcyclotétrasiloxane D4	556-67-2	oui	30	x
		décaméthylcyclopentasiloxane D5	541-02-6	oui	30	x
		dodécaméthylcyclohexasiloxane D6	540-97-6	oui	30	x
PYRÉTHRINONIDES		cyfluthrine	686359-37-5	oui	3	
		cyperméthrine	52315-07-8	oui	3	
		deltaméthrine	52918-63-5	oui	3	
		perméthrine (cis-/trans-)	52645-53-1	oui	3	
		pipéronyl butoxide (synergiste)	51-03-6	oui	3	
		tétraméthrine	7696-12-0	oui	3	
ÉTERS DE GLYCOL GROUPE E		MEG éthylèneglycol	107-21-1	non	30	x
		2-méthoxyéthanol	109-86-4	oui	30	x
		2-éthoxyéthanol	110-80-5	oui	30	x
		2-butoxyéthanol	111-76-2	oui	30	x
		2-hexoxyéthanol	112-25-4	oui	30	x

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		2-phénoxyéthanol	122-99-6	oui	30	x
		2-méthoxyéthylacétate	110-49-6	non	30	x
		2-éthoxyéthylacétate	111-15-9	oui	30	x
		2-butoxyéthylacétate	112-07-2	oui	30	x
		diéthylèneglycol	111-46-6	oui	30	x
		2-méthoxyéthoxyéthanol	111-77-3	oui	30	
		2-éthoxyéthoxyéthanol	111-90-0	oui	30	x
		2-butoxyéthoxyéthanol	112-34-5	oui	30	x
		diéthylèneglycoldiméthyléther	111-96-6	non	30	x
		triéthylèneglycolbutyléther	143-22-6	non	30	
		1-phénoxypropanol	136-91-0 770-35-4	non	30	
ÉTHERS DE GLYCOL GROUPE P OU SIMILAIRES		EDGA - éthyldiglycolacétate	112-15-2	non	30	
		DGB- butyldiglycoacétate	124-17-4	oui	30	x
		triéthylèneglycoldiméthyléther	112-49-2	non	30	x
		1,2-propylèneglycol	57-55-6	oui	30	x
		1-méthoxy-2-propanol	107-98-2	oui	30	x
		1-éthoxy-2-propanol	1569-02-4	oui	30	
		1-butoxy-2-propanol	5131-66-8	oui	30	x
		1-tert.-butoxy-2-propanol	57018-52-7	non	30	
		1-méthoxy-2-propylacétate	108-65-6	oui	30	x
		dipropylèneglycol	25265-71-8	non	30	x
		méthoxypropoxypropanol (dipropylenglykolmonométhyléther)	34590-94-8	oui	30	
		dipropylène glycol mono-n-butyléther	29911-28-2	non	30	
		tripropylèneglycol	24800-44-0	non	30	
		tripropylène glycol monobutyléther	55934-93-5	non	30	x
		3-méthoxy-1-butanol	2517-43-3	non	30	x
AUTRES ESTERS		tétrahydrofurane	109-99-9	oui	30	x
		2-méthylfurane	534-22-5	oui	30	
		2-pentylfurane	37777-69-3	oui	30	
		dioxane	123-91-1	oui	30	x
		tert.-butylméthyléther	1634-04-4	oui	30	
		dibutoxyméthane	2568-90-3	oui	30	
		diéthylcarbonate	105-58-8	oui	30	
COV HALOGÉNÉS		trichlorométhane	67-66-3	oui	30	
		tétrachlorométhane	56-23-5	oui	30	
		1,2-dichloroéthane	107-06-2	oui	30	
		1,1,1-trichloréthane	71-55-6	oui	30	
		trichloréthylène	79-01-6	oui	30	
		perchloréthylène, tétrachloréthylène	127-18-4	oui	30	x

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHÉ	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		chlorobenzène	108-90-7	oui	30	
		1,2-dichlorobenzène	95-50-1	oui	30	
		1,3-dichlorobenzène	541-73-1	oui	30	
		1,4-dichlorobenzène	106-46-7	oui	30	x
		1-chlornaphthalène	90-13-1	oui	30	
TERPÈNES		limonène	138-86-3	oui	30	x
		menthol	89-78-1	oui	30	
		α-terpinène	99-86-5	oui	30	
		γ-terpinène	99-85-4	oui	30	
		α-terpinéol	98-55-5	oui	30	
		terpinolène	586-62-9	oui	30	
		bornéol	507-70-0	oui	30	
		bornylacétate	76-49-3 5655-61-8	oui	30	
		camphén	79-92-5	oui	30	
		campher	76-22-2	oui	30	
		3-carène	13466-78-9	oui	30	x
		eucalyptol	470-82-6	oui	30	
		α-pinène	80-56-8	oui	30	x
		β-pinène	127-91-3	oui	30	x
		b-caryophyllen	87-44-5	oui	30	
		longifolène	475-20-7	oui	30	
		β-linalool	78-70-6	oui	30	
		linalylacétate	115-95-7	oui	30	
		b-myrcène	123-35-3	oui	30	
ALDÉHYDES		formaldéhyde	50-00-0	oui	30	x
		acétaldéhyde	75-07-0	oui	30	x
		propanal	123-38-6	oui	30	x
		butanal	123-72-8	oui	30	x
		pentanal	110-62-3	oui	30	x
		hexanal	66-25-1	oui	30	x
		heptanal	111-71-7	oui	30	x
		octanal	124-13-0	oui	30	x
		nonanal	124-19-6	oui	30	x
		décanal	112-31-2	oui	30	x
		undécanal	112-44-7	oui	30	
		méthylpropanal	78-74-2	oui	30	
		3-méthylbutanal	590-86-3	oui	30	
		éthylhexanal	123-05-7	oui	30	x
		benzaldéhyde	100-52-7	oui	30	x
		acroleine	107-02-8	oui	30	
		crotonaldéhyde trans-2-buténal	4170-30-3	oui	30	x

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		méthacroleine méthyl-2-propénal	78-85-3	oui	30	
		2-hexénal	6728-26-3	oui	30	x
		2-hepténal	2463-63-0	oui	30	x
		2-octénal	2548-87-0	oui	30	x
		2-nonénal	18829-56-6	oui	30	x
		2-décénal	3913-71-1	oui	30	x
		furfural	98-01-1	oui	30	x
		p-tolualdéhyde	104-87-0		30	
		2,5-diméthylbenzaldéhyde	5779-94-2		30	
ACIDES CARBOXYLIQUES		acide acétique, acide éthanonïque	64-19-7	non	30	x
		acide propanonïque, acide propioïque	79-09-4	non	30	x
		acide butanonïque, acide butyrique	107-92-6	non	30	x
		acide pentanonïque, acide valérique	109-52-4	non	30	x
		acide hexanonïque, acide caproïque	142-62-1	non	30	x
		acide heptanonïque, acide énanthique	111-14-8	non	30	x
		acide octanonïque, acide caprylique	124-07-2	non	30	x
		acide nonanonïque, acide pélargonique	112-05-0	non	30	
		acide décanonïque, acide caprique	334-48-5	non	30	
		acide éthylhexanoïque	149-57-5	non	30	x
AUTRES SUBSTANCES		N-méthylpyrrolidone	872-50-4	oui	30	x
		butanonoxime	92-29-7	oui	30	x
		acétonoxime	127-06-0	oui	30	
		pentanonoxime	623-40-5	oui	30	
		caprolactame	105-60-2	oui	30	x
		diméthylformamide	68-12-2	oui	30	x
		diméthylacétamide	127-19-5	oui	30	
		benzothiazole	95-16-9	oui	30	
CONSERVATEURS ISOTHIAZOLINONES		méthylisothiazolinone	2682-20-4	oui	30	x
BIOCIDES		chlorothalonil	1897-45-6	oui		
		dichlofluanide	1085-98-9	oui	3	
		endosulfanes (alpha+béta)	115-29-7 959-98-8(α) 33213-65-9 (β)	oui	3	
		furmécycloxy	60-568-05-0	oui	3	
		HCH-alpha	319-84-6	oui	3	
		HCH-béta	319-85-7	oui	3	
		HCH-gamma (lindane)	58-89-9	oui	3	

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHÉ	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		pentachlorophénol (PCP)	87-86-5	oui	3	
		propiconazole	60207-90-1	oui	3	
		silaflofène	105024-66-6	non	3	
		tébuconazole	107534-96-3	oui	3	
		tétrachlorophénol	25167-83-3	non	3	
		tolylfluamide	731-27-1	oui	3	
		chlorpyrifos	2921-88-2	oui	3	
		DDT (somme DDT, DDD, DDE)	50-19-3 (72-54-8, 72-55-9)	oui	3	
		dichlorvos / Naled	63-73-7	oui	3	
		p,p'-méthoxychlor	73-43-5	oui	3	
		parathion-éthyl (E605)	56-38-2	oui	3	
		propoxur	114-26-1	oui	3	
		polychloro-2-aminodiphényléther (Eulan WA neu) (PCSD/PCAD)	3687-70-5 55069-01-7	oui	3	
		sulcofuron (Mitin FF) semiquant	24019-05-4	non	3	
		selon "querchers"		oui	3 par substance	
RF ORGANOPHOSPHORÉS		tris(2-chloroéthyl)phosphate TCEP	115-96-8	oui	3	
		tris(2-éthylhexyl)phosphate TEHP	78-42-2	oui	3	
		tris(monochloropropyl)phosphate TCPP	13674-84-5	oui	3	
		tris(dichlorisopropyl)phosphate TdCPP	13674-87-8	oui	3	
		tris(2-butoxyéthyl)phosphate TBEP	78-51-3	oui	3	
		tris(n-butyl)phosphate TBP	126-73-8	oui	3	x
		triphénylphosphate TPP	115-86-6	oui	3	
		trikresylphosphate	1330-78-5	oui	3	
RF POLYBROMÉS		polybromodiphényléthers PBDE (triBDE, tétraBDE, pentaBDE, hexaBDE, heptaBDE, octaBDE, nonaBDE, décaBDE, ...)		oui	3 (par substance)	
		polybromophényles ou biphényles polybromés PBB (hexabromobiphényle, hepta-, octa-, nona- décabromobiphényle)		oui	3 (par substance)	
		hexabromocyclododécane	3194-55-6	non	3	
		tétabromobisphénol A	79-94-7	oui	3	
BIPHÉNYL S POLYCHL		PCB-28	7012-37-5	oui	3	
		PCB-52	41464-40-8	oui	3	
		PCB-101	37680-73-2	oui	3	

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
		PCB-153	35065-27-1	oui	3	
		PCB-138	35694-06-5	oui	3	
		PCB-180	35065-29-3	oui	3	
		somme PCB (arrondie)				
		somme PCB selon LAGA		oui		
PHTALATES		diméthylphtalate (DMP)	131-11-3	oui	3	
		diéthylphtalate DEP)	84-66-2	oui	3	
		di-n-butylphtalate (DBP)	84-74-2	oui	3	
		diisobutylphtalate (DiBP)	84-69-5	oui	3	
		benzylbutylphtalate (BBP)	85-68-7	oui	3	
		di(2-éthylhexyl)phtalate (DEHP)	117-81-7	oui	3	
		di(2-éthylhexyl)adipate	103-23-1	non	3	
AUTRES		biphényles polybromés			3 (par substance)	
		anhydride phtalique	85-44-9	non	3	
		chlorparaffines (semi-quantatif)	85535-84-8	non	3 (par substance)	
		4-chlor-3-méthylphénol (chlorocrésol)	59-50-7	oui	3	
		monochlornaphthalène	90-13-1	non	3	
CONSERVATEURS		méthylisothiazolinone (MIT)	26172-55-4	non	3	x
		benzoisothiazolinone (BIT)	2634-33-5		3	
PFAS - PFCA ACIDES PERFLUOROCARBOXYLIQUES	?	PFBA - acide perfluorobutanoïque	375-22-4	oui	30	
	?	PFPA - acide perfluoropentanoïque	2706-90-3	oui	30	
	?	PFHxA - acide perfluorohexanoïque	307-24-4	oui	30	
		PFHpA - acide perfluoroheptanoïque	375-85-9	oui	30	
		PFOA - acide perfluorooctanoïque	335-67-1	oui	30	
		PFNA - acide heptadécafluorononanoïque	375-95-1	oui	30	
		PFDA - acide perfluorodécanoïque	335-76-2	oui	30	
	?	PFUnA - acide perfluoro-n-undécanoïque	2058-94-8	oui	30	
	?	PFDoA - acide perfluorododécanoïque	307-55-1	oui	30	
	?	PFTTrDA - acide perfluorotridécanoïque	72629-94-8	oui	30	
	?	PFTeDA - acide perfluorotétradécanoïque (PFTDA)	376-06-7	oui	30	
PFAS - ACIDES SULFONIQUES	?	PFBS - acide perfluorobutanesulfonique	375-73-5	oui	30	
	?	PFPS - acide perfluoropentanesulfonique	2706-91-4	oui	30	
		PFHxS - Perfluorohexane sulfonate (PFHS)	355-46-4	oui	30	
	?	PFHpS - acide perfluoropentanesulfonique	375-92-8	oui	30	
		PFOS - acide perfluorooctanesulfonique	1763-23-1	oui	30	
	?	PFNS - acide perfluorononanesulfonique	47511-07-4	oui	30	
	?	PFDS - perfluorodécane sulfonate	335-77-3	oui	30	

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/m³)	EU-LCI
	?	PFUnDS - acide perfluoroundécanesulfonique	749786-16-1	oui	30	
	?	PFDoDS - perfluorododécanesulfonate	79780-39-5	oui	30	
	?	PFTTrDS - acide perfluorotridécanesulfonique	72629-94-8	oui	30	
PFAS SULFONAMIDES	?	PFOSA - perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	754-91-6	oui	30	
PFAS PRÉCURSEURS	?	N-Me-FOSA-N -méthyl-perfluorooctanesulfonamide	31506-32-8	oui	30	
	?	N-Et-FOSA-N -éthyl-perfluorooctanesulfonamide	4151-50-2	oui	30	
	?	N-Me-FOSAA -acide n- méthylperfluorooctanesulfonamideacétique	2355-31-9	oui	30	
	?	N-Et-FOSAA -acide n -éthylperfluorooctanesulfonamideacétique	2991-50-6	oui	30	

	NOCIVITÉ	NOCIVITÉ CONDITIONNELLE	MÉTAL	CAS	BREATHE	CONTAMINÉ (µg/g)
MÉTAUX LOURDS OU NOCIFS		ions	Aluminium (Al)	7429-90-5	oui	
			Antimoine (Sb)	7440-36-0	oui	
	V	III	Arsenic (As)	7440-38-2	oui	10
			Barium (Ba)	7440-39-3	oui	
			Beryllium (Be)	7440-41-7	oui	
			Plomb (Pb)	7439-92-1	oui	50
			Cadmium (Cd)	7440-43-9	oui	2
	III	VI	Chrome (Cr)	7440-47-3	oui	50 (VI)
		conc	Gallium (Ga)	7440-55-3	oui	
			Cobalt (Co)	7440-48-4	oui	
		conc	Fer (Fe)	7439-89-6	oui	
		conc	Cuivre (Cu)	7440-50-8	oui	
		conc	Lithium (Li)	7439-93-2	oui	
			Magnesium (Mg)	7439-95-4	oui	
		conc	Manganese (Mn)	7439-96-5	oui	
		conc	Molybdène (Mo)	7439-98-7	oui	
			Nickel (Ni)	7440-02-0	oui	
		conc	Palladium (Pd)	7440-05-3	oui	
			Platine (Pt)	7440-06-4	oui	
			Mercure (Hg)	7439-97-6	oui	2
		conc	Selenium (Se)	7782-49-2	oui	
		conc	Argent (Ag)	7440-22-4	oui	
		conc	Strontium (Sr)	7440-24-6	oui	
			Thallium (Tl)	7440-28-0	oui	
			Titane (Ti)	7440-32-6	oui	
			Uranium (U)	7440-61-1	oui	
			Vanadium (V)	7440-62-2	oui	
			Zinc (Zn)	7440-66-6	oui	
			Etain (Sn)	7440-31-5	oui	
			Zirconium (Zr)	7440-67-7	oui	

*nocivité conditionnelle : selon certaines conditions, la nocivité du métal peut augmenter par rapport à la toxicité initiale.

ions = sous forme ionique

conc = dépend de la concentration

nombre = valence

Liste BREATHE

	Substances à effets temporaires et réversibles (maux de tête, vertiges, nausées) ou absence de substances nocives
	Substances irritantes ou allergisantes, non bio-accumultrices
	Substances neurotoxiques, toxiques pour le système respiratoire ou perturbateurs endocriniens
	Substances cancérigènes (CMR), neurodégénératives irréversibles (persistantes et bio-accumulatrice (PBT, vPvB))
	Absence de connaissance d'effets nocifs à l'état actuel

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
COV AROMATIQUES		benzène	71-43-2	3	µg/m3	OUI
		toluène	108-88-3	30	µg/m3	OUI
		éthyl-benzène	100-41-4	10	µg/m3	OUI
		m/ p-xylènes	108-38-3 106-42-3	29	µg/m3	OUI
		o-xylène	95-47-6	9	µg/m3	OUI
		n-propyl-benzène	103-65-1	2.1	µg/m3	OUI
		i-propyl-benzène	98-82-8	1	µg/m3	OUI
		1,4-diisopropylbenzène	100-18-5		µg/m3	OUI
		1,2,3-triméthylbenzène	526-73-8	2.6	µg/m3	OUI
		1,2,4-triméthylbenzène	95-63-6	11	µg/m3	OUI
		1,3,5-triméthylbenzène	108-67-8	3	µg/m3	OUI
		1,4-diéthylbenzène	105-05-5		µg/m3	OUI
		n-butylbenzène	104-51-8	1	µg/m3	OUI
		2-éthyltoluène, o-éthyltoluène	611-14-3	3	µg/m3	OUI
		3-éthyltoluène, m-éthyltoluène	620-14-4	6.7	µg/m3	OUI
		4-éthyltoluène, p-éthyltoluène	622-96-8	3	µg/m3	OUI
		1,2,4,5-tétraméthylbenzène	95-93-2	1	µg/m3	OUI
		p-cymène	99-87-6	2	µg/m3	OUI
		indane	496-11-7	1	µg/m3	OUI
		indène	95-13-6	1	µg/m3	OUI
		styrène	100-42-5	12	µg/m3	OUI
		a-méthylstyrène	98-83-9	3	µg/m3	OUI
		naphthalène	91-20-3	1.2	µg/m3	OUI
		1,2,3,4-tétrahydronaphtalène	119-64-2		µg/m3	OUI
CYCLOALCANES PARAFFINES		méthylcyclopentane	96-37-7	3	µg/m3	OUI
		cyclohexane	110-82-7	9	µg/m3	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		méthylcyclohexane	108-87-2	4	µg/m3	OUI
COV ALIPHATIQUES		n-hexane	110-54-3	8	µg/m3	OUI
		n-heptane	142-82-5	9	µg/m3	OUI
		n-octane	111-65-9	5	µg/m3	OUI
		n-nonane	111-84-2	5	µg/m3	OUI
		n-décane	124-18-5	11	µg/m3	OUI
		n-undécane	1120-21-4	14	µg/m3	OUI
		n-dodécane	112-40-3	9	µg/m3	OUI
		n-tridécane	629-50-5	5	µg/m3	OUI
		n-tétradécane	629-59-4	4	µg/m3	OUI
		nonane/tétradécane	mélange		µg/m3	OUI
		n-pentadécane	629-62-9	3	µg/m3	OUI
		n-hexadécane	544-76-3	2	µg/m3	OUI
		heptadécane	629-78-7	2	µg/m3	OUI
		octadécane	593-45-3	1	µg/m3	OUI
		nonadécane	629-92-5	1*	µg/m3	OUI
		2-méthylpentane	107-83-5	7	µg/m3	OUI
		3-méthylpentane	96-14-0	4	µg/m3	OUI
		2-méthylhexane	591-76-4	4	µg/m3	OUI
		3-méthylhexane	589-34-4	6.3	µg/m3	OUI
		2,3-diméthylpentane	565-59-3	4.4	µg/m3	OUI
		2,2,4-triméthylpentane (isooctane)	540-84-1	1	µg/m3	OUI
		2,3-diméthylheptane	3074-71-3	1	µg/m3	OUI
		2,2,4,6,6-pentaméthylheptane	13 475-82-6	4.8	µg/m3	OUI
		2,2,4,4,6,8,8-heptaméthylnonane	4390-04-9 .	1	µg/m3	OUI
		1-heptène	592-76-7	2	µg/m3	OUI
		1-octène	111-66-0	2	µg/m3	OUI
		1-nonène	124-11-8	2	µg/m3	OUI
		1-décène	872-05-9	2	µg/m3	OUI
		1-undécène	821-95-4	2	µg/m3	OUI
		1-dodécène	112-41-4	2	µg/m3	OUI
		1-tridécène	2437-56-1	2	µg/m3	OUI
		isobutène trimère	7756-94-7	1.5	µg/m3	OUI
		4-vinylcyclohexène VCH	100-40-03	1	µg/m3	OUI
		4-phénylcyclohexène	4994-16-5	1	µg/m3	OUI
		isodécènes	mélange		µg/m3	OUI
COV HALOGÉNÉS		trichloroéthylène	79-01-6	1	µg/m3	OUI
		Perchloréthylène tétrachloréthylène	127-18-4	1	µg/m3	OUI
		1,2-dichloroéthane	107-06-2	1	µg/m3	OUI
		1,2-dichloropropane	78-87-5		µg/m3	OUI
		1,1,1,-trichloroéthane	71-55-6	1	µg/m3	OUI
		1,1,2-trichloroéthane	79-00-5		µg/m3	OUI
		1,2-dibromométhane	106-93-4		µg/m3	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		dichlorméthane	75-09-2		µg/m4	OUI
		trichlorométhane	67-66-3	1	µg/m3	OUI
		tétrachlorométhane	56-23-5	1.5	µg/m3	OUI
		chlorobenzène	108-90-7	1	µg/m3	OUI
		1,2-dichlorobenzène	95-50-1	1	µg/m3	OUI
		1,3-dochlorobenzène	541-73-1	1	µg/m3	OUI
		1,4-dichlorobenzène	106-46-7	1	µg/m3	OUI
		1-chlornaphthalène	90-13-1	1	µg/m3	OUI
CÉTONES		méthyléthylcétone (MEK), butanone	78-93-3	33	µg/m3	OUI
		méthylisobutylcétone MIBK	108-10-1	4	µg/m3	OUI
		2-heptanone	110-43-0	1.9	but	OUI
		3-heptanone	106-35-4	2	µg/m3	OUI
		2-octanone	111-13-7		µg/m3	OUI
		cyclohexanone	108-94-1	5	µg/m3	OUI
		acétophénone	98-86-2	4	µg/m3	OUI
		acétone	67-64-1	161	µg/m3	OUI
		2-pentanone méthylpropyl-cétone	107-87-9	3	µg/m3	OUI
		2-hexanone	591-78-6	1	µg/m3	OUI
TERPÈNES		limonène	138-86-3	23	µg/m3	OUI
		α-pinène	80-56-8	68	µg/m3	OUI
		β-pinène	127-91-3	8.7	µg/m3	OUI
		3-carène	13466-78-9	26	µg/m3	OUI
		α-terpinène	99-86-5	1.5	µg/m3	OUI
		g-terpinène	99-85-4	1.5	µg/m3	OUI
		α-terpinéol	98-55-5	1	µg/m3	OUI
		terpinolène	586-62-9		µg/m3	OUI
		bornéol	507-70-0	1	µg/m3	OUI
		bornylacétate	5655-61-8		µg/m3	OUI
		longifolène	475-20-7	2	µg/m3	OUI
		beta-linalool	78-70-6	1	µg/m3	OUI
		campher	76-22-2	1.5	µg/m3	OUI
		camphen	79-92-5	2.1	µg/m3	OUI
		eucalyptol	470-82-6	2	µg/m3	OUI
		menthol	89-78-1	1	µg/m3	OUI
		b-caryophyllen	87-44-5	1.5	µg/m3	OUI
		linylacétate	115-95-7		µg/m3	OUI
		b-myrcène	123-35-3	2	µg/m3	OUI
ÉTHERS DE GLYCOL	E	butoxyéthanol	111-76-2	13	µg/m3	OUI
	P	butoxypropanol	5131-66-8	3	µg/m3	OUI
	E	butoxyéthoxyéthanol	112-34-5	8	µg/m3	OUI
	E	éthoxyéthoxyéthanol	111-90-0	7	µg/m3	OUI
	E	phénoxyéthanol	122-99-6	5	µg/m3	OUI
	E	méthoxyéthanol	109-86-4	5	µg/m3	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
	E	éthoxyéthanol	110-80-5	2,5	µg/m3	OUI
	P	méthoxypropanol	107-98-2	14	µg/m3	OUI
	P	1,2-propylèneglycol	57-55-6	14	µg/m3	OUI
	E	méthoxyéthoxyéthanol	111-77-3	5	µg/m3	OUI
	E	diéthylèneglycol	111-46-6	10	µg/m3	OUI
	E	hexoxyéthanol	112-25-4	1	µg/m3	OUI
	P	méthoxypropoxypropanol dipropylèneglycolmonométhyléther	34590-94-8	7	µg/m3	OUI
	P	éthoxypropanol	1569-02-4	2	µg/m3	OUI
	P	méthoxypropylacétate	108-65-6	7,8	µg/m3	OUI
	E	éthoxyéthylacétate	111-15-9	2	µg/m3	OUI
	E	Butoxyéthylacétate	112-07-2	1	µg/m3	OUI
	E	MEG - éthylèneglycol	107-21-1	6	µg/m3	OUI
	P	dipropylèneglycol	25265-71-8	5	µg/m3	OUI
	P	tripropylèneglycol	24800-44-0	3	µg/m3	OUI
	P	1-tert.-botoxy-2-propanol	57018-52-7		µg/m3	OUI
	P	3-méthoxybutanol	2517-43-3	1,5	µg/m3	OUI
	E	1-phénoxypropanol	770-35-4, 136-91-0	2	µg/m3	OUI
	E	diéthylèneglycoldiméthyléther	111-96-6	1	µg/m3	OUI
	E	triéthylèneglycolbutyléther	143-22-6	1	µg/m3	OUI
	P	triéthylèneglycoldiméthyléther	112-49-2	2	µg/m3	OUI
	P	dipropylèneglycolmono-n-butyléther	29911-28-2	3	µg/m3	OUI
	P	tripropylèneglycolmonobutyléther	55934-93-5	4	µg/m3	OUI
	E	2-méthoxyéthylacétate	110-49-6	1,5	µg/m3	OUI
	P	3-méthoxybutylacétate	4435-53-4	1	µg/m3	NON
	P	éthylènediglycoacétate	112-15-2		µg/m3	OUI
ESTERS		méthylacétate	79-20-9	6	µg/m3	OUI
		éthylacétate	141-78-6	23	µg/m3	OUI
		n-propylacétate	109-60-4	2	µg/m3	OUI
		isopropylacétate	108-21-4	1,5	µg/m3	OUI
		n-butylacétate	123-86-4	27	µg/m3	OUI
		2-éthylhexylacétate	103-09-3	1	µg/m3	OUI
		n-butylformiate	592-84-7	1	µg/m3	OUI
		méthylbenzoate	93-58-3		µg/m3	OUI
		diméthylsuccinate - Bernsteinsäurediméthylester	106-65-0	3	µg/m3	OUI
		diméthylglutarate - Glutarsäurediméthylester	1119-40-0	2,5	µg/m3	OUI
		diméthyladipate - Adipinsäurediméthylester	627-93-0	2	µg/m3	OUI
		tert.-butylméthyléther	1634-04-4	2	µg/m3	OUI
		dibutoxyméthane	2568-90-3		µg/m3	OUI
		tétrahydrofurane	109-99-9	1	µg/m3	OUI
		2-méthylfurane	534-22-5	1,3	µg/m3	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		2-pentylfurane	3777-69-3	2	µg/m3	OUI
		dioxane	123-91-1	3	µg/m3	OUI
		diéthylcarbonate	105-58-8		µg/m3	OUI
		texanol	25265-77-4	2	µg/m3	OUI
		texanoldiisobutyrate (TXIB)	6846-50-0	3	µg/m3	OUI
		isobutylacétate	110-19-0	2	µg/m3	OUI
		DGB-acétate butyldiglykoacétate	124-17-4	1,5	µg/m3	OUI
		méthylacrylate	96-33-3	1	µg/m3	OUI
		méthylmetacrylate	80-62-6	1,5	µg/m3	OUI
		n-butylacrylate	141-32-2	1	µg/m3	OUI
		2-éthylhexylacrylate	103-11-7	1	µg/m3	OUI
ALCOOLS		1-propanol	71-23-8	18	µg/m3	OUI
		2-propanol	67-63-0	91	µg/m3	OUI
		1-butanol	71-36-3	35	µg/m3	OUI
		iso-butanol	78-83-1	10	µg/m3	OUI
		1-pentanol	71-41-0	5.4	µg/m3	OUI
		1-hexanol	111-27-3	1	µg/m3	OUI
		2-éthyl-1-hexanol	104-76-7	13	µg/m3	OUI
		1-nonanol	143-08-8	1	µg/m3	OUI
		1-décanol	112-30-1	1.5	µg/m3	OUI
		2,6-di-tert.-butyl-4-méthylphénol	128-37-0	1	µg/m3	OUI
		alcool benzylique	100-51-6	4.6	µg/m3	OUI
SILOXANES		hexaméthylcyclotrisiloxane D3	541-05-9	16	µg/m3	OUI
		octaméthylcyclotétrasiloxane D4	556-67-2	7	µg/m3	OUI
		décaméthylcyclopentasiloxane D5	541-02-6	22	µg/m3	OUI
		dodécaméthylcyclohexasiloxane D6	540-97-6	11	µg/m3	OUI
PHÉNOLS		phénol	108-95-2	3	µg/m3	OUI
		2-méthylphénol o-crésol	95-48-7	1	µg/m3	OUI
		3,4-méthylphénol m/p-crésol	108-39-4 106-44-5	1	µg/m3	OUI
		n-méthylpyrrolidone	872-50-4	2	µg/m3	OUI
AUTRES		butanonoxime	92-29-7	3.6	µg/m3	OUI
		acétonoxime	127-06-0		µg/m3	OUI
		pentanonoxime	623-40-5		µg/m3	OUI
		caprolactame	105-60-2	2	µg/m3	OUI
		diméthylformamide	68-12-2		µg/m3	OUI
		diméthylacétamide	127-19-5		µg/m3	OUI
		benzothiazole	95-16-9	1	µg/m3	OUI
		méthylisothiazolinone	2682-20-4	1	µg/m3	OUI
		2-chlornaphthalène	91-58-7	1	µg/m3	NON
ALDÉHYDES		formaldéhyde	50-00-0	30	µg/m3	OUI
		acétaldéhyde	75-07-0	54	µg/m3	OUI
		propanal	123-38-6	14	µg/m3	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		butanal	123-72-8	10	µg/m3	OUI
		pentanal	110-62-3	20	µg/m3	OUI
		hexanal	66-25-1	55	µg/m3	OUI
		heptanal	111-71-7	6.7	µg/m3	OUI
		octanal	124-13-0	8	µg/m3	OUI
		nonanal	124-19-6	19	µg/m3	OUI
		décanal	112-31-2	7	µg/m3	OUI
		benzaldéhyde	100-52-7	15	µg/m3	OUI
		n-undécanal	112-44-7	1	µg/m3	OUI
		méthylpropanal	78-74-2		µg/m3	OUI
		tolualdéhyde 4-méthylbenzaldéhyde	104-87-0	1.3	µg/m3	OUI
		acroleine	107-02-8	5	µg/m3	NON
		crotonaldéhyde trans-2-buténal	4170-30-3	2	µg/m3	OUI
		méthylbutanal	590-86-3	3	µg/m3	OUI
		éthylhexanal	123-05-7	2	µg/m3	OUI
		furfural	98-01-1	4	µg/m3	OUI
		méthacroleine, méthyl-2-propenal	78-85-3	3	µg/m3	OUI
		2-hexénal	6728-26-3	1	µg/m3	OUI
		2-hepténal	2463-63-0	1	µg/m3	OUI
		2-octénal	2548-87-0	1	µg/m3	OUI
		2-nonénal	18829-56-6	1	µg/m3	OUI
		2-décénal	3913-71-1	1	µg/m3	OUI
		2,5-diméthylbenzaldéhyde	5779-94-2		µg/m3	OUI
AUTRES		bisphénol A	80-05-7	7	mg/kg	OUI
BIOCIDES		aldrine	309-00-2	0,2	mg/kg	OUI
		azaconazole	60207-31-0	1	mg/kg	QuEChERS
		bendiocarb	22781-23-3	1	mg/kg	OUI
		bromophos	2104-96-3	1	mg/kg	OUI
		carbaryl	63-25-2	1	mg/kg	OUI
		chlordane	51403-71-9	1	mg/kg	OUI
		p-Chlor-m-crésol	59-50-7	1	mg/kg	OUI
		1-Chlor-naphtalène	90-130-1	1	mg/kg	OUI
		2-Chlornaphtalene	91-58-7	1	mg/kg	OUI
		chlorothalonil	1897-45-6	1	mg/kg	OUI
		chlorpyriphos	2921-88-2	1	mg/kg	OUI
		DDE	72-55-9	1	mg/kg	OUI
		DDD	72-54-8	1	mg/kg	OUI
		DDT	50-19-3	1	mg/kg	OUI
		diazinone	333-41-5	1	mg/kg	OUI
		dichlorvos/Naled	63-73-7	1	mg/kg	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		dicofol	115-32-2	1	mg/kg	OUI
		dichlofluanide	1085-98-9	1	mg/kg	OUI
		diéldrine	60-57-1	1	mg/kg	OUI
		a-endosulfane	959-98-8	1	mg/kg	OUI
		b-endosulfane	33213-65-9	1	mg/kg	OUI
		endrine	72-20-8	1	mg/kg	OUI
		éthylparathion E605	56-38-2	1	mg/kg	OUI
		Eulan (PCSD/PCAD)	3687-70-5 55069-01-7	1	mg/kg	OUI
		fenobucarb	3766-81-2	1	mg/kg	OUI
		furmécylox	60568-05-0	1	mg/kg	OUI
		heptachlor	76-44-8	1	mg/kg	OUI
		hexachlorobenzène HCB	118-74-1	1	mg/kg	OUI
		delta-hexachlorocyclohexane	319-86-8	1	mg/kg	NON
		heptachloroépoxyde	1024-57-3	1	mg/kg	OUI
		α-HCH alpha-hexachlorocyclohexane	319-84-6	1	mg/kg	OUI
		β-HCH beta-hexachlorocyclohexane	319-85-7	1	mg/kg	OUI
		hexachlorophène	70-30-4	1	mg/kg	QuEChERS
		lindane	58-89-9	1	mg/kg	OUI
		malathion	121-75-5	1	mg/kg	OUI
		méthoxychlor	72-43-5	1	mg/kg	OUI
		ométhoate	1113-02-6	1	mg/kg	QuEChERS
		pentachlorophénol (PCP)	87-86-5	1	mg/kg	OUI
BIOCIDES		o-phénylphénol	90-43-7	1	mg/kg	QuEChERS
		p-nitrophénol	100-02-7	1	mg/kg	QuEChERS
		penconazol	66246-88-6	1	mg/kg	QuEChERS
		phosmet	732-11-6	1	mg/kg	QuEChERS
		phoxime	14816-18-3	1	mg/kg	QuEChERS
		pirimiphos-méthyl	29232-93-7	1	mg/kg	QuEChERS
		propiconazole	60207-90-1	1	mg/kg	OUI
		propoxur	114-26-1	1	mg/kg	OUI
		pyriméthanil	53112-28-0	1	mg/kg	QuEChERS
		tébuconazole	107534-96-3	1	mg/kg	OUI
		tétrachlorvinphos	22248-79-9	1	mg/kg	OUI
		tolyfluanide	731-27-1	1	mg/kg	OUI
		tributyloxyde d'étain (TBTO)	56-35-9	1	mg/kg	OUI
		trichloranisoles (mélange d'isomères)		1	mg/kg	OUI
		tribromophénol	118-79-6	1	mg/kg	QuEChERS
		3-iodo-2-propinylcarbamate (IPBC)	55406-53-6	1	mg/kg	OUI
		2,3,4,6-tétrachlorophénol	58-90-2	1	mg/kg	QuEChERS

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		2,3,5,6-tétrachlorophénol	935-95-5	1	mg/kg	QuEChERS
RF ORGANOPHOSPHORÉS		tributylphosphate (TBP)	126-73-8	50	mg/kg	OUI
		triphénylphosphate (TPP)	115-86-6	50	mg/kg	OUI
		tris-(2-butoxyéthyl)phosphate (TBEP)	78-51-3	50	mg/kg	OUI
		tris-(2-chloropropyl)phosphate (TCEP)	115-96-8	2	mg/kg	OUI
		tris-(3-chloropropyl)phosphate (TCPP)	13674-84-5 6145-73-9	2	mg/kg	OUI
		tris-(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate (TdCPP)	13674-87-8 78-43-3	2	mg/kg	OUI
		tris-(2-éthylhexyl)phosphate (TEHP)	78-42-2	50	mg/kg	OUI
		trikresylphosphate	1330-78-5	50	mg/kg	OUI
		triméthylphosphate	512-56-1	50	mg/kg	NON
		triéthylphosphate	78-40-0	50	mg/kg	NON
		phénydikrésylphosphate	26446-73-1	50	mg/kg	NON
RF POLYBROMÉS (PBDE)		tribromodiphényléther (triBDE)	41318-75-6	1	mg/kg	PBDE
		tétabromodiphényléther (tétraBDE)	5436-43-1 40088-47-9	1	mg/kg	PBDE
		pentabromodiphényléther (pentaBDE)	32534-81-9	1	mg/kg	PBDE
		hexabromodiphényléther (hexaBDE)	68631-49-2 36483-60-0	1	mg/kg	PBDE
		heptabromodiphényléther (heptaBDE)	68631-49-2 68928-80-3	1	mg/kg	PBDE
		octabromodiphényléther (octaBDE)	32536-52-0	1	mg/kg	PBDE
		nonabromodiphényléther (nonaBDE)	63936-56-1	1	mg/kg	PBDE
		décabromodiphényléther (décaBDE)	1163-19-5	1	mg/kg	PBDE
		somme PBDE		2	mg/kg	OUI
RF POLYBROMÉS (PBB)		hexabromobiphényle	36355-01-8	1	mg/kg	PBB
		heptabromobiphényle	35194-78-6	1	mg/kg	PBB
		octabromobiphényle	27858-07-7	1	mg/kg	PBB
		nonabromobiphényle	27753-52-2	1	mg/kg	PBB
		décabromobiphényle	13654-09-6	1	mg/kg	PBB
		tétabromobisphénol A	79-94-7	1	mg/kg	OUI
PYRÉTHRINOÏDES		alléthrine	584-79-2	1	mg/kg	OUI
		bioresméthrine	28434-01-7	1	mg/kg	OUI
		perméthrine	52645-53-1	1	mg/kg	OUI
		pyréthrine	121-21-1	1	mg/kg	OUI
		cyfluthrine	686359-37-5	1	mg/kg	OUI
		cyperméthrine	52315-07-8	1	mg/kg	OUI
		deltaméthrine	52918-63-5	1	mg/kg	OUI
		fenvalérate	51630-58-1	1	mg/kg	OUI
		phénotrène	26002-80-2	1	mg/kg	OUI
		pipéronyl butoxide	51-03-6	1	mg/kg	OUI
		tétraméthrine	7696-12-0	1	mg/kg	OUI
		cyhalothrine	91465-08-6	1	mg/kg	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		transfluthrine	118712-89-3	1	mg/kg	QuEChERS
		emphénthrine	54406-48-3	1	mg/kg	QuEChERS
		pralléthrine	23031-36-9	1	mg/kg	QuEChERS
		cyphénotrène	39515-40-7	1	mg/kg	QuEChERS
		esfenvalérate	66230-04-4	1	mg/kg	QuEChERS
PCB		# 28	7012-37-5	1	mg/kg	OUI
		# 52	41464-40-8	1	mg/kg	OUI
		# 101	37680-73-2	1	mg/kg	OUI
		# 138	35694-06-5	1	mg/kg	OUI
		# 153	35065-27-1	1	mg/kg	OUI
		# 180	35065-29-3	1	mg/kg	OUI
		# 118	31508-00-6	1	mg/kg	NON
		# 77	32598-3	1	mg/kg	NON
		# 126	57465-28-8	1	mg/kg	NON
		# 169	32774-16-6	1	mg/kg	NON
		somme PCB		2	mg/kg	OUI
PHTHALATES		diméthylphtalate (DMP)	131-11-3	5	mg/kg	OUI
		diéthylphtalate (DEP)	84-66-2	79	mg/kg	OUI
		dibutylphtalate (DBP)	84-74-2	240	mg/kg	OUI
		benzylbutylphtalate (BBP)	85-68-7	150	mg/kg	OUI
		di(2-éthylhexyl)phtalate (DEHP)	117-81-7	2320	mg/kg	OUI
		dioctylphtalate (DOP)	131-15-7 117-84-0	5.3	mg/kg	OUI
		diisooctylphtalate (DiOP)	27554-26-3		mg/kg	NON
		diisononylphtalate (DiNP)	68515-48-0	380	mg/kg	OUI
		diisobutylphtalate (DiBP)	84-69-5	300	mg/kg	OUI
		dipropylphtalate	131-16-8		mg/kg	NON
		diisodécylphtalate	26761-40-0 68515-49-1		mg/kg	NON
		di-méthoxyéthyl-phtalate	117-82-8	2	mg/kg	NON
		dipentylphtalate	131-80-0	2	mg/kg	NON
		dioctyladipate	123-79-5		mg/kg	NON
		di(2-éthylhexyl)adipate	103-23-1		mg/kg	OUI
		anhydride phtalique	85-44-9		mg/kg	OUI
		di(2-éthylhexyl)isophtalate	137-89-3		mg/kg	NON
		di(2-éthylhexyl)terephthalate	6422-86-2		mg/kg	NON
HAP		naphtalène	91-20-3	1	mg/kg	OUI
		Acénaphthylène	208-96-8	1	mg/kg	OUI
		Acénaphthène	83-32-9	1	mg/kg	OUI
		Fluorène	86-73-7	1	mg/kg	OUI
		Phénanthrène	85-01-8	1	mg/kg	OUI
		Anthracène	191-26-4	1	mg/kg	OUI
		Fluoranthène	206-44-0	1	mg/kg	OUI
		Pyrène	129-00-0	1	mg/kg	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		benzo(a)anthracène	92-24-0	1	mg/kg	OUI
		Chrysène	218-01-9	1	mg/kg	OUI
		benzo(b)fluoranthène	205-99-2	1	mg/kg	OUI
		benzo(k)fluoranthène	207-09-9	1	mg/kg	OUI
		benzo(a)pyrène	50-32-8	1	mg/kg	OUI
		indeno(1,2,3-c,d)pyrène	193-39-5	1	mg/kg	OUI
		dibenzo(a,h)anthracène	53-70-3	1	mg/kg	OUI
		benzo(g,h,i)perylène	191-24-2	1	mg/kg	OUI
		1-méthylnaphtalène	90-12-0	1	mg/kg	NON
		2-méthylnaphtalène	91-57-6	1	mg/kg	NON
		somme HAP		10	mg/kg	OUI
CONSERVATEURS ISOTHIAZOLINONES		5-chlor-2-méthyl4isothiazolin-3-on	26172-55-4	1	mg/kg	OUI
		2-n-octyl4isothiazolin3on	26530-20-1	1	mg/kg	OUI
PFAS - PFCA ACIDES PERFLUOROCARBOXYLIQUES	?	PFBA acide perfluorobutanoïque	375-22-4		µg/kg	OUI
	?	PFPA acide perfluoropentanoïque	2706-90-3		µg/kg	OUI
	?	PFHxA acide perfluorohexanoïque	307-24-4		µg/kg	OUI
		PFHpA acide perfluoroheptanoïque	375-85-9		µg/kg	OUI
		PFOA acide perfluorooctanoïque	335-67-1		µg/kg	OUI
		PFNA acide heptadécafluorononanoïque	375-95-1		µg/kg	OUI
		PFDA acide perfluorodécanoïque	335-76-2		µg/kg	OUI
	?	PFUnA acide perfluoro-n-undécanoïque	2058-94-8		µg/kg	OUI
	?	PFDoA acide perfluorododécanoïque	307-55-1		µg/kg	OUI
	?	PFTTrDA acide perfluorotridécanoïque	72629-94-8		µg/kg	OUI
	?	PFTeDA acide perfluorotétradécanoïque (PFTDA)	376-06-7		µg/kg	OUI
PFAS ACIDES SULFONIQUES	?	PFBS acide perfluorobutanesulfonique	375-73-5		µg/kg	OUI
	?	PFPS acide perfluoropentanesulfonique	2706-91-4		µg/kg	OUI
		PFHxS perfluorohexane sulfonate (PFHS)	355-46-4		µg/kg	OUI
	?	PFHpS acide perfluoropentanesulfonique	375-92-8		µg/kg	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		PFOS acide perfluorooctanesulfonique	1763-23-1		µg/kg	OUI
	?	PFNS acide perfluorononanesulfonique	47511-07-4		µg/kg	OUI
	?	PFDS perfluorodécane sulfonate	335-77-3		µg/kg	OUI
	?	PFOUnDS acide perfluoroundécanesulfonique	749786-16-1		µg/kg	OUI
	?	PFOdoDS perfluorododécanesulfonate	79780-39-5		µg/kg	OUI
	?	PFOTrDS acide perfluorotridécanesulfonique	72629-94-8		µg/kg	OUI
PFAS SULFONAMIDES PRÉCURSEURS	?	PFOSA perfluorooctanesulfonamide (FOSA)	754-91-6		µg/kg	OUI
	?	N-Me-FOSA -N-méthyl- perfluorooctanesulfonamide	31506-32-8		µg/kg	OUI
	?	N-Et-FOSA -N-éthyl- perfluorooctanesulfonamide	4151-50-2		µg/kg	OUI
	?	N-Me-FOSAA-acide-n- méthylperfluorooctanesulfonamideacétique	2355-31-9		µg/kg	OUI
	?	N-Et-FOSAA-acide-n- éthylperfluorooctanesulfonamideacétique	2991-50-6		µg/kg	OUI
MÉTAUX LOURDS OU NOCIFS		argent (Ag)			µg/g	OUI
		aluminium (Al)			µg/g	OUI
		arsenic (As)		3	µg/g	OUI
		barium (Ba)			µg/g	OUI
		béryllium (Be)			µg/g	OUI
		cadmium (Cd)		5	µg/g	OUI
		cobalt (Co)		5	µg/g	OUI
		cuivre (Cu)		500	µg/g	OUI
		chrome (Cr)		200	µg/g	OUI
		fer (Fe)			µg/g	OUI
		gallium (Ga)			µg/g	OUI
		mercure (Hg)		1	µg/g	OUI
		lithium (Li)			µg/g	OUI
		magnésium (Mg)			µg/g	OUI
		manganèse (Mn)			µg/g	OUI
		molybdène (Mo)			µg/g	OUI
		nickel (Ni)		30	µg/g	OUI
		plomb (Pb)		150	µg/g	OUI
		palladium (Pd)			µg/g	OUI
		platine (Pt)			µg/g	OUI
		antimoine (Sb)		3	µg/g	OUI
		sélénium (Se)			µg/g	OUI
		étain (Sn)		50	µg/g	OUI
		strontium (Sr)			µg/g	OUI

	NOCIVITÉ	SUBSTANCES	CAS	VO 1	UNITÉ	CLAIRE
		titane (Ti)			µg/g	OUI
		thallium (Tl)			µg/g	OUI
		uranium (U)			µg/g	OUI
		vanadium (V)			µg/g	OUI
		zinc (Zn)		1500	µg/g	OUI
		zirconium (Zr)			µg/g	OUI

Littérature consultée (cf. Littérature)

ANSES, 2015 : *Évaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés*
 Bayrisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, 2010 : *Vorkommen und gesundheitliche Bewertung von Siloxanen*
 Bundesgesundheitsblatt, 2020 : *Richtwerte für Benzothiazol in der Innenraumluft*
 Europäische Gesellschaft für gesundes Bauen und Innenraumhygiene EGGBI, 2021 : *Konservierungsmittel Isothiazolinon*
 Kurzweil et al. 2013 *Toxikologie und Gefahrstoffe*
 Lippmann et al. 2020 *Environmental Toxicants*
 Marquardt et al. 1997 : *Lehrbuch der Toxikologie*
 Marquardt et al. 2019 : *Toxikologie*
 Umweltbundesamt, 2007 : *Phthalate: die nützlichen Weichmacher mit den unerwünschten Eigenschaften*

Annexe A1 : Mode opératoire de la base de données CLAIRE

A1.1. Préanalyse

Une préanalyse est faite sur base des données relatives au matériau ou produit de construction, en l'occurrence :

- Les fiches techniques
- Les fiches de sécurité
- Les EPD
- Ou toute autre information décrivant le matériau ou produit en question

Suivant le degré de nocivité des polluants identifiés d'après ces informations, le matériau est caractérisé par un code couleur (à ce titre le polluant le moins favorable, donc le plus nocif sera déterminant pour l'attribution de la couleur du matériau). Les matériaux de construction ne renfermant aucun polluant de couleur orange ou rouge selon les informations disponibles sont ensuite vérifiés ou contrôlés au moyen d'une analyse chimique détaillée (laboratoire accrédité).

A1.2. Analyses de matériaux de construction

A1.2.1. Préparation et envoi

Il faut faire la distinction entre matériaux solides, liquides et produits sous forme de poudres. Les matériaux ou produits de construction sont recueillis de préférence dans leur emballage d'origine soit dans des emballages non émissifs qui ne renferment pas les substances nocives recherchées lors des analyses de laboratoire.

Les échantillons sont ensuite préparés de façon suivante :

- **Solides :**

La taille optimale de l'échantillon est de :

- 20 x 8 cm si la largeur est inférieure à 2 cm
- 20 x 7 cm si la largeur est supérieure à 2 cm

Les échantillons solides sont enveloppés dans du papier aluminium et envoyés au laboratoire. Il faut prévoir 2 échantillons séparés pour le laboratoire.

- **Liquides et poudres :**

- Pour les liquides la quantité minimale à envoyer au laboratoire est de 750 ml. Les liquides et les poudres sont à envoyer soit dans leurs emballages d'origine, soit dans des boîtes métalliques de 0.75 litres.

Ainsi il faudra donc remplir une boîte métallique soit avec le liquide soit avec la poudre en question.

F 24 : Boîte métallique pour envoi des échantillons liquides ou en poudre



A1.2.2. Préparation au laboratoire

Au laboratoire les échantillons sont préparés de la façon suivante :

- Solides : sont utilisés tels quels
- Poudres : sont utilisées telles quelles
- Liquides : sont appliqués sur un support 1 semaine avant les analyses proprement dites et laissés au séchage pendant sept jours

Les supports sont en plaque acier, en bois ou en papier :

- Bois pour les **lasures de bois (qui doivent pénétrer à l'intérieur du support)**
- Acier pour **laques, colles et enduits**
- Papier pour **peintures et lasures c.à.d. des produits** qui de façon explicite ne doivent pas être appliquées sur les supports métalliques ou qui ne nécessitent pas de supports absorbants

A1.2.3. Analyse de laboratoire

L'analyse de COSV et de métaux lourds se fait directement dans le matériau (sauf le mercure qui est mesuré en tant qu'émission similaire aux COV et aldéhydes).

Les analyses de COV et d'aldéhydes se font par émission dans une chambre test de 5,2 litres avec un renouvellement d'air de 0,5/h (soit 0,05 litres/min, donc 3 litres sur un volume de 5,2 litres).

Les analyses se font selon des méthodes accréditées :

T 22 : Analyses de laboratoire des matériaux de construction

SUBSTANCES GROUPEES	MÉTHODE	ACRRÉDITATION	NOMBRE DE SUBSTANCES
COV	GC-MS	DIN ISO 16000-6	< 218
ALDÉHYDES	HPLC-UV	DIN ISO 16000-3	26
COSV	GC-MS, LC-MS	DFG-S19 ASU L 00.00-115 QuEchERS	< 192
MÉTAUX LOURDS	ICP-MS	DIN 38406-E29	30

F 25 : Dispositif d'analyse des émissions en substances volatiles provenant de matériaux de construction



Les limites de détection sont de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (sauf exceptions) pour les COV, 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les aldéhydes, de 0,2 mg/kg pour les COSV et de 1 mg/kg (sauf exceptions) pour les métaux lourds.

A1.3. Interprétation des résultats d'analyse

A1.3.1. Seuils et valeurs d'orientation

L'interprétation des résultats des analyses est faite par le MECO.

Les limites appliquées sont les suivantes :

- Pour les COV et les aldéhydes : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'air de la chambre
- Pour les COSV : 3 mg/kg de matériau
- Pour les métaux lourds : Hg et Cd 2 mg/kg, As 10 mg/kg, Pb 50 mg/kg de matériau

Ces valeurs limites s'expliquent par la façon de procéder suivante :

Pour les COSV la limite de détection de 1 mg/kg est majorée de 100% pour tenir compte des imprécisions dues à l'analyse même ainsi qu'à la manipulation (Messfehler & Messungenauigkeit), donc 2 mg/kg. Les

valeurs décimales sont ensuite arrondies vers le bas (2,3 ou 2,9 sont arrondies vers le bas à 2 mg/kg). Une valeur supérieure à la limite de 2 équivaut donc à 3 mg/kg, d'où la limite effective de 3 mg/kg.

Par analogie la valeur de 10 µg/m³ pour les COV et les aldéhydes est majorée de 100% à 20 µg/m³ pour tenir compte des imprécisions et les valeurs unitaires sont arrondies vers le bas (23 ou 29 µg/m³ sont ramenées à 20 µg/m³). De sorte que la limite effective est de 30 µg/m³. Pour les métaux lourds, des limites individuelles sont appliquées pour les métaux toxiques, en l'occurrence les nickel, plomb, mercure, cadmium, arsenic, barium, béryllium, titane, uranium, vanadium, cobalt, chrome, antimoine ou strontium.

A1.3.2. Classification santé des substances chimiques, matériaux et produits de construction

Les matériaux de construction sont classés en fonction de la toxicité ou nocivité des substances chimiques y contenues en deux étapes.

1. Classification santé des substances chimiques

Les substances sont classifiées selon un code couleur en fonction de leur nocivité en 4 couleurs distinctes :

Les substances sont classifiées selon un code couleur en fonction de leur nocivité :

-  **Vert** : absence de toute substance nocive émissive connue ou COV classiques s'évaporant totalement en 2-3 semaines (ne posant donc pas de problèmes à moyen terme) et provoquant des troubles de santé réversibles et transitoires tels que nausées, maux de tête, vertiges ;
-  **Jaune** : substances irritantes ou allergisantes
-  **Orange** : substances neurotoxiques ou substances capables d'engendrer des troubles respiratoires ou perturbateurs endocriniens ;
-  **Rouge** : présence de substances cancérigènes (CMR), neurodégénératives. Ces substances sont généralement persistantes, bioaccumulables (PBT, vPvB) et les effets de santé sont irréversibles

2. Classification du matériau analysé

Les matériaux ou produits de construction sont classés dans une des quatre couleurs correspondant au polluant (substance nocive) le plus nocif ou toxique mis en évidence. Ainsi la présence d'un polluant cancérigène (code couleur rouge) détecté dans une concentration dépassant le seuil mentionné (3 mg/kg si COSV ou 30 µg/m³ si COV/ aldéhyde), engendre automatiquement que le matériau est classé « rouge ». L'absence de polluants rouges ou oranges avec une présence d'un polluant « irritant ou allergisant » (code couleur jaune) engendre que le matériau est classé « jaune », etc.

- **Catégorie 1 (verte)** : contient des substances à effets temporaires et réversibles (maux de tête, vertiges, nausées) ou absence de substances nocives
- **Catégorie 2 (jaune)** : contient des substances irritantes ou allergisantes, non bio-accumulatrices
- **Catégorie 3 (orange)** : contient des substances neurotoxiques, toxiques pour le système respiratoire ou perturbateurs endocriniens,
- **Catégorie 4 (rouge)** : contient des substances cancérigènes (CMR), neurodégénératives irréversibles et bio-accumulatrices, persistantes (PBT, vPvB)

Banque de données

Les matériaux ou produits sont ensuite repris dans une banque de données publiques.

Pour finir, lorsque le produit ou matériau analysé ne contient aucune des substances nocives ou paramètres problématiques recherchés ou lorsqu'il ne contient que des polluants à effets réversibles et transitoires, il est coloré en vert, indiquant que le matériau/produit peut être utilisé en toute sécurité. À l'inverse lorsque le matériau/produit est coloré en rouge ou en orange, des risques pour la santé des utilisateurs ou occupants ne peuvent être exclus étant donné que le matériau/produit en question est susceptible d'émettre des polluants nocifs. Lorsque ces émissions se limitent à des polluants peu agressifs qui peuvent néanmoins s'avérer problématiques pour des personnes sensibles ou vulnérables, le matériau/produit est codé en jaune.

Seules les deux premières catégories (vert et jaune) constituent la liste positive et sont accessibles au grand public (claire-construction.lu). Les catégories 3 et 4 (orange et rouge) ne sont pas accessibles publiquement mais uniquement pour un public restreint (professionnels de la construction, experts H²E, ...).

Annexe A2 : Projet Pilote liste positive CLAIRE (CLEAN AIR & ENVIRONMENT)

Contexte politique du projet pilote

En 2018 le gouvernement et notamment les ministères de l'énergie MEA (direction construction durable et économie circulaire), de l'environnement MECDD (contexte PRIMeHouse) et du logement (contexte LENOZ) ont décidé d'élaborer une liste positive concernant des matériaux de construction qui ne contiennent pas de substances nocives susceptibles de polluer l'air intérieur des bâtiments. Cette liste est destinée aux professionnels de la construction et au public et devrait dès lors constituer un instrument de prédilection en vue de constructions saines. (voir encadré)

Accord de coalition 2018-2023 en ce qui concerne la construction les notions de biologie de l'habitat et de santé et de la nocivité des matériaux de construction :

- Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement Durable : Dans le cadre de la « PRIMe House », l'évaluation environnementale des matériaux de construction sera complétée par une évaluation des risques liés à la santé et par des critères d'économie circulaire (p.171)
- Afin de réussir la transition vers une économie circulaire, un prérequis essentiel sera l'identification et la gestion durable des produits chimiques dans nos produits de consommation. Une meilleure traçabilité des différents produits chimiques pourra aider à identifier les filières d'utilisation et de réutilisation dans un concept d'économie circulaire (principe de listes positives) (p. 177).

Et le Plan National de l'Environnement et du Climat (PNEC) élaboré en 2020 conjointement par le MECDD et le MEA définit le cadre de la politique énergétique et climatique jusqu'en 2030 :

- Développement durable et santé dans le domaine de la construction (p 117)
Outre un ancrage plus fort du développement durable, des aspects tels que la santé et le bien-être seront également intégrés lors de la construction de nouveaux bâtiments résidentiels et non résidentiels. Ceci sera mis en œuvre à travers l'intégration d'éléments dans le passeport énergétique national, le certificat de durabilité « LENOZ » et la création d'un nouveau label. Les matériaux de construction toxiques et nocifs seront interdits et une liste positive des matériaux de construction contenant des matériaux naturels et écologiques sera établie.
- Subventions étatiques PRIMe House pour les bâtiments résidentiels (p. 86-87)
Le régime d'aides PRIMe House (loi du 23 décembre 2016 instituant un régime d'aides pour la promotion de la durabilité, de l'utilisation rationnelle de l'énergie et des énergies renouvelables dans le domaine du logement) offre des aides à l'investissement pour la rénovation énergétique et durable des bâtiments résidentiels ainsi que les conseils appropriés et qualifiés en matière d'énergie pour la construction de bâtiments résidentiels durables et l'utilisation d'énergies renouvelables (systèmes solaires photovoltaïques, systèmes solaires thermiques, systèmes à pompes à chaleur, systèmes à granulés de bois et chaudières à copeaux de bois). Le régime d'aides a été prolongé et réformé à plusieurs reprises depuis 2001. Le régime actuel s'applique jusque fin 2020.

Les aspects suivants sont au centre des préoccupations quant à l'évolution et l'amélioration du régime :

- Révision des montants octroyés et adaptation si nécessaire
- Intégration de critères de durabilité supplémentaires, notamment pour promouvoir l'économie circulaire
- Introduction de critères visant à réduire les risques pour la santé dans les bâtiments résidentiels
Le ministère de la santé dans son avis du concernant le PNEC du 3 mars 2020 « propose de mettre en valeur via un label les matériaux écologiques favorables à la santé ce qui augmenterait leur visibilité auprès du secteur ».

Dans une première phase, plusieurs centaines de matériaux ont été analysés dans le cadre d'un projet pilote permettant non seulement de constituer une amorce de cette liste positive mais également et surtout d'évaluer l'approche et le cas échéant d'adapter la procédure. En effet, le principe devra absolument être validé d'un point de vue scientifique et juridique.

Réalisation de l'étude-pilote

Durant les années 2021 et 2022, le MEA et Neobuild ont procédé à l'analyse d'une centaine de matériaux ou produits de construction relatifs à la mise en évidence d'éventuelles substances nocives contenues dans le matériau en question et susceptibles de contaminer l'air intérieur et de porter ainsi préjudice à la santé et au bien-être des occupants.

Cette étude pilote vise l'analyse de produits ou matériaux de construction en matière de polluants nocifs pour la santé humaine des occupants de bâtiments. Le but est de classer les matériaux de construction en fonction de leur impact potentiel sur la santé et le bien-être des occupants et de réaliser une « liste positive » de matériaux de construction non nocifs. Cette liste sera au service des futures maîtres d'ouvrage et des professionnels de la construction, voire au système étatique de subvention dans le cadre de constructions durables.

Information sur les critères du classement CLAIRE et de la « liste positive »

CLAIRE est un caméléon qui peut changer de couleur rapidement et spontanément en fonction des résultats des analyses des matériaux ou produits en question. Comme tout caméléon, CLAIRE peut réagir ainsi rapidement à tout changement dans la composition d'un matériau de construction. CLAIRE est destiné à aider les maîtres d'ouvrage et les professionnels de la construction dans le choix des matériaux et des produits de construction qui ne nuisent pas à la santé humaine.

La banque de données se veut être une liste positive, promouvant les matériaux et produits exempts de polluants chimiques nocifs. C'est pourquoi uniquement ces matériaux/produits exempts de substances nocives ou exempts de substances à effets « graves » pour la santé humaine sont accessibles au public dans la banque de données.



CLAIRE vert - A

Le matériau ou produit ne présente pas de risque à moyen ou long terme étant donné qu'il ne renferme soit pas de polluants connus, soit des COV qui se volatilisent complètement endéans de quelques semaines, soit des polluants à symptômes passagers et réversibles (maux de tête, vertiges, nausées).



• CLAIRE jaune - B

Le matériau ou produit ne présente qu'un risque mineur dans le sens où les substances y retrouvées sont irritantes pour les muqueuses ou allergisantes. Ces matériaux peuvent présenter un risque notamment pour les personnes sensibles ou vulnérables.



• CLAIRE orange - C

Le matériau ou produit renferme des polluants à risque pour la santé de l'occupant exposé de sorte que le matériau est à éviter dans le sens d'une précaution de santé. Ces substances sont soit neurotoxiques soit toxiques pour le système respiratoire ou appartiennent à la famille des perturbateurs endocriniens (substances hormono-actives). Les polluants de cette catégorie sont en partie persistantes.



• CLAIRE rouge - D

Le matériau renferme des substances constituant un risque réel et accru pour la santé des utilisateurs. Ces produits sont à éviter dans le sens d'une précaution de santé. Les substances concernées sont soit cancérigènes, neurotoxiques irréversibles, persistantes ou bioaccumulatrices (PBT, vPvB).

A2.1. Échantillonnage

Les matériaux de construction usuels au Luxembourg ont été examinés en deux étapes : une **préanalyse par consultation des fiches** de données relatives au matériau et une **analyse de laboratoire** pour certains matériaux ayant été jugés non nocifs selon la préanalyse. Le choix des matériaux à tester, la récolte des données, la récolte des matériaux à analyser et l'envoi au laboratoire ont été réalisés par Neobuild.

L'évaluation des données lors de la préanalyse ainsi que l'évaluation des résultats de laboratoire ont été réalisés par l'expert du ministère de l'énergie. Les frais d'échantillonnage et des analyses en laboratoire ont été portés par le Fonds Climat Énergie.

La sélection des matériaux à analyser a été réalisé ensemble par les experts du ministère de l'énergie et ceux de Neobuild suivant les critères suivants :

- 1) Absence de polluants nocifs éliminatoires selon les critères CLAIRE (voir plus loin)
- 2) Contact directe ou indirecte avec l'environnement intérieur et donc influence potentielle sur la qualité de l'air intérieur
- 3) Priorité donnée aux types de produits pour lesquels la liste positive n'a pas encore identifié des matériaux exempts de polluants nocifs

La sélection des matériaux à tester a été précédée d'une analyse de marché.

A2.1.1. Analyse de marché par Neobuild

Dans le cadre de l'analyse de marché réalisée par Neobuild, 31 entreprises ont été contactées avec la demande d'identifier les matériaux utilisés quotidiennement sur les chantiers luxembourgeois. La moitié des entreprises (16) n'ont pas donné suite à cette prise de contact. En revanche, 15 entreprises ont répondu favorablement. De plus, 57 entreprises établies dans la la mise en place de systèmes de ventilations mécaniques ont été contactées.

A2.1.2. Sélection de matériaux

Les matériaux énumérés par les 15 entreprises ont ensuite été répertoriés dans 4 catégories par Neobuild selon les critères suivants :

- usage externe (pas d'impact sur la qualité de l'air intérieur)
- usage interne (impact potentiel sur la qualité de l'air intérieur)
 - matériaux à exclure (absence de fiches adéquates ou polluants selon préanalyse)
 - matériaux utilisables (sans polluants nocifs selon préanalyse)
 - matériaux à analyser (sélection de matériaux selon critères en haut et selon budget pour analyses)

Ainsi Neobuild a initialement répertorié 815 matériaux de construction distincts utilisés sur le marché luxembourgeois. Après l'exclusion des matériaux utilisés à l'extérieur, les données concernant 570 matériaux ont été demandées aux fournisseurs ou aux entreprises mettant en œuvre ces matériaux de construction.

Des données concernant 526 matériaux distincts ont été récoltés, en l'occurrence :

- 422 fiches techniques
- 316 fiches de sécurité
- 78 DEP (déclaration environnementale de produit)

Soit au total 816 documents distincts (ce nombre dépasse le nombre de matériaux y relatifs étant donné qu'un même matériau peut être illustré par différents documents distincts p. ex. une fiche technique et une fiche de sécurité).

Il faut noter que la simple fiche technique s'avère le plus souvent insuffisante pour caractériser les substances chimiques contenues dans le matériau, de sorte que seul 327 matériaux ont pu être retenus pour la 2^{ème} étape de la préanalyse sur le critère de « données complètes » (au moins présence de FDS sinon optimalement d'autres données – DEP, etc.).

A2.1.3. Préanalyse

Une préanalyse est faite sur base des données relatives au matériau ou produit de construction, en l'occurrence :

- les fiches techniques
- les fiches de données de sécurité (FDS)
- les déclarations environnementales de produits (DEP)
- ou toute autre information décrivant le matériau ou produit en question

Suivant le degré de nocivité des polluants identifiés d'après ces informations, le matériau est caractérisé par un code couleur (à ce titre le polluant le moins favorable, donc le plus nocif sera déterminant pour l'attribution de la couleur du matériau).

Les matériaux de construction ne renfermant aucun polluant de couleur orange ou rouge selon les informations disponibles sont éligibles pour une analyse chimique détaillée (laboratoire accrédité).

Sur les 327 matériaux retenus, 269 matériaux ont été classés sur base de leur documentation en vert (217) ou jaune (52) et donc évalués favorablement à une analyse de laboratoire. Vingt-cinq des matériaux sont destinés à des applications « sans influence directe sur la qualité de l'air intérieur ». Les autres matériaux (33) ont été classés en orange ou rouge et peuvent donc être considérés comme contaminés par des substances nocives sur base de leur documentation. Ces 58 matériaux (25 & 33) ont donc été écartés d'office d'une analyse de laboratoire.

A2.1.4. Analyses de matériaux de construction

Pour les 327 matériaux présélectionnés sur base de la préanalyse, des échantillons ont été demandés par Neobuild aux entreprises ou fournisseurs et 209 matériaux ont pu être récoltés. Finalement et compte tenu du budget disponible pour réaliser les analyses, 107 composantes de matériaux ou de produits de construction ont été envoyés via Neobuild au laboratoire pour analyse (certains matériaux sont constitués de plusieurs composantes de sorte que le nombre de matériaux analysés est inférieur au nombre de 107).

1. Préparation et envoi

Les matériaux ou produits de construction ont été recueillis de préférence soit dans leur emballage d'origine, soit dans des emballages non émissifs qui ne renferment pas les substances nocives recherchées lors des analyses de laboratoire.

Les échantillons ont été ensuite préparés de façon suivante :

- **Solides**
 - 20 x 8 cm si l'épaisseur est inférieure à 2 cm
 - 20 x 7 cm si l'épaisseur est supérieure à 2 cm

Les échantillons solides ont été enveloppés dans du papier aluminium solide⁴² et envoyés au laboratoire (2 échantillons par matériau).

- **Liquides et poudres**

Pour les liquides la quantité minimale envoyée au laboratoire était de 750 ml. Les liquides et les poudres ont été envoyés soit dans leurs emballages d'origine, soit dans des boîtes métalliques⁴³ de 0.75 litres.

2. Préparation au laboratoire

Au laboratoire les échantillons ont été préparés de la façon suivante :

- Solides ; utilisés tels quels
- Poudres ; utilisés telles quelles
- Liquides ; appliqués sur un support 1 semaine avant les analyses proprement dites et laissés au séchage pendant sept jours

Les supports sont en plaque acier, en bois ou en papier :

- Bois pour les lasures de bois (qui doivent pénétrer à l'intérieur du support)
- Acier pour laques, colles et enduits
- Papier pour peintures et lasures c.à.d. des produits qui de façon explicite ne doivent pas être appliqués sur les supports métalliques ou qui ne nécessitent pas de supports absorbant au même titre que le bois

3. Analyse de laboratoire

Les substances chimiques analysées appartiennent aux groupes suivants :

COV :

- alcools
- aldéhydes
- cétones
- COV (composés organiques volatils) aromatiques
- COV aliphatiques
- COV halogénés
- cyclo alcanes esters
- éthers de glycol
- paraffines
- phénols
- siloxanes
- terpènes

COSV :

- biocides et pyréthriinoïdes
- isothiazolinones
- biphényles polychlorés (PCB)
- diphényléthers polybromés
- hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- métaux lourds

⁴²<https://www.hilliger-rostock.de/verpackungen/ausserhausverpackungen/201/aluminiumfolie-150-meter-versch.breiten-und-staerken?nummer=508090>

⁴³<https://www.hornbach.de/shop/Leergebinde-Blehdose-0-75-l/3875532/artikel.html>

- phtalates
- retardateurs de flammes organophosphorés

L'analyse de COSV (composés organiques semi-volatils) et de métaux lourds se fait directement dans le matériau (sauf le mercure qui est mesuré en tant qu'émission similaire aux COV et aldéhydes).

Les analyses de COV et d'aldéhydes se font par émission dans une chambre test de 5 litres avec un renouvellement d'air de 0,5/h (soit 0,05 litres/min) et une charge Q de 7,5.

Absorption des COV sur tube Tenax : pompe aspirant 3 litres (0,05 l/min)

Absorption des aldéhydes sur cartouche DNPH : pompe aspirant 60 litres (0,05 l/min)

Les analyses se font selon des méthodes accréditées :

T 23 : Analyses de laboratoire des matériaux de construction

SUBSTANCES GROUPES	MÉTHODE	ACCRÉDITATION	NOMBRE DE SUBSTANCES
COV	GC-MS	DIN ISO 16000-6	< 218
ALDÉHYDES	HPLC-UV	DIN ISO 16000-3	26
COSV	GC-MS, LC-MS	DFG-S19 ASU L 00.00-115 QuEChERS	< 192
MÉTAUX LOURDS	ICP-MS	DIN 38406-E29	30

Les limites de détection sont de 1 µg/m³ (sauf exceptions) pour les COV, 2 µg/m³ pour les aldéhydes, de 0,2 mg/kg pour les COSV et de 1 mg/kg (sauf exceptions) pour les métaux lourds.

Le détail des substances à analyser est repris dans la liste CLAIRE.

4. Interprétation des résultats d'analyse

Seuils et valeurs d'orientation

L'interprétation des résultats des analyses a été faite par le MECO.

Les limites appliquées sont les suivantes :

- Pour les COV et les aldéhydes : 30 µg/m³ de l'air de la chambre
- Pour les COSV : 3 mg/kg de matériau

Ces valeurs limites s'expliquent par la façon de procéder suivante :

Pour les COSV la limite de détection de 1 mg/kg est majorée de 100% pour tenir compte des imprécisions dues à l'analyse même ainsi qu'à la manipulation (Messfehler & Messungenauigkeit), donc 2 mg/kg. Les valeurs décimales sont ensuite arrondies vers le bas (2,3 ou 2,9 sont arrondies vers le bas à 2 mg/kg). Une valeur supérieure à la limite de 2 équivaut donc à 3 mg/kg, d'où la limite effective de 3 mg/kg.

Par analogie la valeur de 10 µg/m³ pour les COV et les aldéhydes est majorée de 100% à 20 µg/m³ pour tenir compte des imprécisions et les valeurs unitaires sont arrondies vers le bas (23 ou 29 µg/m³ sont ramenées à 20 µg/m³), de sorte que la limite effective est de 30 µg/m³.

Pour les métaux lourds, des limites individuelles sont appliquées pour les métaux toxiques, en l'occurrence le plomb (50 µg/g), le mercure (2 µg/g), le cadmium (2 µg/g) et l'arsenic (10 µg/g). La présence de chrome (> 50 µg/g) est signalée mais le chrome n'est pas évalué étant donné que la méthode appliquée ne permet pas de

différencier entre le chrome de valence VI et les autres formes de chrome moins nocives. Les matériaux de construction sont classés en fonction de la toxicité ou nocivité des substances chimiques y contenues.

A2.2. Classification santé des substances chimiques

Les substances sont classifiées selon un code couleur en fonction de leur nocivité :

VERT : substance non nocive ou présence de COV classiques s'évaporant totalement en 2-3 semaines (ne posant donc pas de problèmes à moyen terme) et provoquant des troubles de santé réversibles et transitoires tels que nausées, maux de tête, vertiges

Ex : alcanes, alcènes (COV aliphatiques), paraffines, certains alcools, cétones

JAUNE : Substances irritantes ou allergisantes pour des personnes sensibles (allergies)

Ex : terpènes, aldéhydes, isothiazolinones

ORANGE : Substances capables d'engendrer des troubles neurologiques, respiratoires ou perturbateurs endocriniens

Ex : éthers de glycol, phtalates, certains COV, certains HAP, certains biocides, certains métaux lourds

ROUGE : Substances cancérigènes (CMR), neurodégénératives. Ces substances sont généralement persistantes, bioaccumulables (PBT, vPvB) et les effets de santé sont irréversibles

Ex : biocides, pyréthrinoïdes, retardateurs de flamme, certains HAP cancérigènes, PCB, formaldéhyde et acétaldéhyde, certains COV cancérigènes (benzène, ...), certains métaux lourds (Ni, Pb, Hg, ...)

A2.3. Classification du matériau analysé

Les matériaux ou produits de construction sont classés dans une des quatre couleurs correspondant au polluant (substance nocive) le plus nocif ou toxique mis en évidence. Ainsi la présence d'un polluant cancérigène (code couleur rouge) détectée dans une concentration dépassant le seuil mentionné (3 mg/kg ou 30 µg/m³), engendre automatiquement que le matériau est classé « rouge », l'absence de polluants rouges ou oranges avec une présence d'un polluant « irritant ou allergisant » (code couleur jaune) engendre que le matériau est classé « jaune », etc.

- **Catégorie 1 (CLAIRE vert-A)** : contient des substances à effets temporaires et réversibles (maux de tête, vertiges, nausées) ou absence de substances nocives
- **Catégorie 2 (CLAIRE jaune - B)** : contient des substances irritantes ou allergisantes, non bio-accumulatrices
- **Catégorie 3 (CLAIRE orange - C)** : contient des substances neurotoxiques, toxiques pour le système respiratoire ou perturbateurs endocriniens, substances non bio-accumulatrices
- **Catégorie 4 (CLAIRE rouge - D)** : contient des substances cancérigènes (CMR), neurotoxiques et bio-accumulatrices, persistantes (PBT, vPvB)

A2.4. Banque de données / liste positive

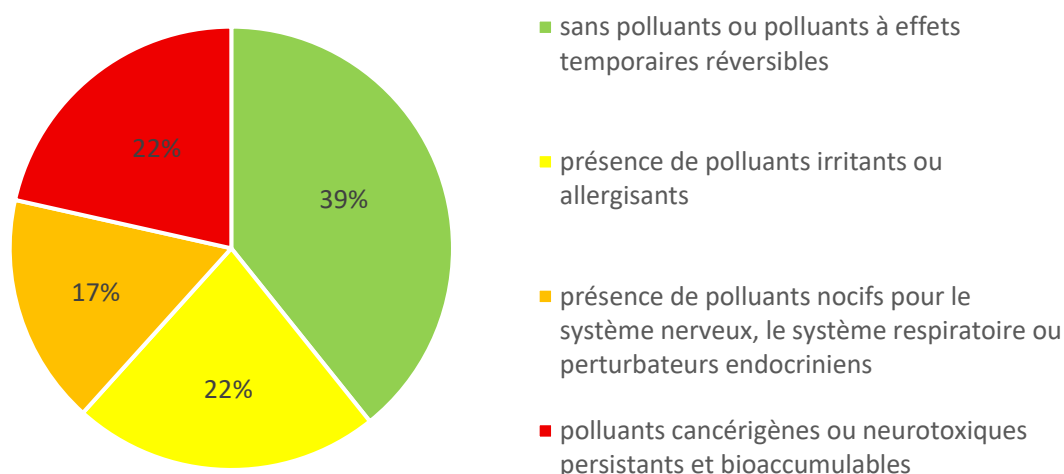
En conclusion, lorsque le produit ou matériau analysé ne contient aucune des substances nocives ou paramètres problématiques recherchés ou encore des polluants à effets réversibles et transitoires (CLAIRE vert – A) il peut être utilisé en toute sécurité⁴⁴.

À l'inverse lorsque le matériau/produit est coloré en CLAIRE orange –C ou en CLAIRE rouge - D, des risques pour la santé des utilisateurs ou occupants ne peuvent être exclus étant donné que le matériau/produit en question est susceptible d'émettre des polluants nocifs. Lorsque ces émissions se limitent à des polluants peu agressifs qui peuvent néanmoins s'avérer problématiques pour des personnes sensibles ou vulnérables, le matériau/produit est codé en CLAIRE jaune - B. Dans une « liste positive » seules les deux premières catégories (vert et jaune) constitueraient la liste positive et seraient accessibles au grand public. Les catégories 3 et 4 (orange et rouge) ne seraient pas accessibles publiquement mais uniquement pour un public restreint (professionnels de la construction, ambassadeurs H²E, ...).

Résultats des analyses

Sur les 107 analyses de matériaux, 66 matériaux (61 %) sont classés verts ou jaunes selon les résultats des analyses, 41 matériaux (39%) sont classés comme contaminés par des substances nocives (à ceux-ci s'ajoutent en principe les 33 matériaux classés orange ou rouges en préanalyse et écartés tout de suite).

F 26 : Classement des matériaux de construction selon les résultats des analyses de laboratoire (n=107)

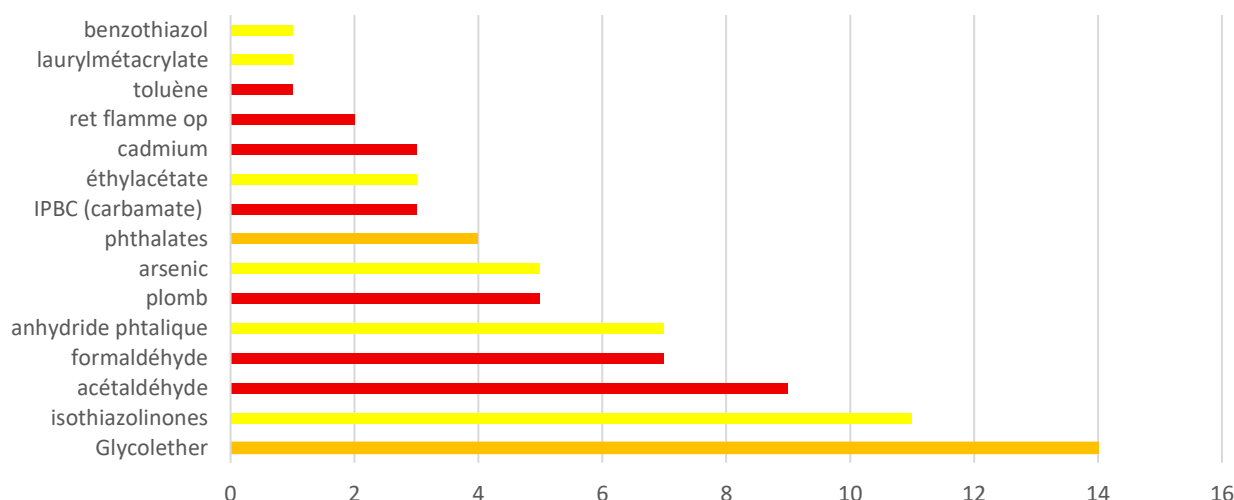


Plus d'un échantillon sur cinq est contaminé par un polluant appartenant à la classe « rouge », et donc à éviter absolument dans le sens d'une précaution sanitaire par rapport aux occupants des bâtiments.

Les polluants les plus détectés concernent les éthers de glycol (14) et les isothiazolinones (11), tous les deux des conservateurs dans les peintures ou colles à dispersion ainsi que deux aldéhydes classés cancérigènes, le formaldéhyde (7) et l'acétaldéhyde (9). Parmi les métaux lourds, l'arsenic (5) et le plomb (5) ont été retrouvés le plus souvent. La couleur des substances dans le diagramme correspond à la nocivité de la substance en question.

⁴⁴ à l'état actuel des connaissances scientifiques

F 27 : Polluants détectés par les analyses, non mentionnés dans la FDS (classés par fréquence)



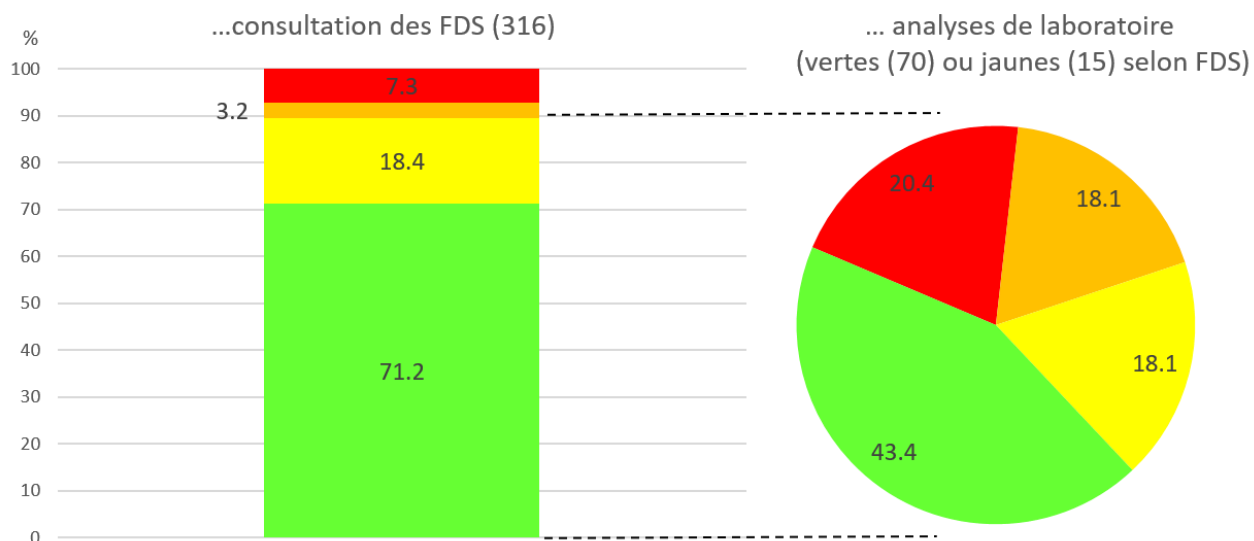
Si les isothiazolinones ne constituent pas de surprise étant donné que les matériaux classés en jaune en pré-analyse ont été acceptés pour les analyses de laboratoire, la présence des formaldéhyde et acétaldéhyde, des éthers de glycol et du plomb est plus interpellant, étant donné que les matériaux renfermant ces polluants auraient dû être écartés lors de la préanalyse si les données concernant les matériaux s'étaient avérées exactes. À noter que les éthers de glycol sur base de leur température d'ébullition élevée ainsi que les retardateurs de flamme organophosphorés (2 échantillons) n'ont pas besoin d'être mentionnés sur les fiches de sécurité.

A2.5. Analyses et fiches de sécurité et/ou DEP

La comparaison des résultats des analyses de laboratoire aux fiches de sécurité des matériaux en question met en évidence des différences notables. Alors que plus de 70 % des matériaux seraient exempts de substances nocives selon les fiches de sécurité et même plus de 80 % des matériaux sélectionnés pour le laboratoire, il se révèle que finalement le taux réel de matériaux exempts de polluants nocifs n'est que de 43 % sur les matériaux éligibles pour le laboratoire.

À l'inverse, le taux de matériaux non recommandables pour des projets de construction « sains » de 10 % selon les fiches de sécurité voire inexistants dans le lot des échantillons analysés monte à presque 40 % des matériaux effectivement analysés (auxquels se rajoutent en principe les 10 % écartés en préanalyse – oranges et rouges).

F 28 : Classement des matériaux (en %) selon...

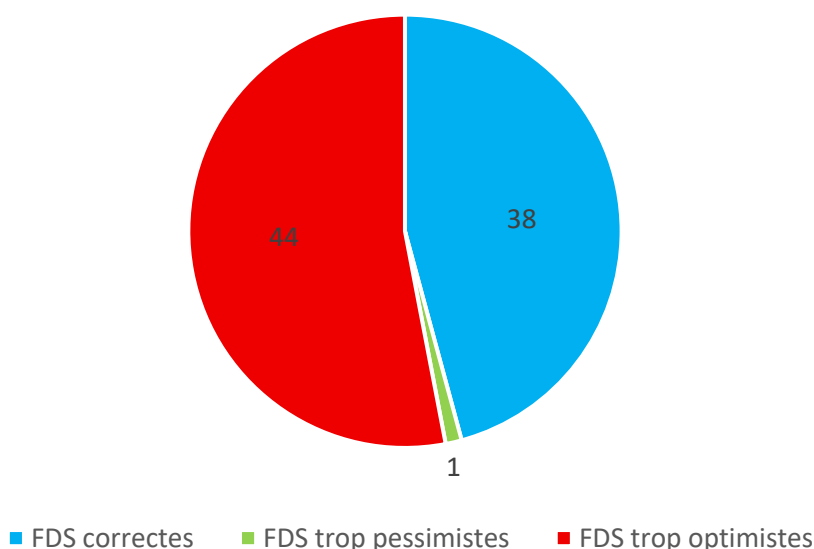


En conséquence, les résultats des analyses s'avèrent nettement moins favorables que ce qui était à attendre selon la consultation des fiches de sécurité et la consultation desdites fiches de données concernant les produits est loin de procurer une sécurité en matière d'utilisation des matériaux de construction en question.

Ceci ne constitue pas forcément le fruit d'une désinformation voulue et ciblée mais peut tout aussi bien être le fruit d'une méconnaissance de la problématique voire d'une ignorance quant aux origines de certaines composantes comme le témoigne le cas précis d'un des matériaux – un élément de structure en bois de renommée internationale. Les analyses de laboratoire révélaient la présence dans des concentrations légèrement accrues d'anhydride phtalique. Pourtant le producteur affirmait que cette substance n'était pas utilisée dans le cadre de sa production. À la suite de l'analyse CLAIRE, une investigation plus approfondie incluant notamment des analyses propres réalisées par un autre laboratoire confirmaient qu'un des sous-produits, en l'occurrence un isolant biosourcé était bien contaminé avec cette substance irritante. L'analyse initiale dans le cadre du projet pilote a donc permis premièrement à rendre le fabricant attentif au problème, deuxièmement de partir à la recherche de la cause, troisièmement à améliorer son matériau. Elle va, en fin de course, ainsi contribuer à optimiser la qualité de l'air intérieur des bâtiments utilisant ce matériau de construction à l'avenir.

Le détail de comparaison des fiches de sécurité avec les résultats des analyses de laboratoire montre que pour moins de la moitié (46 %) des matériaux analysés, la classification ne diffère pas selon la consultation des fiches de sécurité ou l'analyse de laboratoire. En revanche pour la majorité des échantillons (54 %), les résultats d'analyse ont suggéré une réévaluation moins bonne des matériaux par rapport aux fiches de sécurité et DEP. A noter un seul matériau estimé jaune selon les données du fabricant qui a pu être classé en vert suivant les analyses du laboratoire.

F 29 : Vérification de la classification FDS par les analyses laboratoire (nombre d'échantillons)



En détail, 12 matériaux classés en vert selon les données de fabricant se sont avérés jaune, 9 oranges et 12 rouges selon les analyses de laboratoire. En conséquence 33 des 68 matériaux classés « verts » étaient moins bons que le laissait présupposer la consultation des fiches et 21 d'entre eux n'étaient plus compatibles avec la notion de construction saine.

T 24 : Corrélation entre analyses laboratoire et FDS

SELON FDS	SELON ANALYSE LABORATOIRE	NOMBRE
VERT	VERT	35
JAUNE	JAUNE	3
VERT	JAUNE	12
VERT	ORANGE	9
VERT	ROUGE	12
JAUNE	VERT	1
JAUNE	ORANGE	6
JAUNE	ROUGE	5

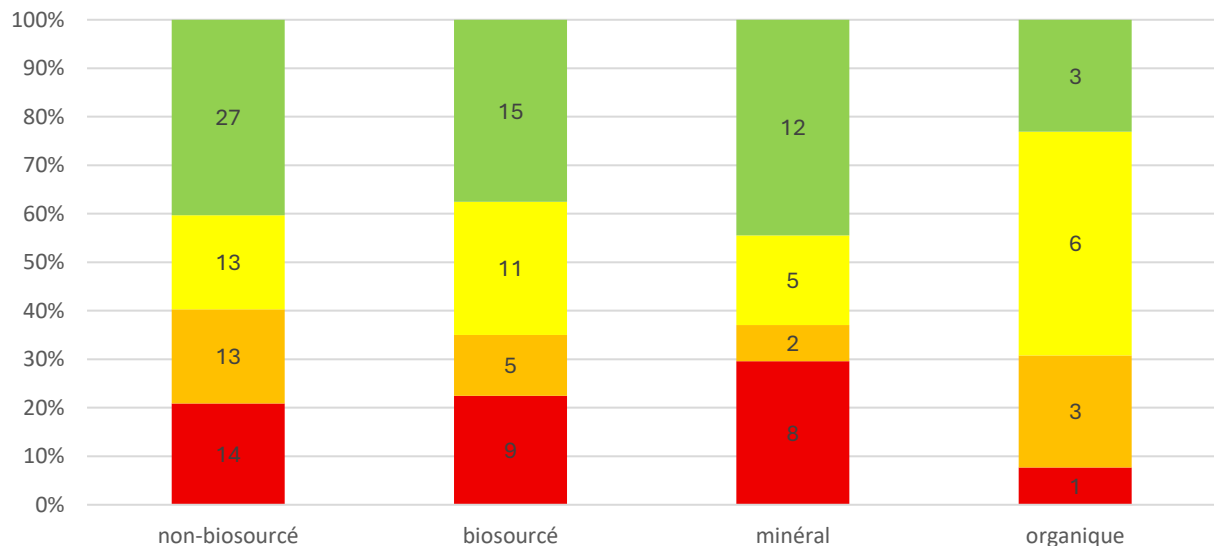
De même, parmi les 15 matériaux estimés jaune, donc peu polluants selon les données de fabricants, seuls 4 étaient confirmés, voir améliorés suivant analyses de laboratoire, les 11 autres étaient insuffisants quant aux exigences en matière de construction saine.

Au total, sur les 83 matériaux analysés – et qui étaient bons (verts ou jaunes) selon les données des fabricants, 32 soit 39% se sont révélés impropres (15 oranges et 17 rouges) à la construction saine suivant analyses de laboratoire.

A2.5. Comparaison des résultats d'analyse des matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés analysés étaient soit minéraux (argile, chaux en forme de briques, de plaques, d'isolants ou de peintures) soit organiques d'origine végétale (cellulose, chanvre, fibres de bois sous forme d'isolants, de plaques) ou d'origine animale (laine de mouton sous forme d'isolants).

F 30 : Classification des matériaux suivant origine. Les chiffres dans les barres indiquent le nombre absolu



La différence entre les matériaux biosourcés et les non-biosourcés est relativement limitée en termes de santé. Pour les deux catégories, le pourcentage des matériaux défavorables (orange et rouge) avoisine les 40 %, donc les matériaux qui peuvent être utilisés sans risque majeur pour la santé des occupants dépassent légèrement les 60%.

La différence principale se présente en faveur des matériaux biosourcés organiques en ce qui concerne les polluants classifiables en rouge. Il faut cependant remarquer le nombre restreint de matériaux organiques analysés (13 produits).

Vu le nombre restreint d'échantillons pour certaines catégories (25 échantillons minéraux et 13 organiques), il faudrait approfondir cette analyse au moyen d'analyses supplémentaires.

Selon les résultats d'analyse, l'origine biosourcée (minérale ou organique) ne constitue pas de garantie en termes de santé.

A2.6. Comparaison des résultats d'analyse des matériaux labellisés ou non labellisés par des labels indépendants

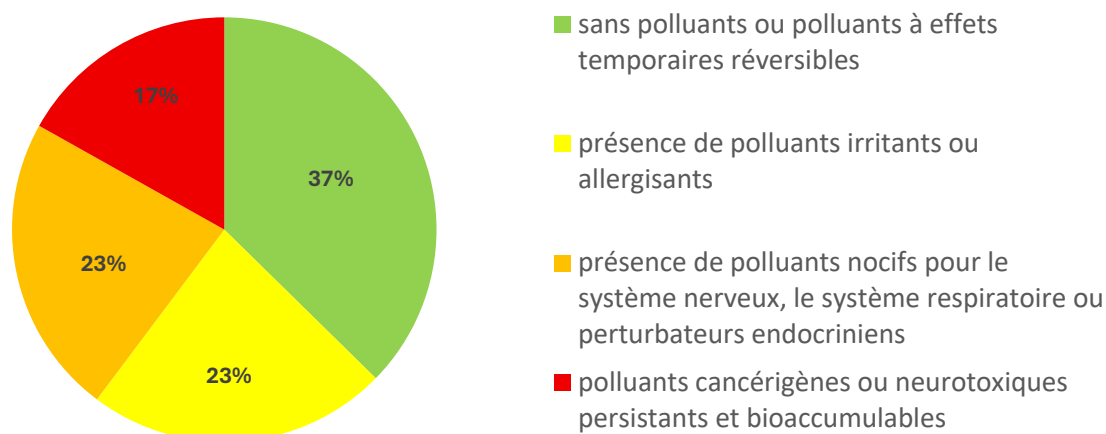
Plus de 80 des matériaux analysés en laboratoire portaient un label étranger et notamment les labels suivants (certains matériaux étant dotés de plusieurs labels à la fois) :

T 25 : Labels des matériaux analysés en laboratoire

LABEL	PAYS	ÉCHANTILLONS PRÉ-ANALYSÉS	ÉCHANTILLONS ANALYSÉS LABORATOIRE
A+	F	36	26
AgBB	D	6	3
Blauer Engel	D	11	9
EC1		15	13
eco-institut	D	2	2
IBR	D	1	0
M1	Fin	7	6
Natureplus	D	6	6
Sentinel	D	4	3
Ü	D	11	5
Autres		12	9
TOTAL		111	82

Parmi les produits portant des labels européens, 31 (37%) sont confirmés par les analyses de laboratoire être sans polluants nocifs pour la santé des occupants, 19 autres (23%) renferment des polluants irritatifs voir allergisants. 33 matériaux labellisés analysés en laboratoire (soit 40%) sont clairement contaminés de sorte à ne pas garantir l'absence de troubles de santé chez les occupants.

F 31 : Classement des matériaux labellisés selon les résultats des analyses de laboratoire (n=89)

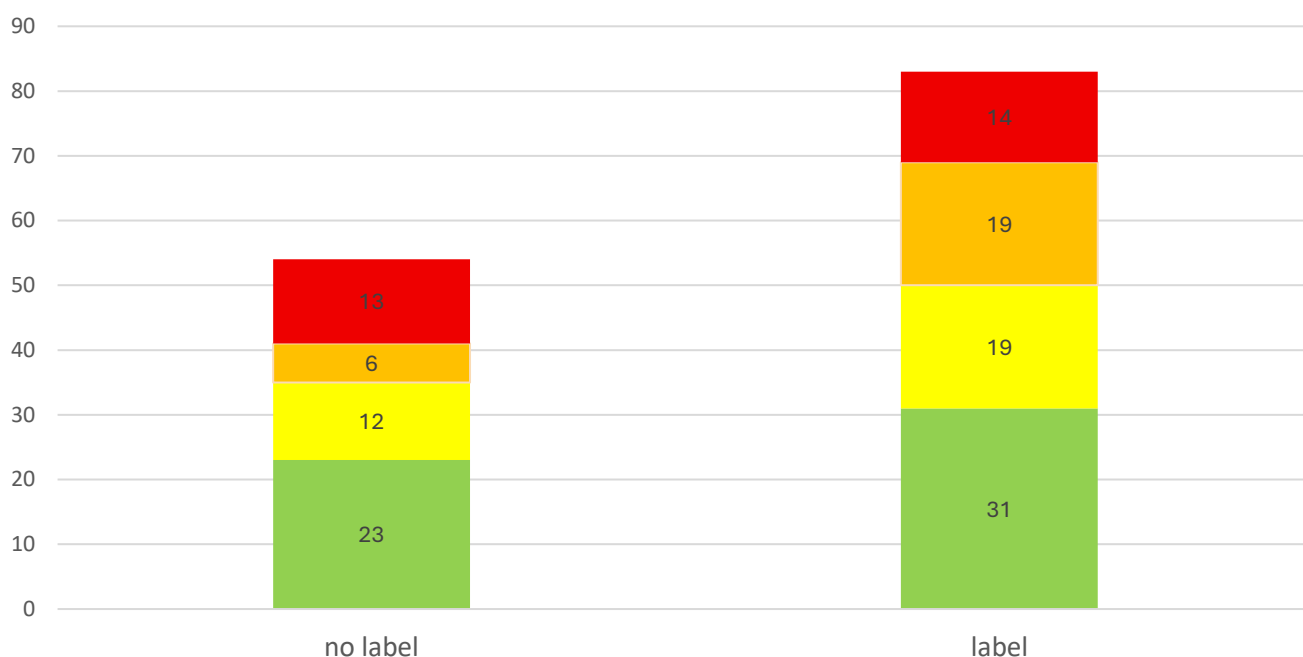


Sur base des analyses de laboratoire, la classification « santé » des matériaux ne diffère pas considérablement entre les matériaux labellisés et les non-labellisés. Alors que les produits labellisés, s'ils sont impropres à la construction en matière de précaution sanitaire, sont majoritairement classés « oranges⁴⁵ », ceux qui ne portent pas de label sont plutôt classés « rouges⁴⁶ ».

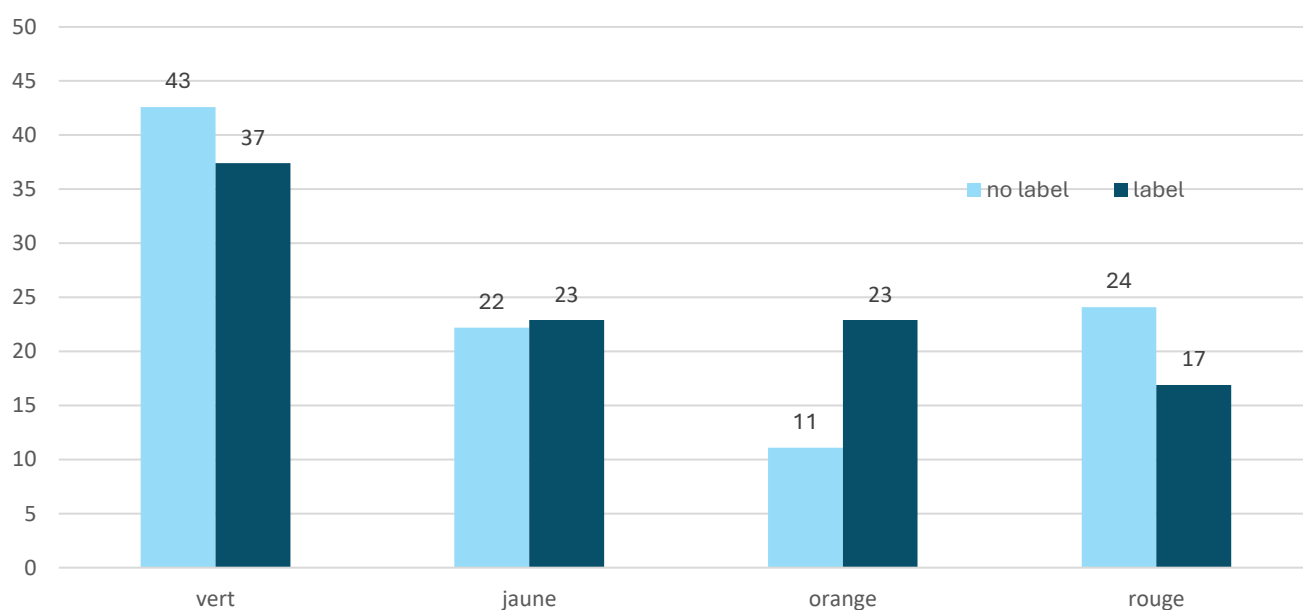
⁴⁵ 23% contre 11% des non-labellisés

⁴⁶ 24% contre 17% des labellisés

F 32 : Comparaison des produits non-labellisés et labellisés selon les analyses de laboratoires CLAIRE (nombre)



F 33 : Comparaison des produits non-labellisés et labellisés selon les analyses de laboratoire CLAIRE (%)



A2.7. Comparaison des résultats d'analyses par rapport à chaque « label »

Les principaux “labels” internationaux trouvés sur les matériaux de construction analysés sont :

A+ - Étiquetage des produits de construction

Il s'agit d'une obligation française pour les produits de construction et de décoration vendus en France de porter une étiquette qui indique le niveau d'émissions en polluants volatils (COV et formaldéhyde) variant de

A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions) établi par le ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires et du ministère de la transition énergétique).

Cet étiquetage, en vigueur depuis 2013, se base sur une réglementation officielle (LOI no 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement ; Arrêté du 20 février 2012 modifiant l'arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils ; Code de l'environnement : art. L. 221-7 et suivants : principes de la qualité de l'air intérieur, article R. 221-1 : définitions, art. R. 221-22 et suivants : étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants).

AgBB

Le „Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten“ ou AgBB créé en 1997 est une organisation incluant différents organismes ou administrations allemands („Ländergesundheits-behörden, Umweltbundesamt, DIBt, ARGEBAU, Bundesanstalt für Materialforschung BAM, Bundesinstitut für Risikobewertung“). L'AgBB développe le schéma d'évaluation pour les matériaux de construction en matière des exigences pour la qualité de l'air intérieur. L'AgBB prévoit des analyses laboratoires mais n'inclut que les COV totaux et les COSV totaux ainsi que les substances cancérigènes (catégories +A et +B de l'Union Européenne). De plus le schéma prévoit une évaluation sensorielle facultative.

Blauer Engel (« ange bleu »)

Il s'agit d'une certification allemande en matière d'environnement (« Umweltzeichen ») non spécifique aux matériaux de construction. L'ange bleu garantit que le produit concerné contamine moins l'environnement et le climat et qu'il satisfait à des exigences élevées en matière de santé. Les critères sont développés par le « Umweltbundesamt ». La certification considère une approche holistique du produit en termes de cycle de vie depuis la production via l'utilisation jusqu'à l'élimination ou le recyclage. En détail, les sujets considérés incluent l'énergie, les émissions dans l'eau, le sol et l'air, la protection des ressources les émissions sonores et les substances nocives du produit de même que les conditions de travail lors de la production.

Le « Blaue Engel » appartient au « Bundesumweltministerium » qui en détient le logo. Le « Umweltbundesamt » développe les critères et vérifie régulièrement ces critères. Le « Jury Umweltzeichen » est un groupe bénévole composé de 15 représentants divers (syndicats, organisations environnementales, industrie, commerce, communes, scientifiques, médias, jeunesse et « Bundesländer ») qui décide des critères établis et proposés par le « Umweltbundesamt ». Finalement la RAL gmbH, une organisation indépendante, vérifie que les critères sont respectés par le fabricant/produit en question.

EC1

Le label EC1 est un label émis par GEV-Emicode. GEV (Gemeinschaft Emissionskontrollierte Verlegestoffe, Klebstoffe und Bauprodukte e.V.) est une institution allemande créée par les fabricants en 1997 qui a développé le système Emicode avec le but de pouvoir comparer des matériaux de construction selon leur comportement émissif. Le label se base sur des analyses laboratoires à charge des fabricants dans des laboratoires externes reconnus. Le label se subdivise en plusieurs catégories : EC2 pauvre en émissions, EC1 très pauvre en émissions et EC1plus encore plus sévère.

Eco-INSTITUT-Label

Eco-institut gmbH est un laboratoire privé situé à Cologne. La certification « eco-INSTITUT-Label » est un label pour des matériaux intérieurs pauvres en substances nocives et en émissions avec notamment des produits de construction et des revêtements de sol, des matelas et autres produits de literie et des meubles. Les émissions sont analysées par l'institut lui-même dans des chambres-tests. La sélection des paramètres (métaux lourds, pesticides, dérivés halogéniques) se fait selon le type de produit analysé.

IBR Institut für Baubiologie Rosenheim GmbH

Il s'agit d'institut allemand privé créé en 1978 et qui a créé son label ou « Prüfsiegel » en 1982. Le label s'intéresse aux aspects de santé et renferme actuellement plus de 300 produits de construction.

M1

Il s'agit d'un label finlandais concernant des matériaux de construction et des meubles peu émissifs publié pour la première fois en 1996. Il évalue les COV, le formaldéhyde et l'ammoniac (analyses de laboratoire) ainsi que l'odeur émise par un matériau. La liste positive est accessible au grand public sans frais. Le système M1 a été développé par la « Finish Society of Indoor Air Quality and Climate FiSIAQ et la « Building Information Foundation RTS (Rakennustieto). Il est géré par la « Building Information foundation RTS » composée d'un comité multidisciplinaire.

Natureplus

Il s'agit d'un label allemand qui vise une construction respectueuse du climat, de l'habitat sain et des ressources avec des matériaux et des méthodes de construction durables. Il s'agit d'une association d'utilité publique qui publie un écolabel reconnu dans toute l'Europe pour les matériaux de construction durables contrôlés. Les analyses des matériaux sont effectuées par des laboratoires accrédités selon des standards internationaux. Il s'agit d'une liste positive regroupant actuellement environ 600 produits.

Sentinel

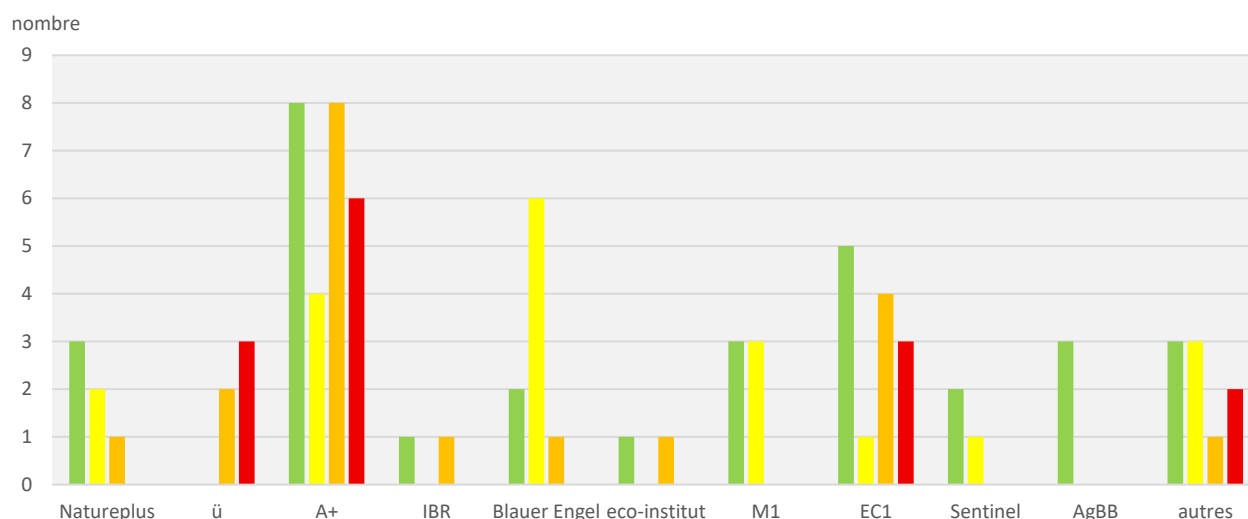
Il s'agit d'un institut privé allemand « Sentinel Haus Institut SHI » qui favorise les matériaux de construction « testés » (« schadstoffgeprüft ») en se basant sur des analyses de laboratoire accrédités dans d'autres contextes. Cependant, ils n'ont pas de critères propres et ne réalisent pas d'analyses à leur compte. Ils certifient plutôt des matériaux de construction sur base d'autres labels tels que décrits dans ce chapitre.

Ü

Le logo « Ü » certifie que le matériau produit en Allemagne convient aux normes légales et qu'il est surveillé ou contrôlé par un organisme externe. Ce logo est attribué par le DIBt allemand (« Deutsches Institut für Bautechnik »). Selon une décision de la Cour de justice de l'Union européenne (CJUE) d'octobre 2014 le logo « Ü » a été aboli en 2016. Néanmoins sur 3 matériaux analysés en laboratoire le label « Ü » a été affiché.

A2.8. Évaluation des résultats d'analyses en fonction de l'attribution des labels internationaux

F 34 : Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives détectées en analyse de laboratoire



Seuls trois des labels équivalaient pour tous les matériaux analysés à une classification verte ou jaune, caractérisant selon nos critères des matériaux de construction favorables à une construction saine : le label finlandais M1, et les deux certifications allemandes Sentinel et AgBB. Il faut cependant remarquer que le nombre de matériaux analysés pour chacun de ces trois labels était limité : six pour M1, trois pour Sentinel et AgBB. Pour le « Blauer Engel » et « Natureplus » avec neuf et six échantillons analysés, seul un matériau pour chacun était insuffisant à une construction saine. En revanche pour le A+ français, le EC1 Emicode et « Ü », les résultats étaient nettement plus mitigés et les labels ne sauraient donner une garantie en ce qui concerne la qualité de l'air intérieur en relation avec l'utilisation du matériau de construction en question.

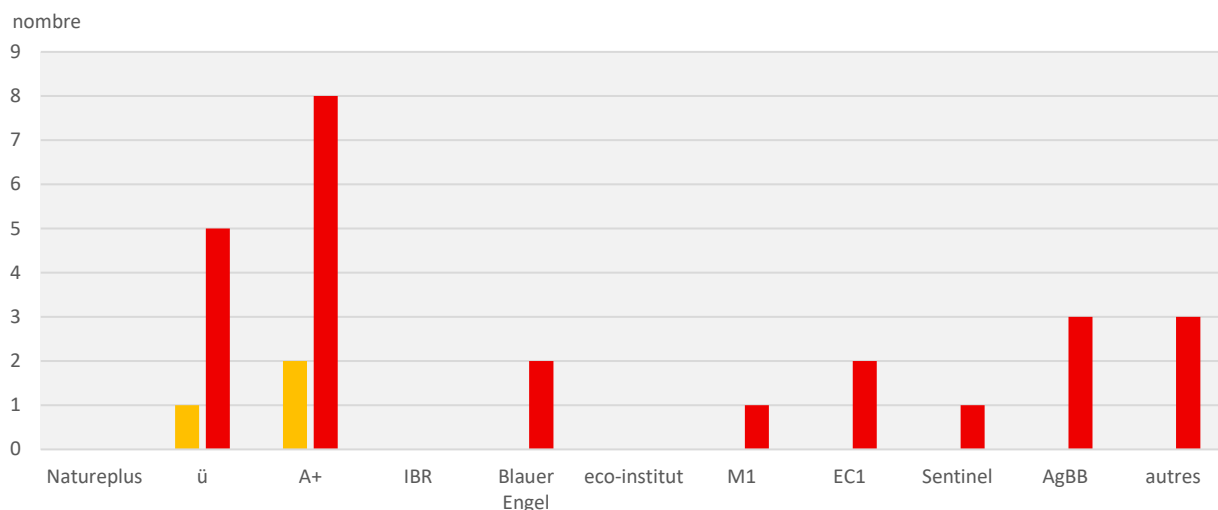
Cependant, les nombres d'échantillons analysés pour chacun des labels concernés (à l'exception de A+) apparaissent insuffisants pour en tirer des conclusions définitives.

Il faut cependant remarquer que ces résultats ne concernent que des matériaux avec labels dont les fiches de sécurité préconisent l'absence de polluants nocifs majeurs (donc les oranges ou rouges). En effet, la pré-analyse, en l'occurrence la consultation des fiches de sécurité et autres données relatives aux matériaux a permis d'éliminer, avant analyse de laboratoire, les matériaux – avec ou sans labels internationaux – dont les fiches de sécurité admettaient la présence de substances nocives à la santé humaine.

A2.9. Évaluation des résultats de préanalyses en fonction de l'attribution des labels internationaux

Sur les 33 matériaux écartés sur base de la consultation des fiches de sécurité et autres données mis à disposition par les fabricants, 18 portaient un ou plusieurs labels internationaux.

F 35 : Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives identifiées en pré-analyse

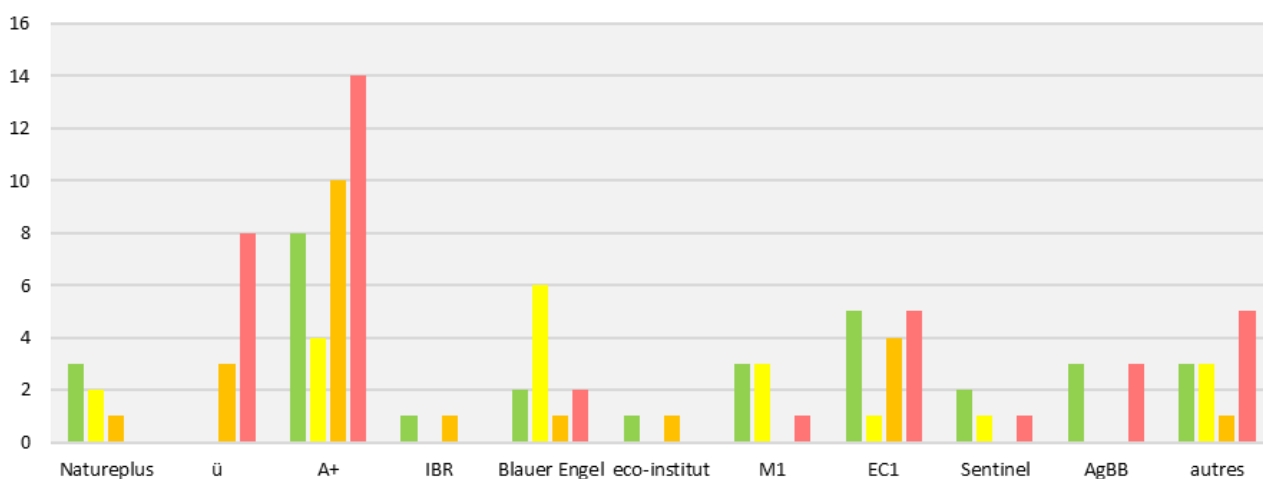


À l'exception de Natureplus, IBR et eco-INSTITUT, tous les autres labels renfermaient des matériaux dont au moins une des substances nocives y contenues sont, selon nos critères d'analyse, à classer en rouge et qui sont donc à éviter dans le sens d'une construction saine.

A2.10. Évaluation des matériaux de construction portant des labels internationaux dans le cadre de l'étude-pilote

Afin de pouvoir évaluer correctement la validité des labels internationaux en termes de précaution sanitaire et de construction saine, il faut additionner les résultats des analyses de laboratoire aux résultats concernant les matériaux labellisés écartés sur base de la documentation en préanalyse.

F 36 : Classement des matériaux labellisés selon la présence de substances nocives détectées en préanalyse ou en analyse de laboratoire



Selon l'étude pilote, aucun des labels internationaux ne saurait donner une garantie infaillible d'absence de substances nocives dans ledit matériau de construction et en l'occurrence de construction saine. En ce qui concerne p. ex. A+ (36 matériaux) et EC1 (15) les résultats apparaissent complètement aléatoires dans la mesure où les matériaux labellisés peuvent ou non renfermer des substances nocives. Pour « Blauer Engel » (11) et M1 (7) la tendance est plus positive envers les matériaux sains. Natureplus (6), Sentinel (3), AgBB (3), eco-INSTITUT (2) et IBR (2), les matériaux ne contiennent au moins pas de substances nocives « rouges ». Il faut cependant remarquer que les nombres de matériaux analysés avec ces trois labels étaient trop faibles pour permettre une évaluation statistique.

Conclusions

Les résultats des analyses de laboratoire ainsi que la consultation des fiches de données des fabricants permettent de dresser un bilan provisoire et de tirer les conclusions suivantes :

Sur les matériaux préanalysés et analysés par la suite en laboratoire, près de 40 % se sont révélés impropres à la construction saine et constituent donc des matériaux à ne pas mettre en œuvre en vue d'une précaution sanitaire. Viennent s'ajouter une trentaine de matériaux écartés sur base de la préanalyse.

La consultation ni des fiches de sécurité ni d'autres documents fournis par les fabricants ne constituent une garantie en matière de construction saine. En effet plus que la moitié des matériaux analysés ne satisfaisaient pas les critères conformément aux déclarations des fiches de sécurité.

L'origine biosourcée (minérale ou organique) ne donne pas de garantie en termes de santé et d'absence de substances nocives émissives.

Les labels sont, pour la plupart, insuffisants pour garantir le respect des aspects de santé et les produits et matériaux labellisés ne s'avèrent pas mieux que les « non-labels ».

Les différents labels internationaux sont très hétérogènes avec de grandes différences en rapport aux exigences en matière de santé d'un label à l'autre. Ils ne sont pas comparables entre eux quant aux impacts potentiels sur la santé des occupants des matériaux.

D'où le bien-fondé et la nécessité d'une liste positive comme proposée dans le cadre de l'étude.

De ce fait, il y a nécessité pour un pays comme le Luxembourg où le secteur met en œuvre des matériaux de construction des différents pays, de procéder à une uniformisation des données concernant les aspects de santé afin d'éviter de comparer « des pommes et des poires ». Il en résulte donc la nécessité de recourir à une liste positive qui permet de comparer les matériaux des origines différentes selon une méthodologie harmonisée.

Étant donné les faibles nombres d'échantillons notamment pour certains types de matériaux et pour certains labels, il y a lieu de poursuivre l'étude pilote moyennant une campagne complémentaire permettant d'augmenter les effectifs des échantillons répondant aux différents critères et par conséquent d'approfondir les résultats de cette analyse.

Annexe A3 : Factsheet : radon (Rn)

Factsheet : radon (Rn)

Le radon est un gaz radioactif (rayons alpha) qui est présent dans les sols à des concentrations différentes, lié à l'abondance naturelle plus ou moins élevée des éléments uranium et radium. Le radon est classé comme cancérigène certain (classe 1) pour l'homme par le CIRC (comité international pour la recherche en cancérologie, IARC en anglais) depuis 1987 et constitue après le tabac, la deuxième cause du cancer de poumon en Europe. Ainsi 5 à 12% des décès par le cancer du poumon en France chaque année seraient attribuables à l'exposition domestique au radon (institut de veille sanitaire⁴⁷).

Situation géologique Luxembourg

En fonction de la perméabilité des sols, le radon passe à travers les couches pédologiques et peut pénétrer dans les bâtiments notamment en passant par les percées des infrastructures (canalisation, électricité, etc.) à travers la dalle ou par les microfissures au niveau des caves voir des tuyaux d'apport d'air frais des systèmes de ventilation mécanique ensevelis dans la terre (puits canadien).

En fonction de la structure géologique, les émissions du radon en provenance des roches varient d'une région à l'autre. Ainsi les sols schisteux (ardoises) du nord du pays sont plus perméables que les sols argileux du sud du pays. Dans le cadre du Plan national d'action⁴⁸, la Division de la Radioprotection du ministère de la Santé a réalisé plusieurs campagnes de mesures du radon au sein de bâtiments à travers le pays entre 1991 et 2017 mettant en évidence des risques liés à la pénétration et l'accumulation du radon dans les bâtiments notamment dans certaines régions du pays. S'il est vrai que la région de l'Oesling (cantons de Clervaux, Wiltz, Redange, Diekirch ou Vianden) est le plus touché par le phénomène d'accumulation de radon dans les bâtiments, des taux accrus de radon sont régulièrement mis en évidence dans les autres cantons (Grevenmacher, Echternach, Remich, Esch-sur-Alzette) avec des concentrations dépassant les 300 Bq/m³.

Ainsi, une campagne de 1000 mesurages par la DRP en hiver 2017/18 a mis en évidence un dépassement des niveaux de référence (300 Bq/m³) dans 15,8 % des bâtiments investigués. Une carte dynamique du radon au Luxembourg⁴⁹ de la DRP est disponible sur Géoportail.

Le radon et les bâtiments

Les bâtiments construits dans des zones sensibles risquent d'accumuler le radon de sorte à présenter un risque pour la santé.

Les bâtiments passifs

Les bâtiments passifs ne sont pas exclus de la problématique d'une accumulation potentielle de radon. Si d'un côté, la ventilation mécanique continue assure un constant renouvellement d'air et donc en théorie une dilution de pollutions éventuelles, y compris du radon, la construction passive constitue néanmoins une arme à double tranchant à plusieurs raisons :

⁴⁷www.invs.sante.fr

⁴⁸ <https://sante.public.lu/fr/politique-sante/plans-action/plan-radon/index.html> et

<https://sante.public.lu/fr/publications/p/plan-action-radon-2017/plan-action-radon-2017.pdf>

⁴⁹https://map.geoportail.lu/theme/emwelt?bqLayer=topo_bw_jpeg&lang=en&version=3&zoom=10&X=671464&Y=6421415&layers=1468&opacities=1

- L'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment
- Les puits canadiens si non étanches transportent l'air enrichi de radon vers le bâtiment
- L'aspiration d'air frais si elle passe par le sol et qu'elle n'est pas étanche permet l'infiltration de radon vers l'intérieur du bâtiment
- Une sous-pression à l'intérieur du bâtiment (pulsion moins forte que l'évacuation de l'air) favorise la pénétration du radon vers le bâtiment

Une autre campagne de mesurages 2016-2017 effectuées dans 172 bâtiments passifs ou de basse énergie (classes A et B) au Luxembourg par la DRP a mis en évidence que même si les contaminations au radon semblent être moins fréquentes dans les bâtiments à basse énergie que dans les maisons conventionnelles, une telle contamination ne peut toutefois être exclue dans de tels bâtiments.

Cadre légal: limites, valeurs de référence, recommandations, valeurs d'orientation

- 300 Bq/m³ pour les bâtiments existants (Union Européenne)
- 200 Bq/m³ au Canada (ministère de la Santé)
- 150 Bq/m³ selon l'agence de protection de l'environnement américaine (US-EPA)
- 100 Bq/m³ par le bureau fédéral de radioprotection allemand (Bundesamt für Strahlenschutz)
- 100 Bq/m³ selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS ou WHO)
- 60-200 Bq/m³ selon le standard en biologie de l'habitat allemand SBM-2015 (Standard baubiologischer Messtechnik)
- 200 Bq/m³ pour les nouvelles constructions (Union Européenne)
- 200 Bq/m³ pour les nouvelles constructions en Suède, Norvège, Angleterre

Comme pour un agent cancérigène et notamment pour un agent radioactif, le risque zéro n'existe pas, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de seuil en-dessous duquel il n'y a pas de risque, le principe de précaution prévoit de réduire l'exposition à un minimum techniquement réalisable (A.L.A.R.A. « as low as reasonably achievable »). En effet, pour chaque augmentation de 100 Bq/m³, le risque de développer un cancer du poumon augmente de 10%.

Que faire afin d'éviter toute accumulation de radon à l'intérieur du bâtiment

Il existe trois mesures à envisager en cas de contamination de l'air intérieur par du radon :

▪ **Ventiler ou aérer**

Ventiler permet certes d'évacuer le radon de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur. Cependant la ventilation héberge le risque de favoriser des sous-pression à l'intérieur du bâtiment qui « sucent » le radon du sol vers le bâtiment et donc d'amplifier la pénétration du radon vers l'immeuble.

▪ **Étanchéifier**

Il s'agit d'une méthode efficace à constitution qu'elle soit bien réalisée et donc étanche à 100%. Toute imperfection permet l'entrée du radon et ne pourra que très difficilement être remédiée voire assainie par la suite.

▪ **Utiliser un puisard**

Le puisard est facile à installer, peu coûteux et permet d'être activé (équipé d'un ventilateur) à posteriori lorsqu'une accumulation de radon est constatée à l'intérieur du bâtiment. Il est cependant primordial d'installer le puisard avant de couler la dalle de la cave, plus tard il sera impossible de le placer en position centrale faute d'accessibilité.

Les nouvelles constructions

Le ministère de la santé canadien recommande d'utiliser des techniques qui permettent d'éviter l'entrée du radon vers l'immeuble et qui faciliteront le cas échéant plus tard l'évacuation du radon (« The construction of new dwellings should employ techniques that will minimize radon entry and will facilitate post-construction radon removal, should this subsequently prove necessary »).

La Division de la Radioprotection luxembourgeoise propose pour les nouvelles constructions des mesures permettant de réduire ou d'éviter la pénétration de radon vers l'immeuble à titre de précaution sanitaire⁵⁰:

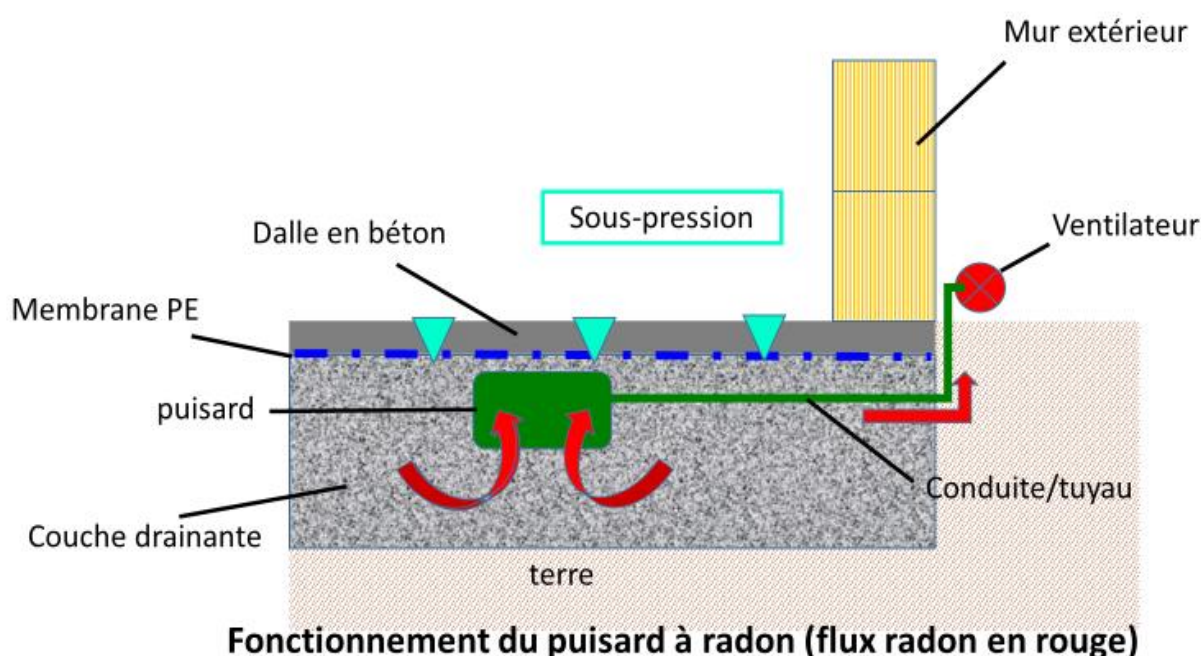
- Assurer l'étanchéité de l'interface entre le sol et la construction par une installation d'une membrane 'pare-radon' fonctionnant comme un écran étanche à l'interface sol-bâtiment.
- Prévoir une couche perméable (enrochement ou gravier) en dessous de la chape ou un vide sanitaire.
- Prévoir une ventilation passive de cette couche perméable comprenant une sortie d'air vers l'extérieur pouvant aspirer l'air pollué avec le radon, avant qu'il ne pénètre dans la construction, si nécessaire.

Le puisard

Le puisard à radon consiste en un récipient en plastique posé sous la dalle de la cave au milieu du futur bâtiment dans la couche drainante et de relier ce récipient par un tuyau en plastique vers la limite (mur extérieur) du futur bâtiment.

Cette installation doit absolument être réalisée avant de couler la dalle faute de quoi l'accès sera rendu impossible. Si par la suite, les concentrations en radon à l'intérieur du bâtiment s'avèrent trop importantes, l'installation d'un simple ventilateur à la sortie du tuyau permet de créer une sous-pression vers le récipient enseveli et de drainer le radon vers l'extérieur du bâtiment.

F 37 : Fonctionnement du puisard à radon



⁵⁰ <https://sante.public.lu/fr/prevention/radon/mesures-de-prevention/index.html>

F 38 : Puisard



F 39 : Puisard installé à Beckerich



Selon une étude du « National Research Council Canada », l'installation de puisards dans 4 cas de maisons contaminées par du radon, a permis de réduire les concentrations dans l'air intérieur de 37%, 90%, 85% et 52% respectivement⁵¹.

« To do » en cas de nouvelle construction

- Prévoir l'installation d'un puisard (seau en plastique relié à un tube air jusqu'au périmètre du bâtiment) sous la dalle de la cave qui permet le cas échéant de dévier le radon vers l'extérieur du bâtiment (coûts estimés de cette mesure 100-150 Euros).
- Prévoir test exposimétrique après achèvement du chantier,
 - ➔ S'il s'avère que les concentrations en radon dans la maison sont trop élevées, il suffira de relier un ventilateur au tube air accessible au périmètre du bâtiment qui permet de dévier le radon en créant une sous-pression sous la dalle de la cave.
 - ➔ Si la concentration n'est pas dangereuse, aucune mesure supplémentaire ne sera prise.

⁵¹ <https://nrc.canada.ca/en/stories/construction-innovation/radon-control-canadian-homes>

- Envisager une obligation d'installation d'un tel puisard, qui est une mesure préventive, avant de couler la dalle de la cave, étant donné qu'une fois la dalle coulée l'accès ne sera plus possible et que les mesures réparatrices seront beaucoup plus coûteuses. Actuellement des subsides pour des mesures de remédiation sont prévus.⁵² « La prévention est moins chère que la remédiation ».

⁵² <http://sante.public.lu/fr/prevention/radon/aides-financieres/index.html>

Annexe A4 : CO₂ - Qualité de l'air intérieur et ventilation

Historiquement, le CO₂ sert d'indicateur de la qualité de l'air intérieur, fonction qui remonte au 19^{ème} siècle et qui a été formulée par l'hygiéniste allemand Pettenkofer. Si effectivement dans les bâtiments aérés manuellement, construits avec quelques matériaux de construction basiques et naturels non-modifiés chimiquement, cette fonction était non contestée, nous sommes aujourd'hui confrontés à une multitude de polluants chimiques. Ils émanent d'innombrables matériaux ou produits de construction ou d'utilisation distinctes dans des bâtiments de plus en plus étanches et gérés via des systèmes de ventilation mécaniques contrôlés et automatisés.

De nombreux auteurs scientifiques voire des publications scientifiques mettent en doute/question la validité du CO₂ en termes d'indicateur de qualité de l'air intérieur et de santé humaine.

Le présent chapitre vise à faire le point sur la question :

- Si et dans quelle mesure le CO₂ peut ou doit être utilisé comme indicateur de la qualité de l'air dans les constructions contemporaines et notamment dans les salles de classe
- Et accessoirement dans quelle mesure la ventilation peut contribuer à une amélioration de la qualité de l'air intérieur.

A4.1. Qualité d'air intérieur et santé

La qualité de l'air intérieur influe sur la santé et le bien-être des occupants d'un bâtiment. Les problèmes de santé types liés à l'environnement intérieur touchent d'abord des organes au contact direct avec l'air contaminé : la peau, les muqueuses des yeux et du nez ainsi que les voies respiratoires. Les effets typiques incluent donc des irritations de la peau, du nez, des yeux ou de la gorge, des troubles respiratoires comme la toux ou l'asthme. D'autre part, de nombreux polluants sont neurotoxiques, avec des effets typiques comme les maux de tête, les nausées ou les vertiges.

Le « Sick building Syndrom (SBS) » décrit pour la première fois en 1983 par l'organisation mondiale de la santé OMS (WHO en anglais) décrit des symptômes que les occupants peuvent développer en relation avec la qualité de l'air intérieur dans des bâtiments qui pourtant répondent à toutes les normes en vigueur.

De nombreux polluants de l'air intérieur sont liposolubles et bio-accumulateurs, c'est-à-dire qu'ils s'accumulent dans les tissus adipeux de certains organes comme le foie ou le système nerveux et le cerveau pouvant ainsi provoquer à long terme des maladies chroniques et induire ou empirer notamment des maladies neurologiques ou neurodégénératives (parkinsonisme par le manganèse ou par certains biocides, Alzheimer par l'aluminium, ...). Un bon nombre des polluants intérieurs sont classés cancérigènes (CMR⁵³) ou perturbateurs endocriniens, c'est-à-dire qu'ils peuvent avoir des effets pseudo-hormonaux.

D'autre part, les différents polluants susceptibles de contaminer l'air intérieur et de porter ainsi préjudice à la santé des occupants sont très divergents en termes de volatilité. Ils peuvent dès lors être subdivisés en :

- Substances très volatiles VVOC ;
- Volatiles VOC ;
- Semi- ou peu volatiles COSV (SVOC) ;
- Substances liées aux particules POM⁵⁴.

Or, il est évident que l'effet de dilution par aération ou par ventilation affecte différemment les polluants selon leur tendance à se volatiliser. En particulier, les COSV et POM qui regroupent la plupart des polluants persistants et bioaccumulables adsorbent (se fixent) aux poussières fines et échappent ainsi à la phase gazeuse. Or, cette phase gazeuse est la seule pouvant être diluée efficacement par ventilation. Au contraire, les COSV et les POM fixées aux poussières fines inhalables sont remises en suspension par tout mouvement d'air (ouverture/fermeture de la porte, mouvements des personnes, courants d'air, etc.).

Les polluants susceptibles de détériorer la qualité de l'air intérieur et de porter préjudice à la santé et au bien-être des occupants peuvent être de différentes natures et origines :

- Polluants chimiques provenant des matériaux : matériaux de construction et mobilier, composantes des ventilations mécaniques contrôlées, ... ;
- Polluants chimiques provenant des activités humaines : produits de nettoyage, activités de bricolage, ... ;
- « Polluants » provenant directement de l'homme : CO₂ par respiration/exhalation, humidité par transpiration, particules virales par toux ou éternuements, ... ;

⁵³ Cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques

⁵⁴ VVOC very volatile organic compounds - VOC volatile organic compounds - SVOC semi-volatile organic compounds - POM particulate organic matter

- Polluants mycologiques : moisissures ou mycotoxines à la suite de problèmes d'humidité (ponts thermiques, fuites d'eau, plantes trop arrosées, murs végétaux, ventilations mécaniques contrôlées, ...).

Parmi ces polluants, seuls ceux qui proviennent directement de l'homme ou des activités humaines sont proportionnels au nombre d'occupants dans un local à un moment précis, les autres polluants émanent et s'accumulent indépendamment du nombre d'occupants dans l'air intérieur.

En l'occurrence, les polluants émis par les matériaux de construction les produits de nettoyage et en grande partie par le mobilier sont proportionnels aux surfaces contaminées et non pas à la présence de personnes.

En ce qui concerne les « polluants » liés à l'activité humaine il faut distinguer entre les paramètres liés directement à la présence humaine (CO_2 , humidité) et ceux qui sont émis en cas d'activités particulières comme les activités de bricolage, peinture etc. Or ces activités ne sont que sporadiques (notamment en salle de classe) et demandent donc une mesure de minimisation (par exemple une aération manuelle ou mécanique) ponctuelle pouvant répondre à une situation particulière et ne devrait par conséquent pas entrer dans les calculs de demandes de renouvellement d'air continues.

Pour ce qui est des paramètres liés à la simple présence humaine, il faut clarifier que l'humidité ne constitue en soi pas de « pollution » directe. Bien au contraire, dans les bâtiments modernes équipés d'échangeurs thermiques sans récupération d'humidité, on fait désormais plus souvent face à un assèchement de l'air intérieur (notamment en hiver). Dès lors il y a une nécessité d'humidifier artificiellement avec le désavantage d'augmenter les consommations énergétiques dues aux besoins de chauffage supplémentaires. De plus une humidification technique par évaporation et la diffusion d'humidité comporte toujours un risque d'engendrer des problèmes de moisissures au sein de l'installation de ventilation mécanique.

En résumé, la qualité de l'air intérieur est déterminée par un grand nombre de polluants potentiels très divergents en termes de volatilité et donc plus ou moins influencée par l'effet de dilution en relation avec une aération manuelle voire une ventilation mécanique. Cette dernière ne saurait en plus pas « réagir » par rapport à des situations particulières sporadiques sans courir le risque d'un surdimensionnement énorme engendrant d'autres désavantages dans le fonctionnement quotidien.

A4.2. Qualité d'air intérieur et CO_2

A4.2.1. CO_2 ou dioxyde de carbone

Le CO_2 est un gaz incolore, acide, plus lourd que l'air (densité de $1,98 \text{ kg/m}^3$). A basses concentrations il est inodore alors qu'à concentrations élevées, il a une odeur acide et sévère et est irritant pour les yeux, le nez ou la gorge. Techniquement, le CO_2 est facilement détectable ou mesurable avec des instruments digitalisés à affichage immédiat et sans besoin d'analyses de laboratoire coûteuses ce qui fait qu'il s'apprête parfaitement à un monitoring en continu, à moyen ou long terme. Pour les mêmes raisons les sondes ou micro-capteurs au CO_2 s'apprêtent à l'utilisation dans les ventilations mécaniques contrôlées et réglées selon les besoins réels (« bedarfsorientiert »). Le mesurage et le monitoring faciles et bon marché ainsi que la non-toxicité relative du CO_2 en font par ailleurs un excellent « tracer gas » qui est non inflammable et non explosif.

Le CO_2 est souvent utilisé pour déterminer la qualité de l'air intérieur. Alors que sa concentration est intimement liée à l'activité humaine, un seuil de $1'000 \text{ ppm}$ est typiquement avancé comme valeur de référence pour une bonne qualité de l'air. La question se pose si :

- Le CO₂ est adapté à caractériser et à représenter la contamination par d'autres polluants et donc de refléter correctement la qualité de l'air intérieur ;
- La valeur seuil de 1'000 ppm datant de la fin du 19^{ème} siècle reste d'actualité en temps de constructions efficientes en énergie voire passives équipées de systèmes de ventilation mécaniques complexes, ou si le CO₂ est actuellement encore représentatif pour une « pollution » humaine avec des habitudes d'hygiène différentes au 19^{ème} siècle.

Il faut donc se demander si les ventilations mécaniques contrôlées autoréglables devraient bien être modulées moyennant le CO₂ via des micro-capteurs ou sondes y relatives.

En effet, dans ce cadre, la mesure du CO₂ dans l'air intérieur est utilisée pour :

- La détection d'une concentration de CO₂ trop élevée étant donné qu'il est nocif voire toxique à partir de certaines concentrations ;
- L'indication pour la présence d'autres polluants que ceux relatifs à l'activité humaine de l'air pour représenter la qualité de l'air ;
- La détermination du taux de renouvellement de l'air en cas de présence de personnes et donc de l'efficacité de la ventilation notamment en matière d'infections transmises par aérosols.

En ce qui concerne le « polluant CO₂ » et non sa fonction « indicateur », il y lieu de se pencher sur les effets de santé potentiels du CO₂ (voir point suivant).

A4.2.2. Effets de santé propres au CO₂

L'homme produit du CO₂ par respiration cellulaire et l'élimine par l'expiration via les poumons. Dans le cas d'une concentration sanguine en CO₂ élevée, l'augmentation du taux de respiration permet d'éliminer/compenser et d'éviter ainsi des effets nocifs.

D'autres mécanismes de régulation incluent la production d'adrénaline, la vasoconstriction des vaisseaux sanguins et l'augmentation des minutes-volumes du cœur. Il s'agit là d'adaptations physiologiques et non pas d'effets de santé.

Les effets sur la santé et le bien-être des occupants se manifestent à des concentrations environnantes relativement élevées. Ainsi, des concentrations de CO₂ supérieures à 80.000 ppm provoquent des pertes de conscience et peuvent entraîner des effets mortels. Des troubles de santé tels que les maux de tête ou de la fatigue se manifestent à partir de concentrations de plus de 5.000 ppm.

F 40 : Effets de santé du CO₂ (Kälte- und Klimatechnik GmbH, Hambourg⁵⁵)

CO ₂ -Konzentration in ppm		
200.000		Schnell eintretende Bewusstlosigkeit; Tod
100.000		Übelkeit, Bewusstlosigkeit, Erbrechen; Erlöschen einer Kerze
30.000		Atemfrequenz und Atemzugvolumen erhöhen sich
6.000		Gesundheitlich bedenklich; Belastung sollte nur kurzzeitig sein; weitere Befindlichkeitsstörungen treten auf
5.000		Max. Arbeitsplatzkonzentration; begrenzter Aufenthalt von max. 8 Stunden täglich
2.000		Die Gefahr einer Ansteckung erhöht sich
1.500		Max. Innenraumrichtwert Müdigkeit und Schläfrigkeit können einsetzen
1.000		Behaglichkeitsgrenze nach Pettenkofer lufthygienisch noch akzeptabel
600- 800		Hohe Raumlufthqualität
350- 450		Frische, natürliche Umgebungsluft

Des sensations de fatigue ou de somnolence peuvent se manifester à partir de 1'500 ppm, le risque de contagion (virus, bactéries) augmente à partir de concentrations supérieures à 2'000 ppm. A faibles concentrations, le CO₂ ne constitue pas de danger pour la santé humaine. En effet, il est ajouté dans de nombreuses boissons afin de les rendre plus rafraichissantes (eau gazéifiée, limonades⁵⁶) ou se retrouve naturellement dans certains aliments par respiration cellulaire des levures (bière, champagne, pain, ...). À ne pas confondre avec le monoxyde de carbone CO qui est un gaz toxique aux conséquences graves pour la santé (il peut entraîner la mort).

Le CO₂ n'est donc pas une molécule toxique en tant que telle (sauf à des concentrations très élevées, dépassant nettement les valeurs observées en qualité de l'air intérieur), le CO₂ agit plutôt par le fait qu'il inhibe ou diminue la fixation de l'oxygène par les globules rouges.

Alors qu'à des concentrations inférieures à 5'000 ppm on n'observe pas d'effets négatifs sur la santé, il peut y avoir cependant des effets sur la concentration et sur les capacités cognitives des occupants.

⁵⁵ <https://klimatechnik-kks.de/unsere-leistungen/lueftungsanlagen/lueftungsanlagen-bueros>

⁵⁶ L'acide carbonique des boissons gazéifiées correspond en fait au CO₂ qui est soumis à haute pression

A4.2.3. Effets du CO₂ sur la performance

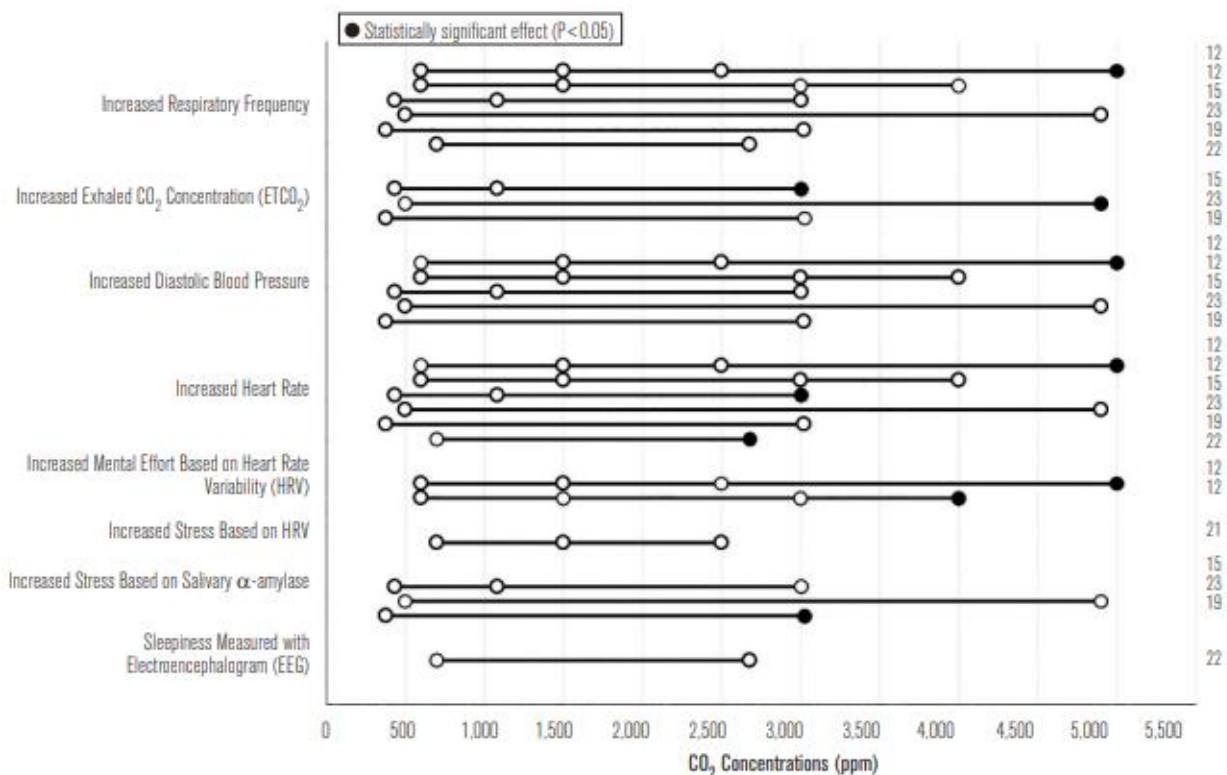
Une revue des études scientifiques par Wargocki (2020)⁵⁷, chercheur au « International Centre for Indoor Environment and Energy » de l'université technique de Copenhague conclut :

- Que la diminution des concentrations en CO₂ de 2'100 à 900 ppm permet une légère augmentation de la performance des élèves (12 % pour la vitesse, 2 % pour l'exactitude) ;
- Une diminution de 2'400 à 900 ppm permet une amélioration de la performance de 5 % ;
- La réduction de 4'200 à 900 ppm diminue les absences de l'ordre de 2,5 %.

D'autre part, l'augmentation du taux de ventilation de 7,2 (+ 3'140 ppm) à 27 (+ 1'100 ppm) m³/h/personne permet une augmentation de la performance de 5 % et de la présence de 1,5 %. Une autre étude du même auteur (Wargocki, 2000⁵⁸) conclut qu'une augmentation du taux de ventilation de 18 à 36 m³/h/personne permet une amélioration de la performance cognitive de 2-4%.

Lors d'une présentation (« keynote ») au congrès « Healthy Buildings Europe » à Oslo en 2022, Wargocki a fait la synthèse sur l'association des taux de CO₂ et les retombées physiologiques :

F 41 : Association entre CO₂ et effets physiologiques (Fisk, 2019⁵⁹)

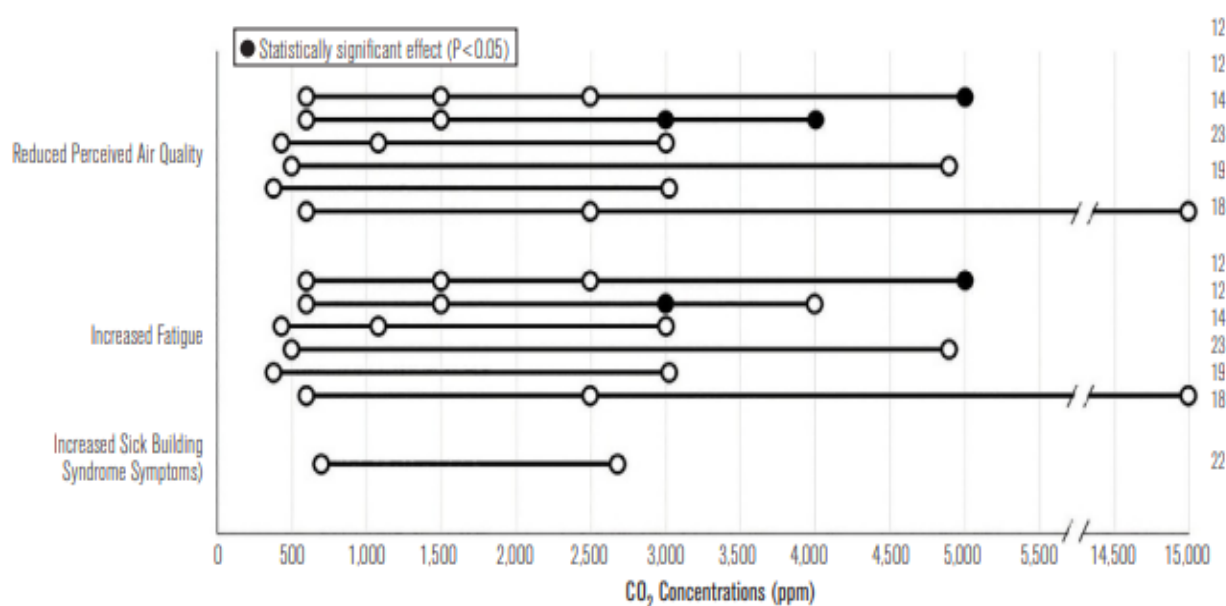


⁵⁷ Wargocki P, et al, 2020: The relationship between classroom air quality and children's performance in school; *Building and Environment* 173

⁵⁸ Wargocki et al, 2000: The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity. *Indoor Air* 10: 222-236

⁵⁹ Fisk W., 2019: Do Indoor CO₂ Levels Directly Affect Perceived Air Quality, Health, or Work Performance? In *ASHRAE Journal* September 2019, pages 70-77

F 42 : Association entre CO₂ et effets de perception (Fisk, 2019)



En conclusion, si certaines études mettent en évidence des influences négatives du CO₂ sur les performances des élèves, ces effets sont minimes (de l'ordre de quelques pourcents pour des différences de concentrations notables de 900 à plus de 2'000 ppm) et les résultats des études sont non consistants et le plus souvent statistiquement non significatifs, donc à relativiser et à prendre avec extrême précaution.

A4.2.4. CO₂ indicateur de qualité de l'air intérieur (« Leitparameter »)

La notion du CO₂ à utiliser comme indicateur de la qualité de l'air remonte à un hygiéniste allemand du 19^{ème} siècle du nom de Pettenkofer. Selon lui, le CO₂ exhalé par l'homme corrèle avec d'autres émanations corporelles de l'homme⁶⁰ et notamment avec des substances odorantes. Dans ce sens, Pettenkofer a défini le CO₂ comme indicateur de la qualité de l'air en relation avec les émanations corporelles et il a défini une valeur de 1000 ppm comme valeur seuil⁶¹ :

"the presence of organic material from human skin and lungs cause the negative effects attributed to poor ventilation, not CO₂" Pettenkofer proposed CO₂ as a surrogate for vitiated air and indicator of deleterious airborne substances of unknown origin" (cité par Wargocki, Oslo, Healthy Buildings conf. 2022).

Au 20^{ème} siècle, différents auteurs (dont Yaglou⁶²) ont conclu que le CO₂ n'intervenait pas comme polluant mais plutôt comme marqueur d'odeurs liées aux corps humains (cité par Wargocki, Oslo, Healthy Buildings conf. 2022).

De nombreuses études se sont penchées sur la question d'une corrélation éventuelle entre les taux de CO₂ et les concentrations en polluants autres qu'humains de l'air intérieur.

⁶⁰ Acétone, acide butyrique, éthanol, méthanol, acétaldéhyde, acide acétique, diéthylcétone, phénol, ...

⁶¹ À cette époque le taux de CO₂ dans l'air extérieur était nettement plus bas qu'aujourd'hui (ainsi les concentrations « outdoor » ont augmenté de plus de 30% depuis 1750, passant de 280 ppm du temps de Pettenkofer à 310 ppm en 1960 et à 420 ppm aujourd'hui pour dépasser la barre des 500 ppm dans un avenir proche).

⁶² Constantin Yaglou (1897-1960) était un physiologiste américain connu pour sa recherche dans le domaine de la qualité de l'air intérieur qui a fait des contributions significatives permettant de comprendre le confort humain et le bien-être dans l'environnement intérieur. Sa recherche continue à impacter la compréhension des environnements intérieurs et leurs effets sur la santé humaine et la productivité. L'ISIAQ (« International Society of Indoor air Quality ») décerne annuellement un prix Yaglou aux jeunes chercheurs prometteurs dans le domaine des sciences sur l'air intérieur. Il était notamment professeur de l'hygiène industrielle à la "Harvard School of Public Health" de 1930 à 1950.

Ainsi les mesures de divers polluants dans quatre écoles norvégiennes⁶³ mettent en évidence une absence de corrélation entre les taux de CO₂ et les taux de formaldéhyde. En effet, dans 30 % du temps les concentrations en formaldéhyde dépassaient les taux recommandés par l'OMS (100 µg/m³) alors que les taux de CO₂ restaient inférieurs à 1'000 ppm.

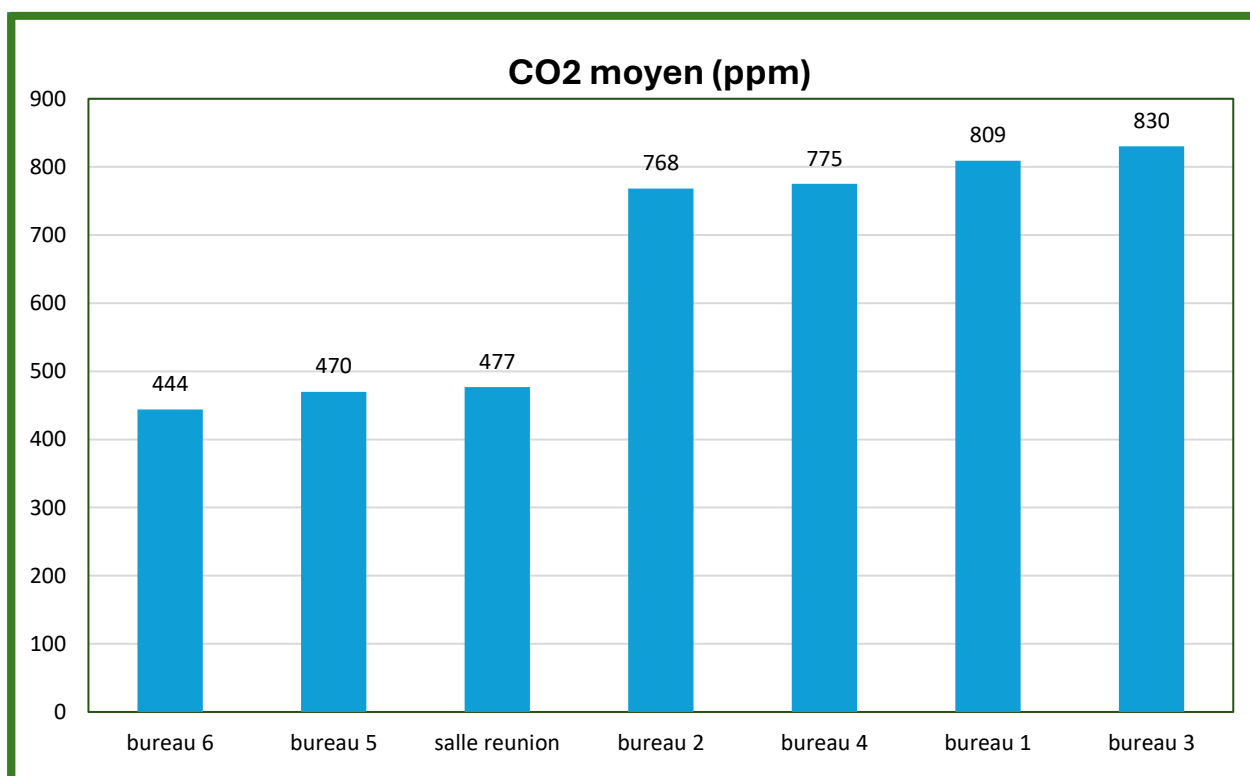
Des mesures de routine dans un bâtiment fonctionnel à Copenhague⁶⁴ mettent en évidence des résultats divergents pour différents polluants « indoor ».

T 26 : Mesures de routine dans un bâtiment fonctionnel à Copenhague⁶⁵

	BUREAU 6	BUREAU 5	SALLE RÉUNION	BUREAU 2	BUREAU 4	BUREAU 1	BUREAU 3	UNITÉ
CO ₂ moyen	444	470	477	768	775	809	830	ppm
COV	850	1100	25349	2083	668	3100	1696	µg/m ³
Formaldéhyde	4.2	4	3.8	12	20	13	17	µg/m ³
PM10	21	15	12	328	0	0	12	µg/m ³

Alors que les concentrations en formaldéhyde corrôlaient relativement bien avec les taux de CO₂ (il faut cependant remarquer que toutes les valeurs pour le formaldéhyde étaient très basses et inférieures au seuil en vigueur de l'OMS), pour les COV totaux et les particules fines (PM 10), les concentrations en CO₂ ne permettaient pas de conclure aux contaminations par les COV totaux ou les PM 10.

F 43 : Concentrations en CO₂ : bâtiment fonctionnel à Copenhague⁶⁶



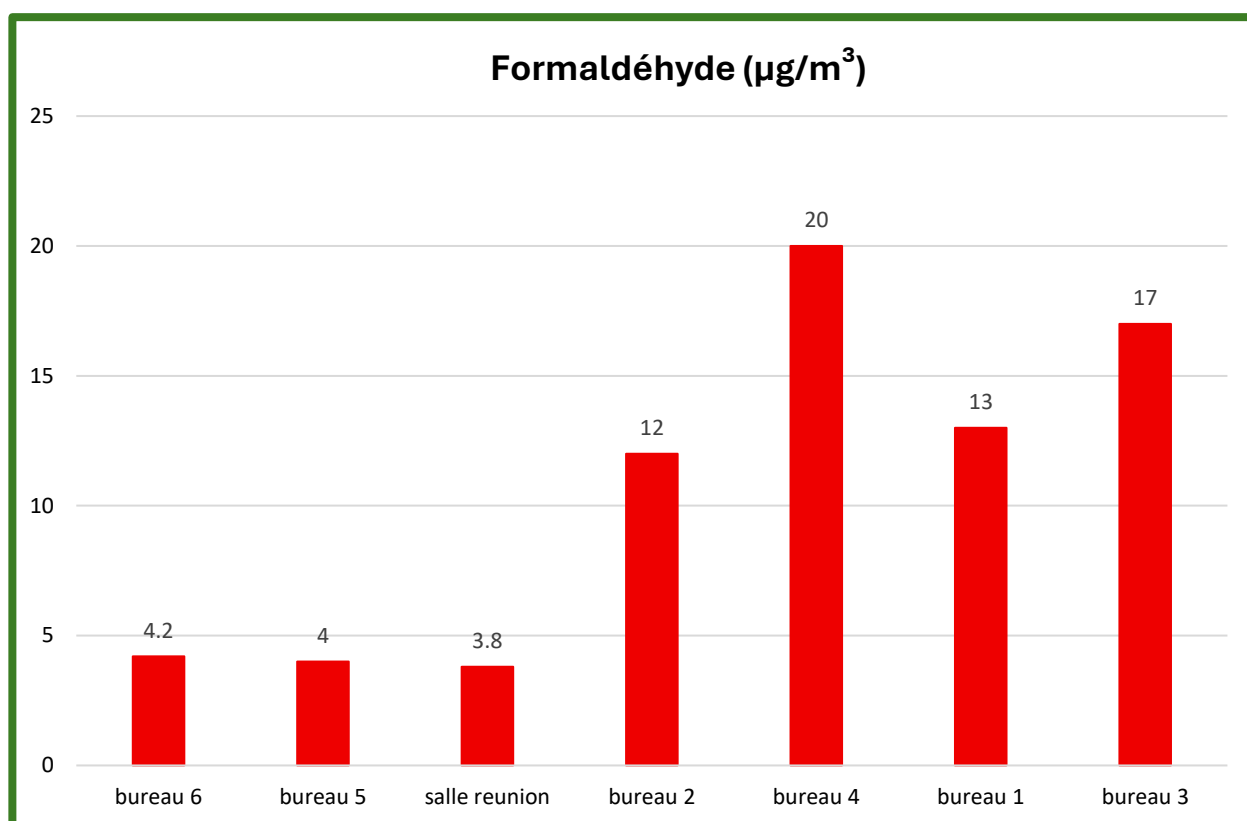
⁶³ Justo Alonso M. et al, 2021: Measurements of Indoor air quality in four Norwegian schools; Healthy buildings Oslo, 2021, proceedings

⁶⁴ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

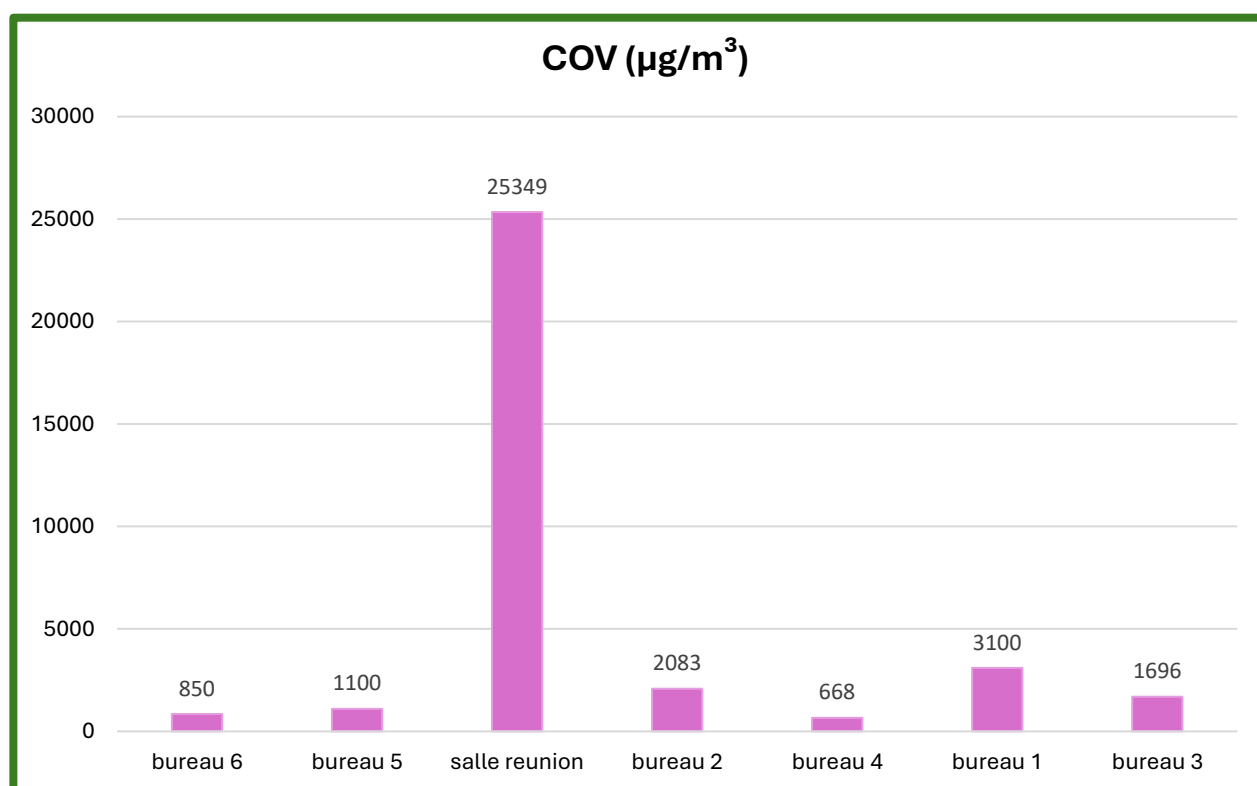
⁶⁵ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

⁶⁶ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

F 44 : Concentrations en formaldéhyde : bâtiment fonctionnel à Copenhague⁶⁷



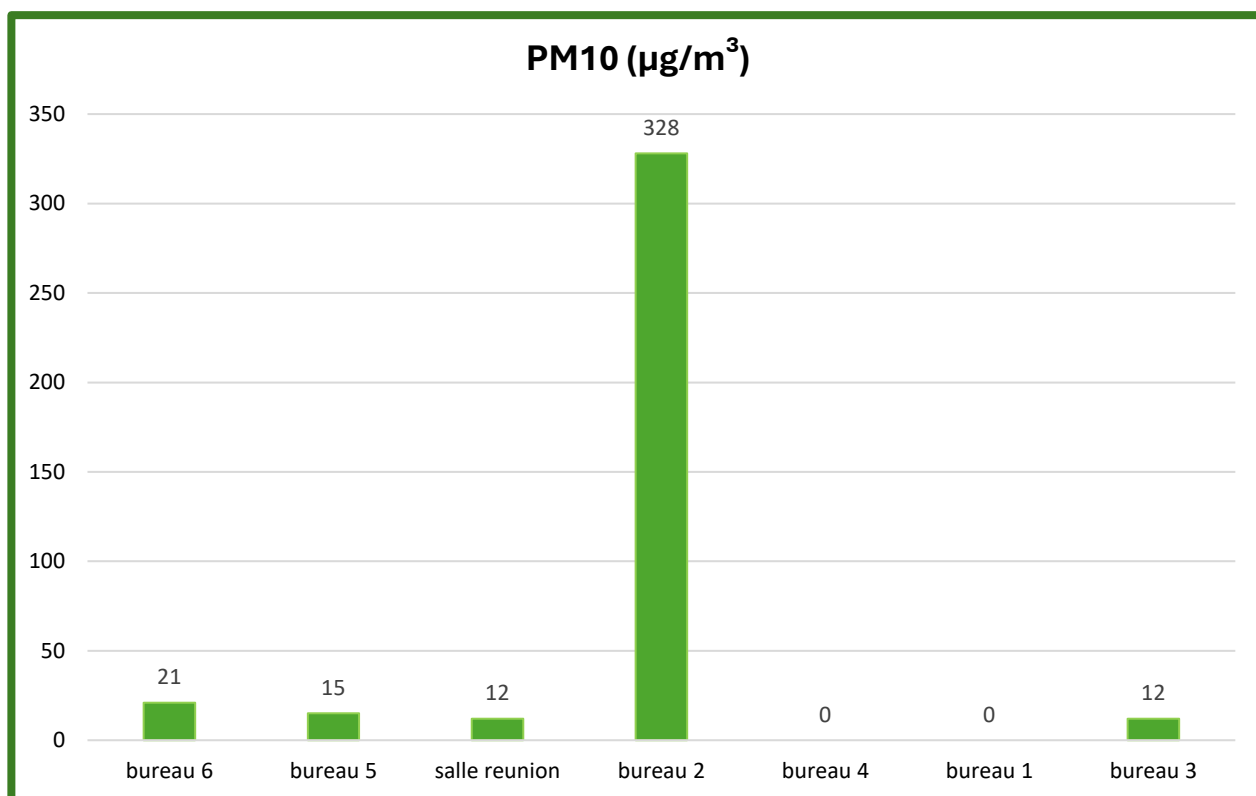
F 45 : Concentrations en COV : bâtiment fonctionnel à Copenhague⁶⁸



⁶⁷ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

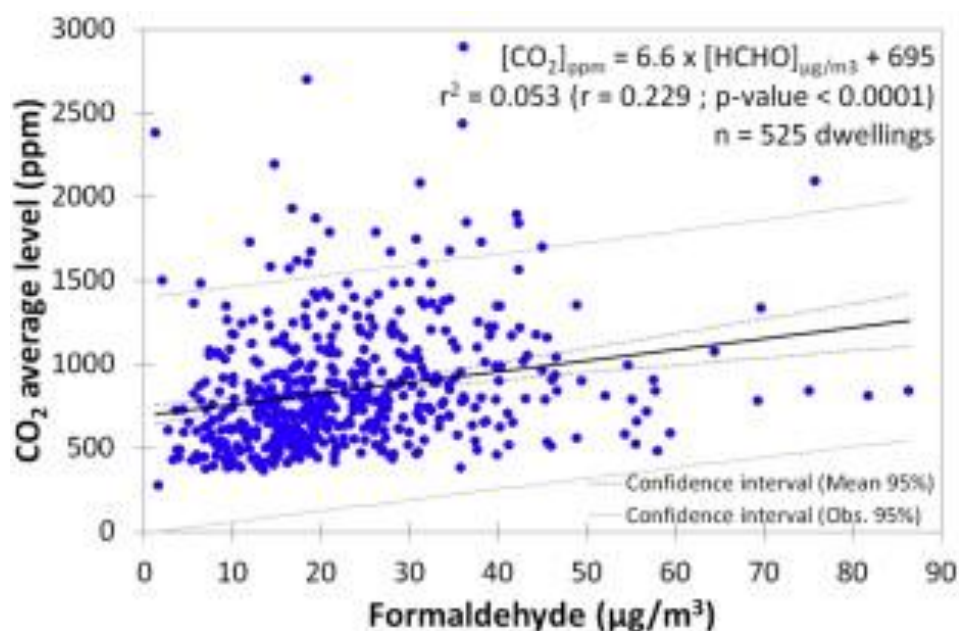
⁶⁸ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

F 46 : Concentrations en PM10 : bâtiment fonctionnel à Copenhague⁶⁹



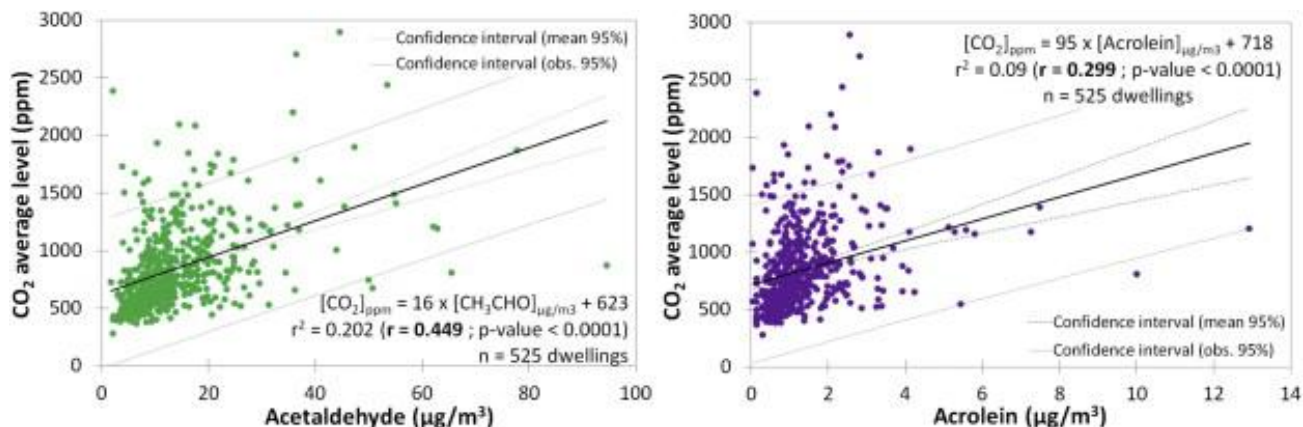
Wargocki (Healthy Buildings conference, Oslo 2022) conclut que « ... le CO₂ ne constitue pas un bon marqueur pour la qualité de l'air intérieur... ».

F 47 : Corrélations entre différents polluants et le CO₂ (Ramahlo, 2015)⁷⁰



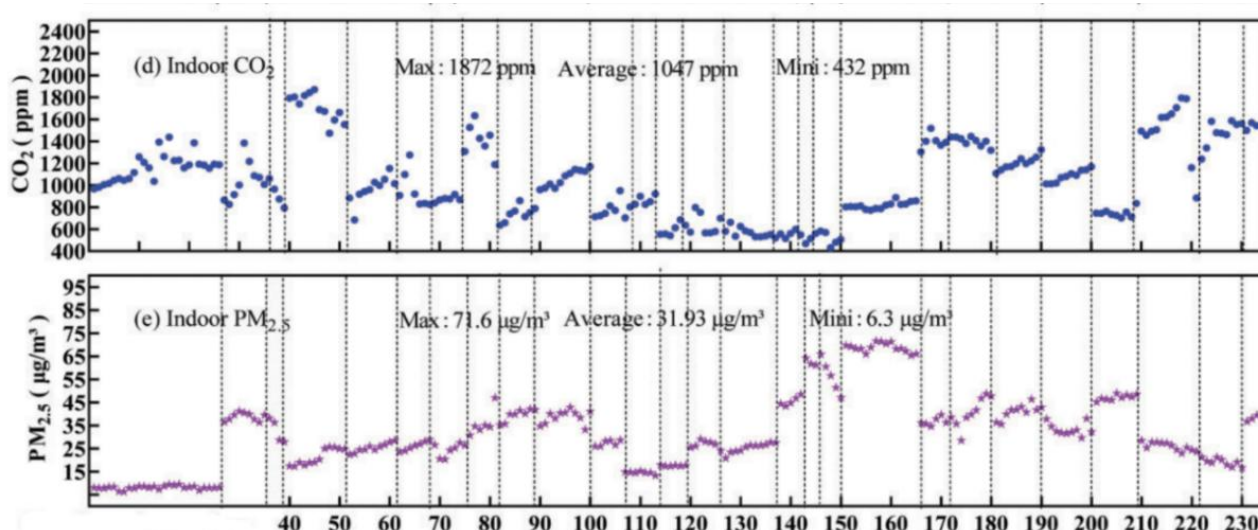
⁶⁹ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

⁷⁰ Ramahlo et al, 2015: Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values: 13th International Conference of the International Society of Indoor Air quality and (Indoor air 2014, International Society of Indoor Air Quality and Climate, Jul 2014, Hong-Kong, China pp.115-124, 10.1016/j.buildenv.2015.03.018. hal-01052809



Une étude chinoise de 2021⁷¹ met en évidence l'absence de corrélation entre les particules fines PM2,5 et le taux de CO₂ lors de mesures dans de nombreux locaux. Ces résultats ne surprennent guère étant donné que les poussières fines ont tendance, au contraire de polluants gazeux, à sédimenter en absence de courant d'air et au contraire sont remis en suspension au moindre mouvement d'air.

F 48 : Corrélation entre les particules fines PM2,5 et le taux de CO₂ lors de mesures dans de nombreux locaux (Huang, 2021)



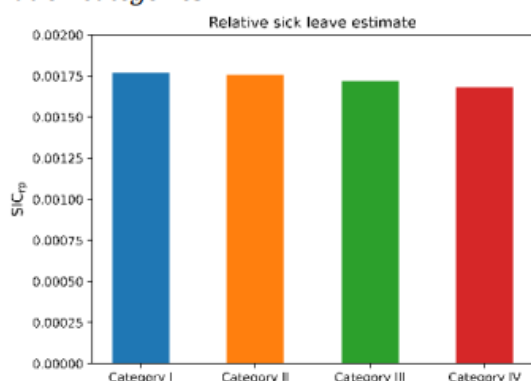
Une étude présentée en 2023 à Aachen (Healthy Buildings Europe conference) par le VTT Technical Research Centre of Finland⁷² suggère que les taux d'absentéisme sont indépendants du taux de CO₂ dans l'air (se basant sur un local avec 4 personnes et des taux de ventilation de 58,5 m³/pers*heure –catégorie I bleu, de 40,1 – catégorie II orange, 23,4 – catégorie III vert et 15,75 m³/pers*heure – catégorie IV rouge) et également indépendant du taux de ventilation.

⁷¹ Huang et al: Development of an indoor environment evaluation model for heating, ventilation and air-conditioning control system of office buildings in subtropical region considering indoor health and thermal comfort in Indoor and Built Environment 2021, 13 pages

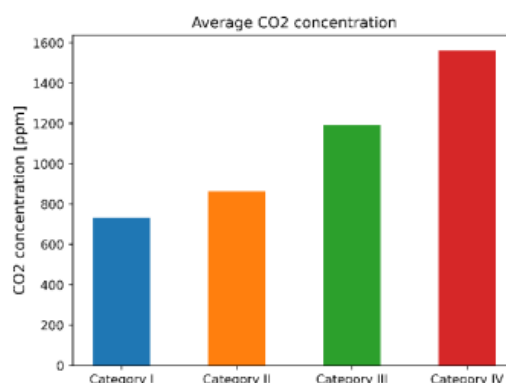
⁷² Siilin et al, 2023: Novel computational tool for indoor air quality; 18th Healthy Buildings Europe conference Aachen/Germany 2023, 8 pages; <https://www.ukaachen.de/kliniken-institute/hb2023-europe/about/welcome-to-hb2023-europe/>

F 49: Novel Computational tool for indoor air quality (Siilin, 2023)

Relative sick leave estimate for different EN 16798 ventilation categories.



Carbon dioxide concentrations for different EN 16798 ventilation categories.



Ces études mettent en évidence une absence de corrélation entre les concentrations de CO₂ (qui est émis par l'expiration des occupants) et les divers polluants chimiques ou mycologiques qui émanent des matériaux de construction, des meubles ou des produits de nettoyage et d'entretien. Ils sont indépendants du nombre d'occupants. Ceci est logique dans la mesure où les sources de contamination par le CO₂ et les sources des polluants déterminant la qualité de l'air intérieur sont bien distinctes. De même, les absences pour cause de maladies sont largement indépendantes des taux de CO₂ et des taux de ventilation. Les considérations reprises dans la norme ILNAS EN 16798-1 :2019 vont dans le même sens. En effet, dans le dimensionnement des débits de ventilation l'on distingue entre la pollution due aux occupants (bio-effluents) en tenant compte du nombre de personnes (indiqué par la concentration en CO₂) et la pollution due au bâtiment et aux systèmes en tenant compte de la surface du local. Les débits résultants respectifs sont indépendants l'un de l'autre.

A4.2.5. Les normes et recommandations en termes de concentrations en CO₂

En termes de risque pour la santé humaine, la TRGS 900 (Technischen Regeln für Gefahrstoffe) fixe des limites maximales appelées « Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) (antérieurement « maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) ». Pour le CO₂ la valeur est limitée à une moyenne de 5'000 ppm pour une exposition de 8 heures et 5 jours par semaine.

En ce qui concerne le rôle d'indicateur de la qualité de l'air intérieur, différents organismes préconisent des seuils divergents en partie :

Norme Luxembourgeoise ILNAS EN 16798-1 :2019

La norme valable au Luxembourg prévoit un dimensionnement de la ventilation mécanique suivant une des trois méthodes suivantes : soit en se basant sur des débits tenant compte du nombre de personnes et de la surface du local, soit sur le taux de CO₂ identifié comme le polluant le plus pertinent, ou encore en se basant sur des débits prédéfinis.

En considérant une concentration de CO₂ de 450 ppm dans l'air extérieur, la deuxième méthode prévoit une limite de +/- 1'000 ppm pour une qualité de l'air intérieur haute (catégorie I), +/- 1'250 ppm pour une qualité moyenne (catégorie II), +/- 1'800 ppm pour une qualité modérée (catégorie III) et également pour une qualité d'air intérieur faible (catégorie IV).

À noter que la norme prévoit aussi bien des débits de ventilation pour diluer la pollution due aux occupants que pour les émissions de polluants dues aux objets émettant des substances.

Norme Allemande⁷³ (DIN EN 13779 selon Umweltbundesamt, 2008)

La norme allemande prévoit pour la concentration du CO₂ un seuil de 800 ppm pour une qualité de l'air intérieur bonne, 800-1000 ppm pour une qualité moyenne, 1'000-1'400 ppm pour une qualité modérée et 1'400 ppm pour une mauvaise qualité d'air intérieur.

- En 2008 et en 2021 le même « Umweltbundesamt ⁷⁴ a fixé les seuils pour le CO₂ en tant qu'indicateur de la qualité de l'air intérieur (« Leitparameter ») à 1'000 ppm pour un air hygiéniquement indiscutable (« hygienisch unbedenklich »), 1'000-2'000 ppm pour une qualité d'air intérieur « dépassant la norme hygiénique » (« hygienisch auffällig ») et 2'000 ppm pour une qualité inacceptable d'un point de vue hygiénique.

Norme Autrichienne

Le ministère autrichien pour la protection du climat, l'environnement, l'énergie, la mobilité, l'innovation et la technologie⁷⁵ (2023) préconise un seuil de 800 ppm pour un séjour durable de personnes, un seuil de 1'000 ppm pour des locaux où des activités intellectuelles ou de la régénération sont prévus, un seuil de 1'400 ppm pour les autres locaux à séjour prolongé et un seuil de 5'000 ppm pour les locaux à séjour non prolongé.

Il faut cependant préciser que toutes ces recommandations ne constituent pas des pointes de concentrations en CO₂ mais des concentrations moyennes (par exemple sur 60 minutes).

Norme Belge

La norme NBN EN 17798-1⁷⁶ de 2019 belge prévoit un dimensionnement de la ventilation mécanique suivant une des trois méthodes suivantes : soit en se basant sur la qualité de l'air intérieur, soit sur les taux de CO₂ (méthode des valeurs limites de substances polluantes), ou encore en se basant sur des débits minimaux d'air de ventilation.

En ce qui concerne les taux de CO₂, elle prévoit trois seuils, tous les trois par rapport à l'extérieur (extérieur + 550 ppm (=1'000 ppm), extérieur + 800 ppm (=1'250 ppm) et extérieur + 1'350 ppm (=1'800 ppm)) (en supposant une émission de CO normalisée de 20 L/h/personne).

Par rapport à la qualité de l'air intérieur, elle distingue trois niveaux de pollution « indoor » : bâtiment très peu polluant, bâtiment peu polluant et bâtiment non faiblement polluant.

Recommandations en France

L'ANSES en France a émis un avis⁷⁷ sur le Dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air intérieur précisant que : « Les valeurs limites réglementaires ou normatives actuelles varient usuellement entre 1'000 et 1'500 ppm. Elles s'appliquent aux bâtiments scolaires, bâtiments résidentiels et bureaux et n'ont pas de signification quant à la qualité sanitaire de l'air intérieur.

⁷³ www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf

⁷⁴ www.umweltbundesamt.de/bild/leitwerte-fuer-die-innenraumluft

⁷⁵ Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter in Anlehnung ISO 16000-41. Indoor Air- Part 41: assessment and classification 2023-08 https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/rl_luftqualitaet.html

⁷⁶ <https://energieplus-lesite.be/reglementations/ventilation9/performance-energetique-des-batiments-ventilation-des-batiments-nbn-en-16798-12019/>

⁷⁷ [Dioxyde de carbone \(CO2\) dans l'air intérieur | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail](#)

Sur la base d'une analyse de la littérature scientifique et d'une analyse des concentrations de CO₂ et d'autres polluants de l'air mesurées en France dans des logements, des écoles, des crèches et des bureaux, plusieurs conclusions et recommandations sont formulées par l'ANSES.

L'ANSES, tout en préconisant que le CO₂ peut être utilisé comme un indicateur du confinement de l'air, recommande de ne pas élaborer de Valeur Guide de qualité d'Air Intérieur (VGAI) pour le CO₂, que ce soit pour ses effets propres ou pour les effets du confinement sur la santé. Elle insiste sur le fait que la seule mesure du CO₂ ne peut être considérée comme l'unique indicateur de qualité sanitaire de l'air intérieur au vu des résultats de ses travaux qui montrent que :

- Les données épidémiologiques disponibles ne permettent pas de construire de valeur seuil du CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, sur la perception de confort ou sur les performances cognitives ;
- Dans l'air de logements, d'écoles et de bureaux en France, la probabilité de dépassement de valeurs cibles sanitaires de divers polluants chimiques (VGAI du formaldéhyde, ...) n'est pas nulle même à des concentrations de CO₂ réduites.

Concernant les effets intrinsèques du CO₂, une récente étude expérimentale chez l'Homme suggère un effet du CO₂ sur la performance psychomotrice (prise de décision, résolution de problèmes) à partir de 1'000 ppm. En l'absence de convergence avec d'autres études et de consensus sur le mode d'action associé, l'Agence recommande d'améliorer les connaissances sur ces effets suspectés.

La stratégie d'aération doit tenir compte de certains paramètres dont les nuisances sonores, le transfert de la pollution extérieure, le confort thermique, etc. Cette stratégie d'aération doit être complémentaire de la maîtrise des sources de pollution, notamment le choix des produits de construction, de décoration, d'ameublement, des produits d'entretien, des fournitures scolaires, etc. ».

Les seuils appliqués dans différents pays sont repris dans le tableau⁷⁸ suivant.

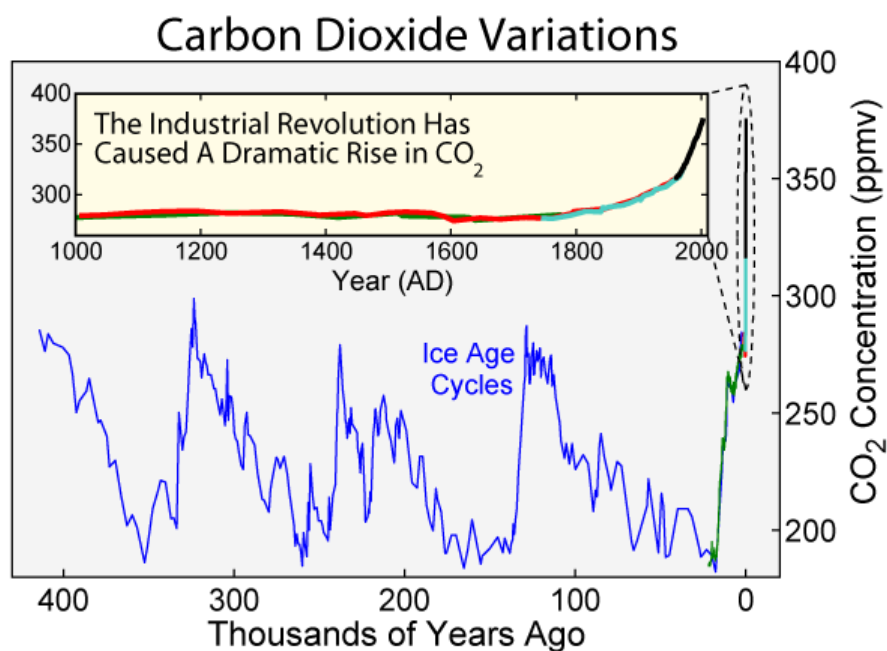
T 27 : Comparatif des seuils appliqués dans différents pays

PAYS	RÈGLEMENT GOUVERNEMENTAL	GUIDE GOUVERNEMENTAL	AUTRES	ANNÉE	VALEUR (ppm)	VALEUR ABSOLUE (ppm)	TYPE BÂTIMENT
Allemagne		x		2008	1000	>1000	"Safe"
					1000-2000	1000-2000	"Noticeable"
					2000	>2000	"Inacceptable"
Brésil	x			2003	1000	1000	
Corée Sud	x			2019	1500	1500	Écoles
	x			2020	1000	1000	Écoles
Czechie	x			2012	1500	1500	
Espagne	x				ext. + 500	920	
Finlande		x		2018	ext. + 350	770	Classe 1
					ext. + 550	970	Classe 2
					ext. + 800	1220	Classe 3
	x			2015	ext. + 1150	1570	

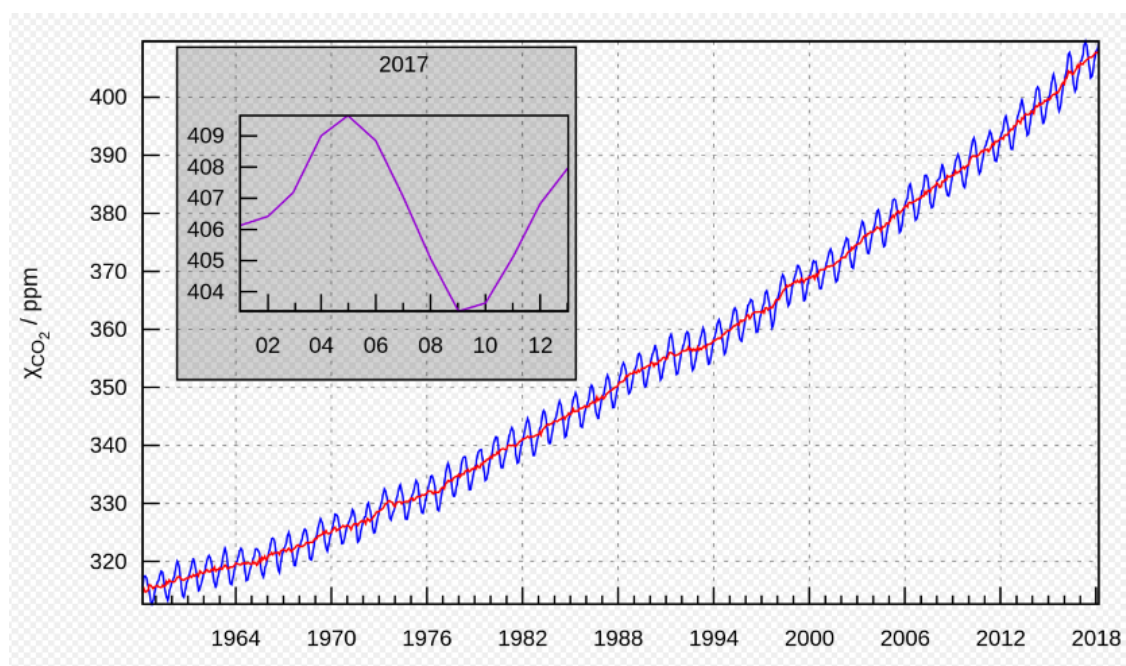
⁷⁸ Source: ISIAQ International Society for Indoor Air Quality

PAYS	RÉGLEMENT GOUVERNEMENTAL	GUIDE GOUVERNEMENTAL	AUTRES	ANNÉE	VALEUR (ppm)	VALEUR ABSOLUE (ppm)	TYPE BÂTIMENT
	x			2017	concentration air extérieur + 800	1220	
France	x			2023	800-1500	800-1500	Bâtiments publics
Hong Kong		x		2003	800-1000	800-1000	
Japon	x				1500	1500	Écoles
Lettonie				2015	1000	1000	
Lithuanie	x			2011	1500	1500	Écoles
Norvège		x		2015	1000	1000	Population générale
Nouvelle Zélande		x		2017	1000	1000	Écoles
Pays-Bas			guide non-gov.	2021	1200	1200	Écoles
			guide non-gov.	2022	800	800	Classe A
			guide non-gov.	2022	950	950	Classe B
			guide non-gov.	2022	1200	1200	Classe C
Portugal	x				1250	1250	Bâtiment commercial
Singapour		x		2016	ext. + 700	1120	Population générale
Slovénie	x				1670	1670	
Thaïlande				2022	1000	1000	Bâtiment publics
UAE Dubai			green build. regul.		800	800	
UK		x		2018	1500	1500	Écoles

Certains pays et certaines normes se basent sur une différence par rapport à l'air extérieur au lieu de prévoir des taux absolus. En effet, le taux de CO₂ dans l'air extérieur n'est pas constant mais évolue au fil du temps, comme le montrent les deux graphiques suivants.



F 51 : Diagramme « Keeling » de la station de mesure Mauna Loa⁸⁰



Comme expliqué en amont, le seuil de 1'000 ppm remonte au 19^{ème} siècle alors que les concentrations extérieures et donc la référence étaient sensiblement inférieures (280 ppm) aux concentrations extérieures d'aujourd'hui (420-450 ppm) et certainement des taux prévus pour l'avenir avec le réchauffement dû au changement climatique. De ce fait seul, il faudrait donc logiquement adapter les recommandations de Pettenkofer à 1'200 ppm aujourd'hui.

⁷⁹ Wikipedia: Robert A. Rhode, lead scientist for Berkeley Earth (NGO) publicly available data for global warming art project (2009)

⁸⁰ Wikipedia: Graph drawn by Hanno using data published on the web by P. Tans (2007) as "Monthly mean atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii ". Global Monitoring Division, Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, U.S.A

A4.3 Qualité d'air et ventilation

A4.3.1. Influence du taux de ventilation sur la qualité d'air intérieur

La ventilation, du fait d'apporter de l'air frais non contaminé (en principe) et d'évacuer l'air vicié éventuellement enrichi en polluants, a vocation à apporter une dilution des concentrations en polluants et de contribuer ainsi à une amélioration de la qualité de l'air intérieur. Cependant cet effet n'est que partiel et loin d'être satisfaisant pour différentes raisons :

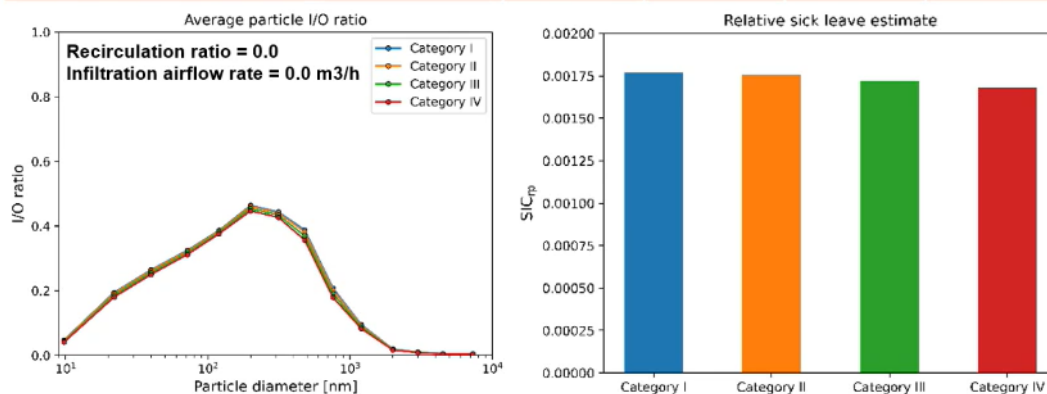
- Si l'évacuation fonctionne relativement bien pour certaines substances très volatiles, elle fonctionne nettement moins bien pour les polluants peu ou semi-volatils qui ont tendance à adsorber sur les poussières et à sédimenter avant d'être remis en suspension à chaque mouvement d'air ;
- De nombreux polluants et notamment les polluants semi-volatils adsorbent sur les surfaces de meubles ou de matériaux de construction en fonction de leur porosité et échappent ainsi à la ventilation ;
- Les mouvements d'air engendrés par la ventilation (en fonction de l'intensité de celle-ci) sont susceptibles de provoquer une remise en suspension des polluants sédimentés et contribuent ainsi à une détérioration de la qualité de l'air intérieur ;
- Les émissions de polluants à l'interface entre le matériau solide à la phase gazeuse directement au contact de celui-ci tendent chimiquement vers un équilibre. Ceci signifie que la ventilation augmente en fait la vitesse d'émanation des polluants du matériau vers l'air au contact de sorte à contrecarrer l'effet de dilution de la ventilation ;
- Les ventilations mécaniques contrôlées peuvent constituer des sources de pollution notamment en rapport avec les composantes plastiques (phtalates, retardateurs de feu, bactéricides), les huiles de montage, les colonisations par des microorganismes (bactéries, levures, moisissures) à la suite d'infiltrations d'humidité ou des phénomènes de condensation au niveau des batteries froides, des humidificateurs ou des échangeurs thermiques ;
- Des débits plus élevés de la ventilation mécanique favorisent des baisses de confort acoustique (bruit de la ventilations mécaniques contrôlées) et du confort de vélocité de l'air (sensations de courant d'air en raison des flux d'air importants) ;
- Finalement toute augmentation des débits et volumes de la ventilation mécanique contrôlée engendrent des pertes énergétiques aussi bien par l'augmentation des volumes d'air échangés que par les puissances accrues nécessaires des moteurs et ventilateurs et contrarient donc le but initial de la construction mettant en œuvre une ventilation mécanique contrôlée, l'efficacité énergétique.

L'étude de Sillin susmentionnée indique des taux de congés de maladies équivalents peu importe les taux de ventilation et donc de renouvellement d'air. D'autre part, les mesures de particules fines et notamment le rapport entre l'intérieur et l'extérieur ne changeait pas avec les différents taux de ventilation.

Particle I/O ratio and relative sick leave estimates for various ventilation rates according to EN 16798

Ventilation rates corresponding to EN 16798 categories for the studied space with four occupants.

Category	I	II	III	IV
Supply airflow rate [m ³ /h]	234.00	163.8	93.6	63.0



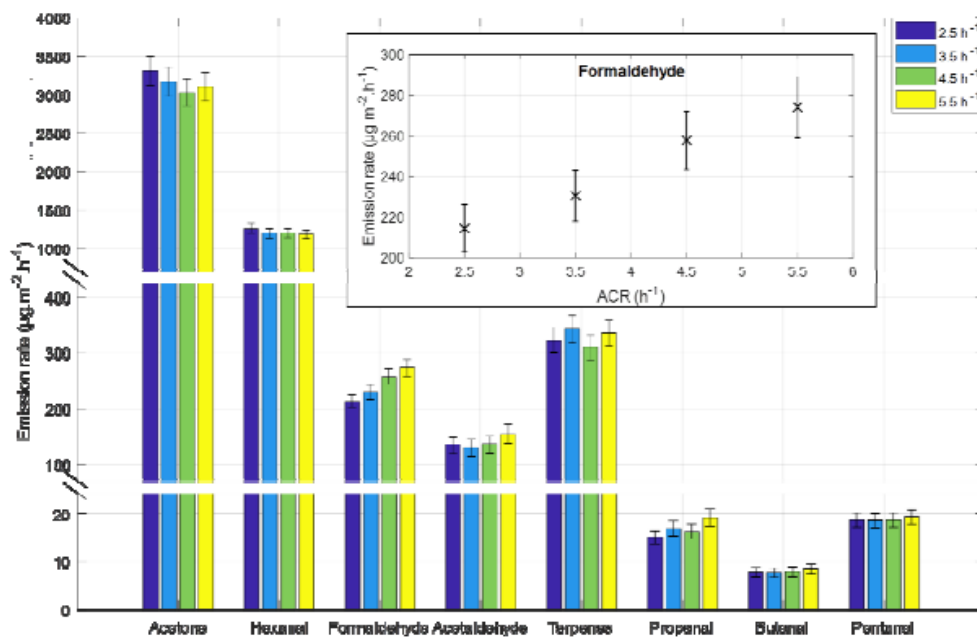
13/06/2023 VTT – beyond the obvious

D'autres études mettent en évidence une absence de corrélation voire parfois même une corrélation négative (augmentation des émissions et de la contamination de l'air) avec une ventilation accrue.

Une étude récente française⁸¹ (INRS), montre que les émissions et les contaminations en formaldéhyde augmentaient si on augmentait le taux de ventilation et donc de renouvellement d'air (de 214 à 274 µg/m³h en passant d'un taux de 2,5 à 5,5 / h de renouvellement d'air). D'autre part, les émissions et la contamination de l'air par certaines COV (acétone, terpènes, autres aldéhydes) n'étaient pas affectées par le taux de ventilation.

⁸¹ Caron et al, 2020: Behaviour of individual VOCs in indoor environments: how ventilation affects emission from materials; Atmospheric environment 2020, vol 243, 41 pages

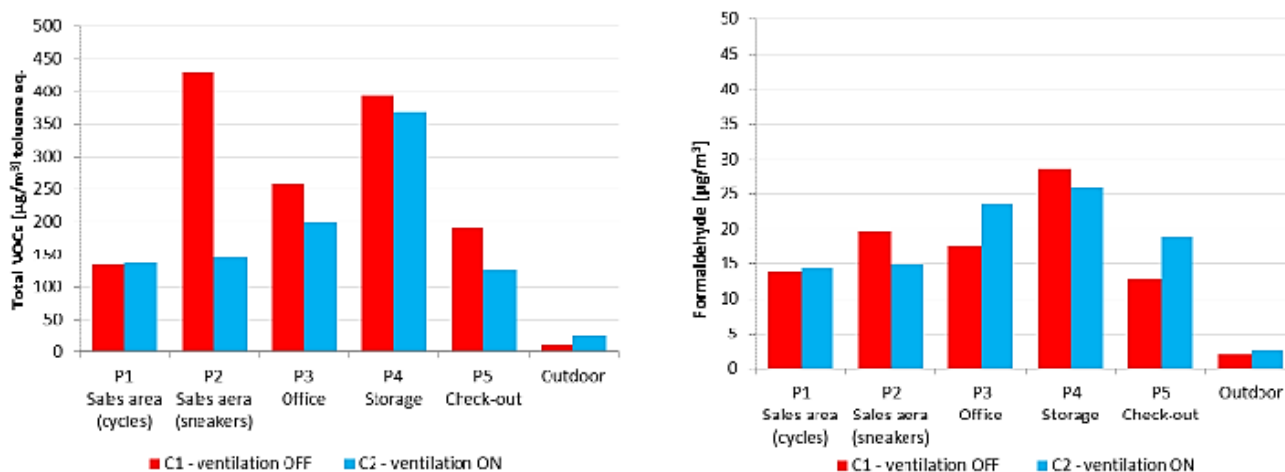
F 53 : Émissions de différents polluants en fonction des taux de ventilation (Caron, INRS, 2020)



Emission rate ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) for the eight main VOCs under different ACR (h^{-1}) conditions. Inset: emission rates for formaldehyde as a function of the ACR.

Une étude réalisée en 2018 par l'INRS⁸² en France sur le dosage de polluants volatils dans un magasin de sports doté d'une ventilation mécanique contrôlée a mis en évidence une augmentation de la concentration en formaldéhyde dans le magasin lorsque la ventilation mécanique contrôlée était en marche par rapport à la situation avec la ventilation mécanique contrôlée éteinte soulignant ainsi l'effet contre-productif que peut avoir un taux de ventilation accru sur l'émission de polluants et la qualité de l'air intérieur qui en découle.

F 54 : Impact de la ventilation sur la qualité de l'air dans un magasin de sport (Robert, 2018)



Un autre exemple est donné par les analyses et mesurages de routine d'un bâtiment de bureaux à Copenhague.

⁸² Robert et al, 2018: Impact of Ventilation on indoor air quality in a sports store, <https://www.researchgate.net/publication/325781269>

T 28 : Analyses et mesures de routine dans un bâtiment fonctionnel à Copenhague⁸³

	BUREAU 1	BUREAU 2	BUREAU 3	BUREAU 4	BUREAU 5	BUREAU 6	SALLE RÉUNION	UNITÉ
Taux de renouvellement d'air mesuré	0.22	0.36	0.43	0.44	2	2.9	3.1	/h
COV	3100	2083	1696	668	1100	850	25349	µg/m ³
Formaldéhyde	13	12	17	20	4	4.2	3.8	µg/m ³
PM10	0	328	12	0	15	21	12	µg/m ³

Ainsi, la concentration en COV était maximale dans la salle de réunion pourtant la mieux ventilée (taux de 3,1/h) et était nettement plus élevée au bureau 5 (1'100 µg/m³ avec une ventilation de 2/h que dans le bureau 4 (668 µg/m³ avec un taux de ventilation de 0,44/h. Dans aucun des locaux, indépendamment du taux de ventilation, les recommandations en matière de COV totaux à savoir des concentrations inférieures à 300 µg/m³ ne furent respectées.

En ce qui concerne les particules fines inférieures à 10 µm, les concentrations mesurées dans les locaux bien ventilés (supérieur à 2 /h) étaient même supérieures ou égales à celles des locaux moins bien ventilés (inférieur à 0,44/h), ceci à l'exception du bureau 2.

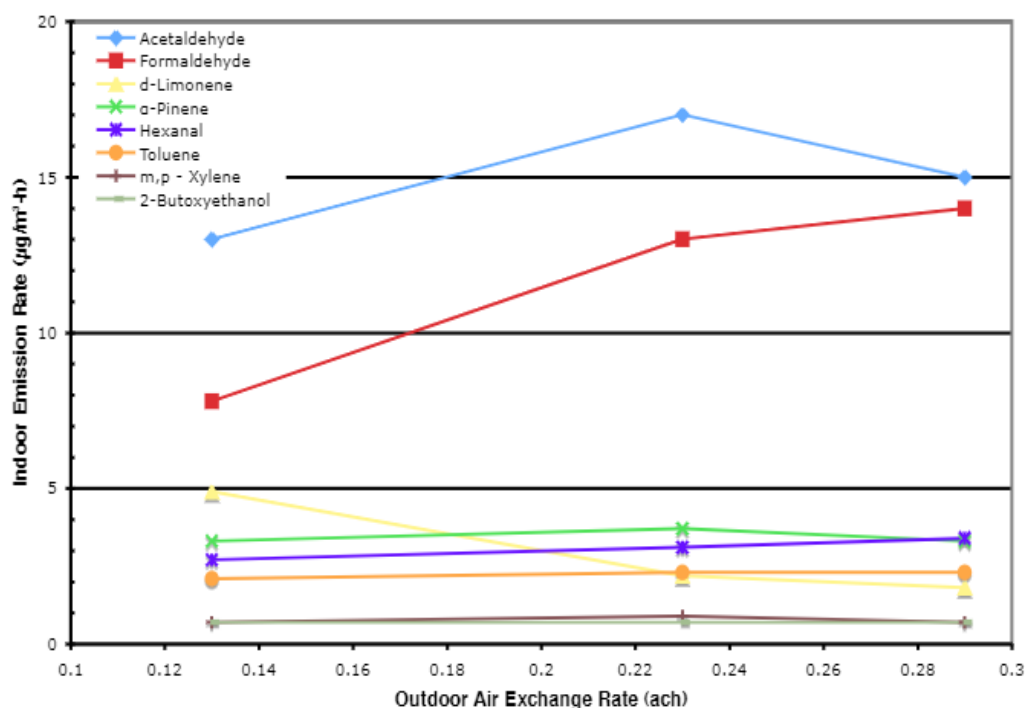
Pour le formaldéhyde, la tendance suivait la ventilation à savoir que plus le taux de ventilation augmentait, plus les concentrations diminuaient, mais il faut remarquer que dans aucun des locaux les concentrations en formaldéhyde étaient vraiment élevées et les taux étaient dans tous les locaux en dessous des seuils en vigueur pour le formaldéhyde.

Une étude américaine⁸⁴ sur les émissions de COV dans des nouvelles habitations met en évidence des émissions en partie croissante avec une augmentation des taux de ventilation, notamment pour les aldéhydes (entre autres le formaldéhyde), montrant que l'augmentation des taux de ventilation induit une augmentation des émissions de polluants.

⁸³ Résultats d'une surveillance de routine mis à disposition par l'exploitant

⁸⁴ Offermann et al, 2017: Emission rates of organic compounds in new homes; Indoor environmental engineering, San Francisco, CA, USA

F 55 : Émissions de polluants organiques (COV) en fonction de la ventilation dans des maisons nouvelles aux U.S.A. (Offermann, 2017)



Les différentes études mettent en évidence une absence de corrélation entre les émissions et les contaminations « indoor » pour certains polluants volatils ou moins volatils (par exemple les particules fines) et les taux de ventilation de sorte que la ventilation naturelle ou mécanique ne peut et ne doit pas être considérée comme le seul moyen approprié pour garantir une bonne qualité de l'air intérieur.

A4.3.2. Qualité d'air, ventilations et infections biologiques virales ou bactériales

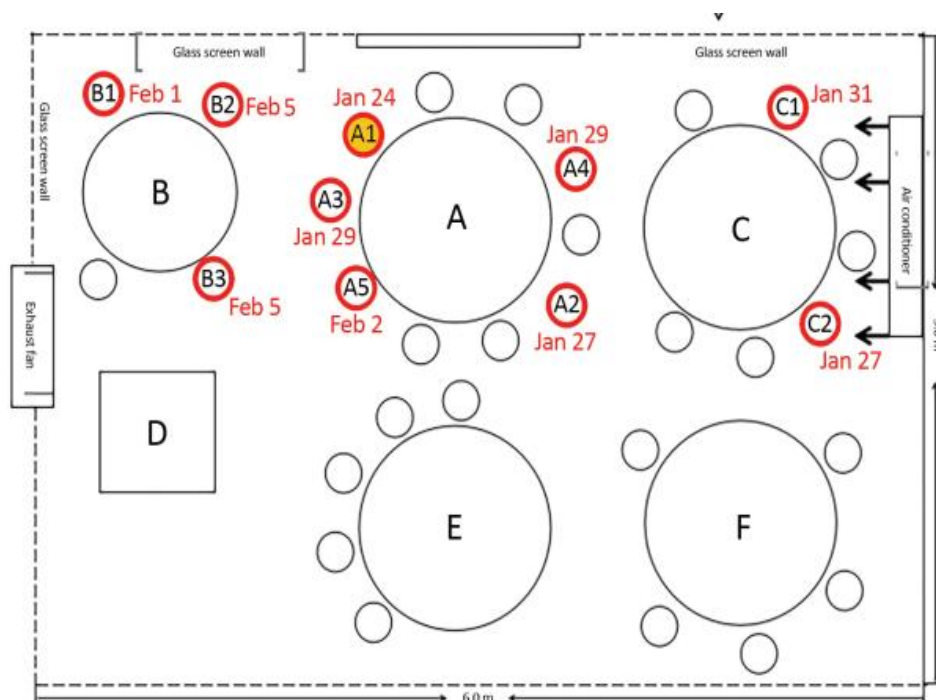
Dans le cadre de la pandémie COVID-19, une des mesures de prévention consistait à augmenter les taux de ventilation. Ainsi le ministère de la santé et l'OAI ont formulé dans un dépliant la recommandation de prévoir un taux de ventilation de 36 m³/h/personne. Il est vrai qu'une dilution des charges virales moyennant un apport d'air frais non contaminé via une alimentation en air frais est propice à une diminution des risques de contagion (du moins en théorie et dans une approche mathématique). Néanmoins, la répartition des particules virales (au contraire de polluants gazeux) n'est pas homogène dans l'air intérieur. Elle aura un gradient avec des concentrations importantes notamment autour des personnes infectées (et qui distribuent par la toux ou les éternuements). Dans ce sens, une augmentation des volumes d'air et donc des flux d'air (vélocité) a comme effet d'augmenter la circulation des particules fines dans l'air intérieur et donc le risque d'une contagion.

À titre d'illustration, une étude chinoise⁸⁵ présentait un cas de clusters de COVID -19 dans un restaurant chinois en 2020. Toutes les personnes infectées par le porteur initial (A1) étaient assises dans le flux d'air du

⁸⁵ Lu et al, 2020: COVID-19 Outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging Infectious Diseases* www.cdc.gov/eid, vol 26 N°7 July 2020

système de ventilation (tables A, B, C) alors que les personnes des tables (D, E et F) non situées dans ce flux d'air ne développaient pas de symptômes.

F 56 : Croquis illustrant la disposition des tables du restaurant et la circulation de l'air de la climatisation sur le lieu de l'épidémie coronavirus de 2019 (Lu et al, 2020)



Augmenter le taux de ventilation constitue donc une arme à double tranchant. Selon certaines études, le risque de contagion par des microorganismes pathogènes augmente à partir de taux de CO₂ de plus de 2'000 ppm.

A4.4. Conclusions sur la qualité de l'air

Il résulte de l'analyse des études repris sous les paragraphes 1 à 4 en amont que :

- La qualité de l'air intérieur relative aux différents polluants chimiques est largement indépendante du nombre d'occupants et donc également du taux de CO₂ dans l'air ambiant ;
- Les émissions de polluants chimiques et donc les concentrations dans l'air intérieur sont du moins en partie non corrélées aux taux de ventilation et par conséquent la ventilation ne constitue pas le moyen approprié pour assurer ou garantir une qualité de l'air intérieur adéquate ;
- Le CO₂, aux concentrations habituelles dans les bâtiments (i.e. inférieur à 5'000 ppm) ne constitue pas un risque pour la santé des occupants. De même les effets du CO₂ sur les troubles de concentration ou de performance cognitive des occupants sont minimes (de l'ordre de quelques pourcents pour de différences de taux de CO₂ de 900 à 2'000 ppm) ;
- La propriété de « paramètre indicateur (« Leitparameter ») » du CO₂ se limite aux seuls « polluants » à origine humaine (mauvaise odeur, humidité par transpiration) et non pas à la grande majorité des polluants chimiques nocifs pour la santé humaine qui proviennent des matériaux de construction, des meubles ou encore de l'application régulière des produits de nettoyage ;
- Augmenter la ventilation face à des risques de contagion (pandémies) s'avère une arme à double tranchant : dilution d'une part mais augmentation de la circulation des particules dans l'air intérieur d'autre part.

En fin de compte, le CO₂ apparaît comme inadéquat en tant que paramètre guide pour trois raisons :

- Aux taux usuels en milieu intérieur, il ne constitue pas un facteur de risque du point de vue sanitaire,
- Il n'est guère proportionnel aux concentrations des polluants intérieurs nocifs,
- Il n'est pas stable à l'extérieur mais évolutif (de ce fait des valeurs absolues pour l'intérieur ne sont pas réelles, il vaudrait mieux considérer la différence intérieur-extérieur)

L'association américaine des ingénieurs spécialisés en chauffage, ventilation et conditionnement d'air ASHRAE viennent aux mêmes conclusions dans un document publié en 2022 (cf. annexe).

A4.5. Autres considérations complémentaires

Le seul moyen de réduire les taux de CO₂ dans l'air intérieur (à part de limiter le nombre des occupants) en présence d'occupants est d'aérer soit par ventilation manuelle en ouvrant les fenêtres ou les portes, soit en augmentant les taux de ventilation de la ventilation mécanique contrôlée (VMC).

La ventilation mécanique constitue une aération automatique et réglable de manière continue permettant ainsi une optimisation de l'aération tout en minimisant les pertes énergétiques (récupération de la chaleur). Néanmoins elle ne saurait répondre à des besoins spontanés accrus. A cette fin, il est important que les bâtiments disposent également de fenêtres à ouverture manuelle permettant d'aérer manuellement en cas de pointes de polluants, humidité, odeurs, CO₂ (grâce à l'indication de l'afficheur CO₂).

Si la ventilation mécanique présente certains avantages comme la filtration de l'air frais entrant dans le bâtiment (pollen, spores de moisissures, particules fines externes), il faut cependant bien noter que l'augmentation excessive et surdimensionnée des taux de ventilation de la ventilation mécanique contrôlée risque d'avoir des impacts négatifs sur différents aspects de qualité, voire d'ambiance ou encore le confort :

Qualité d'air et confort

- Remise en suspension de particules ou poussières suite à l'augmentation des mouvements d'air ;
- Transfer de polluants extérieurs gazeux (non retenus par les filtres) vers l'intérieur des bâtiments
- Ambiance de l'air et bien-être des occupants : sensations de courants d'air ;
- Bruit propre aux moteurs des ventilateurs ;
- Air sec en hiver⁸⁶ / suite à la seule récupération de chaleur et suite au volume accru (non réglable) dépendant des conditions météorologiques ;

À ceci s'ajoutent les surcoûts dus à un surdimensionnement de la VMC ainsi qu'à son fonctionnement à des régimes excessivement élevés :

- Surdimensionnement des installations (gainés de ventilation, centrale de traitement d'air, volume du bâtiment, ...) ;
- Augmentation des fréquences d'entretien (inspections, échanges de filtres, nettoyages des gainés, désinfections des échangeurs thermiques, ...) et donc augmentation des coûts d'entretien ;
- Surconsommation énergétique thermique due aux déperditions liées à la ventilation ;
- Surconsommation énergétique électrique des ventilateurs ;
- Surconsommation énergétique due à une humidification artificielle pour réduire l'assèchement.

⁸⁶ L'humidification artificielle est à risque puisqu'elle favorise le développement de moisissures à l'intérieur de la VMC

A4.6. Recommandations pour les bâtiments publics

Il résulte des considérations évoquées ci-dessus qu'un taux de ventilation élevé à des fins d'amélioration de la qualité de l'air intérieur constitue une arme à double tranchant susceptible de dégrader en fin de compte ladite qualité ou de diminuer le confort des occupants. Un taux de ventilation élevé peut présenter des inconvénients d'ordre économique et énergétique et mettre à risque le respect des exigences légales ou relatives au PNEC (plan national intégré en matière d'énergie et de climat) en termes de durabilité.

Comment gérer le dimensionnement des VMC au Luxembourg à des fins de précaution de santé ?

Sur base de l'ensemble des études scientifiques susmentionnées, il est essentiel de confirmer un concept de ventilation pour les bâtiments publics.

Ce standard doit concilier :

- La meilleure performance énergétique ;
- La garantie d'une qualité d'air pour les occupants.

Ainsi, le concept se basera sur les principes suivants :

- Favoriser la mise en œuvre de matériaux de constructions exempts de substances nocives (suivant CLAIRE ou équivalent), confirmée par des analyses (à noter que l'Administration des Bâtiments publics met déjà en œuvre une politique la limitation des substances nocives grâce à un contrôle des fiches techniques par un organisme indépendant. Ce contrôle est vérifié par des analyses de contrôle de la qualité d'air au sein de ces bâtiments) ;
- Dimensionner avec un débit minimal de 24 m³/h/personne conformément au règlement grand-ducal modifié du 13 juin 1979 ;
- Réguler la ventilation afin de garantir une qualité d'air modérée (limite de CO₂ à 1'250 ppm correspondant théoriquement à 25 m³/h/personne) à moyenne (limite à 1'800 ppm correspondant théoriquement à 15 m³/h/personne) suivant l'ILNAS -EN 16798-1 :2019 ;
- Favoriser les systèmes de ventilation plus efficaces (p.ex. la ventilation par déplacement) ;
- Exclure du dimensionnement de la ventilation le débit minimal spécifique pour diluer les émissions relatives aux matériaux dans le cadre d'une construction saine et sur base de certificats de la qualité de l'air (le bâtiment n'émet pas de polluants nocifs y inclus les produits d'entretien et de nettoyage).
- Maintenir la mise en place d'afficheur de CO₂ à des fins d'information aux occupants.
- Maintenir la mise en place d'ouvrants manuels pour une aération forcée ponctuellement en cas de pointes de polluants, humidité, odeurs, CO₂, etc;

Extrait du document de position d'association l'ASHRAE (american association of heating, refrigerating and air-conditioning engineers) sur le dioxyde de carbone en « indoor » rédigé par un comité regroupant :

A. Persily, PhD – National institute of Standards and Technology Gaithersburg, Maryland, USA

W. Bahnfleth, PhD, PE – Pennsylvania State University, USA

H. Kipen, MD, MPH - Rutgers University, School of Public Health Piscataway, New Jersey, USA

J. Lau, PhD - University of Nebraska, USA

C. Mandin, PhD – CSTB (Centre scientifique des Techniques du bâtiment) France

C. Sekhar, PhD – National University of Singapore, Singapore

P. Wargocki, PhD – Technical University of Denmark, Denmark

L. Nguyen Weekes Peng, ing. – La Cité College Ottawa, Canada

ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide (2022)

- Indoor CO₂ concentrations do not provide an overall indication of indoor air quality, but they can be a useful tool in IAQ assessments if users understand the limitations in these applications
- Existing evidence for direct impacts of CO₂ on health, well-being, learning outcomes and work performance at commonly observed indoor concentrations is inconsistent and therefore does not currently justify changes to ventilation and IAQ standards, regulations or guidelines
- Air-cleaning technologies that remove only CO₂ will not necessarily improve overall indoor air quality and can interfere with systems using CO₂ for ventilation control or indoor air quality monitoring

Annexe A5 : Recommandation hygiéniques relatives à la ventilation mécanique (Peter KVAS, Ing. Dipl. FH)

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
Hygiène du système de conduites					L'air frais apporté au système doit être sain, de bonne qualité et sans odeur particulière
	Qualité de l'apport d'air frais de la VMC				L'air frais apporté ne doit pas se dégrader lors du passage de l'extérieur vers les locaux asservis.
		Apport de l'air frais au niveau de la toiture			Directive concernant l'aspiration d'air frais au niveau de la toiture pour des raisons hygiéniques.
			X		Gaz d'échappement des cheminées, des poêles-cheminées à bois, évacuations de bains/WC/etc. sont à éviter
				X	Éviter les matériaux nocifs pour la toiture (p. ex. les étanchéités bitumineuses)
				X	Éviter un surchauffement estival de la toiture
				X	Toiture verte peut être avantageuse du point de vue surchauffement
				X	Les aspirations d'air frais au niveau des murs extérieurs, des jambettes et des pignons sont à préférer
			X		Tenir compte des surfaces de toiture recevant les panneaux solaires ou photovoltaïques pour positionner l'aspiration d'air frais
			X		En cas d'allergies, une aspiration au niveau de la toiture est à éviter (pers.)
		Apport d'air frais par le sol			L'aspiration de l'air frais se fait à travers le sol (p. ex. jardin)
			X		Éviter le positionnement de l'aspiration d'air frais à proximité immédiate de source de pollution ou d'odeur (composte, poubelles, garages, garages souterrains, etc.)
			X		Positionnement de l'aspiration d'air frais à une hauteur d'au moins 1 mètre du sol
				X	Positionnement de l'aspiration d'air frais à une hauteur d'au moins 2-2,5 mètres du sol si possible
				X	En cas d'allergies, positionnement de l'aspiration d'air frais à une hauteur d'au moins 2,5-3 mètres du sol avec éventuellement des filtres de qualité supplémentaires (pers.)
				X	En cas de danger de vandalisme, positionner l'aspiration d'air frais à une hauteur d'au moins 2,5-3 mètres du sol (pers.)
				X	Positionner l'aspiration d'air frais dans l'ombre afin d'éviter un surchauffement estival (éviter donc de préférence les côtés sud et ouest du bâtiment)
				X	Tenir compte des niveaux de neige potentiels selon la région
				X	De manière générale, plus l'aspiration d'air frais est élevée, meilleure sera la qualité de l'air frais (pers.)
		Apport d'air frais mural (mur extérieur)			L'aspiration d'air frais est positionnée au niveau du mur extérieur
			X		Les mêmes recommandations que pour l'apport à travers le sol sont valables

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
			X		Tenir compte des surfaces murales recevant les panneaux solaires ou photovoltaïques pour positionner l'aspiration d'air frais
		Éviter un court-circuitage entre l'évacuation d'air vicié et l'aspiration d'air frais			Minimiser ou mieux éviter un court-circuitage entre l'évacuation d'air vicié et l'aspiration d'air frais
			X		Éviter un court-circuitage entre l'évacuation d'air vicié et l'aspiration d'air frais. Alternativement une grille d'aération extérieure combinée selon les recommandations du fabricant
				X	Distance entre aspiration et évacuation au moins 2- 2,5 mètres
				X	Distance entre aspiration et évacuation au moins 1 mètre si sur des faces de bâtiment différentes
				X	Toiture plate : distance entre aspiration et évacuation supérieure à 2,5-3 mètres
			X		Positionnement mural : distance entre aspiration et évacuation supérieure à 1 mètre
	La stratégie antigel de la VMC				Stratégie destinée à éviter le gel de l'échangeur thermique en hiver
		Échangeur géothermique air-sol (puits canadien)			
			X		Les conduites de l'échangeur géothermique air-sol sont à réaliser selon les exigences des fabricants en évitent des matériaux nocifs
			X		Éviter les joints dans les conduites d'air neuf
			X		Vérifier les pertes de pression de l'échangeur en l'intégrant dans les pertes de pression globales du système de conduites du bâtiment
			X		Prévoir un effluent de condensation pour l'échangeur géothermique de sorte qu'aucune condensation ne stagne dans les conduites d'air (prévoir une inclinaison de 1-2° pour les conduites d'air de l'échangeur géothermique)
			X		Dans les régions à risque de radon, évaluer l'utilité d'un échangeur géothermique air-sol et remplacer le cas échéant par un échangeur géothermique à eau glycolée
			X		Éviter un „croisement“ des infrastructures d'approvisionnement du bâtiment avec les conduites d'air de l'échangeur géothermique au niveau du sol
			X		Tenir compte des niveaux de neige potentiels selon la région et éviter que la neige ne puisse entrer dans les conduites d'air
				X	Choisir les dimensions des conduites d'air de sorte à ne pas dépasser des vitesses d'air de 1,5-2 m/s (cf. Indications des fabricants)
			X		Filtrer l'air frais en amont du filtre fin par un filtre grossier
		Échangeur géothermique à eau glycolée			L'échangeur géothermique à eau glycolée est plus avantageux que l'échangeur air-sol du point de vue hygiénique
			X		Les recommandations concernant l'échangeur air-sol restent valables pour l'échangeur à eau glycolée
			X		Éviter un "croisement" des infrastructures d'approvisionnement du bâtiment avec les conduites d'air de l'échangeur géothermique à eau glycolée au niveau du sol

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
			X		L'effluent de condensation doit être réalisée de manière hygiénique et selon les règles de l'art
			X		Filtrer l'air frais en amont du filtre fin par un filtre grossier
		Bobine de préchauffage électrique			L'alternative plus hygiénique et moins chère à l'échangeur géothermique
			X		Les recommandations concernant l'échangeur air-sol restent valables
				X	Type 1 : VMC avec une stratégie « antigel en régime sous-pression »
					Veiller à ne pas dépasser une tolérance de déséquilibre « disbalance » de 10% entre air frais apporté et air vicié évacué. Une sous-pression du bâtiment est possible (vérifier les données du fabricant)
				X	Type 2 : VMC avec double surveillance de température comme surveillance antigel (surveillance de la température de l'air frais et de l'air évacué) (La bobine ne devient active que si les deux températures sont mesurées, p. ex. air frais $\leq 5^{\circ}\text{C}$ et air évacué $< 3^{\circ}\text{C}$)
					Type 3 : VMC avec surveillance « Hx » (appareils « eco »)
				X	Déterminer la valeur de référence des besoins en électricité de la stratégie « antigel ». Les besoins peuvent dépasser ceux de l'échangeur géothermique à eau glycolée en période de gel
	La phase de construction et le système de conduites d'air				D'un point de vue hygiénique, il faut veiller à ne pas contaminer les systèmes de conduites par des matériaux de construction nocifs.
			X		Garantir un accès aux systèmes de conduites d'air à certains endroits pour les révisions
			X		Maintenir toutes les ouvertures du système de ventilation fermées pendant la phase de chantier afin d'éviter un encrassement du système
				X	Le montage du système de conduites doit être effectué rigoureusement selon les plans réalisés en amont
	Accès au système de ventilation à des fins de révision et d'entretien				Un nettoyage hygiénique des conduites d'air de la VMC ne peut se faire qu'au moyen d'un accès adéquat au système
		Centrale de ventilation avec récupération de chaleur			
			X		Centrale de ventilation et son entretien électrique
			X		Amortisseur de son pour pulsion et extraction au niveau de la centrale
			X		Effluent de condensation
			X		Veiller à un accès adéquat aux filtres de la centrale de ventilation (air frais et air vicié)
		Système de conduites d'air			
			X		Lors de la planification des conduites d'air prévoir les accès de révision afin de permettre un nettoyage adéquat des conduites
				X	Conduite d'air passe par une gaine ou cheminée centrale
			X		Silencieux (amortisseur de son) cylindriques entre les locaux à pulsion d'air
			X		Permettre l'accès aux bouches d'aération (pulsion et extraction)
			X		Garantir l'accès aux caissons distributeurs

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
				X	Grillage de protection de l'aspiration extérieure d'air frais facilement accessible
				X	Grillage de protection de l'extraction extérieure facilement accessible
		Échangeur géothermique - air			
			X		Garantir l'accès du filtre d'air frais (entretien, nettoyage)
			X		Garantir l'accès de l'effluent de condensation (nettoyage)
		Échangeur géothermique à eau glycolée			
			X		Garantir l'accès du filtre d'air frais (entretien, nettoyage)
			X		Garantir l'accès pour vérifier le bon fonctionnement de la pompe de circulation (cf. indications du fabricant)
			X		Garantir l'accès pour l'entretien et le nettoyage de l'échangeur thermique
		Bobine de préchauffage électrique			
			X		Garantir l'accès du filtre d'air frais (entretien, nettoyage)
			X		Garantir l'accès pour vérifier le bon fonctionnement de la bobine (cf. indications du fabricant)
	Planification de la ventilation mécanique				Une planification détaillée constitue un avantage
			X		Plans bidimensionnels de la ventilation mécanique
				X	Plans tridimensionnels de la ventilation mécanique
				X	Calculs des pertes de pression du système de conduites
			X		Prévoir les accès de révision du système de conduites d'air et les identifier sur les plans
			X		Considérer les filtres du système (pour l'entretien) et les identifier sur les plans
			X		Assurer un accès des conduites d'air lors de la planification afin de permettre un nettoyage des conduites
				X	Idéalement le positionnement des meubles est à prévoir afin de planifier des zones de confort et des accès des bouches d'aération
			X		Planifier les systèmes des conduites d'air à l'intérieur de l'enveloppe thermique afin d'éviter des phénomènes de condensation dans les conduites d'extraction ou de minimiser la récupération de chaleur
				X	Positionner la centrale de ventilation mécanique de préférence à l'intérieur de l'enveloppe thermique (cf. Indications du fabricant)
			X		Planification et exécution des conduites d'air de manière hygiénique et propice au nettoyage/entretien (conduite arrondie plus faciles à nettoyer)
			X		Utiliser des matériaux inertes d'un point de vue hygiénique (cf. indications du fabricant) pour les conduites d'air
			X		Assurer une séparation des conduites d'air entre deux logements (résidences, bâtiments fonctionnels)
			X		Si la ventilation mécanique concerne à la fois une partie chauffée et une partie non-chauffée, les systèmes de conduites devraient être séparés (p. ex. cave et séjours)
			X		Dans le cas d'une ventilation de la cave, une surveillance « Hx » des températures et humidités relatives intérieures et extérieures est recommandé durant l'été

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
				X	Veiller à un équilibre du nombre de bouches de pulsion et d'extraction pour chaque étage et unités de logement (recommandation personnelle)
			X		Les silencieux doivent être accessibles pour la révision un positionnement dans la chape ou dans un faux-plafond sont à éviter
			X		En cas de ventilation des caves dans une région à radon, la ventilation doit se faire via un système séparé
	Échangeur thermique de la VMC				
				X	Dans le cas d'un échangeur de chaleur rotatif ou enthalpique, il faut assurer une qualité hygiénique impeccable de l'air entrant
				X	Les échangeurs thermiques à courants croisés en aluminium sont sans risque du point de vue hygiénique
				X	Tenir compte des informations du fabricant « échangeur thermique – fuites internes »
	Exécution du système de conduites d'air				
				X	Les conduites en tôle d'acier hélice sont normalement sans risque du point de vue hygiénique
				X	L'utilisation de tôle en acier zinc pour les composantes de la ventilation (distributeurs, silencieux, clapets anti-feux, régulateurs de débits d'air, ...) constitue un avantage
				X	La tôle en acier zinc peut présenter des traces de rouille aux coupures, toute condensation à la surface est à éviter. Si une telle condensation ne peut être évitée, il vaut mieux utiliser des composantes en acier inoxydable
			X		L'inertie chimique des conduites en plastique est à vérifier chez le fabricant (certificats)
				X	Les conduites en aluminium flexible sont à éviter dans le secteur résidentiel étant donné qu'ils sont difficiles à nettoyer
	Entretien				L'hygiène de la VMC dépend également de la fréquence d'entretien et de nettoyage
			X		Lors de la planification, vérifier les consignes du fabricant concernant l'entretien des filtres
			X		Remplacer les filtres selon les besoins
			X		Respecter les consignes des fabricants concernant l'entretien des filtres
			X		Les filtres des échangeurs géothermiques sont à entretenir selon les consignes du fabricant
	Courants d'air				Courants d'air dus à des débits élevés
	Recommandation concernant les pulsions/extractions				
				X	Max. 20m³/h – pour les pulsions et extractions si DN100 (diamètre 100 mm)
				X	Max. 30m³/h - pour les pulsions et extractions si DN125 (diamètre 125 mm)
				X	Pour des volumes d'air plus importants en pulsion, augmenter le nombre de pulsions afin d'assurer un brassage complet de l'air du local (p.ex. 2 pulsions pour un volume de 40 m³/h)
	Équilibrage des étages en termes de débits d'air				Les courants d'air entre les étages peuvent être minimisés si la pulsion et l'extraction au sein d'un étage sont équilibrés

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
			X		Un déséquilibre entre pulsion et extraction pour le bâtiment ne devrait pas dépasser 10% de tolérance
				X	Un déséquilibre entre pulsion et extraction par étage ne devrait pas dépasser 10% de tolérance
				X	Prévoir le même nombre de pulsions que d'extractions dans la mesure du possible par étage et par unité de logement
	Types de bouches d'aération				Certains types de bouches de pulsion favorisent des sensations de courants d'air
				X	Vérifier si des bouches à longue portée (pulsion directionnelle) sont vraiment nécessaires
				X	Vérifier si des bouches de pulsion au sol sont vraiment nécessaires
				X	Les bouches en plafond à l'aux murs sont à favoriser si elles sont placées hors zone de confort
	"zone de confort" des bouches à extraction				
				X	Afin de garantir un brassage optimal du local, les locaux fortement contaminés devraient être munis de plusieurs bouches d'extraction
				X	Tenir compte de l'éclairage pour le positionnement de bouches d'extraction au plafond
	"zone de confort" des bouches de pulsion				Positionnement des bouches de pulsion à distance suffisante par rapport à l'utilisateur du bâtiment
			X		Ne pas positionner les bouches de pulsion à proximité des lits, fauteuils, canapés, chaises (respecter une distance par rapport à la tête de l'utilisateur)
			X		Positionner les bouches de pulsion de préférence en dehors de la « zone de confort », surtout si la VMC refroidit ou chauffe l'air
				X	En cas de débits élevés p.ex. au salon ou dans la chambre parentale, multiplier le nombre de bouches de pulsion afin de garantir un brassage complet de l'air du local
				X	En cas de bouches de pulsion dans le « zone de confort » de l'utilisateur, préférer des bouches de pulsion à effet coanda
				X	Respecter au moins 1 m de distance entre les bouches de pulsion au plafond ou au mur et la tête de l'utilisateur ainsi qu'un débit de 20m³/h
			X		Vérifier si des bouches à pulsion au sol sont vraiment nécessaires ; si OUI respecter une distance de 1m par rapport aux personnes
			X		Tenir compte de l'éclairage pour le positionnement de bouches de pulsion au plafond
	Récupération de la chaleur de la VMC				Sensation de "courant d'air" dépend de la récupération de chaleur de l'installation
			X		Plus la récupération de chaleur est réduite, plus il convient d'éviter des bouches de pulsion à l'intérieur de la "zone de confort"
				X	Si possible planifier les débits de pulsion et d'extraction avec une performance de la VMC à 50-60% afin d'éviter une minimisation de la récupération de chaleur (cf. consignes du fabricant)
				X	Si des bouches d'aération des parties non chauffées de la cave sont liés à la récupération centrale de la VMC, une

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
					réduction de la récupération de l'apport d'air frais est possible
				X	Les locaux non chauffés (p.ex. la cave) sont à équiper d'un système centralisé ou décentralisé à part avec ses propres conduites (survey Hx constitue un avantage)
				X	Éviter les systèmes qui prévoient de couper le moteur d'air frais en hiver en termes de protection contre le gel (sous-pression dans le bâtiment, perturbation de la récupération de chaleur ou sensations de courants d'air)
				X	Les hottes aspirantes des cuisines peuvent perturber l'efficacité de la récupération de chaleur et sont à éviter par conséquent
				X	Les hottes à recyclage (sans évacuation) n'interfèrent pas sur la pression, et sont donc compatibles avec le système de récupération de chaleur de la VMC
				X	Les aspirateurs centraux peuvent influencer l'efficacité de la récupération de chaleur si l'air aspiré est évacué hors du bâtiment
	Échangeur géothermique à air				
				X	Ne pas dépasser les vitesses de l'air de 1,5.2,0m/s pour les échangeurs géothermiques à air
Sonorisation du système					Sous-dimensionnement du système de conduites ou de la VMC
	Pertes de pression du système de conduites				
				X	Élaborer les pertes de pression de toutes les composantes
				X	La perte de pression totale par unité de logement de doit pas dépasser 70-80 Pa .
			X		Si la perte de pression totale de la pulsion ou de l'extraction dépasse 120 Pa , il faut vérifier si une augmentation supplémentaire de la VMC de l'ordre de 30% reste possible (cf. fabricant)
			X		Un réglage optimal des bouches d'aération (ouverture maximale de la section) constitue un avantage
				X	La VMC devrait être réglée à 50-60% de sa puissance maximale
			X		Si la VMC fonctionne à 70-85% de sa puissance maximale , il convient de vérifier si une augmentation de 30% en supplément reste possible
				X	Tous les filtres du système sont à vérifier et contrôler selon les fréquences indiquées par le fabricant
				X	Tous les filtres du système sont à dimensionner de sorte à espacer les intervalles d'entretien et de nettoyage (cf. fabricants)
				X	Contrôler les grilles de protection (pulsion et extraction) selon leur encrassement
			X		Plus la perte de pression dans les conduites est élevée, plus la VMC essaie de compenser en augmentant la puissance du moteur et risque donc d'émettre du bruit (cf. données du fabricant)
	Réseau de conduites				La pose des conduites a une influence notable sur les pertes de pression.
				X	Éviter les radius trop serrés pour les conduites (<10cm) (pertes de pression des composantes de la VMC à vérifier chez le fabricant)

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
				X	Éviter 4 à 6 changements de directions de 90° avec des radius <10cm (calcul des pertes de pressions recommandé)
			X		Veiller au découplage sonore des composantes de la VMC lors de l'assemblage/montage
			X		La gaine centrale verticale est à réaliser de manière insonore
				X	Ne pas placer les conduites d'air principales à proximité des "zones de confort"
				X	Le montage du système de conduites ne devrait pas dévier de la planification
			X		Protéger le système des conduites d'air pendant la phase chantier, afin d'éviter tout endommagement, déformation ou encrassement
	Recommandations concernant les débits d'air des bouches d'aération				Plus les débits d'air sont réduits, moins les bouches émettent des bruits gênants.
		VMC centralisée ; récupération de chaleur récupérative			
				X	Max. 20m³/h – pour les bouches d'aération avec des conduites de 100mm (DN100)
				X	Max. 30m³/h - pour les bouches d'aération avec des conduites de 125mm (DN125)
				X	Max. 30-40m³/h – est à éviter si possible (DN100)
				X	Max. 40-60m³/h – est à éviter si possible (DN125)
		VMC décentralisée			
		Récupération de chaleur régénérative			
				X	Une VMC décentralisée avec récupération de chaleur dans chaque local est une alternative à la VMC centralisée
				X	Débit d'air minimal pour chaque appareil : 10-18 m³/h en ne dépassant pas un niveau sonore de 18 dB
				X	Débit d'air maximal pour chaque appareil : 100-130 m³/h
	Vitesse de l'air au niveau des conduites d'air				Vitesse de l'air au niveau des conduites (puissance nominale)
			X		Vérifier la section transversale non obstruée des clapets anti-feu ou des régulateurs de débits d'air (bruits possibles)
		DN100 à 300			p.ex. gaine centrale verticale / conduites principales jusqu'aux distributeurs ou silencieux, régulateurs de débits d'air, clapets anti-feu, etc.
			X		La vitesse de l'air ne devrait pas dépasser les 4,0 m/s (bruits possibles)
				X	La vitesse de l'air ne devrait pas dépasser les 3,0-3,5 m/s (bruits possibles)
		DN63/75/90			p.ex. conduites arrondies ou ovales menant jusqu'aux bouches d'aération (pulsion et extraction) en DN63/75/90
			X		Ne pas dépasser les vitesses de 2,5 m/s
				X	Prévoir des vitesses de 1,0-1,5 m/s si possible
	Longueur des conduites d'air				Plus les conduites sont longues, plus les pertes de pression sont importantes
		DN100 à 300			Gaines centrales verticales, conduites principales vers les distributeurs, silencieux, etc.

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
				X	La longueur des gaines principales dépend des pertes de pression de de l'ensemble des sections transversales y compris les silencieux, etc. (comparer les indications des fabricants)
			X		Le sous-dimensionnement des sections transversales est à calculer en tenant compte des bruits des courants potentiels
		DN63/75/90			Par ex. les conduites arrondies ou ovales (flexibles) alimentant les bouches d'aération en DN63/75/90
				X	Pour les conduites en plastique, ne pas dépasser une longueur de 8 m (cf. indications fabricants)
			X		Pour des longueurs supérieures à 10m , il convient d'évaluer les pertes de pression en tenant compte des changements de direction (cf. indications des fabricants)
	Sous-dimensionnement des appareils				Éviter tout sous-dimensionnement de la VMC
				X	La VMC devrait être réglée à 50-60% de sa puissance maximale
			X		Si la VMC fonctionne à 70-85% de sa puissance maximale , il convient de vérifier si une augmentation de 30% en supplément reste possible
				X	La perte de pression totale par unité de logement de doit pas dépasser 70-80 Pa.
			X		Si la perte de pression totale de la pulsion ou de l'extraction dépasse 120 Pa , il faut vérifier si une augmentation supplémentaire de la VMC de l'ordre de 30% reste possible (cf. fabricant)
			X		Comparer les exigences de puissance pour le bâtiment et les pertes de pression totales aux indications des fabricants afin d'éviter un sous-dimensionnement de la VMC
	Treillis de la façade extérieure				
			X		Prévoir des treillis à mailles de 10mm² pour l'air frais et l'air vicié (les treillis à mailles de 1-2 mm ² ne conviennent pas)
	Emplacement de la centrale de VMC				
			X		Respecter une distance maximale par rapport aux „zones de confort“ des pièces de séjour (salon, chambres à coucher)
				X	Si la VMC est placée dans un local technique, celui-ci doit être muni d'une porte insonorisant
		Emplacement central de la VMC centralisée avec système de récupération de chaleur			Une VMC centralisée commune pour toutes les unités de logement est p.ex. placée sur le toit ou dans la cave.
			X		Prendre en considération un sous-dimensionnement des éléments anti-feu (bruits potentiels)
			X		Prendre en considération un sous-dimensionnement des régulateurs de débits (bruits potentiels)
			X		Assurer une insonorisation adéquate au niveau des régulateurs de débits et des silencieux
		Emplacement décentralisé d'une VMC centralisée munie d'un système de récupération de chaleur			VMC décentralisée – chaque unité de logement possède sa propre VMC
			X		Planifier l'emplacement dans chaque unité de logement se sorte à éviter des perturbations sonores et de sorte à garantir un accès de révision

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
		Emplacement décentralisé d'une VMC décentralisée avec système de récupération de chaleur			VMC décentralisée - chaque local concerné de l'unité de logement possède sa propre unité de ventilation mécanique décentralisée
				X	Une VMC décentralisée avec récupération de chaleur dans chaque local est une alternative à la VMC centralisée
				X	Débit d'air minimal pour chaque appareil : 10-18 m³/h en ne dépassant pas un niveau sonore de 18 dB (cf. indications du fabricant)
				X	Débit d'air maximal pour chaque appareil : 100-130 m³/h
				X	Emplacement au niveau du mur extérieur tenant compte des "zones de confort"
				X	Plus facile à planifier que la VMC centralisée
	Silencieux				
				X	Préférer les silencieux à caissons pour l'air frais, surtout en cas de sous-dimensionnement (vérifier les données du fabricant)
				X	Si nécessaire prévoir des atténuateurs de téléphonie (vérifier les données du fabricant)
				X	Favoriser les distributeurs d'air avec atténuateurs intégrés
				X	Si le local est sous-dimensionné par rapport à la VMC, une centrale avec silencieux intégré pour la pulsion et l'extraction constitue un avantage
	Conduite centrale verticale - positionnement				
				X	Découplage sonore des conduites si nécessaire
			X		Matériaux de revêtement insonorisant pour la gaine et les trappes de révision
			X		Respecter le plus grand écart possible par rapport aux "zones de confort" des locaux à séjour prolongé (salon, chambres)
	Séparation entre deux unités de logement				
			X		Respecter des coupures de bruit de feu lors de la séparation du système entre deux unités de logement
	Humidité relative de l'air				
	Détermination des échanges d'air nécessaires				Les 3 règles pour la détermination des échanges d'air
		1 : dimensionnement normatif	X		Respecter les normes existantes (p.ex. les volumes des locaux chauffés sont à doter d'un échange d'air de 35%
		2: le nombre de personnes	X		Prévoir 30m³/h par personne
		3. les locaux à extraction d'air	X		Locaux à extraction à 20 m³/h :
					-WC
					-garderobe
					- débarras
					- locaux sans fenêtre
					- Hall aux étages
		X	X		Locaux à extraction à 40 m³/h :
					-salle de bain
					- cuisine
					- buanderie
					- sauna

PHASE DE PLANIFICATION	BUT	VARIANTE	OBLIGATOIRE	RECOMMANDÉ	REMARQUES
					- salle fitness
				X	En cas de locaux sans fenêtres, une pulsion ou extraction spécifique est à déterminer
				X	Les règles 1 et 2 devraient aboutir à un débit d'air de 20-30m³/h
				X	En ce qui concerne la règle 3, un échange d'air de 40% ne devrait pas être dépassé. Si ce taux est dépassé il y a lieu de requérir à un concept séparé moyennant une VMC séparée
				X	Pour les locaux humides ou « contaminés » où les pointes d'humidité ne sont que temporaires et limitées dans le temps (sauna, fitness, cinémas, ...), une VMC séparée avec un concept de ventilation spécifique constitue un avantage
	Échangeur thermique de la VMC				
			X		Dans le cas d'un échangeur thermique à enthalpie ou à rotation, l'évolution de l'humidité résiduelle de la phase chantier doit être surveillée pendant les 2-3 premières années (p.ex. nouvelles constructions)
	Température de l'air frais soufflé dans les locaux				Plus la température intérieure est élevée en période hivernale, plus l'humidité relative de l'air dans les locaux risque de se réduire.
				X	L'humidification de l'air frais soufflé dans les locaux (p.ex. eau chauffée) est à éviter (coûts de chauffage à estimer)
				X	Un échauffement de l'air soufflé comme seule source de chauffage pour le bâtiment est à éviter (Charge de chauffage et coûts relatifs sont à évaluer avec le planificateur)
				X	Une adaptation active de la température peut être envisagée à titre de confort thermique (les coûts sont à évaluer)
	Nombre de bouches d'aération				L'augmentation du nombre de bouches de pulsion ou d'extraction permet d'améliorer le brassage de l'air intérieur du local
				X	Chambres à coucher : 2 bouches de pulsion au lieu d'une seule (p.ex. 2 x 20 m³/h au lieu de 1 x 40 m³/h)
					Salon : 2 ou 3 couches de pulsion au lieu d'une seule
					Salle de bain : 2 bouches d'extraction au lieu d'une seule
					Buanderie : 2 bouches de pulsion et 2 bouches d'extraction au lieu d'une bouche de pulsion et une bouche d'extraction
					Cuisine : 2-3 bouches d'extraction au lieu d'une seule

Littérature

AGÖF - Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft (Aktualisierte Fassung vom 28. November 2013)

→ <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-voc-orientierungswerte.html>

AGÖF - Leitfaden "Hausstaubuntersuchungen auf chemische Parameter" - Mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen (SVOC) und Schwermetalle (Stand 12.11.2020)

→ <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaubleitfaden.html>

Allen, J.G., Macomber J.D., 2020. Healthy Buildings : how indoor spaces drive performance and productivity. Havard University Press, 2020, ISBN 978-0-674-23797-1. 292 pages

Al Horr Y., Arif M., Katafygiotou M., Mazroei A., Kaushik A., Elsarrag E., 2016; Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: a review of the literature; International Journal of Soustainable Built Environment, 2016: 5,1-11

ASHRAE, 2010: Guideline 10P, Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments, Second Public Review. ASHRAE, Atlanta, USA

ANSES, CSTB & OQAI, 2014 : Etude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur, rapport d'étude 96 pages

→ <https://www.anses.fr/fr/system/files/AUT-Ra-CoutAirInterieurSHS2014.pdf>

ANSES, 2015 : Evaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés- partie 2 : Évaluation des effets sur la santé et sur l'environnement et estimation qualitative du rapport bénéfices/risques. Rapport d'expertise collective. Saisine n° 2011-SA-0132. 243 pages

→ <https://www.anses.fr/fr/system/files/CONSO2011sa0132Ra-02.pdf>

Baden, 2009. L'environnement intérieur : nouveaux allergènes, nouveaux irritants ; Journée Régionale d'actualités en Allergologie, Association des Allergologues, Université de Lille.

Baden, Ott & Reis, 2011. Double-blind non-controlled chemical challenge with environmental toxicological assessment in a Multiple Chemical Sensitivity case. Journal of the neurological sciences. 306. 154-6. 10.1016/j.jns.2011.03.044.

Baden, 2015 : « Environnement et/ou génétique : quel lien avec le cancer ? » dans le cadre du « symposium de formation : Environnement et Cancer » pour l'asbl GSO – Groupe de soignants en Oncologie au CHL à Luxembourg

→ <https://www.chl.lu/fr/symposium-formation-oncologie-2015;>
https://www.dropbox.com/sh/bc5fgk9cia8dra5/AABBqn6uGtuN_NSd0QYw12eMa?dl=0&preview=01_R+Baden_Service+Sante+Environnementale_Lux_Environnement+et+ou+genetique+Quel+lien+cancer.pdf

Baden, 2017 : Les polluants de l'air intérieur ; abstracts du congrès La pollution de l'air une menace pour le cerveau de l'enfant ; 2^e réunion internationale Santé et Environnement au Conseil de l'Europe à Strasbourg par l'association RISE – rencontres internationales santé et environnement

→ <https://www.asso-rise.com/>

Baden, 2022 : L'habitat et la construction sains : la maison passive biologique, Edition Binsfeld, ISBN 978-99959-42-74-8, 320 pages

Bayrisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, 2010: Vorkommen und gesundheitliche Bewertung von Siloxanen. Band 21 der Schriftenreihe-Materialien zur Umweltmedizin, 150 pages, ISBN 978-3-942018-10-4

Belpomme D., Hardell L., Belyaev I., Burgio E., Carpenter D., 2018. Thermal and non-thermal health effects of low intensity non-ionizing radiation : An international perspective. Environ Pollut. 2018 Nov;242(Pt A):643-658

→ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30025338/>

Belpomme D., Irriguay P., 2020. Electrohypersensitivity as a Newly Identified and Characterized Neurologic Pathological Disorder: How to Diagnose, Treat, and Prevent It. Int J Mol Sci . 2020 Mar 11;21(6):1915

→ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32168876/>

Bioinitiative, 2012. A Rationale for Biologically-based public exposure Standards for electromagnetic Fields (ELF and RF), 1557 pages

→ www.bioinitiative.org

Bornehag, 2004 : The association between asthma and allergic symptoms in children and phthalates in house dust: a nested case study; Environmental Health Perspectives, 2004 : 112 (4) 1393-1397

→ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1247566/>

Bundesgesundheitsblatt, 2020: Richtwerte für Benzothiazol in der Innenraumluft – Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte. Springer Verlag 2020.63:1304-1310

→ <https://doi.org/10.1007/s00103-020-03193-w>

CARB, 2005 : California Air Resources Board (2005) Report to the California Legislature: Indoor air pollution in California. US-California : 363 pages

→ <https://www.arb.ca.gov/research/apr/reports/l3041.pdf>

Commission, 2018 : COM (2018) 734 final

→ <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-32347-strategie.pdf>

→ [http://europa.eu/rapid/press-release MEMO-18-6285 fr.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-18-6285_fr.htm)

COST, 1992 : CEC-Commission of the European Communities: Sick Building Syndrome. COST Project 613, Brussels, Reports N°4, 1989

CSL, 2019 : Chambre des salariés Luxembourg, consultation 22janvier 2019

→ <https://www.csl.lu/fr/vos-droits/securite-sociale/assurance-accident/maladie-professionnelle>

Cullen, 1987 The work with Multiple Chemical Sensitivities: an overview; Occupational Medicine 2, 655-661, 1987

Danish Environmental Protection Agency's List of Undesirable Substances (LOUS) de 2010

→ <https://eng.mst.dk/chemicals/chemicals-in-products/assessment-of-chemicals/list-of-undesirable-substances/>

Danish research center for chemical sensitivities, 2013 :

→ <http://www.mcsvidencenter.dk/?site=2&side=13&id=326>

Daudeker 1995: Gifte im Alltag, 253 S., Verlag C.H. Beck, ISBN-3-406-39186-9

Daunderer 1990: Handbuch der Umweltgifte, 4000 S., ecomed Landsberg am Lech (1990) ISBN-10: 3609711205

De Blay, F. 2003: Medical Indoor Environment Counselor (MIEC): role in compliance with advice on mite allergen avoidance and on mite allergen exposure. Allergy 2003: 58: 27–33

Déclaration universelle des droits de l'homme, 1948

→ https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/217%28III%29

Division de la radioprotection DRP du Ministère de la Santé luxembourgeois, 2018

→ <http://sante.public.lu/fr/prevention/radon/campagnes-de-mesures-recentes/index.html>

Demeneix B., Slama R., 2019 : Endocrine disruptors : from scientific evidence to human health protection – study requested by the PETI committee (European Parliament); policy department for citizens' rights and constitutional affairs – DG internal policies of the Union PE 608.866, 132 pages

→ [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/608866/IPOL_STU\(2019\)608866_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2019/608866/IPOL_STU(2019)608866_EN.pdf)

EHS-Toulouse : Décision du Tribunal du Contentieux de l'incapacité de Travail de Toulouse

→ <https://www.scribd.com/document/276519756/Marine-Decision-AAH-072015>

EU-LCI, 2023 : 2023 List of “Lowest Concentration of Interest” (LCI) values. European Union, 2023 ISBN 978-92-68-07091-8 doi : 10.2873/88989

→ <https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/d/d/workspace/SpacesStore/5a1ce5d0-b945-480b-b7aa-8848864a5d4e/download>

→ <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/44905>

EU Priority List des perturbateurs endocriniens

→ http://ec.europa.eu/environment/chemicals/endocrine/strategy/substances_en.htm#priority_list

Europäische Gesellschaft für gesundes Bauen und Innenraumhygiene EGGBI, 2021: Konservierungsmittel Isothiazolinon. Aufgerufen 16.2.21, 14 pages

EuSANH, 2012: Childhood Leukemia and environmental factors – Health Council of the Netherlands. Publication no 2012/33 ISBN 978-90-5549-926-7 et Brussels Superior Health Council 2012. Advisory report no 8548 ISBN 978-94-9054-230-6

Fisk, W.J., 1997 : Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments; Indoor Air, 1997 ; 7: 158-172

Fisk W.J., 2000 : Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. Annual Review of Energy and their Environment 25(2): 537-566

Fisk, W.J., 2011 : Benefits and costs of improved IEQ in U.S. Offices ; Lawrence Berkeley National Laboratory et EPA, USA ; Indoor Air 2011; 21:357-367 (Internat. Journal of Indoor Environment and Health)

Gebbers, 2003 : Sick building Syndrome ; Forum Médical Suisse, N°5, 29 janvier 2003

→ http://buerowissen.ch/data/131/cms-files/sick_building.pdf

Guide-Pratique - Pacte Climat, 2025 : Guide pratique : taux et conditions d'octroi des aides financières pour communes, syndicats de communes et établissements publics placés sous la surveillance des communes 28 pages

→ https://www.klima-agence.lu/sites/default/files/2025-07/FCE_Guide%20pratique_20250715_0.pdf

→ <https://pacteclimat.lu/fr/acteur-engage/news/communiqué-de-presse-présentation-du-régime-daides-revise-klimabonus-gemengen-un-soutien-renforce-pour-acceler-la-transition-climatique-et-energetique-0>

Grandjean, 2006 : Developmental neurotoxicity of industrial chemicals, Lancet 368, 2167-2178

Huangfu Y., Lima N.M., O’Keeffe P., Kirk W.M, Lamb B.K., 2021: Whole house emission rates and loss coefficients of formaldehyde and other VOCs as a function of air change. Environ.Sci. Technol Jan 2020, 31 pages 10.1021/acs.est.9b05594 <https://sci-hub.eg/10.1021/acs.est.9b05594> vu le 6 déc 2021.

Hutter, 2005 Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau auf die Innenraumluftqualität und Gesundheit, Forschungsvorhaben F1469 Wohnbauforschung des Bundesministeriums für Wirtschaft & Arbeit Österreich, 2005.

ICPS, 1996 : International Program on Chemical Safety : Conclusions and recommendations of a workshop on Multiple Chemical Sensitivities (MCS) ; Regul. Toxicology and Pharmacology 24, pp 188-189, 1996.

IGAS, 2017 : Inspection Générale des Affaires Sociales française : La stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE) ; évaluation de la mise en œuvre et propositions d’évolution

→ <http://www.igas.gouv.fr/IMG/pdf/2017-117R.pdf>

Ilvonen O. et al, 2017: Mindeststandards für Bauprodukte: gesundheitliche Bewertung und rechtliche Regelungen in Gebäudeschadstoffe und Innenraumluft: Emissionen aus Bauprodukten, Verlag Rudolf Müller; pages 16-25

Interphone, 2010 : Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study, International Journal of Epidemiology, 2010, 1–20 (PDF) Int J Epidemiol. 2010 Jun ;39(3):675-94

→ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20483835> <http://www.euro.who.int/en/health-topics/noncommunicable-diseases/cancer/news/news/2010/7/interphone-study-on-mobile-phone-use-and-brain-cancer-risk>

ITM, 2011, 1996 et 1991 : Installations de ventilation et de conditionnement d’air. Prescriptions de sécurité types. Inspection du Travail et des Mines

→ <https://itm.public.lu/fr/securite-sante-travail/etablissements-classes/conditions-types.html>

Järveholm, 1993. It is time to change the terminology of Sick Building Syndrome. Indoor Environment 1993 ; 2: 186-188

Jantunen, 2011 : Promoting actions for healthy indoor air IAIAQ; European Commission Directorate General for Health and Consumers, Luxembourg ; 45 pages ISBN 978-92-79-20419-7

→ [www.semanticscholar.org/paper/Promoting-actions-for-healthy-indoor-air-\(IAIAQ\)-Jantunen-Fernandes/2c7de7ca0d5c9fdedfd396958292834c4fee6ade](http://www.semanticscholar.org/paper/Promoting-actions-for-healthy-indoor-air-(IAIAQ)-Jantunen-Fernandes/2c7de7ca0d5c9fdedfd396958292834c4fee6ade)

Kelly, 2000 : risk reduction in the 21st century - Indoor air quality symposium, Sacramento, may 2000

Kephalopoulos D, 2006 : Strategies to determine and control the contributions of indoor air pollution to total inhalation exposure (STRATEX), European Commission : 79 pages.

Kurzweil P., 2013. Toxikologie und Gefahrstoffe – Gifte-Wirkungen-Arbeitssicherheit. Verlag Europa-Lehrmittel, 520 pages, ISBN 978-3-8085-7024-1

Lacour, 2005 : Multiple Chemical Sensitivity Syndrome (MCS) - suggestions for an extension of the U.S. MCS-case. Int Journal of Hygiene and Environmental Medicine 208, 141-151, 2005

Landesgesundheitsamt Baden-Wurtemberg, 2001 (überarbeitet 2004). Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. 195 Seiten

→ https://www.gesundheitsamt-bw.de/SiteCollectionDocuments/03_Fachinformationen/Fachpublikationen+Info-Materialien/Schimmelpilze_NachweisBewertungQM.pdf

Lawa, 2016: Mikroschadstoffe in Gewässern, LAWA-AO – Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, Janvier 2016, 135 pages

Leech, 2004 : Health in occupants of energy efficient new homes (Canada), Indoor air, 2004 : 14 : p. 169-173

Lippmann M., Leikauf G., 2020: Environmental toxicants – human exposures and their health effects. Wiley. 1004 pages. ISBN 978-1-119-43880-9

Loftness, 2006 : Sustainability and Health are Integral Goals for the Built Environment Healthy Buildings 2006 Lisbon, Portugal June 4-8, 2006

Lu et al, 2020: COVID-19 Outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. Emerging Infectious Diseases www.cdc.gov/eid, vol 26 N°7 July 2020

Marquardt H., Schäfer S.G., 1997: Lehrbuch der Toxikologie. Spektrum Akademischer Verlag. 1004 pages. ISBN 3-8274-0271-9

Marquardt H. Schäfer S.G., Barth H., 2019: Toxikologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart. 1458 pages. ISBN 978-3-8047-3657-3

Metiäinen P, 2016 : New regulation for the housing health and required qualifications for the certified indoor environment specialists in Finland, National Supervisory Authority for Welfare and Health – 14th International Conference on Indoor Air quality and Climate (INDOOR AIR 2016), proceedings ISBN : 978-1-5108-3687-7 p 26-28

Metzger, 2001: Flammschutzmittel in Oberflächenwässern, Grundwässern und Abwässern - Eintragspfade und Gehalte; Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart, 53 pages

→ <https://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/40084/BWB99012SBer.pdf?command=downloadContent&filename=BWB99012SBer.pdf&FIS=203>

Ministère de la Santé Luxembourg, 2014 : Plan National Cancer 2014-2018

→ <http://sante.public.lu/fr/publications/p/plan-national-cancer-lux-2014-2018/index.html>

Molhave, 1990 The sick building syndrome (SBS) caused by exposure of volatile organic compounds (VOCs) in DM weeks, RB Gammage eds. The practioner's approach to indoor air quality investigations. Aiha Akron, OH : 1990

Molhave, 1992 : Controlled experiments for studies of the sick building syndrome. Ann. NY Academy of Sciences, 1992; 641: 45-55

Mundy, 2009 : Building a database of developmental neurotoxicants : evidence from human and animal studies (US-EPA) –Neurotoxicology Division

→ https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NHEERL&dirEntryId=200234
<http://experimentalvaccines.org/wp-content/uploads/2013/10/epa-Mundy.pdf>

Murray C., 2020: Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. Lancet 2020; 296: 1223-49

→ www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S0140-6736%2820%2930752-2

NHEXAS National Human Exposure Survey, 1999: National human exposure assessment survey (NHEXAS): exploratory survey of exposure among population subgroups in EPA Region V., J Expo Anal Environ Epidemiol. 1999 Jan-Feb;9(1):49-55

→ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10189626>

NOPE, 1990: Non-occupational Pesticide Exposure Study; US-EPA, 192 pages; Immerman, F. FINAL REPORT OF THE NON-OCCUPATIONAL PESTICIDE EXPOSURE STUDY (NOPEs). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/3-90/003.

NTP (National Toxicology Program). 2016. Report on Carcinogens, Fourteenth Edition.; Research Triangle Park, NC: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service

→ <https://ntp.niehs.nih.gov/go/roc14> (EndNote XML)

Offermann F, J, Maddalena R., Offermann J.C., Singer B.C. Wilhelm H. The Impact of Ventilation on the Emission Rates of Volatile Organic Compounds in Residences. Conference Paper Presented on Healthy Building 2012 – 10th International conference

→ https://www.researchgate.net/publication/288171623_The_impact_of_ventilation_on_the_emission_rates_of_volatile_organic_compounds_in_residences

OMS (angl. World Health Organisation WHO), 1946 : Préambule [archive] adopté par la Conférence internationale sur la Santé, New York, 19-22 juin 1946; signé le 22 juillet 1946 par les représentants de 61 États. 1946 ; (Actes officiels de l'Organisation mondiale de la Santé, n°. 2, p. 100) et entré en vigueur le 7 avril 1948. à la Constitution de l'Organisation mondiale de la Santé.

OMS (angl. World Health Organisation WHO), 1983: Indoor Air Pollutants : Exposure and Health Effects ; Euro Reports and Studies, Copenhagen 1978, WHO, 1983

OMS. 1989. Charte européenne de l'environnement et de la santé

→ <http://www.euro.who.int/fr/publications/policy-documents/european-charter-on-environment-and-health,-1989>.

OMS. 1994. Déclaration d'Helsinki sur l'environnement et la santé, Helsinki, 20–22 juin 1994

→ <http://www.euro.who.int/fr/publications/policy-documents/helsinki-declaration-on-action-for-environment-and-health-in-europe,-1994>

OMS, 2005. Champs électromagnétiques et santé publique : hypersensibilité électromagnétique

→ https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs296_fr/en/

OMS, 2009. Handbook on Indoor Radon – a public health perspective

→ http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf;jsessionid=44726AAAEF9E42EF73EB8C3CD20CD57D?sequence=1

Orisakwe O.E., 2012. Other heavy metals : antimony, cadmium, chromium and mercury. Toxicity of building materials, Woodhead Publishing Limited ISBN 978-1-84569-408-1 p.297-333

Pacheco-Torgal, 2011. Toxicity of Building Materials. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. ISBN-10-0081016360, 506 pages

R-2000 standard : environmentally friendly homes – natural resources Canada - government Canada

→ www.nrcan.gc.ca; <https://www.nrcan.gc.ca/homes/buying-energy-efficient-new-home/r-2000-environmentally-friendly-homes/20575>

Reis J., 2019 : La neurologie environnementale ; Pratique Neurologique – FMC 2019 ; 10 :1-8

Rifkin J., 2016. The TIR Consulting Group LLC. The 3rd Industrial Revolution Strategy Study for the Grand Duchy of Luxembourg. 475 pages

→ https://www.troisiemerevolutionindustrielle.lu/wp-content/uploads/2016/11/TIR-CG_Luxembourg-Final-Report_Long-Version.pdf

Rohde, Ziegler, Engelmann, Henninger, Jorschick, Dannerberg, Knobloch, 2005 : Pflanzenschutzmittelwirkstoffe – Vorkommen in sächsischen Fließgewässern – Datenstand 1997-2004. Landesamt für Umwelt und Geologie; Landesanstalt für Landwirtschaft, 35 pages

SBM-2015, Standard der Baubiologischen Messtechnik & Baubiologische Richtwerte für Schlafbereiche

→ <https://www.baubiologie.de/downloads/sbm-15.pdf>,
<https://www.baubiologie.de/downloads/richtwerte-schlafbereiche-15.pdf>

SCENIHR, 2015: Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF) by Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks of the European Commission, 288 pages

→ https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_041.pdf

Siilin et al, 2023: Novel computational tool for indoor air quality; 18th Healthy Buildings Europe conference Aachen/Germany 2023, 8 pages; <https://www.ukaachen.de/kliniken-institute/hb2023-europe/about/welcome-to-hb2023-europe/>

Spertini, 2013: HOPE - Health Optimisation Protocol for Energy-efficient buildings

→ <https://hope.epfl.ch/results/FinalReportHOPEpublic.pdf>

Stranger (Vito) 2012 : Clean Air Low Energy Residences

→ <https://cleanairlowenergy.vito.be/en>

Robert et al, 2018: Impact of Ventilation on indoor air quality in a sports store,

→ <https://www.researchgate.net/publication/325781269>

TEDX – The endocrine disruption exchange

→ <https://endocrinedisruption.org/>

The Proposition 65 list: chemicals known to the state to cause cancer or reproductive toxicity (version 2019); California office of Environmental Health Hazard Assessment

→ <https://oehha.ca.gov/proposition-65/proposition-65-list>

UBA, 2017 Umweltbundesamt Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. 188 Seiten ISSN 2363-8311

→ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf

Umweltbundesamt, 2007: Phthalate: die nützlichen Weichmacher mit den unerwünschten Eigenschaften, 24 pages

→ <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3540.pdf>

US-EPA, 1987: Unfinished business: a comparative assessment of environmental problems (overview report and 4 volumes), US Environmental Protection Agency, office of Policy analysis, office of policy, planning and evaluation, Washington DC, 1987

US-EPA, 2020 : Chemicals Evaluated for Carcinogenic; Potential Annual Cancer Report 2020

→ http://npic.orst.edu/chemicals_evaluated.pdf

Vandenberg et al, 2012 : Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals : Low-Dose Effects and Non-monotonic Dose Responses (Endocrine Review, March 14, 2012)

VDB, 2018: VDB-Richtlinien – Band 1 & Band 2

→ <https://baubiologie.net/publikationen/info-vdb-richtlinien/>

VDI, 1994. Luftverunreinigung in Innenräumen – Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – VDI-Berichte 1122. Verein Deutscher Ingenieure – VDI Verlag 965 p., ISBN 3-18-091122-0

WHO, 2000 : « The right to Healthy Indoor Air” Report on a WHO meeting from the Eur. Cent. Environ. Health, may 15-17 Bilthoven, Netherlands; Copenhagen Reg. Off.Eur

→ https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0019/117316/E69828.pdf

WHO, 2009 : WHO-Guidelines for Indoor air quality: dampness and mould. WHO Regional Office for Europe, 228 p., ISBN 798 92 890 4168 3

WHO, 2010 : WHO-Guidelines for Indoor air quality: selected pollutants. WHO Regional Office for Europe, 454 p., ISBN 978 92 890 0213 4