Prédiction de la qualité de l'air intérieur par simulation numérique

Aurore Pfister

▶ **To cite this version:**

Aurore Pfister. Prédiction de la qualité de l'air intérieur par simulation numérique. Architecture, aménagement de l'espace. 2014. dumas-01281651

HAL Id: dumas-01281651

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01281651

Submitted on 4 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPECIALITE AMBIANCES ET FORMES URBAINES

Année 2013 / 2014

Thèse de Master STEU

Diplôme cohabilité par
l'École Centrale de Nantes,
l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes
l'Ecole Supérieure d'Architecture de Nantes,
l'Université de Nantes

Présentée et soutenue par :

AURORE PFISTER

Le 8 septembre 2014

à l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Nantes

TITRE :

PREDICTION DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR PAR SIMULATION NUMERIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

JURY

Président : **Pascal Joanne**, Architecte, Maître assistant ENSA Nantes, docteur en sciences de l'ingénieur

Examinateurs : **Marjorie Musy**, chercheur au laboratoire CERMA), et directrice adjointe de l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville
Virginie Meunier, Enseignant-chercheur, Maître-assistant à l'ensa Nantes
Aurélie Foucquier, Ingénieur de recherche, pôle Ingénierie & Simulation de RFR Eléments, docteur en Physique

---

Directeur de mémoire : Aurélie Foucquier
Laboratoire/Institution : RFR Eléments
Co-encadrant : Sophie Moreau

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Résumé en français

Aujourd'hui, nous passons 90% du temps dans des espaces cloisonnés. Nous pensons tous être protégés des pollutions extérieures, or l'air intérieur est jusqu'à dix fois plus pollué que l'air extérieur.

La mauvaise qualité de l'air intérieur devient un problème grandissant. A partir de janvier 2015, les écoles devront surveiller leur qualité de l'air afin de limiter l'exposition des enfants. Cette nouvelle réglementation pose la question de la prédiction de la qualité de l'air. C'est l'objet principal de cette étude. Un état de l'art réglementaire et scientifique est fait. Puis, nous avons sélectionné deux outils permettant de prédire la qualité de l'air et les avons utilisés pour modéliser des cas concrets. Les résultats montrent que selon les débits de ventilation et les matériaux mis en place, les concentrations en polluants intérieurs peuvent être en accord avec la réglementation ou très alarmantes pour la santé des occupants.

Mots-clés : Qualité de l'air intérieur, matériaux, polluants, simulation, santé,

Discipline: Pollution intérieure, Santé dans le bâtiment

English abstract

Indoor air quality prediction by numeric simulation

Today, we spend 90% of our time indoor. Indoor air quality seems to be better than outdoor air, actually this is false. Indoor air can be up to 10 times more polluted than outdoor air. In January 2015, a new law will be implemented. Establishment servicing public, especially schools, will have to measure their indoor air and respect guidelines. This context asks the question of the indoor air prediction by simulation. Can we predict indoor air and how? This study is divided in two parts: a state of art of the indoor air quality and simulation. Two tools were chosen, CONTAM an EnergyPlus, to simulate IAQ. The results were in accordance with the experimental campaigns. It is important to underline the importance of the choice of construction materials and ventilation flows to respect the threshold.

Keywords: Indoor air quality, material, pollutants, simulation, health

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Sommaire

REMERCIEMENT 10

SIGLES ET ABREVIATIONS 12

1. INTRODUCTION 14

2. LA SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR 15

2.1. LA NOUVELLE REGLEMENTATION 15
2.2. LES METHODES DE MESURES 19

3. LES POLLUANTS INTERIEURS 21

3.1. LES COV 22
3.1.1. Le formaldéhyde 23
3.1.2. Le benzène 25
3.2. LES PARTICULES 26
3.3. CO 28
3.4. RADON 29
3.5. CO2 29
3.6. SYNTHESES ET VALEURS GUIDES DE L'ANSES 32
..... 33

4. LA RECOLTE DES DONNEES 34

4.1. L'OBSERVATOIRE DE LA QUALITE DE L'AIR 34
4.1.1. La campagne de mesure dans les logements 35
4.1.2. La campagne dans les écoles 35
4.2. LES BASES DE DONNEES EXISTANTES 37
4.2.1. Pandore 37
4.2.2. CNRC Material emissions database 38

5. IMPACTS SUR LA SANTE ET LE CONFORT 39

5.1. LE SYNDROME DU BATIMENT MALSAIN 39
5.2. LES IMPACTS SUR LA SANTE D'UNE MAUVAISE QUALITE DE L'AIR INTERIEUR 40
5.3. LE CONFORT ET LA PERCEPTION DES USAGERS 42
5.4. INFLUENCES DES PARAMETRES PHYSIQUES 43
5.4.1. Humidité relative 43
5.4.2. Température 44

6. LES SOLUTIONS POUR PALLIER A UNE MAUVAISE QUALITE DE L'AIR INTERIEUR 46

6.1. LA VENTILATION 46
6.2. LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION 51
6.2.1. Directive européenne 51
6.2.2. Etiquetage des matériaux 51
6.2.3. Labels 53

7. LES MODELES ET SIMULATION NUMERIQUE 56

7.1. LA DIFFUSION DANS LES MATERIAUX 56
7.2. DESORPTION A L'INTERFACE MATERIAU/AIR 58
7.3. TRANSFERT DE MASSE DANS LA COUCHE LIMITE 59
7.4. EFFET DE PUIT 59
7.5. DETERMINATION DE LA CONCENTRATION DANS LE LOCAL 61

8. LES OUTILS EXISTANTS 67

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

8.1. CONTAM 67
8.2. ENERGYPLUS ET DESIGN BUILDER 70

9. APPLICATION 73

9.1. HYPOTHESES ET METHODOLOGIE 73
9.2. BUFFON NANTERRE 74
9.2.1. Test sans mobilier 77
9.2.2. Test avec mobilier 78
9.2.3. Test avec des matériaux non classés A+ mais A, ie : 60 µg/m^3 80
9.2.4. Avec débit augmenté à 25 m^3/h/personne 82
9.3. LE CAS D'UN BUREAU 84
9.4. CONCLUSIONS DES SIMULATIONS 89

10. PERSPECTIVES 91

11. ANNEXES 92

11.1. ANNEXES 1 : LES RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE MESURES SUR LES LOGEMENTS 92
11.2. ANNEXES 2 – LA BASE DE DONNEE PANDORE 95
11.3. ANNEXE 3 – LA BASE DE DONNEE DU CNRC 97

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Table des figures

Figure 1 : Concentration seuils autorisées 16
Figure 2 : Indice de confinement 17
Figure 3 : Valeurs limites d'investigations complémentaires 18
Figure 4 : Piégeage dur formaldéhyde 20
Figure 5 : Principe d'un tube passif radial 20
Figure 6 : Les sources de pollution dans une maison 21
Figure 7 : Valeurs internationales de référence pour les teneurs en Formaldéhyde de l'air intérieur 24
Figure 8 : Valeurs limites pour le benzène 25
Figure 9 : Organes respiratoires touchés en fonction de la taille de PM 27
Figure 10 : Valeurs limites pour les particules dans l'air extérieur 27
Figure 11 : Valeurs guides du monoxyde de carbone 28
Figure 12 : Carte des activités volumiques du radon dans les habitations 29
Figure 13 : Concentration en CO2 et QAI 31
Figure 14 : Synthèse des valeurs guide pour l'air intérieur 32
Figure 15 : Tableau récapitulatif des polluants et de leurs sources 33
Figure 16 : Liste des catégories de la base de données Pandore 37
Figure 17 : Valeurs de concentration pour les aldéhydes dans la base de données du CNRC 38
Figure 18 : Tableau des débits de pointe 47
Figure 19 : Tableau des débits extraits par pièce 47
Figure 20 : Tableau des débits minimums dans les ERP 48
Figure 21 : Tableau des débits minimums définis par le code du travail 48
Figure 22 : Emissions limites par polluants 52
Figure 23 : Récapitulatif des émissions labels environnementaux 55
Figure 24 : Schéma de l'émission de polluant d'un matériau vers un local 57
Figure 25 : Les différentes concentrations lors des émissions de polluants 58
Figure 26 : Schéma de l'effet de puit 60
Figure 27 : Elements du bilan 61
Figure 28 : Schéma d'un projet sous CONTAM 68
Figure 29 : Définition d'une source de contaminant sous CONTAM 69
Figure 30 : Modèle 3D sous DesginBuilder 70
Figure 31 : Définition d'une source de polluant sous EnergyPlus 72
Figure 32 : Courbe du débit sur une semaine 75
Figure 33 : Courbe du débit sur une journée 75
Figure 34 : Courbe de concentration sur une semaine 77
Figure 35 : Courbe de concentration sur une journée 77
Figure 36 : Courbe de concentration sur une semaine, comparaison avec et sans mobilier 79
Figure 37 : Concentration sur une journée, comparaison avec et sans mobilier 80
Figure 38 : Concentration avec matériau A sur une semaine 81
Figure 39 :Concentration avec matériau A sur une journée 81
Figure 40 : Concentration avec débit augmenté sur une journée 83
Figure 41 : Débit de ventilation sur une semaine 85
Figure 42 : Débit de ventilation sur une journée 85
Figure 43 : Comparaison de la concentration en formaldéhyde dans un bureau et une salle de classe sur une semaine 86
Figure 44 : Comparaison de la concentration en formaldéhyde dans un bureau et une salle de classe sur une journée 87
Figure 45 : Comparaison de la concentration en formaldéhyde dans un bureau et une salle de classe sur une journée après le week-end 88

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

REMERCIEMENT

Je remercie vivement Benjamin Cimerman, directeur du bureau d'étude RFR Eléments pour son accueil et sa confiance.

Je tiens à remercier chaleureusement ma tutrice de stage Aurélie Foucquier qui aura su me guider tout au long de ce stage. Ses conseils et son écoute furent d'une grande aide pendant ces six mois.

Mes remerciements vont également à Sophie Moreau, chef du pôle Ingénierie et Simulation, pour son accueil au sein de l'équipe et sans qui la réalisation de ce stage n'aurait pas été possible.

Merci à Simon de me laisser sa place, fais bon voyage, et à Yacine pour toutes ses blagues nulles.

Mes remerciements vont à toute l'équipe de RFR Eléments grâce à qui ce stage s'est si bien passé.

Merci à tous pour votre aide, vos partages d'expériences, votre accueil et surtout votre gentillesse.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

SIGLES ET ABREVIATIONS

ADEME : Agence départementale pour l'environnement et la maitrise de l'énergie

AFSSET : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APD : Avant-projet définitif

APS : Avant-projet sommaire

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CLI : Concentration limite d'intérêt

COFRAC : Comité français d'accréditation

COV : Composé organiques volatils

NIST : National Institute of Standards and Technology

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PM : Particulate matter, particule fine en français

QAI : Qualité de l'air intérieur

RSD(T) : Règlement sanitaire départemental (type)

SBS : Sick Building Syndrome (syndrome du bâtiment malsain)

STD : Simulation thermique dynamique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1. INTRODUCTION

Protégés par des murs solides ou des fenêtres isolantes, nous croyons être bien à l'abri des atteintes de l'extérieur… Pourtant, en ce qui concerne l'air que nous respirons – notre besoin le plus vital – cette impression rassurante est un leurre.

Aujourd'hui, il a été prouvé expérimentalement que l'air intérieur est jusqu'à dix fois plus pollué que l'air extérieur. En effet, les polluants extérieurs se retrouvent à l'intérieur et à ceux-là s'ajoutent les polluants de sources intérieures (matériaux, occupants, activités telles que la cuisine, les douches, etc..). Cette problématique est grandissante. La loi qui traite de la qualité de l'air intérieur des logements date de 1982 et impose un certain débit d'air extrait selon les pièces. Cependant depuis cette loi, de nombreuses réglementations thermiques ont été mises en application afin notamment d'améliorer l'étanchéité des bâtiments dans le but de réduire les pertes énergétiques associées.

A partir de janvier 2015 un nouvel arrêté sera mis en application, cet arrêté vise à limiter la pollution intérieure pour les établissements recevant du public (ERP). Des valeurs guides en formaldéhyde et benzène sont définies (Formaldéhyde 30µg/m3 en 2015 puis 10µg/m3 en 2023 et pour le benzène 5µg/m3 en 2013 puis 2µg/m3 en 2016).

C'est dans ce contexte que le besoin d'un outil de prédiction de la qualité de l'air se fait ressentir. Le bureau d'étude RFR éléments désire mettre un point d'honneur à la qualité de l'air intérieur des futurs bâtiments. Le but de ce stage est tout d'abord d'élargir les connaissances sur la qualité de l'air intérieur puis à terme de disposer d'un outil de prédiction de la qualité de l'air intérieur. Cet outil devra prendre en compte un certain nombre de paramètres tels que les émissions des différents matériaux, l'occupation du lieu, la température, l'humidité relative, etc…

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2. LA SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

La qualité de l'air est définie à la fois par des paramètres directs (concentration en polluants chimiques, biologiques, et physiques) et par des paramètres indirects (température, humidité et confinement).

Pour limiter les risques sanitaires, il est donc indispensable de réduire dans un premier temps les polluants à la source, et de contrôler ensuite les paramètres d'influence (humidité et température). De plus, l'évacuation des polluants par le biais d'un système de ventilation optimal est également primordiale pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur.

2.1. La nouvelle réglementation

Les campagnes de tests de la qualité de l'air ont prouvé que l'air intérieur est très pollué. Nous passons 90% de notre temps à l'intérieur et cette pollution est nocive pour la santé, en particulier celle des plus sensibles comme les enfants. C'est pourquoi une nouvelle législation a été mise en place, celle-ci oblige les ERP à surveiller la qualité de l'air de leur établissement en évaluant les moyens d'aération et en mesurant les concentrations de plusieurs polluants, à savoir le formaldéhyde, le benzène et le CO2. Dans le **Décret n° 2011-1728 du 2 décembre 2011**, plusieurs échéances existent et la première prendra effet en janvier 2015. Les échéances sont les suivantes :

- avant le 1er janvier 2015 pour les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans et les écoles maternelles
- avant le 1er janvier 2018 pour les écoles élémentaires
- avant le 1er janvier 2020 pour les accueils de loisirs et les établissements d'enseignement du second degré
- avant le 1er janvier 2023 pour les autres établissements

Les bâtiments neufs devront satisfaire les exigences de mesure dans l'année suivant la livraison. Les méthodes de mesure seront étudiées plus loin.

Le formaldéhyde, le benzène et le CO2 ont été choisis car ils donnent chacun une information spécifique concernant la qualité de l'air.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Le formaldéhyde, composé considéré comme cancérigène, est un COV. Dans le milieu intérieur, il provient majoritairement des matériaux de construction et mobiliers. Il donne donc une information sur les sources intérieures de polluants. De plus, les instruments disponibles aujourd'hui permettent de détecter un composant uniquement lorsqu'il possède une certaine concentration, ce qui est le cas du formaldéhyde.

Le benzène est un composé organique produit principalement lors d'une combustion incomplète de matière organique. Les principales sources d'exposition sont les gaz d'échappement, vapeur d'essence, fumée de cigarette ou encore combustion du bois. La mesure de ce polluant donne une indication à la fois sur l'infiltration de la pollution extérieure à l'intérieur et sur les émissions des appareils à combustion qui fonctionne à l'intérieur.

Le CO2 n'est pas considéré comme nocif pour la santé mise à part à très haute quantité, cependant il donne une indication sur le confinement d'un local. En effet, les occupants expirent de l'air contenant 4% de CO2. Ainsi, un fort taux de CO2 indique un mauvais renouvellement d'air.

Le **Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène** fixe les valeurs seuils. Celles-ci sont rapportées dans le tableau suivant:

Substance	**Numéro CAS de la substance**	**Valeur guide pour l'air intérieur**	
Formaldéhyde	50-00-0	**30 µg/m³** pour une exposition de longue durée à compter du 1er janvier 2015	**10 µg/m³** pour une exposition de longue durée à compter du 1er janvier 2023
Benzène	71-43-2	**5 µg/m³** pour une exposition de longue durée à compter du 1er janvier 2015	**2 µg/m³** pour une exposition de longue durée à compter du 1er janvier 2023

Figure 1 : Concentration seuils autorisées
Source : Décret n° 2011-1727

Le numéro CAS est le numéro d'enregistrement unique d'une espèce chimique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service (CAS).

Une exposition est considérée de longue durée lorsque qu'elle correspond à plusieurs heures voire plusieurs jours. En l'occurrence, dans le cas des mesures, la concentration est mesurée sur 4,5 jours.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Les valeurs seuils à atteindre pour 2023 sont les concentrations en deçà desquelles on considère qu'il n'y a plus de risques pour la santé des occupants.

Le taux de CO2 permet de calculer un indice de confinement allant de 1 à 5 :

INDICE DE CONFINEMENT	NATURE DU CONFINEMENT	INFORMATIONS
0	Confinement nul	Néant
1	Confinement faible	
2	Confinement moyen	
3	Confinement élevé	
4	Confinement très élevé	**Message de sensibilisation destiné au maître d'ouvrage :** Veiller à ce que l'utilisation des pièces soit conforme au taux d'occupation prévu. Lorsque ces salles sont équipées d'un dispositif spécifique de ventilation, il est souhaitable de faire intervenir un spécialiste pour procéder à une inspection de l'installation. En l'absence de dispositif spécifique de ventilation, il est souhaitable d'améliorer les conditions d'aération de ces salles en procédant à des ouvertures plus fréquentes des fenêtres durant la période d'occupation.
5	Confinement extrême	**Message de sensibilisation destiné au maître d'ouvrage :** Veiller à ce que l'utilisation des pièces soit conforme au taux d'occupation prévu. Lorsque ces salles sont équipées d'un dispositif spécifique de ventilation, il est recommandé de faire intervenir un spécialiste pour procéder à une inspection de l'installation. En l'absence de dispositif spécifique de ventilation, il est recommandé d'améliorer les conditions d'aération de ces salles en procédant à des ouvertures plus fréquentes des fenêtres durant la période d'occupation. **Actions à mener par l'organisme en charge de la réalisation des mesures sur site :** - Information au préfet du département du lieu d'implantation de l'établissement dans un délai de quinze jours après réception de l'ensemble des résultats d'analyse.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Figure 2 : Indice de confinement
Source : Guide d'application pour la surveillance du confinement de l'air dans les établissements d'enseignements, d'accueil de la petite enfance et d'accueil de loisirs, CSTB

Aujourd'hui, le RDST limite les taux de CO2 de l'air intérieur à 1000ppm avec une marge jusqu'à 1300ppm dans les locaux non-fumeurs. Cette valeur seuil de CO2 a également permis de fixer les débits de ventilation minimum.

Si les mesures présentent des valeurs supérieures aux valeurs données dans le tableau ci-dessous, des investigations poussées devront être faites sur les sources afin de trouver des solutions pour diminuer les concentrations de polluants. Les valeurs seuils d'investigation sont les suivantes :

Substance	**Valeur pour laquelle des investigations complémentaires doivent être menées et pour laquelle le préfet de département du lieu d'implantation de l'établissement doit être informé**
Formaldéhyde	Concentration > **100 µg/m³**
Benzène	Concentration > **10 µg/m³**
Dioxyde de carbone	Indice de confinement = **5**

Figure 3 : Valeurs limites d'investigations complémentaires
Source : Décret n° 2012-14

Le **Décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuée au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public** donnent des indications sur les conditions de mesures. Ces indications sont primordiales pour les établissements qui doivent faire réaliser ces mesures.
Les mesures doivent être réalisées par un organisme accrédité par la COFRAC. Le COFRAC, créé en 1994 sous le régime de la loi du 1er juillet 1901 a été désigné comme unique instance nationale d'accréditation par le décret du 19 décembre 2008, reconnaissant ainsi l'accréditation comme une activité de puissance publique.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2.2. Les méthodes de mesures

Les mesures devront être réalisées, pour le benzène et le formaldéhyde, selon les normes ISO 16000 – 4 pour le formaldéhyde et ISO 16017 pour le benzène.

Deux mesures devront être faites, une pendant la période de chauffe et une pendant la période de non-chauffe (avec une séparation de 5 à 7 mois entre les mesures), chacune sur une durée de 4,5 jours en occupation normal.

Les mesures devront être faites dans les mêmes pièces.

Si l'établissement possède moins de 8 pièces, des mesures devront être faites dans chaque pièce. Dans le cas où l'établissement possède plus de 8 zones, un échantillonnage devra être fait.

En revanche, la mesure de CO2 ne se fera qu'une fois et durant la période de chauffe. Les mesures devront être renouvelées tous les 7 ans.

Chaque mesure est faite en un seul point représentatif de la pièce.

Plusieurs méthodes permettent de mesurer les polluants intérieurs. Les réalisateurs de mesures peuvent choisir d'utiliser un protocole normé ou non. Parmi les différentes publications, plusieurs méthodes ont été utilisées.

Ici, nous allons particulièrement nous intéresser au protocole issu des normes NF EN ISO 16000. Ces normes sont utilisées pour réaliser les mesures de la qualité de l'air dans le cadre de la nouvelle réglementation qui entrera en vigueur à partir de janvier 2015.

La description de la norme ISO 16000-4 donnée par l'AFNOR est la suivante :

« La présente partie de l'ISO 16000 spécifie un dosage du formaldéhyde dans l'air intérieur au moyen d'un échantillonneur par diffusion avec désorption de solvant et chromatographie en phase liquide à haute performance (CLHP). La méthode d'essai s'applique au mesurage du formaldéhyde dans l'air intérieur dans une gamme comprise entre 0,001 mg/m3 et 1,0 mg/m3 pour une période d'échantillonnage comprise entre 24 h et 72 h. Pour des périodes d'échantillonnage de 24 h, la gamme de concentration applicable est comprise entre 0,003 mg/m3 et 1 mg/m3, et pour des périodes de 72 h, elle est comprise entre 0,001 mg/m3 et 0,33 mg/m3. L'échantillonnage à court terme (moins de 24 h). La méthode convient à des mesurages réalisés dans des atmosphères ayant une humidité relative dans l'air intérieur normale et pour la surveillance à des vitesses d'air de l'ordre de 0,02 m/s. L'étape de chromatographie prévue dans la méthode est destinée à permettre l'élimination des interférences potentielles, notamment celles dues à la présence d'autres composés carbonylés. La méthode d'échantillonnage fournit un résultat moyen pondéré dans le temps. »

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Afin de quantifier le formaldéhyde, on le piège par chimisorption avec du dinitro phényl hydrazine. La réaction qui a lieu est la suivante :

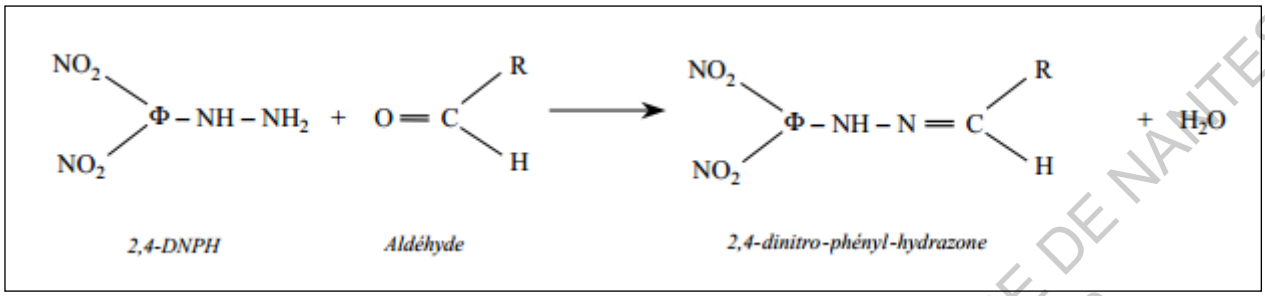


Figure 4 : Piégeage du formaldéhyde
Source : RAPPORT D'ÉTUDE de l'INERIS 21/12/2004 N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1057-IZd

Dans le cas des mesures réglementaires de la qualité de l'air, la méthode utilisée est dite « passive », ceci est dû au tube qui sert à la chimisorption.

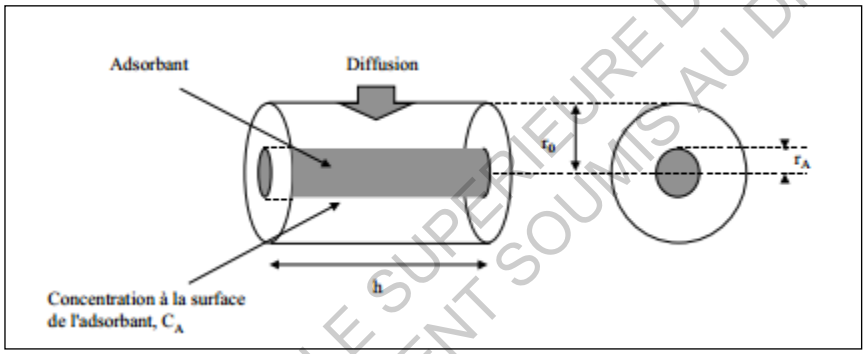


Figure 5 : Principe d'un tube passif radial
Source : RAPPORT D'ÉTUDE de l'INERIS 21/12/2004 N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1057-IZd

La méthode utilisée est donc une méthode passive, c'est ce qui est le plus souvent utilisé pour les mesures de l'air intérieur. La méthode active se différencie par le fait que l'air est pompé dans le tube et donc la diffusion n'est pas naturelle.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3. LES POLLUANTS INTERIEURS

La qualité de l'air intérieur est très fortement influencée par les sources de pollution intérieures au bâtiment. Ces sources sont les activités humaines, les matériaux de construction ou encore le mobilier. Mais quels sont les polluants émis par ces sources ? Et quels sont leurs impacts sur la santé des occupants ?

Figure 6 : Les sources de pollution dans une maison
Source : ADEME / Atelier des giboulées extrait du guide ADEME « un air sain chez soi »

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

On retrouve un très grand panel de polluants dans l'air intérieur. Ceci est dû au fait que les polluants intérieurs proviennent de sources diverses.

Ils proviennent à la fois de l'extérieur, des matériaux et du mobilier, des activités humaines, etc..

Les paramètres de la qualité de l'air intérieur sont souvent définis sur la base de 4 critères :

- La concentration en composés chimiques (composés organiques volatils, monoxyde de carbone)
- La concentration en composés biologiques (allergènes de chats, de chiens, acariens, etc.)
-Les paramètres physiques : particules fines, radon, etc.
-Les paramètres de confort : humidité, température, dioxyde de carbone.

Les paragraphes suivants listent les principaux polluants retrouvés à l'intérieur et leurs caractéristiques. Pour chaque polluant, des valeurs guides sont données. Une valeur guide est une valeur numérique associée à un temps d'exposition correspondant à une concentration dans l'air d'une substance chimique en dessous de laquelle aucun effet sanitaire ou (dans le cas de composés odorants) aucune nuisance ou aucun effet indirect important sur la santé n'est en principe attendu pour la population générale (définition de l'Organisation Mondiale de la Santé).

3.1. Les COV

Les composés organiques volatils sont une famille de composés. Ils sont majoritairement composés de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Ils se trouvent sous forme gazeuse dans l'atmosphère. On les retrouve autant dans l'air extérieur que dans l'air intérieur. Ils sont les principaux polluants émis par les matériaux de construction. Les émissions de COV sont essentiellement dues à la combustion et à l'utilisation de solvants, dégraissants, conservateurs et proviennent donc de sources très nombreuses.

Les effets des solvants sont souvent difficiles à démontrer: ils sont très variables et dépendent de la sensibilité des individus, de leur concentration dans l'air, des durées d'exposition ou des combinaisons entre les produits. Il est néanmoins confirmé que, selon les concentrations, une exposition régulière aux COV peut entraîner différents troubles:

- irritation des yeux ou de la gorge
- allergies
- maux de tête
- crises d'asthme
- Urticaire
- nausées
- fatigue

Aussi, quelques COV, comme le benzène et le formaldéhyde, ont un effet cancérigène démontré. La lutte contre les émissions de COV est enclenchée depuis plusieurs années. Les fabricants sont priés de minimiser autant que possible la concentration en COV de leurs produits. Si certaines conditions

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

sont respectées, ils peuvent être labellisés. Les différents labels présentés par la suite donnent tous des valeurs limites d'émissions de COV.

Le danois Lars Molhave[1] a distingué trois classes de concentrations en COV :

- **Niveau de confort (<200 µg/m³)**
- **Niveau d'exposition multi sensorielle (entre 200 et 3000 µg/m³)**
- **Niveau d'inconfort (entre 3000 et 25000 µg/m³)**
- **Niveau toxique (>25000 µg/m³)**

La concentration en COV Totaux (COVT) est souvent utilisée comme indicateur global de la concentration en COV, mais ce paramètre n'est pas une valeur sanitaire en soi. Pour chaque composé, une valeur seuil doit être définie.

3.1.1. Le formaldéhyde

Le formaldéhyde est le plus simple des aldéhydes, sa formule est CH_2O. Notre organisme utilise le formaldéhyde pour différentes synthèses et notre sang contient environ 2 à 3mg/l. Cependant, il reste une substance toxique pour notre organisme. C'est un gaz irritant et inflammable. Depuis 2004, le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) l'a classé comme un composé cancérogène avéré pour l'homme. Les sources de formaldéhyde sont multiples. Une étude française réalisée par G. Poulhet et al[2] donne un méthodologie pour établir quelles sont les sources de formaldéhydes dans plusieurs écoles. Les résultats ont montré plus de 29 sources dans chaque classe notamment dans les peintures, les moquettes, les tables, les chaises ou encore les jouets. En général, les émissions des matériaux de construction étaient supérieures aux émissions du mobilier. Les taux d'émissions variaient entre 1.2 et 252 µg/m²/h. Plusieurs travaux ont montré que les faux plafonds sont les surfaces comportant le plus fort caractère émissif.

Le formaldéhyde a différents impacts sur la santé, en particulier sur les enfants. Le formaldéhyde se caractérise par une forte réactivité avec les macromolécules biologiques des voies respiratoires ce qui peut provoquer d'importantes conséquences pathologiques. Le formaldéhyde a été défini

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

comme un cancérogène avéré. Par exemple, une forte exposition au formaldéhyde augmente les chances de cancer nasopharynx.

Les différentes valeurs guides pour lesquelles le risque sanitaire devient avéré pour le formaldéhyde en France et à l'étranger sont les suivantes :

Pays/Organisme	Valeur seuil
OMS, 2000	**100 µg/m³** en moyenne sur 30 minutes
Finlande, 2000	Classification des bâtiments - S1, qualité de l'air très bonne, inférieure à **30 µg/m³** - S2, qualité de l'air bonne entre **30 et 50 µg/m³** - S3, qualité de l'air conforme au code de la construction**, entre 50 et 100 µg**/m³
Texas, 2002	**50 µg/m³**
Chine, 2002	**80 µg/m³** en moyenne horaire, norme hygiénique, mesure obligatoire à la livraison du bâtiment
Japon, 2003	Mesure obligatoire à la livraison du bâtiment - Bâtiment de qualité d'air excellente : inférieure à **30 µg/m³** - Bâtiment de bonne qualité d'air : inférieure à **100 µg/m³**
Projet européen INDEX, 2005	**30 µg/m³** en moyenne sur 30 minutes (niveau estimé sans effet aigu et chronique) avec un objectif de concentration aussi bas que possible
Californie, 2004	- **34 µg/m³** (8h et plus) - **16.5 µg/m³** pour les écoles
Santé Canada, 2005	- **123 µg/m³** (1h) - **50 µg/m³** (8h)
Certification LEED	**50 µg/m³**
AFSSET, 2007	- **50 µg/m³** (2h) - **10 µg/m³** (long terme)

Figure 7 : Valeurs internationales de référence pour les teneurs en Formaldéhyde de l'air intérieur
Source : Bâtir pour la santé des enfants, Suzanne Déoux [3]

A noter que ces valeurs sont différentes des valeurs seuils imposées par la réglementation.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.1.2. Le benzène

Le benzène est un liquide incolore et très volatil. Il possède une odeur d'aromatique qui devient perceptible à partir d'une concentration de 5ppm.

Le benzène est très présent dans les vapeurs d'essence. L'exposition est donc plus forte en extérieur proche des stations essences, ou du trafic routier en général. Les bâtiments, proches d'axes routiers importants sont plus propices à la contamination au benzène. L'ADEME a montré que les écoles à moins de 500 mètres d'une gare routière ou d'une autoroute étaient plus touchées par les fortes concentrations intérieures en benzène. D'autre part, une étude[4] sur la corrélation entre concentration intérieure et extérieure en benzène dans plusieurs villes a montré, qu'il n'y a pas de loi qui régissait ce phénomène de transfert. En effet, les concentrations intérieures dépendent de la concentration extérieure, pour autant, elle ne peut pas être prévu à l'avance, car les ratios ne sont pas les mêmes selon les villes et ils varient également selon les saisons. Une seconde étude [5] a montré que la concentration intérieure en benzène n'est pas uniquement régi par la pollution extérieure, la présence d'un garage attenant au bâtiment pourrait également être source d'une intoxication de l'air au benzène.

L'Union Européenne ainsi que le CIRC, ont classé le benzène comme cancérogène. Il serait une des causes de la leucémie. Il serait également impliqué dans les cancers du poumon [6]

Les valeurs limites pour le benzène pour l'intérieur et l'extérieur sont les suivantes :

<table>
<tr><th>Air extérieur</th><th>Air intérieur</th></tr>
<tr><td>Directive 2008/50/CE</td><td>AFSSET 2008</td></tr>
<tr><td>5 µg/m³ à respecter depuis le 1er janvier 2010</td><td rowspan="3">Court terme : 30 µg/m³ sur 14 jours
Intermédiaire : 20 µg/m³ sur 1 an
long terme : 10 µg/m³ sur 1 an
2 µg/m³ sur une vie entière</td></tr>
<tr><td>Décret français 98-360 du 6 mai 1998</td></tr>
<tr><td>2 µg/m³ (objectif de qualité de l'air)</td></tr>
</table>

Figure 8 : Valeurs limites pour le benzène
Source : Bâtir pour la santé des enfants, Suzanne Déoux[3]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.2. Les particules

Les particules, communément appelées poussières, proviennent de source diverses et se retrouvent surtout dans l'air extérieur. Le trafic routier, l'agriculture, les industries, et les activités de construction sont les sources principales. Même si la plupart des particules proviennent de l'air extérieur, l'air intérieur est aussi source de particules. Les activités telles que la combustion pour le chauffage ou le mobilier en bois sont émetteurs de particules.

En général, les filtres sont placés au niveau des entrées d'air de VMC afin d'empêcher les particules d'entrer dans l'air intérieur. Or, l'efficacité d'un filtre est souvent définie grâce au pourcentage de particule qu'il retient en masse et les particules les plus grosses sont en général les plus lourdes. La plupart du temps, les filtres laissent passer les particules les plus légères et donc les plus fines, c'est aussi celles qui sont les plus dangereuses. Une étude menée par P.T.B.S. Branco[7], montre que les concentrations en particules dans des crèches de Porto, Portugal sont très élevées atteignant jusqu'à 145mg/m³ pour les PM10, 158mg/m³ pour les PM2.5. De plus, les concentrations étaient souvent plus élevées que les valeurs guide données par l'OMS, en particulier pour les PM2.5 qui sont particulièrement dangereuses.

Les particules sont aujourd'hui considérées comme un des polluants les plus nocifs pour la santé. Elles peuvent être plus ou moins fines, la plupart du temps on parle des particules ayant un diamètre inférieur à 10µm ou inférieur à 2.5 µm, on parle alors de particule fine. Les plus grosses particules sont arrêtées par nos voies nasales et respiratoires, les autres pénètrent jusqu'aux poumons et ne sont plus délogées ensuite. Les particules sont majoritairement composées de carbone mais contiennent beaucoup d'autres substances comme le souffre ou des composés organiques.

Bernstein et al [8] expliquent que les impacts sur la santé des particules dépendent, en effet, de leur déposition dans les voies respiratoires et ceci dépend en grande partie de leur taille. De plus, les polluants organiques et autres toxines peuvent être adsorbés à la surface des particules et sont entrainées dans les voies respiratoires.

Les impacts sur la santé sont multiples mais sont tous relatifs à des symptômes respiratoires. Une étude menée en Italie a montré une corrélation entre une exposition aux PM2.5 et les bronchites et cas d'asthme, particulier durant la période d'hiver.[9]

L'exposition aux particules PM10 et PM2.5 provoque un plus fort risque d'asthme et une plus forte prise de médicament pour en venir à bout. [6]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

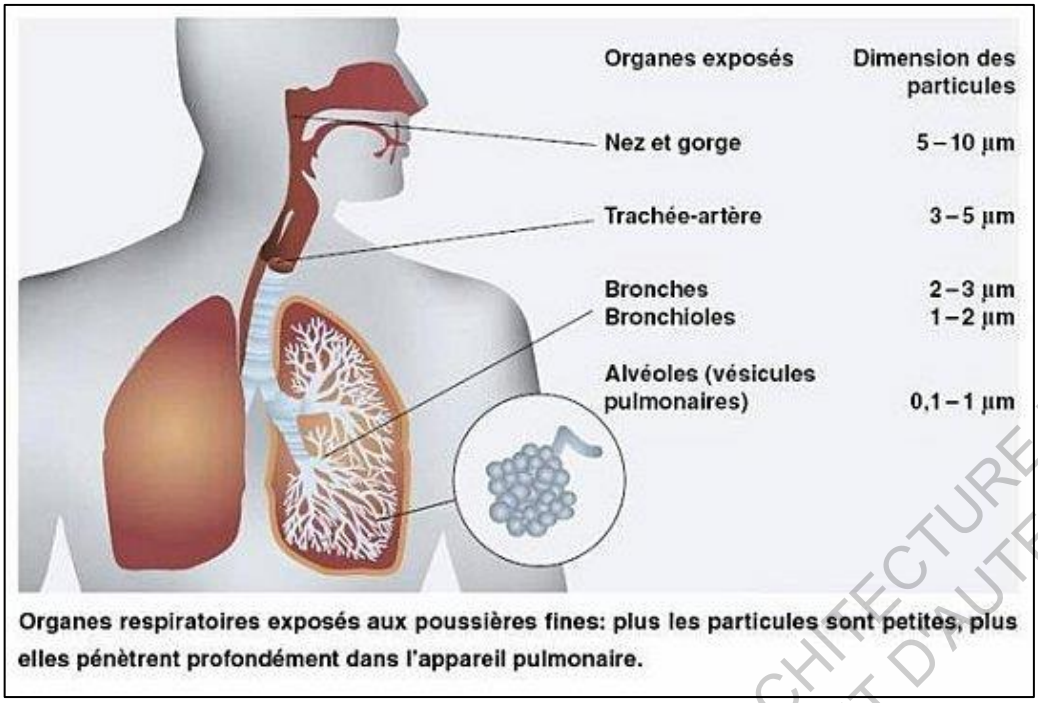


Figure 9 : Organes respiratoires touchés en fonction de la taille de PM

L'ANSES (Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) n'a pas défini de valeur guide pour les PM, seule L'OMS a défini des valeurs guides pour l'air extérieur. Ces valeurs sont les suivantes :

	Lignes directrices de l'OMS 2005	**Période considérée**	**Directive 2008/50/CE**
Particules PM2.5	**10 µg/m³**	année	**25 µg/m³** (2015) **20 µg/m³** (2020)
	25 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 3 jours par an	Journée (24h)	-
Particules PM10	**20 µg/m³**	année	**40 µg/m³**
	50 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 3 jours par an	Journée (24 heures)	**50 µg/m³**

Figure 10 : Valeurs limites pour les particules dans l'air extérieur
Source : Bâtir pour la santé des enfants, p333, Suzanne Déoux

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.3. CO

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore et inodore qui est extrêmement toxique. Il a une très bonne capacité de diffusion dans l'air et s'accumule facilement. Il est produit par la combustion incomplète de composé contenant du carbone. Les intoxications au monoxyde de carbone sont très connues car elles entraînent souvent la mort. En effet, la dose létale de CO est assez basse. Il est absorbé en quelques minutes par l'organisme et se fixe sur l'hémoglobine.

- 0,1 % (1000 ppm) de CO dans l'air tue en une heure
- 1 % (10 000 ppm) de CO dans l'air tue en 15 minutes
- 10 % (100 000 ppm) de CO dans l'air tuent immédiatement.

Le monoxyde de carbone de l'air intérieur provient en majeur partie de l'air extérieur, et souvent l'air intérieur est moins chargé en monoxyde de carbone que l'air extérieur comme le montre une étude [10] réalisée en Grèce à Athènes. En effet, des mesures de CO ont été faites dans des écoles et les résultats ont montrés que la concentration intérieure était très dépendante de la concentration extérieure. De plus, les taux intérieurs étaient toujours plus faibles. Les valeurs intérieures étaient aux alentours de 5ppm.

Les valeurs guides du monoxyde de carbone sont les suivantes :

Concentration dans l'air extérieur (Directive 2008/50/CE)	**Durée d'exposition**
10 mg/m³	8 heures
Concentration dans l'air intérieur (OMS et ANSES)	**Durée d'exposition**
10 ppm (10 mg/m³)	8 heures
25 ppm (30 mg/m³)	1 heures
50 ppm (60 mg/m³)	30 minutes
90 ppm (100 mg/m³)	15 minutes

Figure 11 : Valeurs guides du monoxyde de carbone
Source : Bâtir pour la santé des enfants, p333, Suzanne Déoux

A partir de 10ppm, l'ANSES recommande un diagnostic permettant d'évaluer quelles sont les sources d'émissions et de les traiter ensuite.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.4. Radon

Le radon est un gaz radioactif inodore et incolore. Il provient de la désintégration naturelle de l'uranium. Certaines régions sont plus particulièrement concernées par le risque radon. En France, les régions à risques sont : le Massif Central, la Bretagne, les Vosges, la Corse et les Pyrénées. Le radon est la première source d'irradiation parmi les sources naturelles de rayonnement.

La concentration en radon est particulièrement élevée au niveau du sol. L'étanchéité à l'interface sol/bâtiment étant souvent mauvaise, c'est par là que pénètre le radon dans le bâtiment. Le sol est la source majoritaire de radon dans les bâtiments. Il passe en particulier par les fissures et matériaux poreux. La réglementation recommande des concentrations en radon inférieures à 200Bq/m³ dans les bâtiments neufs et 400 Bq/m³ dans les bâtiments existants.

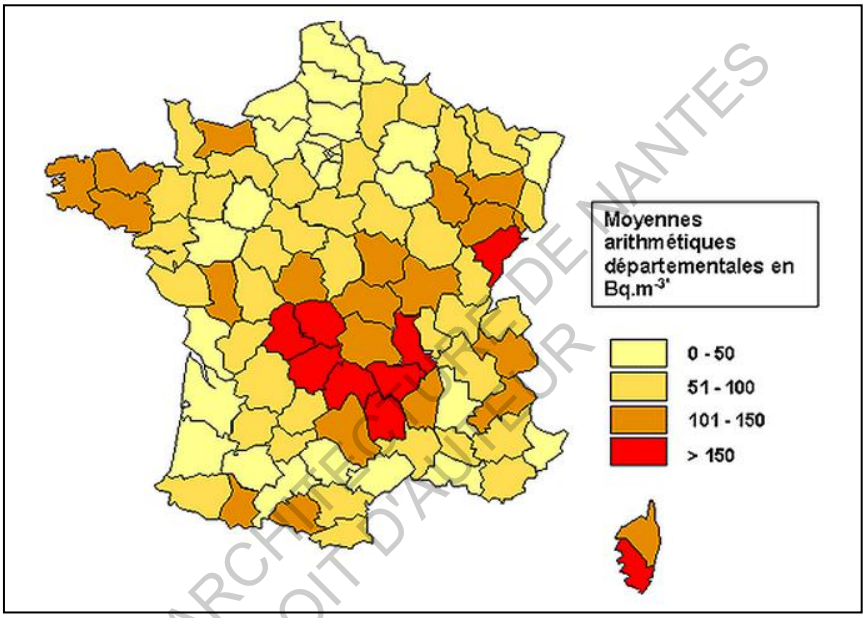


Figure 12 : Carte des activités volumiques du radon dans les habitations
Source : IRSN

3.5. CO2

Le CO2 est souvent connu pour son action de gaz à effet de serre. L'atmosphère ambiante en contient environ 400ppm en tout temps. Contrairement à ce que l'on croit, le CO2 n'est pas considéré comme un polluant intérieur mais plutôt comme un traceur de la qualité de l'air intérieur. Le dioxyde de carbone ne présente pas de réelle toxicité pour l'homme (excepté à des doses anormalement élevées). Il est utilisé comme un indicateur du confinement des bâtiments. Plus l'air est confiné, plus le niveau de CO2 est élevé et moins bonne est la qualité de l'air dans la pièce. En 2001, une étude du Laboratoire d'Hygiène et de Santé Publique de la faculté de Pharmacie de Paris V et du Laboratoire d'Hygiène de la Ville de Paris a permis de montrer que les concentrations de polluants (composés chimiques) augmentent significativement avec le niveau moyen de CO2.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Le CO2, comme nous l'avons dit, ne présente pas de toxicité directe pour l'Homme, mais il peut toutefois entraîner, indirectement des problèmes de santé chez les occupants.

L'Organisation Mondiale de la Santé a fixé un plafond de 1000 ppm à ne pas dépasser. Outre le problème d'odeur, une forte concentration de CO2 peut conduire à un approvisionnement insuffisant en oxygène dans le sang occasionnant des problèmes de santé ainsi que des maux de tête, des troubles du sommeil, de fatigue, des états de stress, etc.

Cette valeur limite du taux de CO2 de 1000ppm a également été reprise par de nombreux experts, ainsi que par le Règlement Sanitaire Départemental, qui fixe cette valeur comme une valeur guide à ne pas dépasser dans les environnements intérieurs, avec un seuil de tolérance de 1300 ppm pouvant être atteint ponctuellement.

C'est également à partir de ces valeurs que les débits donnés dans le règlement sanitaire départemental (RSD) ont été déterminés. Le CO2 est principalement émis dans l'air intérieur des bâtiments par la respiration des occupants. Le taux de CO2 dans les locaux est donc lié au nombre d'occupants présents dans les logements

Le CO2, bien qu'il faille une concentration très importante pour avoir un réel impact sur la santé (plusieurs milliers de ppm), donne un indice sur le confinement d'un local. Plusieurs études[11][12], ont montré que les concentrations en CO2 ont un impact sur la santé des enfants. D'une part, une forte concentration augmente les risques d'asthmes, mais cela peut entraîner des difficultés de concentration et une moins bonne productivité des professeurs. Les résultats des élèves sont meilleurs lorsqu'une pièce est correctement ventilée et que la concentration en CO2 est plus faible. L'ANSES donne des valeurs guides qui permettent d'évaluer la qualité de l'air.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Figure 13 : Concentration en CO2 et QAI
Source : ANSES

Concentrations de CO_2 dans l'air intérieur – Mise en perspective à titre indicatif de :
valeurs de classement de la qualité de l'air intérieur, valeurs associées à des effets sur la santé dans la littérature scientifique, et valeurs limites d'exposition professionnelle

Différentiel de concentrations de CO_2 de l'air intérieur et de l'air extérieur **utilisé pour le classement de la qualité de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779**	**Mise en perspectives avec :**	
	les concentrations de CO_2 ou *différentiels de concentrations de CO_2 entre l'air intérieur et l'air extérieur* issues des études épidémiologiques ou toxicologiques	**les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP)**
d [CO_2] ≤400 ppm Qualité de l'air intérieur excellente		
d [CO_2] entre 400 et 600 ppm Qualité de l'air intérieur moyenne	**[CO_2] ≥850 ppm *ou d [CO_2] ≥450 ppm*** Plage correspondant en moyenne sur une journée de travail à une augmentation de symptômes du SBS dans des bureaux	
d [CO_2] entre 600 et 1000 ppm Qualité de l'air intérieur modérée	**[CO_2] ≥1000 ppm *ou d [CO_2] ≥600 ppm**** Plage correspondant à : - une augmentation de symptômes liés à l'asthme chez l'enfant, en moyenne sur une journée d'école - une altération suspectée de la performance psychomotrice due au CO_2 seul chez l'adulte, en moyenne sur quelques heures (une seule étude)	
d [CO_2] > 1000 ppm Qualité de l'air intérieur basse	**[CO_2] égale à 10000 ppm** Concentration correspondant sur au moins 30 minutes à l'apparition d'acidose respiratoire due au CO_2 seul (un des premiers effets critiques) chez l'adulte sain avec une charge physique modérée	**[CO_2] égale à 5000 ppm** Concentration moyenne sur 8 heures (VLEP 8h) utilisée comme valeur limite d'exposition professionnelle en France et à l'étranger **[CO_2] comprise entre 10000 et 30000 ppm** Intervalle des concentrations court terme (VLCT ou VLE) utilisées comme valeurs limites d'exposition professionnelle à l'étranger (aucune valeur pour la France)

**Différentiel entre CO_2 de l'air intérieur et de l'air extérieur calculé à partir d'un niveau intérieur ≥1000 ppm et d'un niveau extérieur pris par défaut de 400 ppm*

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.6. Synthèses et valeurs guides de L'ANSES

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a déterminé un certain nombre de valeurs guides pour l'air intérieur. Ces valeurs sont rassemblées dans le tableau suivant :

Substances	VGAI proposées		Année de parution
Formaldéhyde	VGAI court terme : pour une exposition de 2 heures	50 µg.m^{-3}	2007
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10 µg.m^{-3}	
Monoxyde de carbone (CO)	VGAI court terme - Pour une exposition de 8 heures - Pour une exposition de 1 heure - Pour une exposition de 30 minutes - Pour une exposition de 15 minutes	 10 mg.m^{-3} 30 mg.m^{-3} 60 mg.m^{-3} 100 mg.m^{-3}	2007
Benzène	VGAI court terme : pour une exposition de 1 à 14 jours	30 µg.m^{-3}	2008
	VGAI intermédiaire : pour une exposition de 14 jours à 1 an	20 µg.m^{-3}	
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10 µg.m^{-3}	
	VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10^{-6}	0,2 µg.m^{-3}	
	VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10^{-5}	2 µg.m^{-3}	
Naphtalène	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10 µg.m^{-3}	2009
Trichloroéthylène	VGAI intermédiaire : pour une exposition de 14 jours à 1 an	800 µg.m^{-3}	2009
	VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10^{-6}	2 µg.m^{-3}	
	VGAI long terme : pour une exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10^{-5}	20 µg.m^{-3}	
Tétrachloroéthylène	VGAI court terme : pour une exposition de 1 à 14 jours	1380 µg.m^{-3}	2010
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	250 µg.m^{-3}	
Particules ($PM_{2.5}$ et PM_{10})	pas de VGAI proposées	/	2010
Acide cyanhydrique (HCN)	pas de VGAI court terme proposées	/	2011
Dioxyde d'azote (NO_2)	VGAI court terme : pour une exposition de 2 heures	200 µg.m^{-3}	2013
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	20 µg.m^{-3}	

Figure 14 : Synthèse des valeurs guide pour l'air intérieur
Source : ANSES

Ici, un certain nombre de polluants qui n'a pas été décrit précédemment est mentionné. Ces polluants sont souvent organiques et typiques de la pollution intérieure. Leurs effets sont similaires

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

aux effets du formaldéhyde et du benzène. De même, leurs sources sont très semblables :les matériaux, les mobiliers, les vêtements ou encore les objets de décoration.

Comme il a été mentionné précédemment, on peut à nouveau noter que les valeurs limites des particules n'ont pas été déterminées. En effet, des valeurs seuils sont définies pour l'air extérieur mais pas encore pour l'air intérieur. Il est certain qu'il faut les limiter au maximum aux vues de leurs conséquences sur la santé des humains.

Le tableau suivant récense les différents polluants trouvés dans l'air intérieur et leurs sources.

POLLUANTS CHIMIQUES	Origines possibles
COV (composés organiques volatils)	Matériaux de construction ou de décoration, mobilier, produits d'entretien, cuisson des aliments, fumée de tabac…
Formaldéhyde	Panneaux de particules, aggloméré, mousses isolantes, moquettes, textiles, colles, peintures, cosmétiques, fumée de tabac…
Éthers de glycol	Certaines peintures «à l'eau», encres, vernis, colles, produits d'entretien, diluants, cosmétiques…
Hydrocarbures (benzène, toluène, xylène, styrène, octane, trichloréthylène…)	Produits de bricolage, meubles, fumée de tabac, peintures, vernis, colles, encres, moquettes, insecticides, matières plastiques, isolants, détachants…
CO (monoxyde de carbone)	Appareils de chauffage et de production d'eau chaude par combustion, mal réglés ou peu performants, fumée de tabac
NO_x (oxydes d'azote)	Combustions diverses (gazinière, chauffe-eau gaz, chauffage au bois, fumée de tabac…)
SO_2 (dioxyde de soufre)	Combustion du charbon, du fioul
Pesticides	Produits de traitement du bois, produits de traitement des plantes et des animaux domestiques, insecticides…

GAZ RADIOACTIF	Origines possibles
Radon	Émanations des sous-sols granitiques et volcaniques et de certains matériaux de construction

POLLUANTS BIOLOGIQUES	Origines possibles
Agents infectieux	
Légionelles	Prolifération dans les réseaux d'eau chaude (entre 25 et 45 °C), systèmes de climatisation, tours aéro-réfrigérantes, humidificateurs, brumisateurs, jacuzzi…
Toxines bactériennes, mycotoxines	Animaux domestiques, moisissures
Allergènes	
de moisissures	Les moisissures prolifèrent dans une ambiance humide, chaude et mal aérée
de blattes	Carapaces et excréments des blattes. Les blattes prolifèrent dans des milieux humides, chauds, sombres où elles trouvent de la nourriture
d'acariens	Les acariens prolifèrent dans les poussières, la literie, les canapés et fauteuils en tissu, les tapis, les moquettes, les rideaux…
d'animaux domestiques	Salive, peau, glandes anales des chats, chiens…

PARTICULES, FIBRES	Origines possibles
Particules	Air extérieur (pollens, gaz d'échappement, fumées diverses…), spores de moisissures, fumée de tabac, chauffage (au bois ou au fioul)
Fibres	Laines minérales, végétales ou animales pour l'isolation, amiante, matériaux de couverture ou de revêtement, canalisations et conduites, textiles

Figure 15 : Tableau récapitulatif des polluants et de leurs sources
Source : la pollution de l'air. Editions Dunod, 2008 ; ADEME ; OQAI- tableau extrait du guide ADEME « un air sain chez soi »

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

4. LA RECOLTE DES DONNEES

4.1. L'observatoire de la qualité de l'air

L'observatoire de la qualité de l'air (OQAI) a été créé en 2001 par les pouvoirs publics. Son objectif est de mieux connaître la pollution intérieure, ses origines et ses dangers, notamment grâce à des campagnes de mesures.

Il travaille en liaison étroite avec l'ANSES et est représenté au sein du Conseil National de l'Air par sa Présidente Andrée Buchmann. L'OQAI se compose d'un Conseil de surveillance qui en définit les orientations générales, d'un Conseil scientifique garant de la qualité de ses travaux et d'un Comité consultatif qui recueille les avis et les suggestions des partenaires institutionnels, des professionnels et des représentants d'usagers. Le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) est opérateur du projet. Il élabore le programme de travail, anime et coordonne le réseau de partenaires en relation avec les trois instances. C'est à lui également qu'il revient d'organiser et de mettre en œuvre sur le terrain la politique définie par le Conseil de surveillance.

Plusieurs questions essentielles sont au cœur du travail mené pour améliorer et prévenir les situations à risque :

- Quels sont le confort et la qualité de l'air dans nos espaces de vie ?
- Qu'est-ce qui détermine la qualité des environnements intérieurs ?
- Que faire pour améliorer la situation dans les bâtiments ?

L'Observatoire organise des campagnes de mesures pour apporter des solutions adaptées à la prévention et au contrôle de la qualité de l'air intérieur à travers la sensibilisation des professionnels et l'information du grand public. L'Observatoire apporte des éclairages sur les orientations à prendre en matière de réglementation sur les matériaux, les équipements, la maintenance et les pratiques constructives ainsi que sur l'étiquetage des produits de consommation courante.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT COUVERT PAR LE DROIT D'AUTEUR

4.1.1. La campagne de mesure dans les logements

L'OQAI a ainsi réalisé entre 2003 et 2005 une campagne de mesure sur des logements français, ayant permis d'établir un état des lieux de la qualité de l'air intérieur, représentatif de la situation des 24 millions de résidences principales en France métropolitaine continentale.

La campagne de mesure sur les logements menées par l'OQAI a permis de mettre en évidence qu'il existe une spécificité de la qualité de l'air intérieure des logements par rapport à l'extérieur, qui s'exprime par la présence de certaines substances non observées à l'extérieur ou par des concentrations nettement plus importantes à l'intérieur.

Les polluants observés dans les logements ont ainsi été listés, analysés, et classés par niveau de priorité, en fonction de leur concentration et de leur nocivité, sur la base des valeurs de toxicologie existantes (valeurs guides de références).

La campagne de mesures dans les logements a montré que 10% des logements français peuvent être qualifiés de « multi-pollués » (3 à 8 des composés recherchés sont mesurés à de fortes concentrations), 15% des logements sont « pollués » (1 à 2 composés présents à de fortes concentrations), 30% des logements sont « légèrement pollués » (4 à 7 composés présents à des concentrations supérieures aux médianes de l'ensemble des logements) et 45% des logements sont « peu pollués » (l'ensemble des composés étant présents à des concentrations inférieures aux médianes de l'ensemble des logements). Le formaldéhyde est considéré comme le polluant le plus important.

Il est important de rester prudent face à ces mesures, car les logements considérés ne sont pas tous des logements récents, la campagne de mesures étant représentative des 24 millions de logements français. Certains logements ne disposent donc pas de systèmes de ventilation, il est dans ce sens difficile d'établir un lien entre présence/absence de ventilation et qualité de l'air intérieur. Cependant, cette étude permet d'identifier les polluants, et permet de remonter à leur source d'émissions, dans le but de définir une stratégie de réduction ou d'élimination de cette pollution.

4.1.2. La campagne dans les écoles

En 2013, deux nouvelles campagnes ont démarré dans les bureaux et les écoles. En plus de cela, un dispositif national de collecte de données dans les bâtiments performants énergétiquement a été mis en place afin de mieux connaitre la qualité de l'air intérieur et le confort des occupants dans ces bâtiments.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Pour le moment, aucune étude française n'a permis de donner une vision globale de la qualité de l'air dans les écoles. Cette campagne est coordonnée par le CSTB et de nombreuses autres équipes partenaires. Plus de 600 salles de classe dans 300 écoles feront l'objet de mesures de polluants. Les polluants testées seront : les COV, les COV totaux (COVT), le dioxyde d'azote, les particules, les métaux lourds. Les résultats sont attendus et seront présentés en 2016.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

4.2. Les bases de données existantes

Afin de modéliser la dynamique des concentrations de polluants à l'intérieur des bâtiments, la connaissance de multiples entrées est nécessaire. Les taux d'émissions de polluants et les concentrations obtenues dans des cas d'études pourront alors être comparés aux différentes simulations. Ainsi, la création d'une base de données unique regroupant les données de la littérature concernant les taux d'émission des polluants gazeux et particulaires générés par les sources rencontrées à l'intérieur des bâtiments paraît être de grande importance pour la modélisation.

Beaucoup de données sont disponibles dans la littérature, mais peu de bases de données les regroupent.

Dans la suite de ce chapitre, deux bases de données de la qualité de l'air intérieur sont présentées.

4.2.1. Pandore

La base de données PANDORE : une comPilAtion des émissioNs Des pOlluants de l'aiR intériEur, est une base de données réalisée à l'université de la Rochelle par le laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement (le LaSIE).

Cette base de données regroupe des informations sur 8171 polluants, 7980 polluants gazeux et 191 polluants particulaires. Ces polluants proviennent de 542 sources. Ces sources sont très variées, allant des matériaux de construction aux différents types de cuissons.

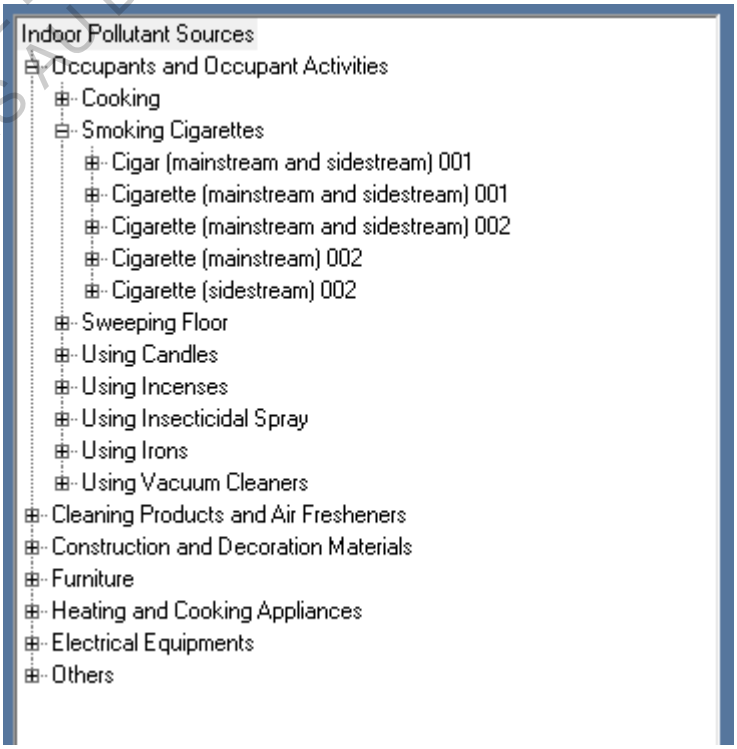


Figure 16 : Liste des catégories de la base de données Pandore

La dernière version date de mai 2014. La base de données est structurée de la manière suivante, il y a 4 niveaux de hiérarchie des sources de polluants. Les catégories sont le plus haut niveau, il y a 7 catégories principales (les occupants, les matériaux de construction, le mobilier, etc..). Ensuite, il y a les types globaux, dans le cas de la

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

catégorie « Occupants et activités des occupants », les types globaux sont la cuisine, le fait de fumer, utilisation de bougies, etc..

Puis il y a les types (ex : cigarettes). Le dernier niveau est le niveau source, dans lequel on va retrouver les informations sur la source et en particulier son taux d'émission.

D'autres images de la base de données sont données dans l'annexe 2.

4.2.2. CNRC Material emissions database

Contrôler les sources de pollution intérieure est le meilleur moyen d'améliorer la qualité de l'air intérieur. Afin de pouvoir contrôler ces sources, il faut mieux les connaître, c'est en partant de ce postulat que cette base de données a été créée. La CNRC material emissions database est une base de données canadienne qui regroupe les taux d'émission de plusieurs matériaux de construction. Les taux d'émission sont donnés pour 90 COV cibles. Ces composés cibles ont été sélectionnées dans 11 listes publiées par des agences nationales et internationales, la liste est donnée en annexes 3. 69 matériaux ont été testés pour ces polluants cibles. Les tests ont été faits en chambre d'essai selon la norme ASTM Standard D5116-97. La liste des matériaux est également en annexes. Les résultats sont donnés sous forme de tableau.

Group	VOC #	Solid & Engineered Wood Materials							Flooring								Installation Materials				% (Detection)
		OSB		Plywood		Solid wood		MDF	Carpet/ Assembly		Underpad		Laminate/ Assembly		Linoleum/ Vinyl Flooring		Adhesive		Caulking		
		Min	Max	Min	Max	Min	Max		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Aldehydes	1	41.8	265.5					89.9	1.67	20.85			3.68	11.49	2.0	28.5					46
	2																				0
	3	0.1	2.6			0.2	0.2	0.2	0.08	1.41	0.21	1.42	0.01	0.09	0.90	1.55			6057	6057	60
	4	2.7	59.8	2.1	6.0	0.3	1.7	6.0	0.19	0.48	0.21	0.93	2.33	2.33	0.15	0.15			361	361	52
	5	0.6	44.6	3.3	25.4	1.9	10.4	0.9	13.45	13.45	1.08	7.42	0.53	0.53	0.53	0.71			225	757	63
	6	11.1	53.7					441.6	6.17	40.46	6.70	76.57	1.32	37.66	1.2	19.0					54
	7	4.3	4.3			0.3	0.3														3
	8	0.3	6.5	0.9	3.6	0.7	0.7	1.4			0.15	0.15	0.03	1.62	0.9	1.3					46
	9	29.4	1256.7	12.3	33.0	0.4	5.7	135.7			0.25	0.25	12.67	12.67	21.7	26.2					56
	10	1.1	47.3	3.3	24.7	1.6	12.4	2.5	0.60	0.90	3.03	6.37	0.50	0.50	0.3	1.9	89	89	170	742	67
	11	0.6	6.7	1.0	12.8	0.4	3.6	2.6	0.46	2.43	0.60	0.60	0.30	0.30	1.3	1.6					52
	12	12.9	354.1	3.4	12.2	0.4	4.4	29.0					7.70	7.70	15.5	15.5			762	762	49

Figure 17 : Valeurs de concentration pour les aldéhydes dans la base de données du CNRC

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

5. IMPACTS SUR LA SANTE ET LE CONFORT

L'air intérieur est jusqu'à 10 fois plus pollué que l'air extérieur. Ceci peut être expliqué par le fait que les polluants extérieurs sont transmis à l'intérieur et à ceux-là s'ajoutent les polluants provenant de sources intérieures.

Un certain nombre de chercheurs ont étudiés le ressenti des personnes quant à la qualité de l'air intérieur.

5.1. Le syndrome du bâtiment malsain

Depuis 1982, un nom a été mis sur tous les symptômes dont sont atteints les occupants d'un bâtiment : le syndrome du bâtiment malsain. Il correspond aux différents symptômes non spécifiques qui peuvent toucher les occupants d'un bâtiment et qui s'en vont quelques heures après avoir quitté ce bâtiment. L'OMS a donné une description précise des symptômes du SBS :

- Symptômes généraux
    - Fatigue, tête lourde, céphalée
    - Nausée, vertiges
    - Difficulté de concentration
- Symptômes affectant les muqueuses
    - Démangeaisons, sensations de brulures, irritation des yeux
    - Nez irrité, bouché ou qui coule
    - Gorge sèche et toux
- Symptômes affectant la peau
    - Peau du visage sèche ou rouge
    - Démangeaisons, sensations de brulures ou de pression sur le visage

Le SBS apparaît souvent dans les bâtiments de bureaux, les symptômes empirent au fur à mesure que les heures de la journée passent. Après la sortie du bureau, les symptômes s'atténuent ou disparaissent. Le SBS a souvent été associé à une forte présence de COV, mais jusqu'à présent rien n'a été prouvé et ce n'est pas toujours le cas[13].

Ces symptômes sont dus à une mauvaise qualité de l'air dans un bâtiment. Une étude malaysienne [14] a montré que les paramètre de ventilation et d'accumulation des polluants étaient des

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

prédicateurs de SBS. De plus, selon cette étude, le SBS ne serait pas typique d'un type de bâtiment en particulier.

L'amélioration de l'étanchéité dans le bâtiment empêche non seulement les polluants chimiques d'être évacués mais aussi l'humidité. Une trop forte humidité dans un bâtiment entraîne une forte croissance de moisissures[15], qui peuvent nuireà la santé des occupants et notamment, entraîner des maladies respiratoires.

La ventilation mise en place joue un rôle primordial dans le SBS, en effet, une étude Singapourienne[16] a montré qu'une température plus froide augmente les sensations d'air trop sec et d'irritation. Si la ventilation est trop importante et que l'air soufflé est trop froid au niveau des occupants, cela peut causer une sensation d'inconfort important.

5.2. Les impacts sur la santé d'une mauvaise qualité de l'air intérieur

Une étude[17] des coûts liés aux conséquences d'une mauvaise qualité de l'air intérieur a été faite par une équipe de chercheurs du milieu de l'économie, des risques et de la qualité de l'air intérieur. Cette étude estime le coût socio-économique dû à une mauvaise qualité de l'air à 19 milliard d'euros par an.

L'impact de la pollution intérieure sur la santé, selon les substances et les concentrations, est multiple. Les polluants chimiques peuvent provoquer des irritations de la peau, du nez, de la gorge, des yeux, une sensation d'inconfort, un état de fatigue, des nausées, une hypersensibilité aux odeurs. D'autres peuvent être responsables de maladies : eczéma, allergies, asthme, troubles de l'équilibre, de l'appareil digestif. Plus grave, le formaldéhyde et le benzène sont des gaz cancérigènes. La présence de tous ces polluants chimiques dans l'air de la maison est une des causes de l'augmentation importante des allergies, surtout chez les enfants.
Il convient d'ajouter que les effets sur la santé d'une mauvaise Qualité de l'Air Intérieur ne sont encore que partiellement connus et nécessitent des études supplémentaires.

Les effets de polluants de l'air intérieur sur la santé peuvent se répartir schématiquement en deux groupes :

- les effets liés à une exposition à court terme. Il peut s'agir de symptômes survenant dans des délais brefs (quelques jours, semaines) après l'exposition ; par exemple, des symptômes

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

d'irritations de la peau, des muqueuses ou du tractus respiratoire, des nausées, des céphalées, etc.

- les effets liés à une exposition de longue durée (plus d'un an). Il peut s'agir de pathologies respiratoires, neurologiques etc., jusqu'au développement de certains cancers.

La présence de polluants n'implique pas nécessairement des conséquences sanitaires. Leurs effets dépendent du type de polluant(s), de sa (leur) concentration, de la durée d'exposition (temps passé en présence du polluant) et de la sensibilité de chaque individu.

Cependant, certains travaux réfutent l'impact de la pollution intérieur sur la santé respiratoire des enfants. Notamment, l'étude menée par P. J Franklin [18] sur la qualité de l'air et ses impacts sur la santé des enfants explique que la pollution intérieure n'est pas la cause de maladie respiratoire telles que l'asthme. Toutefois, la pollution intérieure et en particulier les COV peuvent être l'élément déclencheur de maladies respiratoires chez des personnes ayant déjà une certaine sensibilité.

Infections

Plusieurs catégories de maladies étant causées en partie par la pollution intérieure ont été définies dans une étude espagnole[6]. Les catégories sont les suivantes : les infections, les bronchites et maladies pulmonaires chroniques, les cancers du poumon ou encore l'asthme bronchique.

Le rôle des contaminants intérieurs a été prouvé dans le cas d'infections respiratoires. En effet la présence d'humidité et de moisissures est souvent associée à des infections respiratoires. Il a été observée[19] qu'une mauvaise QAI peut augmenter jusqu'à 80% le risque de pneumonie chez l'enfant de moins de 5 ans .

Bronchites chroniques et maladies pulmonaires chroniques

Ces maladies sont souvent associées à la fumée de cigarettes. En effet, les personnes ayant des antécédents de fumeurs ou qui sont souvent en contact avec de la fumée de cigarettes sont plus souvent atteints par ces pathologies. De même, l'exposition au radon pourrait aussi être une des causes de ces maladies.

Cancer du poumon

Un certain nombre de polluants intérieurs est considéré comme cancérogène (formaldéhyde, benzène, radon, etc..). La fumée de cigarette et de feu de bois a souvent été associée au cancer du poumon. Certaines activités intérieures productrices de fumée alimentaire (comme la friture, la cuisine à l'huile en général) le sont également.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Asthme bronchique

La fumée de cigarette ainsi qu'une forte concentration en dioxyde d'azote peuvent être responsable de pathologies liées aux bronches. Une étude récente[20] a montré que pour chaque augmentation de 10µg/m³ de la concentration en formaldéhyde, le risque d'asthme chez l'enfant augmente de 3%. La présence en trop forte de dose de COV en général peut avoir pour effet le déclenchement de l'asthme chez l'enfant, de même pour les particules (PM10 et PM2.5).

5.3. Le confort et la perception des usagers

La qualité de l'air intérieur commence seulement à apparaître comme un problème important. Jusqu'à présent la pollution intérieure n'était pas vraiment reconnue comme un problème à part entière dans la mesure où, à l'intérieur de nos maisons nous nous sentons protégés. De plus, contrairement aux mauvaises odeurs, la pollution intérieure n'est pas nécessairement perceptible. Pour certains polluants, seules des mesures peuvent rendre compte de leur présence.

Plusieurs études ont été menées sur la perception d'une bonne qualité de l'air intérieur par les occupants. Il est important de différencier la qualité de l'air intérieur de la qualité de l'environnement intérieur. La qualité de l'environnement intérieur, compile à la fois les aspects de qualité de l'air mais aussi d'odeur, de confort sonore, de confort thermique ou encore confort hygrothermique.

Une étude menée par des scientifiques danois[21] a également étudié d'autres facteurs non liés aux paramètres intérieurs pouvant influer sur la perception de la qualité de l'environnement intérieur. Plus précisément, ils ont trouvé que la perception dépend du niveau d'éducation, des relations entre les personnes présentes dans les bureaux étaient soumis, cependant la perception n'est pas influencée par le genre, le stress auquel sont soumis les occupants ou le fait de boire du café. De plus, les occupants ont une forte tendance à se sentir plus au chaud et mieux chez eux qu'au bureau, même si les températures sont les mêmes.

Une étude américaine[22] explique que la sensation d'un bon ou mauvais environnement et qualité de l'air intérieur dépend en grande partie du confort des pieds, des mains et du visage. De plus, lorsque les occupants sentent l'air en mouvement, la qualité de l'air est perçue comme meilleure. Ceci est probablement dû à l'impression de renouvellement d'air et donc d'apport en air « propre et frais ».

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

L'importance du confort des extrémités (pieds, mains et visage) est confirmée par une étude[23] sur les théâtres ventilés mécaniquement. Cette étude montre que souvent les théâtres sont sur-ventilés, ce qui provoque de l'inconfort chez les usagers, en particulier quand les courants d'air sont au niveau des pieds.

D'autre part, l'humidité relative est un paramètre important pour le confort intérieur. En effet, il est connu que l'air doit être plutôt sec et frais, or ce principe doit être pris précautionneusement[24], car un air trop sec et trop frais peut entraîner une sécheresse des yeux et des phénomènes d'irritations.

5.4. Influences des paramètres physiques

Comme pour tous phénomènes physiques, plusieurs paramètres ont une influence sur la capacité d'un matériau ou non à émettre des polluants. Cette partie donne les différents paramètres ayant de l'influence et leurs effets. Les paramètres principaux étudiés sont : la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air. D'autres paramètres physiques propres à un matériau sont importants comme la capacité d'un matériau à adsorber les polluants ou à les rejeter.

5.4.1. Humidité relative

Il est connu que l'humidité relative d'un local a un impact sur la pollution bactérienne. En effet, une plus forte humidité relative favorise le développement de champignon, cela est encore accentué quand la température augmente également. Mais il existe encore peu d'études et de résultats concluants sur l'influence de l'humidité relative sur les émissions de matériaux de construction.

Même si plusieurs travaux ont été entrepris, certains se contredisent. Une étude menée à l'université de Syracuse[25] a testé les émissions en formaldéhyde (substance soluble dans l'eau) et en toluène (non soluble dans l'eau) d'un matériau sous trois humidités relatives différentes. Les résultats ont montré qu'une augmentation de l'humidité relative de 25% à 80% augmente les émissions de formaldéhyde de 56%. Ceci est probablement dû au caractère soluble du formaldéhyde. Cependant, lorsque le taux d'humidité relative était entre 25% et 50%, il n'y avait pas de changement significatif.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Les résultats ont également montré que le toluène est moins soluble lorsque l'humidité relative augmente, mais ce n'est pas pour autant que la solubilité est inversement proportionnelle au taux d'humidité relative.

Une étude danoise[26] a montrée expérimentalement qu'un faible taux d'humidité relative pouvait avoir une influence sur les émissions de certains polluants comme le propandiol. En effet, lorsque le taux d'humidité était égal à 0%, les émissions étaient aussi quasiment nulles. En revanche, mis à part pour ce polluant, les effets de l'humidité relative sur les émissions n'étaient pas significatifs. Cette étude montre également que le taux d'émissions du formaldéhyde double lorsque le taux d'humidité relative passe de 30% à 70%.

L'humidité relative peut donc avoir un effet sur les émissions de polluants, mais les travaux entrepris à ce jour ne permettent de conclure quant à une tendance type.

5.4.2. Température

La même étude danoise mentionnée précédemment a également étudié l'influence des changements de température. Selon les matériaux et polluants testés, les effets ne sont pas les mêmes. Elle montre cependant qu'une augmentation de 7°C double les émissions de formaldéhyde.

La diffusion des polluants dépend, entre autres, de la diffusion dans les matériaux poreux, or le coefficient de diffusion dépend de la température. De plus, le coefficient de partition (qui sera défini plus précisément par la suite) qui traduit la capacité ou non d'un gaz à être adsorbé ou sous forme gazeux serait également influencé par la température.

Une étude chinoise [27] a étudié l'influence de la température sur ces deux paramètres. Une nouvelle corrélation a été déduite entre le coefficient de diffusion et la température et le coefficient de partition et la température. Ces corrélations sont les suivantes :

$$\frac{K_{ma}}{T^{1/2}} = A_1 \exp\frac{A_2}{T}$$

Où K_{ma} est le coefficient de partition sans unité du polluant et du solide, T la température en K, A_1 et A_2 sont des coefficients qui dépendent de l'adsorbant et de l'adsorbé.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

$$\frac{D}{T^{1.25}} = B_1 \exp\frac{B_2}{T}$$

Où D est le coefficent de diffusion en m²/s, T la température en K et B_1 et B_2 des coefficients qui dépendent de l'adsorbant et de l'adsorbé.

Ces corrélations sont basées sur le fait que le phénomène de diffusion est le phénomène majoritaire lors des émissions de polluants. Les résultats de la modélisation ont été comparés à des résultats expérimentaux et présentent une bonne correspondance.

Une revue bibliographique menée par F. Haghighat [28], a montré que les changements de températures n'avaient pas toujours le même effets sur les concentrations en COV. Les changements de températures ont plus d'effets sur les COV peu volatils.

A nouveau, les différentes expériences ne présentent pas les mêmes résultats en fonction des matériaux et des polluants considérés.. Cependant, des corrélations commencent à émerger et permettent de traduire l'influence de la température sur les taux d'émissions des matériaux de construction.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

6. LES SOLUTIONS POUR PALLIER UNE MAUVAISE QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

Il existe deux moyens d'action pour améliorer la qualité de l'air intérieur : la ventilation et les matériaux mis en œuvre. En effet, la mise en place de matériaux peu émissifs permet de limiter les sources de polluants, une ventilation adéquate permet l'évacuation des polluants.

6.1. La ventilation

La règlementation en matière de ventilation dans les logements est définie par l'arrêté du 24 mars 1982 relative au renouvellement d'air dans les logements.

Cette règlementation impose une ventilation générale et permanente au moins pendant la période où la température extérieure oblige à maintenir les fenêtres fermées. Toutefois dans les bâtiments soumis à un isolement acoustique renforcé, en application de l'arrêté du 6 octobre 1978, l'aération doit pouvoir être générale et permanente en toute saison. La circulation de l'air doit pouvoir se faire principalement par entrée d'air dans les pièces principales (chambres, salon, etc.), et sortie dans les pièces de service (cuisine, salle de bain, toilettes).

Le système de ventilation doit comporter des entrées d'air dans les pièces principales. Ces entrées d'air peuvent être naturelles, ou réalisées par des dispositifs mécaniques. Le système doit également comporter des sorties d'air dans les pièces de service (au moins dans la cuisine, les salles de bain ou de douche et les WC). Ces sorties d'air peuvent être réalisées par des conduits verticaux à tirage naturel ou des dispositifs mécaniques. En installation collective de ventilation, si une pièce de service possède une sortie d'air mécanique, toutes les autres pièces de service doivent en posséder une.

La règlementation impose également des taux de renouvellement d'air, qui dépendent des pièces du logement considérées et du nombre de pièce total du logement. La réglementation définie des débits d'air maximums dit « de pointe » et des débits d'air minimum.

Les débits de pointes sont nécessaires pour pouvoir évacuer, ponctuellement, l'air intérieur lors des périodes de fortes productions d'odeurs et de polluants (période de préparation des repas). Les débits de pointe maximum sont définis ci dans le tableau ci-dessous.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

nombre de pièces principales du logement	débits extraits exprimés en m³/h cuisine	salle de bains ou de douches commune ou non avec un cabinet d'aisances	autre salle d'eau	cabinet d'aisances unique	cabinet d'aisances multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

Figure 18 : Tableau des débits de pointe
Source : l'arrêté du 24 mars 1982 relative au renouvellement d'air dans les logements

Les débits de pointe conditionnent le dimensionnement des systèmes de ventilation.

Le reste du temps, c'est à dire dans les périodes de faible production d'odeur et de polluants, les débits doivent respecter des valeurs minimales. Le débit total extrait et le débit réduit de cuisine sont au moins égaux aux valeurs données dans le tableau suivant.

débits en m³/h	nombre de pièces principales 1	2	3	4	5	6	7
débit total minimal logement	35	60	75	90	105	120	135
débit minimal en cuisine	20	30	45	45	45	45	45

Figure 19 : Tableau des débits extraits par pièce
Source : l'arrêté du 24 mars 1982 relative au renouvellement d'air dans les logements

Dans les établissements recevant du public, et en particulier dans les écoles, les débits réglementaires sont définis dans le règlement sanitaire départemental (RSD) type. Les exigences en la matière sont regroupées dans les articles 64, 65 et 66-2, 66-3 du Règlement Sanitaire Départemental type (RSD) du 9 août 1978 (JO du 13 septembre 1978) révisé par la circulaire du 20 janvier 1983.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Détermination du renouvellement d'air minimal - locaux d'entrée

désignation des locaux	débit minimal d'air neuf en m³/h et par occupant (air à 1,2 kg/m³)	
	locaux avec interdiction de fumer	locaux sans interdiction de fumer
locaux d'enseignement: classes, salles d'études, laboratoires (à l'exclusion de ceux à pollution spécifique), écoles maternelles, élémentaires et collèges	15	
autres établissements	18	25
ateliers	18	25
locaux d'hébergement: chambres collectives (au moins 3 personnes), dortoirs, cellules, salles de repos	18	25
bureaux et locaux assimilés: locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de poste, banques	18	25
locaux de réunions: salles de réunions, de spectacles, de culte, clubs, foyers	18	30
locaux de vente: boutiques, supermarchés	22	30
locaux de restauration: cafés, bars, restaurants, cantines, salles à manger	22	30
locaux à usage sportif:		
par sportif, dans une piscine	22	
par sportif, dans les autres locaux	25	30
par spectateur	18	30

Figure 20 : Tableau des débits minimums dans les ERP
Source : réglementation sanitaire type

Les débits de ventilation dans les bureaux et bâtiments tertiaires sont régis par le code du travail et en particulier par l'article **Article R4222-6**, qui définit les débits suivants :

DESIGNATION DES LOCAUX	DEBIT MINIMAL d'air neuf par occupant (en mètres cubes par heures)
Bureaux, locaux sans travail physique	25
Locaux de restauration, locaux de vente, locaux de réunion	30
Ateliers et locaux avec travail physique léger	45
Autres ateliers et locaux	60

Figure 21 : Tableau des débits minimums définis par le code du travail
Source : Article R4222-6

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Dans les établissements recevant du public et les bâtiments tertiaires, la ventilation est mise en route en fonction du nombre de personnes présentes. Elle n'est pas permanente contrairement à la ventilation dans les logements.

La ventilation est le moyen d'améliorer la qualité de l'air intérieur des logements par trois moyens :
- Contrôle des paramètres d'influence,
- Evacuation et dilution des polluants,
- Lutter contre le confinement et l'accumulation des polluants.

Dans un premier temps, la ventilation permet d'agir sur les composants biologiques, en contrôlant les paramètres d'influence. La ventilation a tout particulièrement un impact sur l'humidité relative d'un logement. Contrôler ce taux d'humidité et conserver un taux inférieur à 70% d'humidité relative dans le logement permet de lutter efficacement contre le développement de moisissures, d'acariens et de blattes, réduisant ainsi les impacts sur la santé des occupants, notamment les impacts liés au développement d'allergies.

D'autre part, la ventilation permet de réduire la concentration des polluants dans l'air intérieur en évacuant une partie des polluants dans l'air extrait. Les débits d'entrée d'air et d'extraction de ventilation entraînent le renouvellement de l'air intérieur des logements, permettant l'évacuation et la dilution des polluants les plus volatils : COV, aldéhydes, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, monoxyde d'azote. La mise en œuvre de débits de ventilation satisfaisant permet de réduire efficacement la concentration des polluants chimiques encore présents dans l'air intérieur, suite à la réduction à la source.

On sait aujourd'hui que le brassage de l'air par les systèmes de ventilation permet d'évacuer et de diluer les polluants. Cependant, aucune étude n'a actuellement montré dans quelle mesure le renouvellement d'air agissait sur les différents polluants présents.

Enfin, la ventilation permet de lutter efficacement contre le confinement des locaux. Le confinement entraîne la non évacuation des polluants, des odeurs, de l'humidité dans l'air intérieur, participant aux développements des polluants biologiques,. De plus, ilentraîne également l'accumulation des polluants dans l'air intérieur, dégradant encore d'avantage le confort des

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

occupants et la qualité sanitaire de l'air. Le confinement est particulièrement étudié en période d'occupation. En effet, c'est en période d'occupation que la génération de polluants est la plus importante : les polluants provenant des produits de décoration et de construction sont toujours présents, mais les périodes d'occupation entraînent la génération de polluants supplémentaires liés aux activités humaines ainsi qu'aux dégagements humains. Comme il a été mentionné précédemment, le marqueur de confinement généralement employé est le CO2.

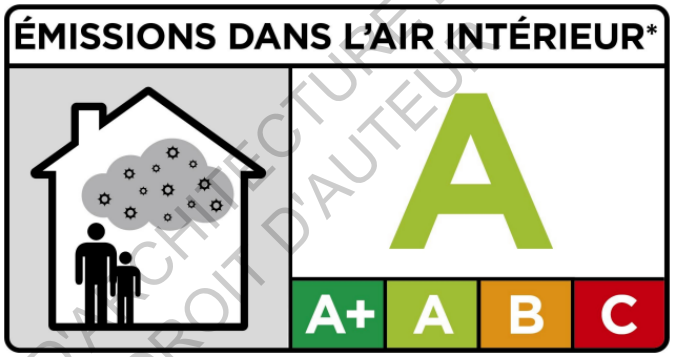
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

6.2. Les matériaux de construction

6.2.1. Directive européenne

La directive européenne relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules a pour but d'œuvrer pour une moindre pollution des peintures.

6.2.2. Etiquetage des matériaux



Les matériaux de construction sont une des principales sources de pollution intérieure. Afin de lutter contre cela, une loi qui régit les émissions a été créée. Depuis le 1er janvier 2012, les nouveaux produits de construction et de décoration mis à disposition sur le marché doivent être munis d'une étiquette. Cette étiquette, prévue par le décret du 23 mars 2011, indiquera de manière simple et lisible le niveau d'émission du produit en polluants volatils. Ce niveau d'émission sera indiqué par une classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions). Les décrets relatifs à ce dispositif sont :

- Le décret n°2011-321 du 23 mars 2011 (étiquetage des matériaux)
- L'arrêté du 19 avril 2011 (liste des polluants, méthodes de mesure, étiquette)
- L'arrêté du 20 février 2012 modifiant l'arrêté du 19 avril 2011 (modification de l'étiquetage

Le tableau ci-dessous présente les différentes classes en fonction des émissions de polluants en µg/m³.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

CLASSES	C	B	A	A+
Formaldéhyde	> 120	< 120	< 60	< 10
Acétaldéhyde	> 400	< 400	< 300	< 200
Toluène	> 600	< 600	< 450	< 300
Tétrachloroéthylène	> 500	< 500	< 350	< 250
Xylène	> 400	< 400	< 300	< 200
1,2,4-Triméthylbenzène	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
1,4-Dichlorobenzène	> 120	< 120	< 90	< 60
Ethylbenzène	> 1500	< 1500	< 1000	< 750
2-Butoxyéthanol	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
Styrène	> 500	< 500	< 350	< 250
COVT	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000

Figure 22 : Emissions limites par polluants
Source : 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

Il est important de noter que dans le tableau on ne retrouve pas des débits d'émissions à proprement parlé. En effet, les émissions sont mesurées dans une chambre selon une procédure précise donnée dans les normes NF EN ISO 16000. Ces normes permettent de mesurer la concentration dans la chambre d'essai à 3 jours puis 28 jours, c'est grâce à cette concentration qu'on en déduit ensuite les classes d'émissions.
Il existe des ratios permettant de passer des valeurs de concentration dans la chambre d'essai au débit d'émission en µg/m²h.

Les composés organiques volatils (COV) regroupent une multitude de substances qui peuvent être d'origine naturelle ou humaine. Ils sont toujours composés de l'élément carbone et d'autres éléments tels que l'hydrogène, les halogènes, l'oxygène, le soufre… Leur volatilité leur confère l'aptitude de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission, entraînant ainsi des impacts directs et indirects sur l'environnement.

Les produits concernés par l'étiquetage obligatoire sont :

- les produits de construction ou de revêtements de murs, sols ou plafonds employés à l'intérieur des locaux (cloisons, panneaux, parquets, moquettes, papiers peints, peintures...)
- les produits utilisés pour leur incorporation ou leur application (isolants sous-couches vernis, colles, adhésifs, etc.)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

6.2.3. Labels

En plus de ce classement, les matériaux et mobiliers peuvent être certifiés afin de prouver leurs faibles émissions. Plusieurs labels existent au niveau national et international. Ils permettent d'indiquer à l'utilisateur si les émissions sont fortes ou non. Les labels ne sont pas des obligations, c'est un acte volontaire de la part des fabricants. Cependant, aujourd'hui la réglementation n'étant pas suffisamment stricte, les fabricants utilisent de plus en plus de labels pour prouver leur implication pour les causes environnementales. Les ingénieurs d'études qui préconisent des matériaux font en sorte de préconiser des matériaux classés A+ et avec des labels pour assurer des impacts sanitaires et environnementaux les plus faibles possibles.

• Label Ange bleu

Il s'agit d'un label écologique pour produits et services, porté par le ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire d'Allemagne. Le label est financé et géré par l'administration fédérale de l'environnement (Umweltbundesamt) et le RAL, l'institut Allemand de la Protection et Déclaration des Biens. Un jury indépendant détermine les critères techniques à respecter afin d'obtenir le label Ange Bleu.

Il s'applique aux matériaux de construction à base de papier recyclé, matériaux de construction à base de verre recyclé, peintures, vernis à émissions toxiques réduites, panneaux de bois, tapisseries, colles pour revêtements de sols.

• L'Eco label Européen

Il s'agit d'un label européen pour les produits et services, porté par la Commission Européenne. Il existe pour chaque pays-membre un point de contact, qui contribue au système d'attribution du label. En Allemagne, ce sont l'administration fédérale de l'environnement (Umweltbundesamt), et le RAL, l'institut Allemand de la protection et déclaration des biens. Il s'applique aux peintures et vernis, et revêtements de sols durs.

Le label européen pour les peintures et les laques se base sur des critères environnementaux et de santé. De par une concentration réduite en solvants et substances dangereuses, les impacts sur l'air ambiant et sur l'environnement sont ainsi limités.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Le label européen pour revêtements de sols durs est attribué aux pierres naturelles (p.ex. marbre, granit, grès, ardoise) et aux produits retravaillés, c.-à-d. les produits durcis ou cuits (p.ex. pierres agglomérées, plaques terrazzo, dallage en béton, carrelages en argile ou en céramique) ayant des besoins limités en ressources et entraînant des émissions réduites.

• Label EMICODE

Il s'agit d'un label d'identification et de classification de produits de fixations de revêtements de sols à émissions contrôlées L'EMICODE impose des critères concernant les émissions de produits de fixation et tient compte des aspects liés à la santé et à la protection de l'environnement. Ceux-ci dépassent les exigences légales. La labellisation considère trois classes différentes :

--- EMICODE EC 1: "très pauvre en émissions",

--- EMICODE EC 2: "pauvre en émissions",

--- EMICODE EC 3: "non pauvre en émissions".

Il s'applique aux colles, couches de fond, pré couches, et enduits.

• Label NF Environnement

Il s'agit d'un label attestant de la conformité des produits ou services aux exigences définies dans des cahiers des charges (ou référentiels) et qui portent sur la qualité d'usage et la qualité environnementale des produits.

Il est délivré par AFNOR Certification, organisme certificateur indépendant. C'est une marque volontaire de certification de produits et services.

La marque NF Environnement est destinée à certifier, tout au long de leur cycle de vie, que les produits ou services sur lesquels elle est apposée présentent un impact négatif moindre sur l'environnement et une qualité d'usage satisfaisante par rapport à d'autres produits ou services analogues présents sur le marché.

Il s'applique à tous les matériaux de construction.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

• **Label Gut**

Ce label assure que la production de tapis a tenu compte d'une série de critères environnementaux et qu'aucune substance polluante n'est utilisée dans la fabrication du tapis labellisé. Les émissions de COV, de substances cancérigènes et d'odeurs sont limitées au minimum…

Exemple pour une peinture intérieure mate mur et plafonds	Teneur max COV Totaux	Emissions max COV Totaux à 28 jours	Emissions max de Formaldéhyde à 28 jours
Directive 2004/42/CE	30 g/l	-	-
NF environnement	30 g/l	-	-
Ecolabel européen	15 g/l	-	-
Protocole Afsset Et étiquetage A+	-	1 000 µg/m^3	10 µg/m^3
Natureplus	0.5 g/kg	300 µg/m^3	24 µg/m^3
Ange Bleu RAL-UZ-102	0.7 g/l	-	-

Figure 23 : Récapitulatif des émissions labels environnementaux
Source : synthèse « Petit déjeuners de l'habitat durable : Peintures : techniques, pratiques et santé » Codem picardie – Lucie Toublon

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

7. LES MODELES ET SIMULATION NUMERIQUE

Plusieurs mécanismes physiques ont lieu lors de la diffusion de polluant des matériaux dans l'air d'un local. Cette partie reprend tous ces phénomènes et les met en équation. Les équations suivantes sont basées sur une compilation de plusieurs publications scientifiques.[29][30][31][32][33][34][35]

Les étapes qui suivent décrivent les mécanismes physiques mis en jeu lors des émissions de polluant (soit de la couche de matériau la plus profonde jusqu'à la zone). Pour cela, les concentrations dans les différents milieux (matériaux, air) sont considérés comme homogènes.
Il est important de noter qu'un certain nombre d'hypothèses sont également faites lors de la résolution de ces équations. Premièrement, les réactions chimiques à l'intérieur des matériaux ne sont pas prises en compte. Ensuite, on considère que la convection ne dépend pas des directions de l'air, alors qu'en réalité on sait que la convection horizontale et verticale ne sont pas les mêmes.
De plus, on considère que le volume de la pièce est homogène et donc uniformément mélangé. Ceci n'est pas réel car on sait qu'il y a une stratification[36]. Cependant, pour des volumes de faibles hauteurs (autour de 3-4 m), il a été montré que cette approximation était acceptable.

7.1. La diffusion dans les matériaux

Le gradient de concentration dans le matériau est la force motrice du transfert de masse qui a lieu. Ce transfert de masse dans le matériau est régi par l'équation suivante. Cette équation est dérivée de la seconde loi de Fick en considérant un coefficient de diffusion invariant dans l'espace.

$$\frac{\partial C_m(y,t)}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_m(y,t)}{\partial y^2}$$

Où $C_m(y,t)$ est la concentration dans la matériau en µg/m³ et D_m est le coefficient de diffusion dans le matériau en m²/s.
Le transfert de masse est considéré unidimensionnel. Cette équation est valable dans le cas où seul un matériau est en place.
Dans le cas de plusieurs couches de différents matériaux, il y a diffusion dans chaque matériau et il y a égalité des concentrations à l'interface entre deux couches.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Selon si les couches sont sèche/sèche (plâtre/ isolant) ou sèche/mouillé (plâtre/colle ou plâtre/peinture) les équations ne seront pas exactement les mêmes.

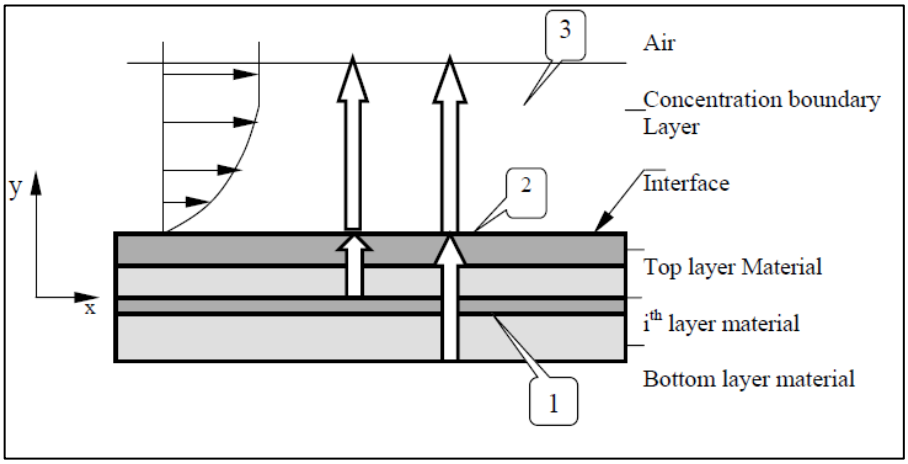


Figure 24 : Schéma de l'émission de polluant d'un matériau vers un local
Source : Haghighat et Huang[33]

Matériau sec/sec

Dans le cas de deux matériaux secs, la concentration en polluant reste relativement faible. Ainsi, le coefficient de diffusion du polluant dans le matériau peut être considéré comme homogène dans le volume. De ce fait, la 2nde loi de Fick énoncée précédemment s'écrit de la façon suivante : :

$$\frac{\partial C_{m,i}(y,t)}{\partial t} = D_{m,i}\frac{\boldsymbol{\partial^2} C_{m,i}(y,t)}{\partial y} \qquad (\boldsymbol{i = 1, \dots, n})$$

Où $C_{mi}(y,t)$ est la concentration dans la matériau i en µg/m³ et D_{mi} est le coefficient de diffusion du polluant dans le matériau i en m²/s.

Matériau Sec/humide

Une publication canadienne[33] explique qu'il y a trois phases d'émissions dans le cas de matériaux sec/mouillé. Tout d'abord, il y a une phase d'évaporation , puis une phase transitoire où le matériau n'est plus aussi mouillé puis le matériau est complètement sec.

A l'inverse de matériaux secs, la concentration en polluant dans les matériaux humides est très élevée. Le coefficient de diffusion devient alors fonction de la concentration et sa variation spatiale ne peut donc plus être négligée.

L'équation qui régit ce phénomène est donc la suivante:

$$\frac{\partial C_{m,i}(y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(D_{m,i}\frac{\boldsymbol{\partial^2} C_{m,i}(y,t)}{\partial y}\right) \qquad (\boldsymbol{i = 1, \dots, n})$$

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Où $C_{mi}(y,t)$ est la concentration dans la matériau i en µg/m³ et D_{mi} est le coefficient de diffusion du polluant dans le matériau i en m²/s

7.2. Désorption à l'interface matériau/air

Le second phénomène physique impliqué dans l'émission de polluant est un phénomène de désorption. Les molécules de polluants se « décrochent » des pores du solide et sont relâchées dans l'air.

Il y a un équilibre qui se fait entre la concentration à l'interface entre le matériau et l'air.

A l'équilibre, on obtient la relation suivante :

$$C_{m,i}(b_e, t) = k_e C_{as}$$

Où C_{mi} (b_e,t) est la concentration dans le matériau au niveau de la plus haute épaisseur (directement en contact avec l'air) en µg/m³, C_{as} est la concentration dans la couche d'air en contact avec la surface en µg/m³ et k_e est le coefficient de partition qui est sans unité. Il traduit la capacité d'une espèce à être en phase gaz ou adsorbé. Il peut être comparé au coefficient de Henry qui traduit la solubilité d'une espèce.

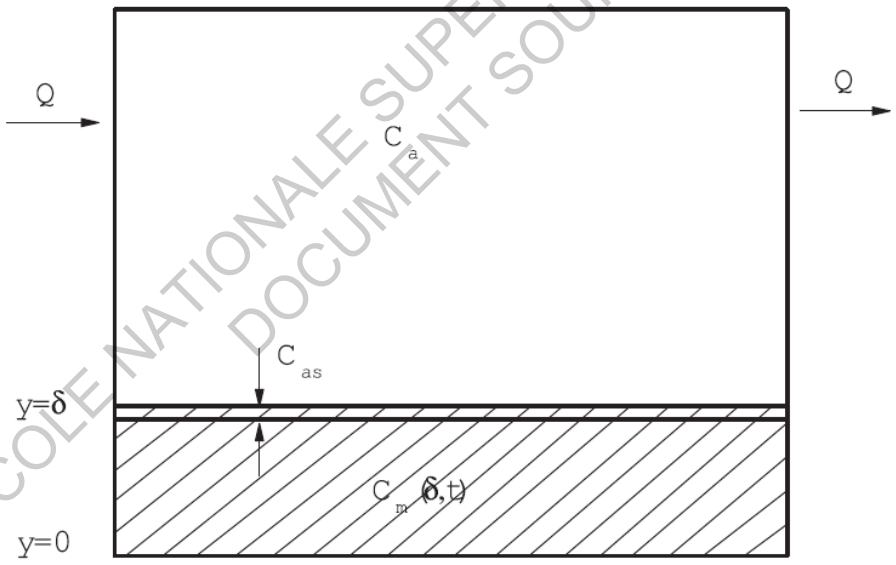


Figure 25 : Les différentes concentrations lors des émissions de polluants
Source : L. Zhu et al.[30]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

7.3. Transfert de masse dans la couche limite

L'air soufflé par ventilation dans la zone crée une couche limite suivant une loi de Poiseuille. A l'intérieur de cette couche limite, des phénomènes de convection et de diffusion prennent place. La vitesse de diffusion étant négligeable face à la vitesse de l'air, seule la contribution de la convection est prise en compte dans le calcul. L'équation impliquée dans ce phénomène est la suivante :

$$R_e = h_e(C_{as} - C_a)$$

Où R_e est le taux d'émissions de polluant en µg/m²s, h_e est le coefficient de transfert de masse en m/s, C_{as} est la concentration dans la couche d'air en contact avec la surface en µg/m³ et C_a est la concentration en polluant dans le local en µg/m³.

7.4. Effet de puit

Pour le moment, nous avons uniquement expliqué le cas d'une source de polluant. Or, le phénomène peut être inversé, c'est ce qu'on appelle le phénomène de « puits » ou absorption. Un matériau sera plutôt source ou puits selon l'orientation du gradient de concentration de polluant entre la zone et la couche la plus profonde de matériau. En effet, si la concentration dans l'air entrant est inférieure à celle dans le matériau alors il y aura désorption, si la concentration dans l'air entrant est supérieure à celle dans le matériau il y aura adsorption et donc effet de puit.

Toutes les équations vues précédemment peuvent être réécrites de la même manière mais elles iront dans le sens suivant : convection, puis ce qu'on appelait désorption devient adsorption puis diffusion dans le matériau.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

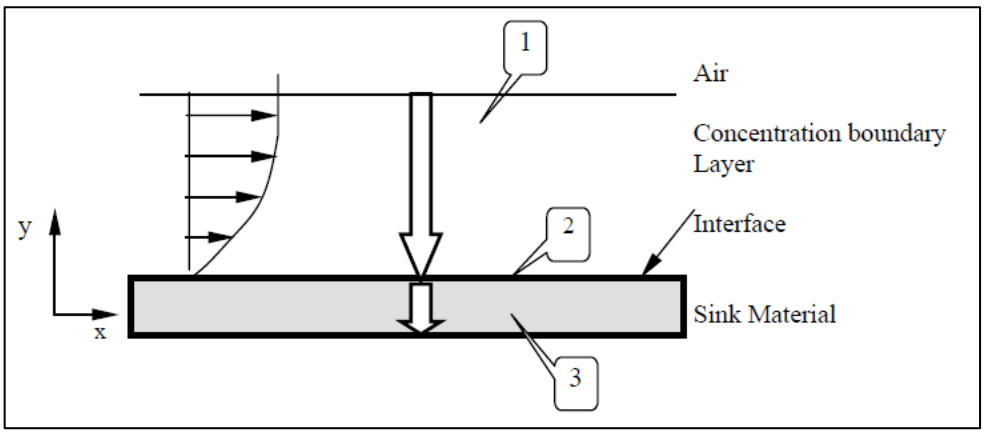


Figure 26 : Schéma de l'effet de puit
Source : Haghighat et Huang[33]

Convection :

$$R_{es} = h_s(C_{ass} - C_a)$$

Où R_{es} est le taux d'émissions de polluant en µg/m²s, h_s est le coefficient de transfert de masse en m/s, C_{ass} est la concentration dans la couche d'air en contact avec la surface en µg/m³ et C_a est la concentration en polluant dans le local en µg/m³.

L'adsorption :

$$\boldsymbol{C_{ms,i}(b_e, t)} = k_s C_{ass}$$

Où C_{msi} (b_e,t) est la concentration dans le matériau au niveau de la plus haute épaisseur (directement en contact avec l'air) en µg/m³, C_{ass} est la concentration dans la couche d'air en contact avec la surface en µg/m³ et ks est le coefficient de partition qui est sans unité. Il traduit la capacité d'une espèce à être en phase gaz ou adsorbé. Il peut être comparé eu coefficient de Henry qui traduit la solubilité d'une espèce.

La diffusion dans le matériau :

$$\frac{\partial C_{ms}(y,t)}{\partial t} = D_{ms}\frac{\partial^2 C_{ms}(y,t)}{\partial y}$$

Où C_{ms}(y,t) est la concentration dans la matériau en µg/m³ et D_{ms} est le coefficient de diffusion dans le matériau en m²/s.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

7.5. Détermination de la concentration dans le local

Afin de déterminer la concentration du polluant dans la pièce, il faut faire un bilan des flux entrants et sortants.

Il faut tenir compte : de l'air entrant sortant chargé en polluant, des polluants émis par le matériau (source) et des polluants absorbé par le matériau (puit).

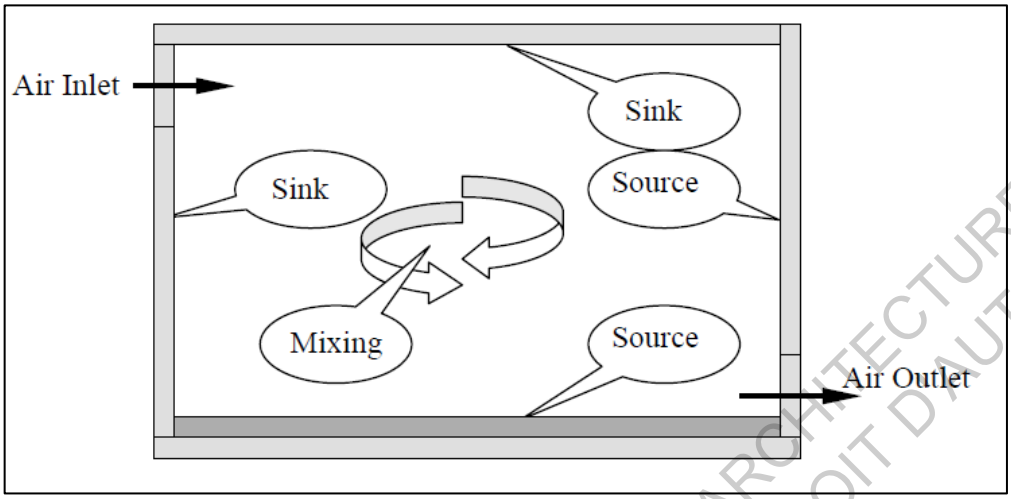


Figure 27 : Elements du bilan
Source : Haghighat et Huang[33]

La loi de conservation de la masse s'écrit de la manière suivante :

$$V\frac{\partial C_a(t)}{\partial t} = VNC_{in} - VNC_a + \dot{m}_{source} + \dot{m}_{puit}$$

Où V est le volume de la pièce en m^3, N est le taux de renouvellement d'air en h^{-1}, C_{in} est la concentration en polluant de l'air entrant en µg/m³, C_a est la concentration en polluant dans le local (et donc dans l'air sortant) en µg/m³.

D'autres part les expressions de $\dot{m}_{source}$ et $\dot{m}_{puit}$ sont les suivantes :

$$\dot{m}_{source} = A_e h_e \left(\frac{C_{me,i}(b_e,t)}{k_e} - C_a\right)$$

Où A_e est la surface de matériau source en m², h_e est le coefficient de transfert de masse de la source en m/s, k_e est le coefficient de partition sans unité, C_{mei} est la concentration dans la matériau en µg/m³ et C_a est la concentration dans le local en µg/m³, b_e est la distance entre la couche la plus profonde et l'interface matériau/air (soit l'épaisseur du matériau)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

$$\dot{m}_{puit} = A_s h_s (\frac{C_{ms,i}(b_s, t)}{k_s} - C_a)$$

Où A_s est la surface de matériau source en m², h_s est le coefficient de transfert de masse de la source en m/s, k_s est le coefficient de partition sans unité, C_{msi} est la concentration dans la matériau en µg/m³ et C_a est la concentration dans le local en µg/m³, b_s est la distance entre la couche la plus profonde et l'interface matériau/air (soit l'épaisseur du matériau).

Les méthodes numériques permettent ensuite de résoudre ces équations couplées en ajoutant des conditions limites spécifiques au cas étudié. La résolution permet alors d'obtenir la concentration dans le local.

Aujourd'hui le problème qui se pose majoritairement la récolte des données tels que le taux d'émissions d'un polluant spécifique à un matériau ou encore – et surtout – la détermination des coefficients de transfert de masse et coefficient de partition. Ces coefficients peuvent être déterminés expérimentalement mais il n'existe pas de base de données qui les recensent.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Références

[1] Lars Mølhave, “Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health,” *Indoor Air*, vol. Volume 1, pp. 357–376, 1991.

[2] G. Poulhet, S. Dusanter, S. Crunaire, N. Locoge, V. Gaudion, C. Merlen, P. Kaluzny, and P. Coddeville, “Investigation of formaldehyde sources in French schools using a passive flux sampler,” *Building and Environment*, vol. 71, pp. 111–120, Jan. 2014.

[3] S. Déoux, *Bâtir pour la santé des enfants*. Medieco Editions, 2010.

[4] H. K. Lai, M. J. Jantunen, N. Künzli, E. Kulinskaya, R. Colvile, and M. J. Nieuwenhuijsen, “Determinants of indoor benzene in Europe,” *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 39, pp. 9128–9135, Dec. 2007.

[5] M. A. Isbell, R. J. Stolzberg, and L. K. Duffy, “Indoor climate in interior Alaska: simultaneous measurement of ventilation, benzene and toluene in residential indoor air of two homes,” *Science of The Total Environment*, vol. 345, no. 1–3, pp. 31–40, Jun. 2005.

[6] L. Carazo Fernández, R. Fernández Alvarez, F. J. González-Barcala, and J. A. Rodríguez Portal, “Indoor air contaminants and their impact on respiratory pathologies,” *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*, vol. 49, no. 1, pp. 22–27, 2013.

[7] P. T. B. S. Branco, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins, and S. I. V. Sousa, “Indoor air quality in urban nurseries at Porto city: Particulate matter assessment,” *Atmospheric Environment*, vol. 84, pp. 133–143, Feb. 2014.

[8] J. A. Bernstein, N. Alexis, H. Bacchus, I. L. Bernstein, P. Fritz, E. Horner, N. Li, S. Mason, A. Nel, J. Oullette, K. Reijula, T. Reponen, J. Seltzer, A. Smith, and S. M. Tarlo, “The health effects of nonindustrial indoor air pollution,” *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 121, no. 3, pp. 585–591, Mar. 2008.

[9] m Simoni and L. Carrozzi, “The Po River Delta (north Italy) indoor epidemiological study: effects of pollutant exposure on acute respiratory symptoms and respiratory function in adults. Arch Environ Health 2002;57:130-6.,” *Archives of Environmental Health: An International Journal*, vol. 57, 2002.

[10] A. Chaloulakou and I. Mavroidis, “Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model,” *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 11, pp. 1769–1781, 2002.

[11] Z. Bakó-Biró, D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H. B. Awbi, and M. J. Williams, “Ventilation rates in schools and pupils’ performance,” *Building and Environment*, vol. 48, pp. 215–223, Feb. 2012.

[12] D. J. Clements-Croome, H. B. Awbi, Z. Bakó-Biró, N. Kochhar, and M. Williams, “Ventilation rates in schools,” *Building and Environment*, vol. 43, no. 3, pp. 362–367, Mar. 2008.

[13] A. P. Jones, “Indoor air quality and health,” *Atmospheric environment*, vol. 33, no. 28, pp. 4535–4564, 1999.

[14] A. Norhidayah, L. Chia-Kuang, M. K. Azhar, and S. Nurulwahida, “Indoor Air Quality and Sick Building Syndrome in Three Selected Buildings,” *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 93–98, Jan. 2013.

[15] B. Crook and N. C. Burton, “Indoor moulds, Sick Building Syndrome and building related illness,” *Fungal Biology Reviews*, vol. 24, no. 3–4, pp. 106–113, Aug. 2010.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

[16] K. W. D. Cheong, W. J. Yu, K. W. Tham, S. C. Sekhar, and R. Kosonen, “A study of perceived air quality and sick building syndrome in a field environment chamber served by displacement ventilation system in the tropics,” *Building and Environment*, vol. 41, no. 11, pp. 1530–1539, Nov. 2006.

[17] CSTB, Anses, OQAI, “Étude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l’air intérieur,” 2014.

[18] P. J. Franklin, “Indoor air quality and respiratory health of children,” *Paediatric Respiratory Reviews*, vol. 8, no. 4, pp. 281–286, Dec. 2007.

[19] N. Bruce, “Indoor air pollution from unprocessed solid fuel use and pneumonia risk in children aged under five years: a systematic review and meta-analysis,” *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 86, no. 5, pp. 390–398, May 2008.

[20] G. McGwin, J. Lienert, and J. I. Kennedy, “Formaldehyde Exposure and Asthma in Children: A Systematic Review,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 118, no. 3, pp. 313–317, Nov. 2009.

[21] M. Frontczak and P. Wargocki, “Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments,” *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 922–937, Apr. 2011.

[22] H. Zhang, E. Arens, D. Kim, E. Buchberger, F. Bauman, and C. Huizenga, “Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task–ambient conditioning system,” *Building and Environment*, vol. 45, no. 1, pp. 29–39, Jan. 2010.

[23] M. Kavgic, D. Mumovic, Z. Stevanovic, and A. Young, “Analysis of thermal comfort and indoor air quality in a mechanically ventilated theatre,” *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 7, pp. 1334–1343, Jan. 2008.

[24] P. Wolkoff and S. K. Kjærgaard, “The dichotomy of relative humidity on indoor air quality,” *Environment International*, vol. 33, no. 6, pp. 850–857, Aug. 2007.

[25] J. Xu and J. S. Zhang, “An experimental study of relative humidity effect on VOCs’ effective diffusion coefficient and partition coefficient in a porous medium,” *Building and Environment*, vol. 46, no. 9, pp. 1785–1796, Sep. 2011.

[26] P. Wolkoff, “Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products,” *Atmospheric Environment*, vol. 32, no. 14, pp. 2659–2668, 1998.

[27] Q. Deng, X. Yang, and J. Zhang, “Study on a new correlation between diffusion coefficient and temperature in porous building materials,” *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 12, pp. 2080–2083, Apr. 2009.

[28] F. HAGHIGHAT, “Material Emission Rates : Literature Review, and the Impact of Indoor Air Temperature and Relative Humidity,” *Building and Environment*, vol. 33, no. 5, pp. 261–277, Sep. 1996.

[29] X. Wang and Y. Zhang, “A New Method for Determining the Initial Mobile Formaldehyde Concentrations, Partition Coefficients, and Diffusion Coefficients of Dry Building Materials,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 59, no. 7, pp. 819–825, Jul. 2009.

[30] L. Zhu, B. Deng, and Y. Guo, “A unified model for VOCs emission/sorption from/on building materials with and without ventilation,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 67, pp. 734–740, Dec. 2013.

[31] H. P. Hu, Y. P. Zhang, X. K. Wang, and J. C. Little, “An analytical mass transfer model for predicting VOC emissions from multi-layered building materials with convective surfaces on both sides,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 11–12, pp. 2069–2077, Jun. 2007.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

[32] A. Katsoyiannis, P. Leva, J. Barrero-Moreno, and D. Kotzias, “Building materials. VOC emissions, diffusion behaviour and implications from their use,” *Environmental Pollution*, vol. 169, pp. 230–234, Oct. 2012.

[33] F. Haghighat and H. Huang, “Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material,” *Building and Environment*, vol. 38, no. 8, pp. 1007–1017, Aug. 2003.

[34] J. Xiong, Y. Zhang, X. Wang, and D. Chang, “Macro–meso two-scale model for predicting the VOC diffusion coefficients and emission characteristics of porous building materials,” *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 21, pp. 5278–5290, Jul. 2008.

[35] Z. Liu, W. Ye, and J. C. Little, “Predicting emissions of volatile and semivolatile organic compounds from building materials: A review,” *Building and Environment*, vol. 64, pp. 7–25, Jun. 2013.

[36] M. O. Abadie, M. M. de Camargo, K. C. Mendonça, and P. Blondeau, “Improving the prediction of zonal modeling for forced convection airflows in rooms,” *Building and Environment*, vol. 48, pp. 173–182, Feb. 2012.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

8. LES OUTILS EXISTANTS

8.1. CONTAM

CONTAM est un outil multizone qui permet de modéliser la qualité de l'air intérieur et la ventilation. Il a été développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) dans les années 2000. C'est un outil libre et expérimental. CONTAM est téléchargeable sur le site de modélisation multizone du NIST : http://www.bfrl.nist.gov.
Cet outil permet de modéliser un bâtiment avec ces ouvertures et sources de contaminant et voir ensuite comment évoluent les vitesses d'air, les débits, les concentrations en polluants etc… Il permet également d'étudier l'exposition des occupants aux polluants.

Le principe d'un projet sous CONTAM est relativement simple, on crée une zone qui représente une pièce. Cette zone est reliée à la zone principale « Ambient » qui représente l'air extérieur et à d'autres zones (pièces) selon le projet. Différentes sortes d'orifices peuvent être créés afin de modéliser les échanges d'air entre les zones. Le volume des pièces est considéré homogène, la température et les pressions sont les mêmes partout. CONTAM utilise un module d'aéraulique simplifié afin de calculer les différents débits au niveau des ouvertures du volume (fenêtres, portes, ventilateurs, etc..).

Un système de ventilation mécanique (HVAC : Heat, ventilation Air-climatizing) peut également être mis en place. Pour ce faire, il est nécessaire de définir une entrée d'air, une sortie d'air et des débits de ventilation.

Afin de modéliser les sources de polluants d'un bâtiment, il est d'abord nécessaire de créer des espèces chimiques qui seront ensuite définis comme des contaminants. Plusieurs types d'émissions peuvent être modélisés :

- Emissions constantes
- Emissions contrôlées par différence de pression
- Concentration seuil
- Source exponentielle décroissante
- Contrôlées par la diffusion dans la couche limite
- Vitesse de déposition

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

- Taux de déposition

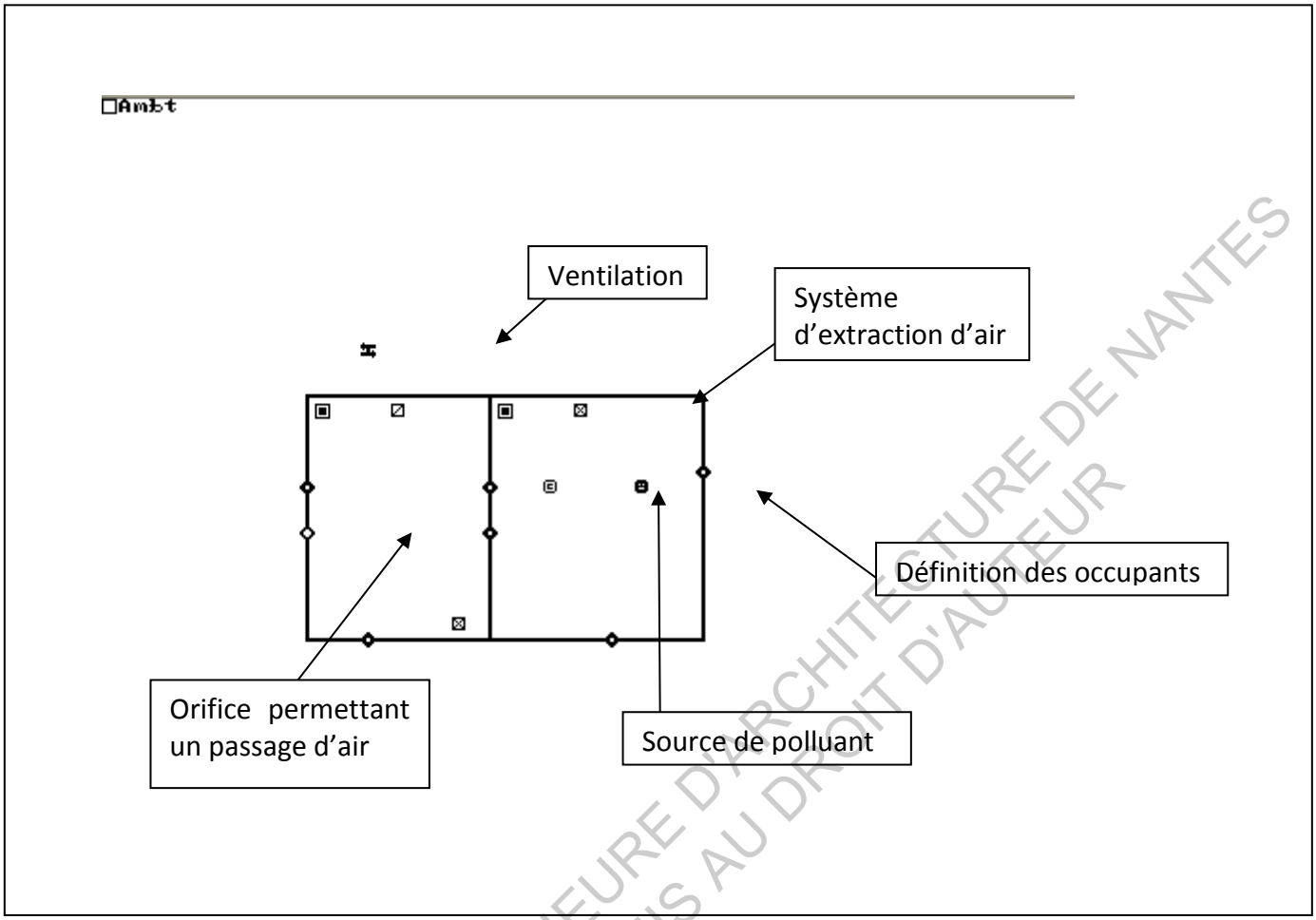


Figure 28 : Schéma d'un projet sous CONTAM

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

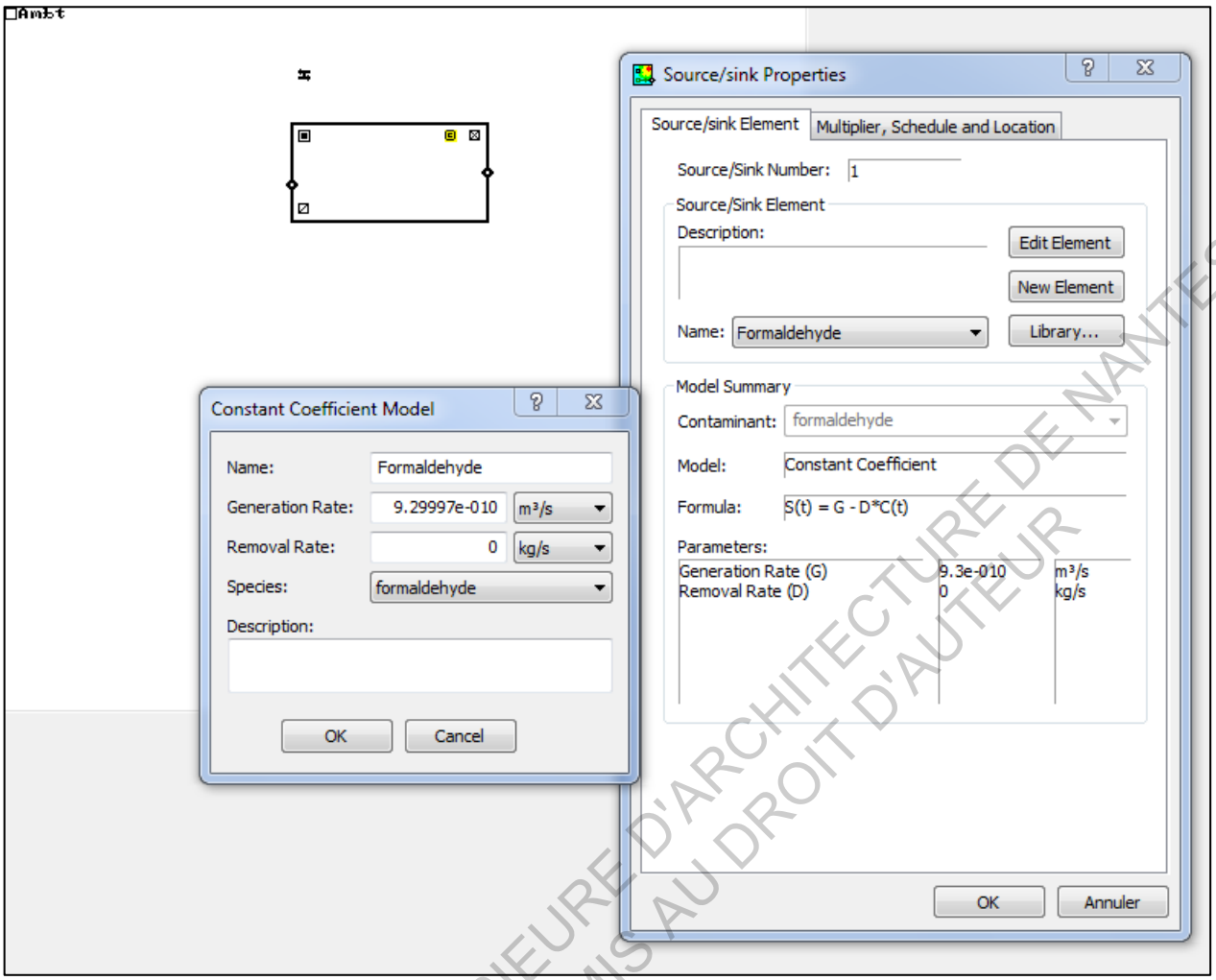


Figure 29 : Définition d'une source de contaminant sous CONTAM

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

8.2. EnergyPlus et Design Builder

Design Builder est l'interface graphique du moteur de calcul EnergyPlus, ensemble ils permettent d'effectuer une simulation thermique dynamique (STD). En effet, le moteur de calcul Energy Plus a une interface peu intuitive et ne permet pas de s'appuyer sur un dessin 3D. Design Builder permet de construire un modèle 3D, puis de définir les paramètres du bâtiment et de son environnement (isolation, surface et type de vitrage, systèmes de ventilation et de chauffage, masque environnant).

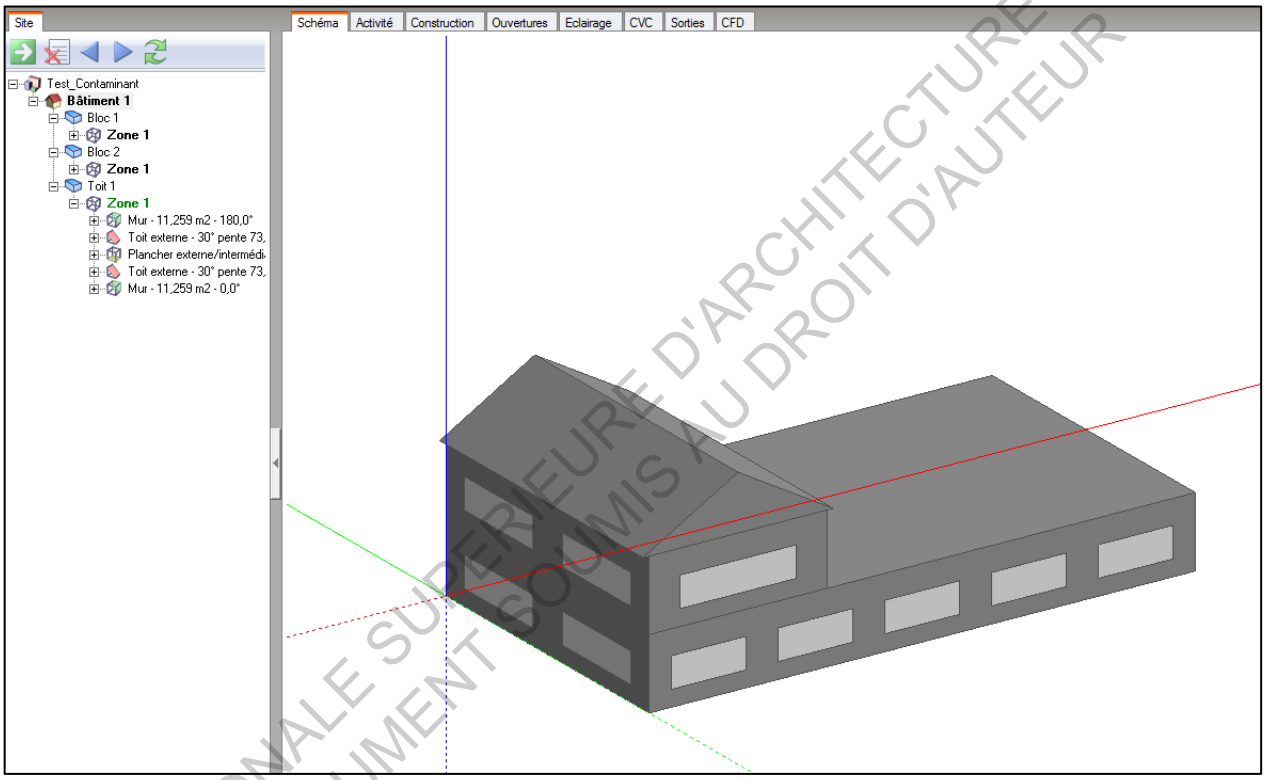


Figure 30 : Modèle 3D sous DesginBuilder

Tout comme CONTAM, EnergyPlus utilise un module d'aéraulique simplifié afin de calculer les différents débits au niveau des ouvertures du volume (fenêtres, portes, ventilateurs, etc..).

EnergyPlus prend en compte un fichier météo. Ceci permet de calculer les températures au plus juste.

La simulation faite est dynamique car elle tient compte des changements de températures, d'occupation, de plannings selon la date et l'heure. EnergyPlus résout les équations de thermique du bâtiment, ce sont des équations différentielles couplées qui tiennent compte de la convection, de la conduction et du rayonnement.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Lla simulation peut être lancée à condition de fournir tous les paramètres nécessaires et l'utilisateur peut choisir les différentes sorties qu'il désire. EnergyPlus permet notamment d'obtenir les températures de zones, les besoins de chaud et de froid, le poste ventilation, les indices de confort, etc…

Aujourd'hui, DesignBuilder ne permet pas de simuler les sources de polluants intérieurs, mais à terme ceci sera possible (les nouvelles versions commencent à avoir des entrées concernant les polluants) et il ne sera plus nécessaire de rentrer dans le moteur de calcul EnergyPlus pour prédire les concentrations en polluants.

EnergyPlus reprend les mêmes possibilités d'émissions que CONTAM (ceci est d'ailleurs explicité dans la documentation d'EnergyPlus), à savoir :

- Emissions constantes
- Emissions contrôlées par différence de pression
- Concentration seuil
- Source exponentielle décroissante
- Contrôlées par la diffusion dans la couche limite
- Vitesse de déposition
- Taux de déposition

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

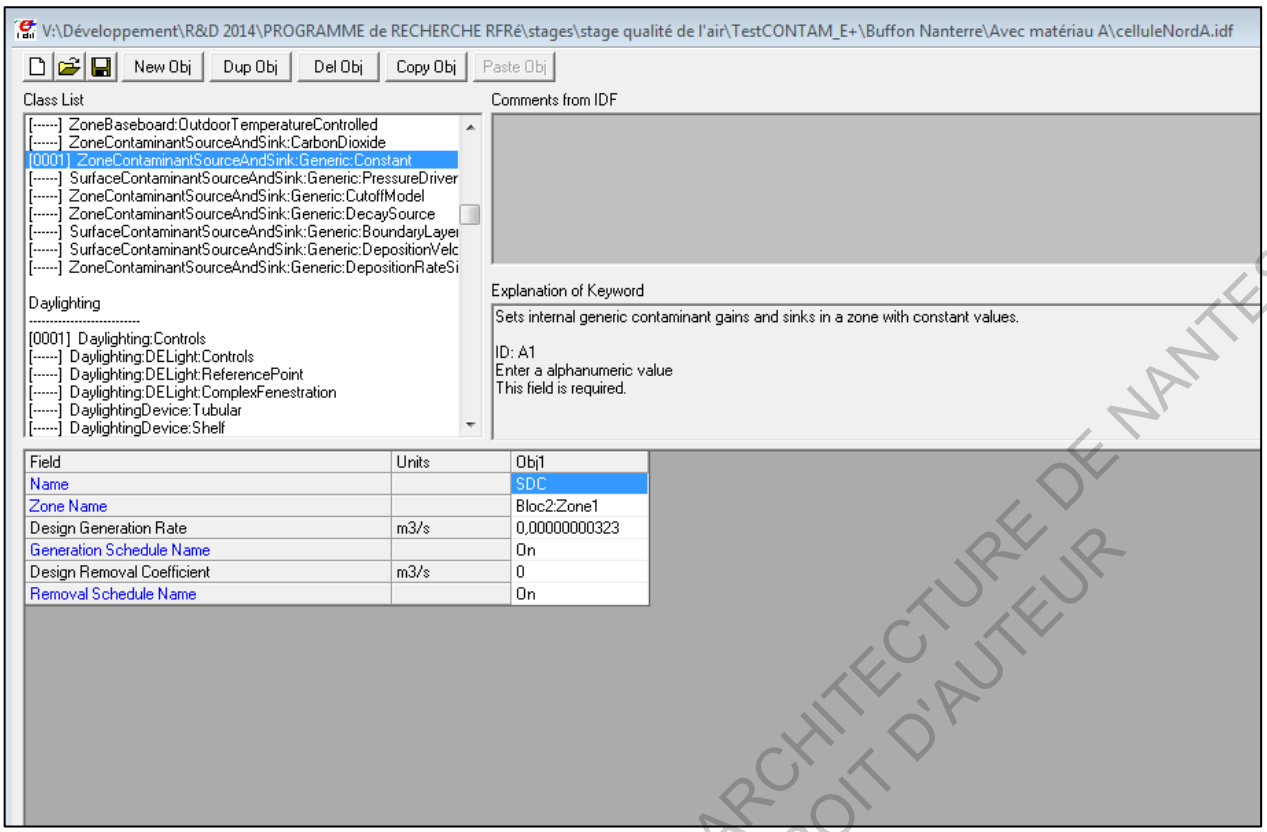


Figure 31 : Définition d'une source de polluant sous EnergyPlus

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

9. APPLICATION

9.1. Hypothèses et méthodologie

Les différentes simulations ont été réalisées afin d'étudier et de comparer les deux outils. Tout d'abord, nous nous sommes basés sur les valeurs trouvées dans les publications scientifiques étudiées au chapitre précédent. Puis, nous nous sommes basés sur des cas concrets de projets réalisés par le bureau d'étude RFR Eléments. De plus, nous nous sommes grandement appuyés sur un rapport sur les sources de formaldéhyde dans les écoles réalisées par Air Pays de la Loire en 2012. Cette étude fait le bilan des sources de formaldéhyde dans 3 écoles grâce à des mesures sur site. Les sources prises en compte sont non seulement les matériaux mais aussi le mobilier des salles de classes.

Les simulations n'ont pu être réalisées pour un grand nombre de polluants faute de données. Elles ont été faites pour le polluant formaldéhyde dans la majeure partie des cas. Ce choix a été fait d'une part car des données étaient disponibles mais aussi pour la pertinence de ce polluant. En effet, il est caractéristiques des polluants dus aux sources intérieures et sa dangerosité a été prouvée.

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe plusieurs types d'émissions de contaminants. Les données concernant les émissions de polluants sont encore rares, il était donc ardu de savoir quel était le type d'émissions le plus judicieux. Les publications scientifiques font références aux transferts de masse au niveau de la couche limite, nous avons donc pensé à tester le type d'émissions « Boundary layer diffusion ». Cependant, un certain nombre de paramètres est demandé lors de la définition d'une source de pollution et nous avions rarement les données adéquates telles que le coefficient de transfert de masse ou encore le coefficient de partition. Ce dernier fait référence à la capacité d'une espèce à être plutôt à l'intérieur du solide ou en phase gazeuse dans l'air, il peut être comparé au coefficient de Henry, qui traduit la concentration maximale d'un gaz en solution.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

9.2. Buffon Nanterre

Le projet Buffon Nanterre est un projet sur lequel travaille actuellement le bureau d'étude RFR éléments. C'est un projet de groupe scolaire à Nanterre. Les simulations ont été faites sur une salle de classe élémentaire type de 60,5 m² au sol. Le débit de ventilation est de 18 m³/h/élève et de 25 m³/h pour le professeur. Il y a 28 élèves dans la classe et un professeur. Le débit estimé est donc de 529 m³/h. Le planning suivant a été mis en place pour la ventilation :

Heures	**Ratio appliqué**
0h-7h30	0
7h30-8h	0.25
8h-8h45	0.5
8h45-10h	1
10h-10h15	0
10h15-12h	1
12-13h45	0
13h45-17h	1
17h-18h	0.75
18h-18h30	0.5
18h30-19h	0.25
19h-00h	0

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

La courbe de ventilation sur une semaine obtenue est la suivante :

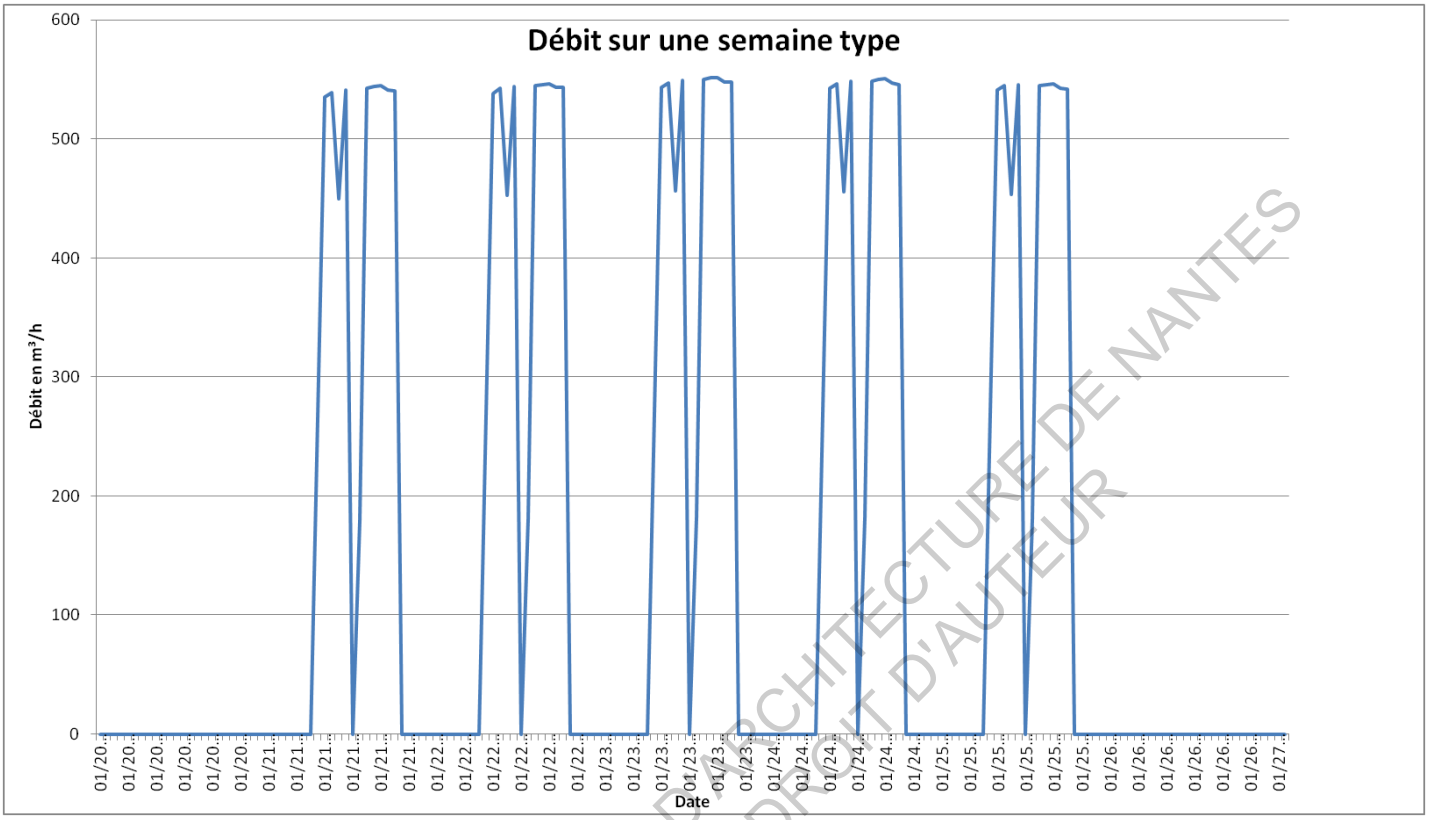


Figure 32 : Courbe du débit sur une semaine

Sur une journée :

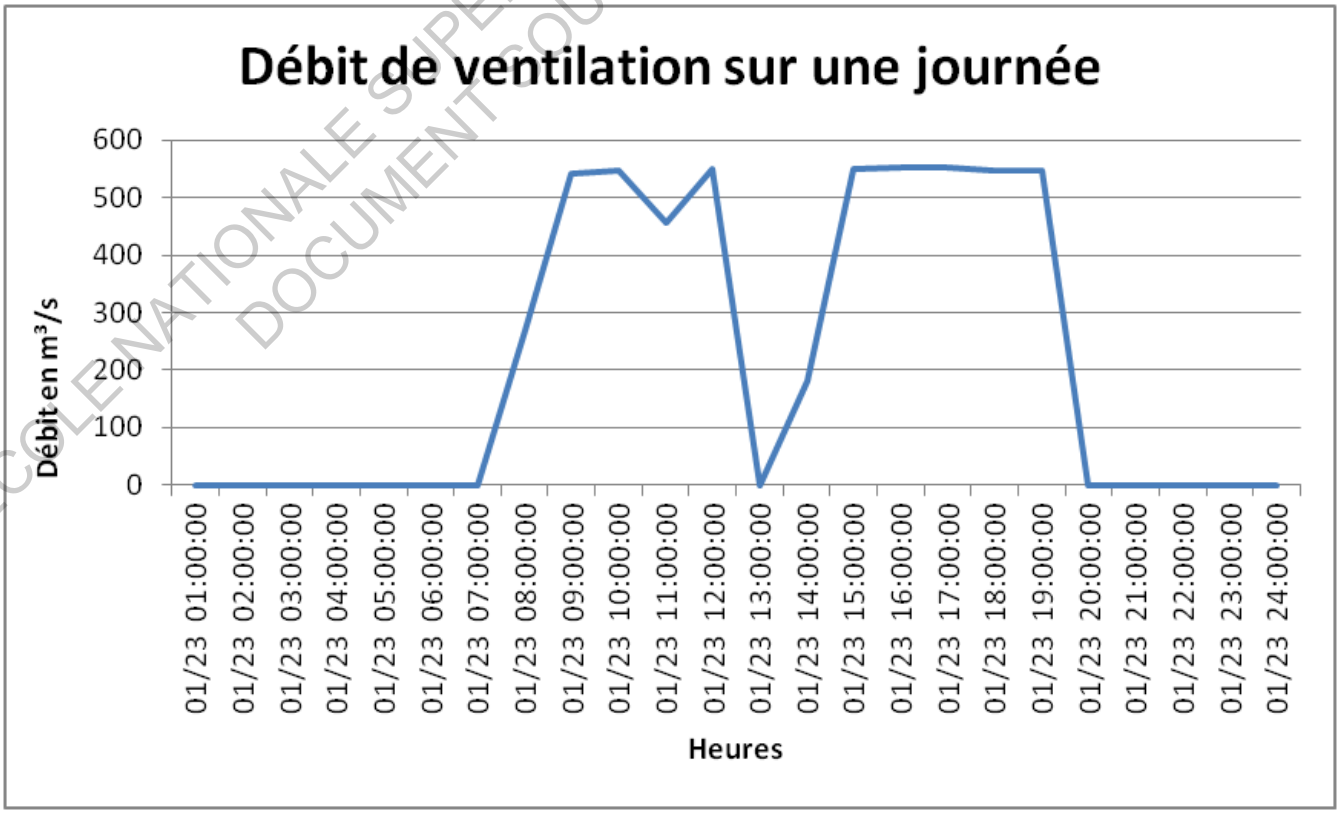


Figure 33 : Courbe du débit sur une journée

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

D’après la note matériau rédigé au sein de RFR éléments, les matériaux en contact avec l’air intérieur seront classés A+ et auront donc des taux d’émissions comme suit :

Bloc 1	**Surface Mur1**	**Surface Mur2**	**Surface Mur3**	**Surface Mur4**	**Surface Sol**	**Surface Plafond**	
Classe élémentaire 6	26.5	26.5	26.5	26.5	60.5	60.5	
Débit d'émission en µg/m²h	5	5	5	5	12.5	12.5	
Emission en µg/h	132.5	132.5	132.5	132.5	756.25	756.25	**Total émission en m³/s**
Emission en m³/s	3.07E-11	3.07E-11	3.07E-11	3.07E-11	1.75E-10	1.75E-10	4.73E-10

Dans un deuxième temps, les émissions du mobilier seront prises en compte. Dans la littérature, on trouve que le mobilier compte pour 40 à 60% des émissions. Nous avons donc multiplié le débit d’émission précédant par deux. Le débit est donc de **9,3E-10 m³/s.**

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

9.2.1. Test sans mobilier

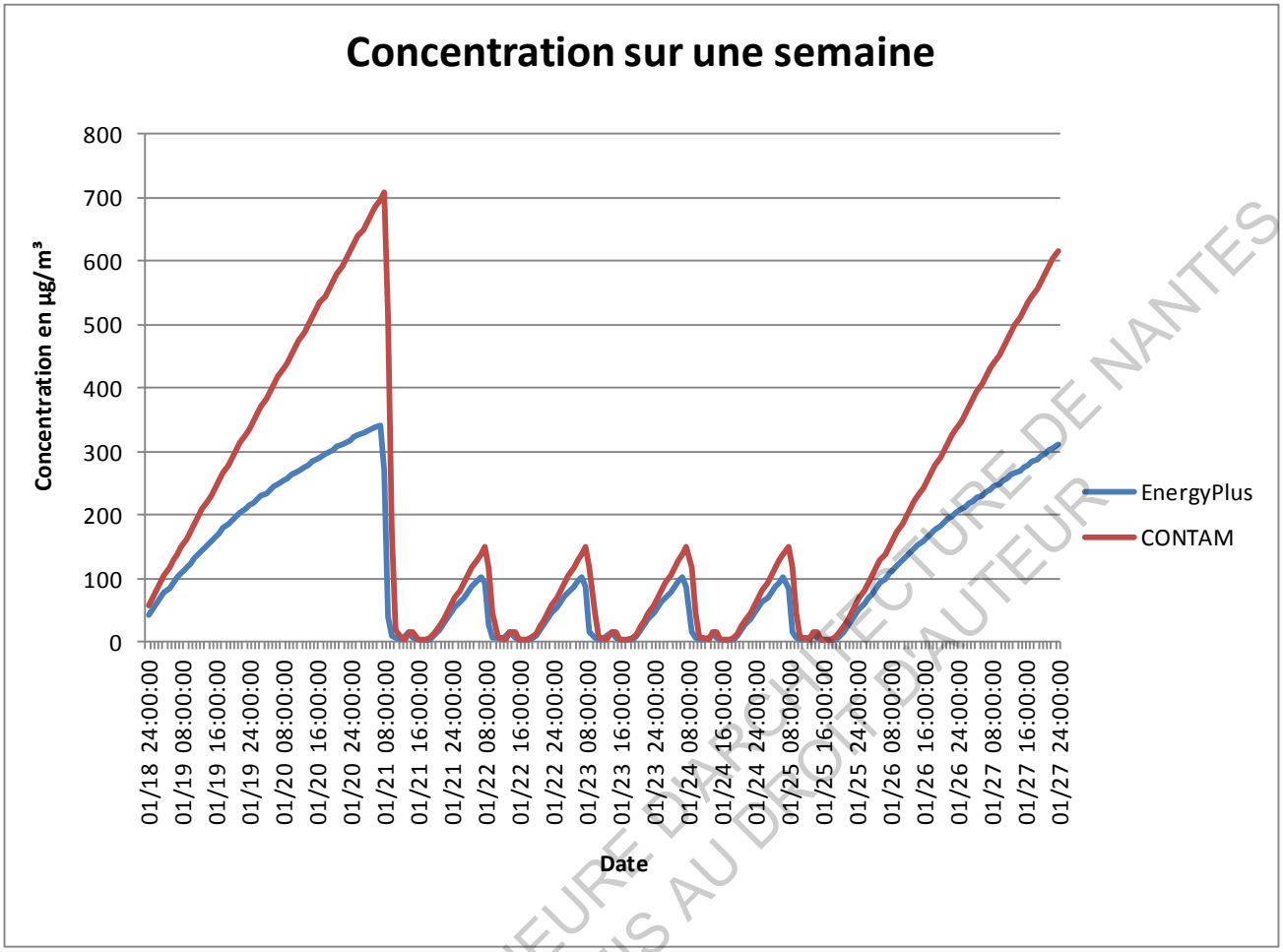


Figure 34 : Courbe de concentration sur une semaine

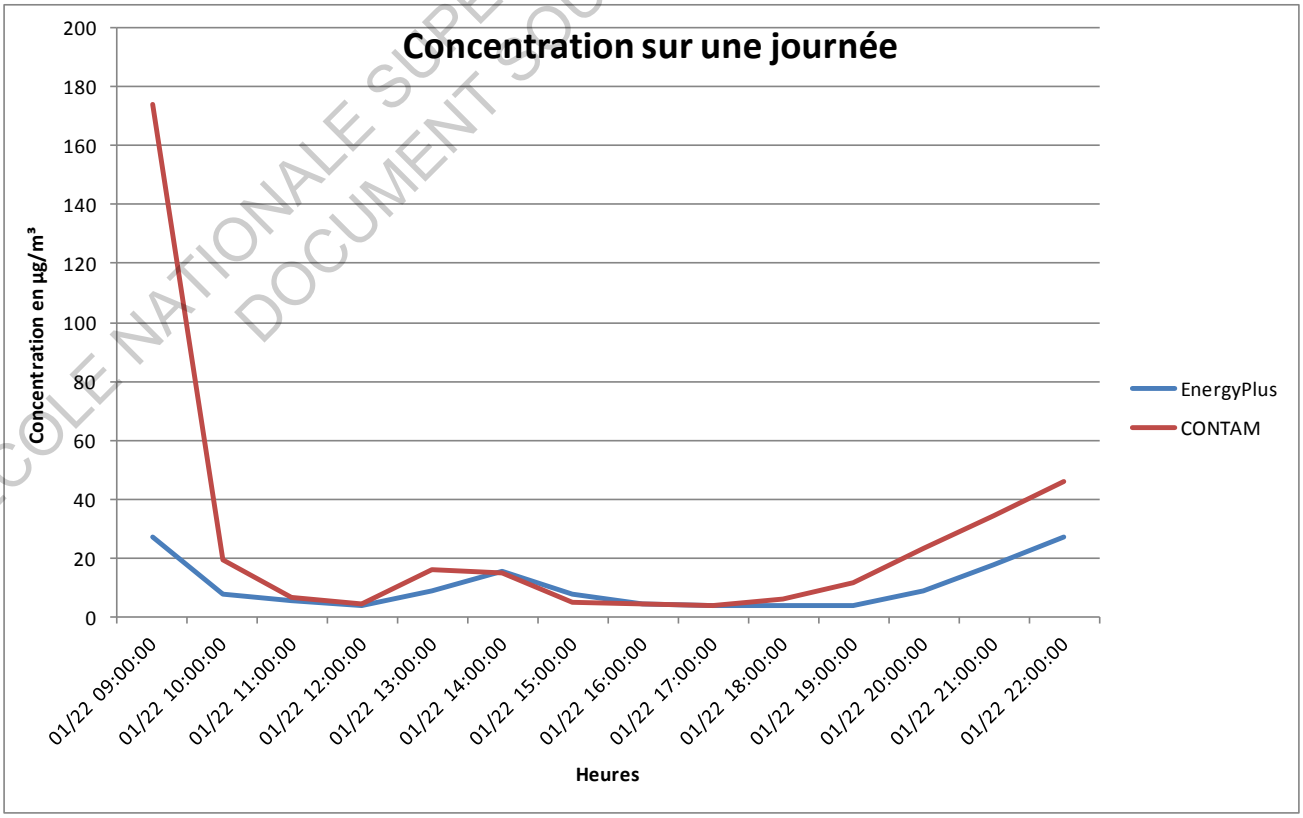


Figure 35 : Courbe de concentration sur une journée

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

La concentration en formaldéhyde évolue de manière périodique, ceci est dû au planning de ventilation mis en place. En effet, durant le week-end (concentration les plus fortes) la ventilation ne fonctionne pas du tout et la concentration évolue de manière linéaire. En revanche, durant la semaine la ventilation se met en route, l'air vicié est évacué et la concentration en formaldéhyde diminue.

Un zoom a été fait sur les valeurs de concentration durant la période d'occupation.

On remarque que les valeurs de concentrations sont relativement faibles comparées aux valeurs pendant les périodes où la ventilation n'est pas mise en route. Les valeurs sont toujours en dessous de 30 µg/m³, qui est la valeur seuil autorisé à partir de 1er janvier 2015. En revanche, cette valeur devrait être abaissée à 10 µg/m³ à partir de janvier 2023 et nous pouvons constater que cette valeur n'est pas atteinte durant toute la durée d'occupation.

Il est important de noter les différences entre les courbes d'EnergyPlus et les courbes de CONTAM.

En effet, durant la période d'occupation et donc où la ventilation est en marche, les résultats sont similaires. On peut quand même noter une petite différence due au fait que le pas de calcul de CONTAM est d'une heure alors que celui d'EnergyPlus est de 10 minutes.

Les différences majoritaires se retrouvent durant les périodes d'inoccupation, la concentration dans le cas d'une simulation faite avec EnergyPlus est deux fois plus faible durant le week-end et également plus faible durant la nuit. Ceci peut-être expliqué par le fait que CONTAM ne prend pas en compte les phénomènes de thermique qui ont lieu au sein du bâtiment. En effet, une différence de température entre deux pièces, ou entre l'intérieur et l'extérieur provoque des mouvements d'air qui induisent des infiltrations d'air. Ainsi, pendant les périodes non ventilées, les mouvements d'air permettent d'évacuer une partie des polluants.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

9.2.2. Test avec mobilier

Le mobilier a ensuite était pris en compte dans la simulation. Pour ce faire, nous nous sommes principalement basés sur une étude réalisée dans les Pays de la Loire sur les sources et les débits d'émissions en formaldéhyde dans une école. Ainsi, cette étude prend à la fois en compte les émissions du mobilier et des matériaux.

Le tableau suivant donne un aperçu des émissions dues au mobilier dans une salle de classe :

Emissions campagne écoles PDLL	Chaise	Etagère	Autres	Emissions totales
Emissions en m^3/s	2.5 E-11	9.5 E-11	2.8 E-10	4.0 E-10

Le débit d'émission total considéré est de 9,1E-10 m^3/s.

Les résultats de la simulation avec EnergyPlus sont les suivants. La figure qui suit présente la comparaison d'une simulation avec mobilier en bleu avec la simulation sans mobilier en rouge précédemment présenté.

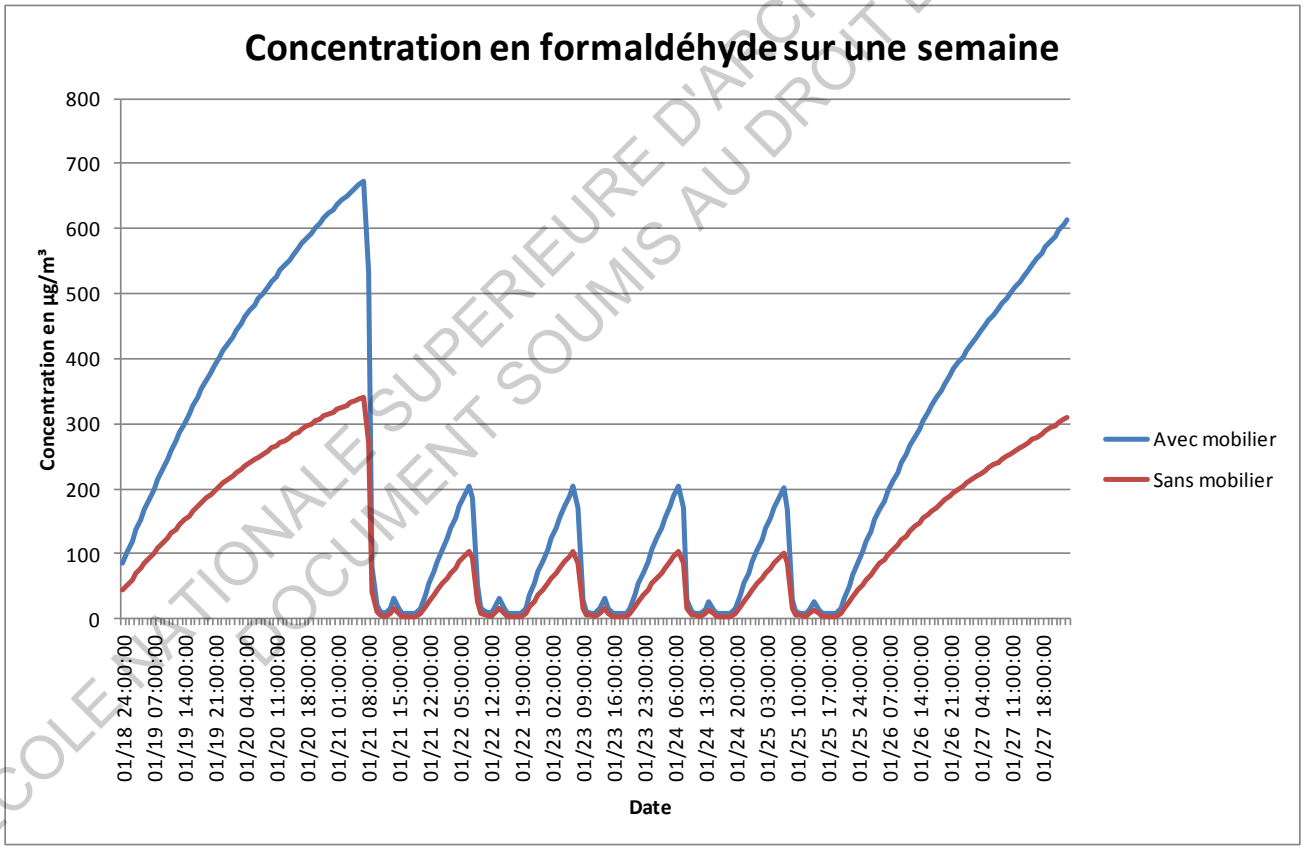


Figure 36 : Courbe de concentration sur une semaine, comparaison avec et sans mobilier

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

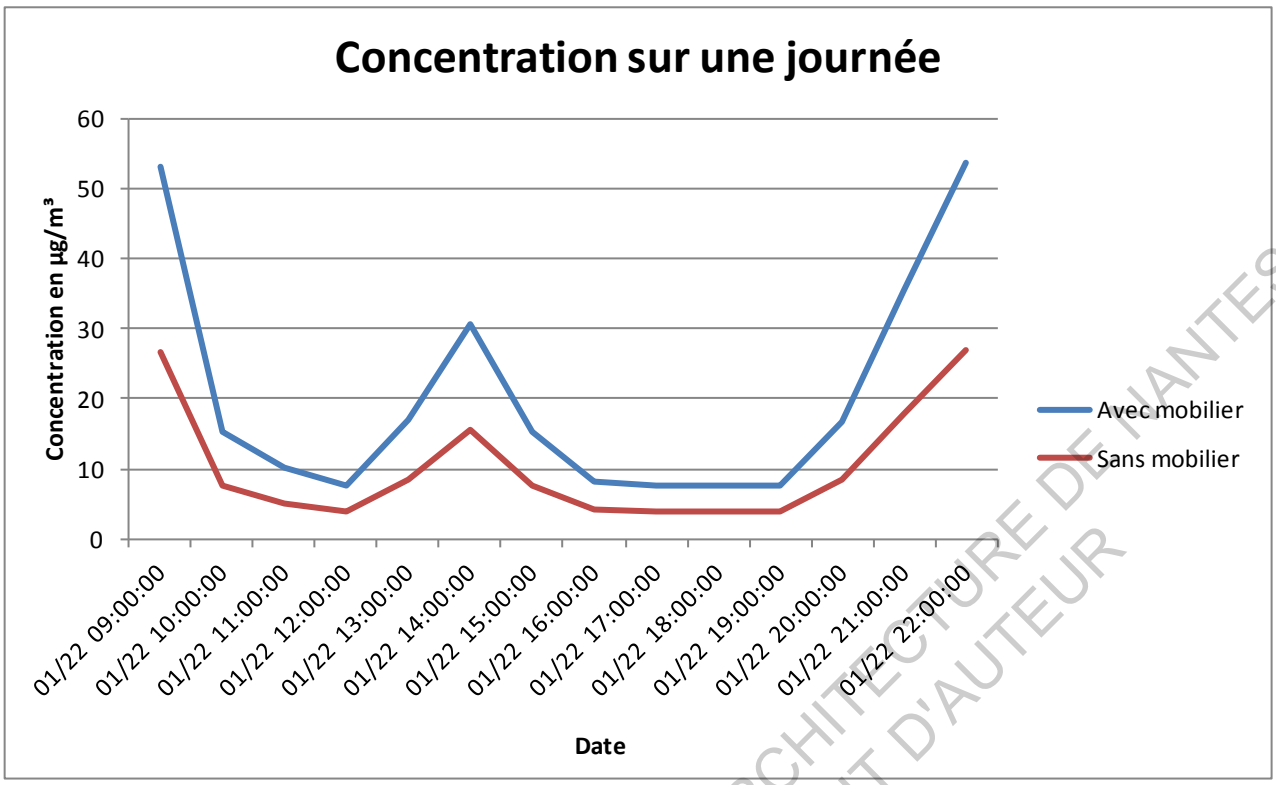


Figure 37 : Concentration sur une journée, comparaison avec et sans mobilier

Les résultats montrent que la concentration en « régime permanent » durant la période d'occupation est supérieure avec le mobilier. Durant l'occupation, la concentration reste en dessous du seuil de 30 µg/m^3. Cependant, le seuil de 10 µg/m^3 à atteindre d'ici 2023 n'est pas respecté durant toute la période d'occupation, en particulier le matin pendant lequel on observe que le formaldéhyde ne s'évacue pas assez rapidement avant la pause déjeuner. De plus, on peut noter que la concentration durant la pause déjeuner remonte assez rapidement et atteint rapidement le seuil des 30 µg/m^3.

9.2.3. Test avec des matériaux non classés A+ mais A, ie : 60 µg/m³

Comme précisé précédemment, il existe une réglementation qui exige que les matériaux de construction soient étiquetés en fonction de leurs émissions. Pour le moment, les simulations ont été faites pour des matériaux classés A+, c'est-à-dire les moins émetteurs car ce sont les matériaux les plus souvent prescrits au sein du bureau d'étude RFR Eléments. Les matériaux classés A peuvent paraître peu émetteurs également, nous les avons donc testés et les résultats sont les suivants :

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

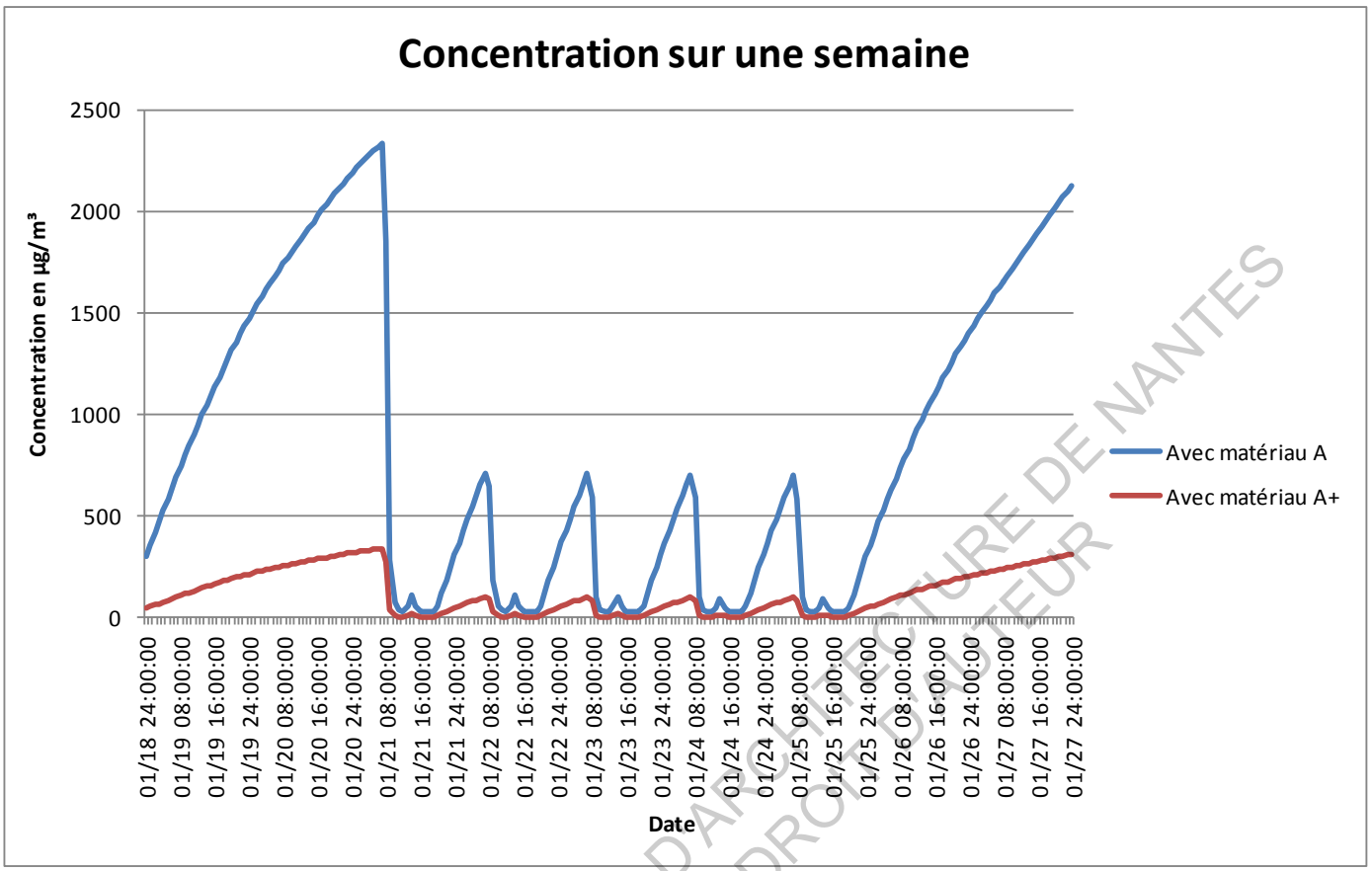


Figure 38 : Concentration avec matériau A sur une semaine

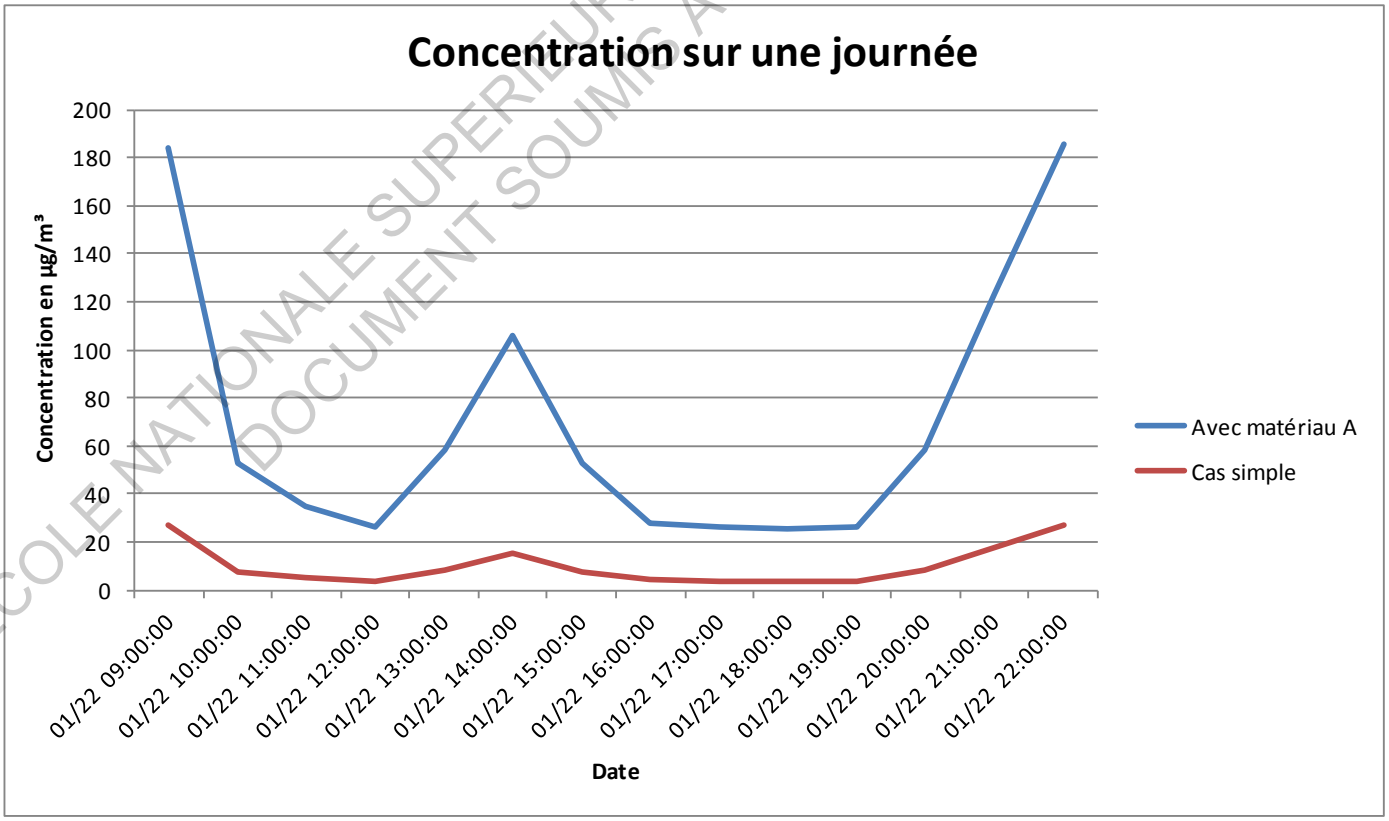


Figure 39 : Concentration avec matériau A sur une journée

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Les résultats montrent que les concentrations sont extrêmement élevées que ce soit durant l'occupation ou hors occupation. La concentration de 2500 µg/m^3 durant les week-ends est réellement alarmante pour la santé des occupants. De plus, durant l'occupation, la concentration ne descend jamais en dessous du seuil des 30 µg/m^3 au 1er janvier 2015. Ceci est d'autant plus alarmant que ce résultat est très éloigné du seuil de 10 µg/m^3 visé à horizon 2023.

Les résultats montrent donc qu'il est vraiment primordial de préconiser des matériaux classés A+ afin de limiter les émissions intérieurs, faute de quoi les concentrations peuvent mettre en danger la santé des occupants.

9.2.4. Avec débit augmenté à 25 m³/h/personne

Les débits réglementaires pour les élèves sont imposés dans le RSDT à 18 m^3/h/ élève, ce débit a été établi afin de respecter un seuil de 1300ppm de CO_2 en occupation. Souvent, il est demandé que ce débit soit augmenté à 25 m^3/h/élève afin de respecter le seuil de 1000 ppm de CO_2.
La valeur de ce débit est uniquement basée sur la teneur en CO2 de l'air, nous avons donc voulu connaître l'impact de l'augmentation des débits à 25 m^3/h/élève sur la concentration en formaldéhyde.

Les mêmes hypothèses que pour le « cas simple » ont été prises, mis à part que le débit a été augmenté à 25 m^3/h/ élève. Le débit total en occupation est donc de 725 m^3/h.

Les résultats obtenus sur une journée en occupation sont les suivants :

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

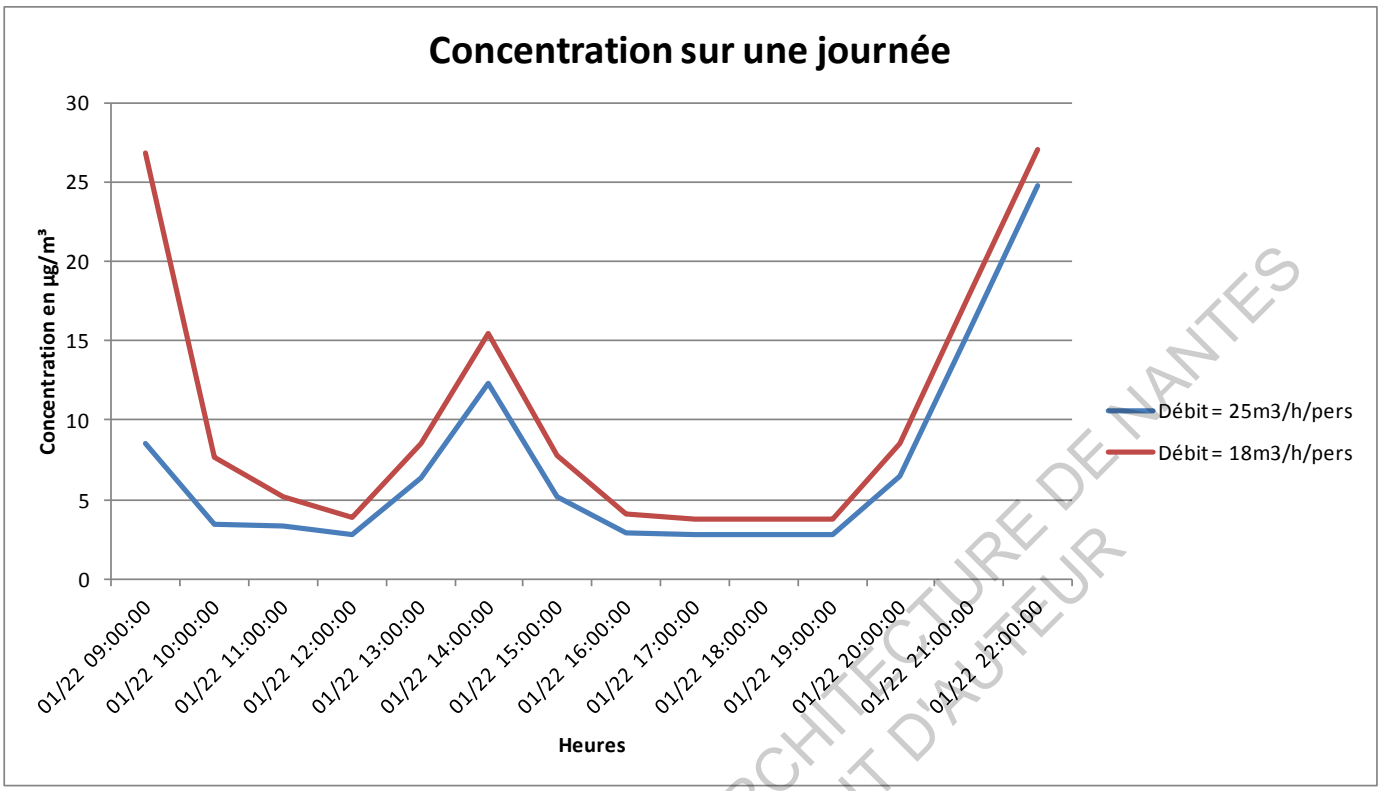


Figure 40 : Concentration avec débit augmenté sur une journée

Comme attendu, les résultats montrent que la concentration est plus faible lorsque le débit est plus élevé, la concentration en régime permanent est d'environ 2.5 µg/m^3, ce qui est largement en dessous du seuil de 10 µg/m^3. Ce qu'il est important de noter, est le fait que la concentration atteint le régime permanent assez rapidement dans la matinée et donc les occupants ne sont jamais surexposés, même au début de l'occupation.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

9.3. Le cas d'un bureau

Pour le moment tous les cas étudiés représentent des cas de salle de classe. La densité d'élève au m² dans une salle de classe est beaucoup plus élevée que la densité dans un local de bureau, il est donc intéressant de simuler la concentration en formaldéhyde dans un bureau. Comme précisé dans la partie réglementation, le débit de ventilation défini dans le code du travail est de 25m³/h/personne. Ce débit est plus élevé que pour un élève.

La densité est d'environ 1pers/10m², dans une pièce de 60m² il y a 28 élèves et un professeur alors que dans un bureau il y a uniquement 6 salariés. Le débit total est de 150m³/h.

Hypothèses :

On considère une pièce de 60.5m² dans laquelle se trouvent 6 employés et du mobilier. On considère un débit égale à 25m³/h/personne.

Le planning d'occupation est le suivant :

Heures	Ratio appliqué
0h-7h30	0
7h30-8h45	0.5
8h45 – 12h	1
12h-13h45	0
13h45 -18h	1
18h - 19h	0.5
19h – 24h	0

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Les débits de ventilation sur une semaine et sur une journée sont les suivants :

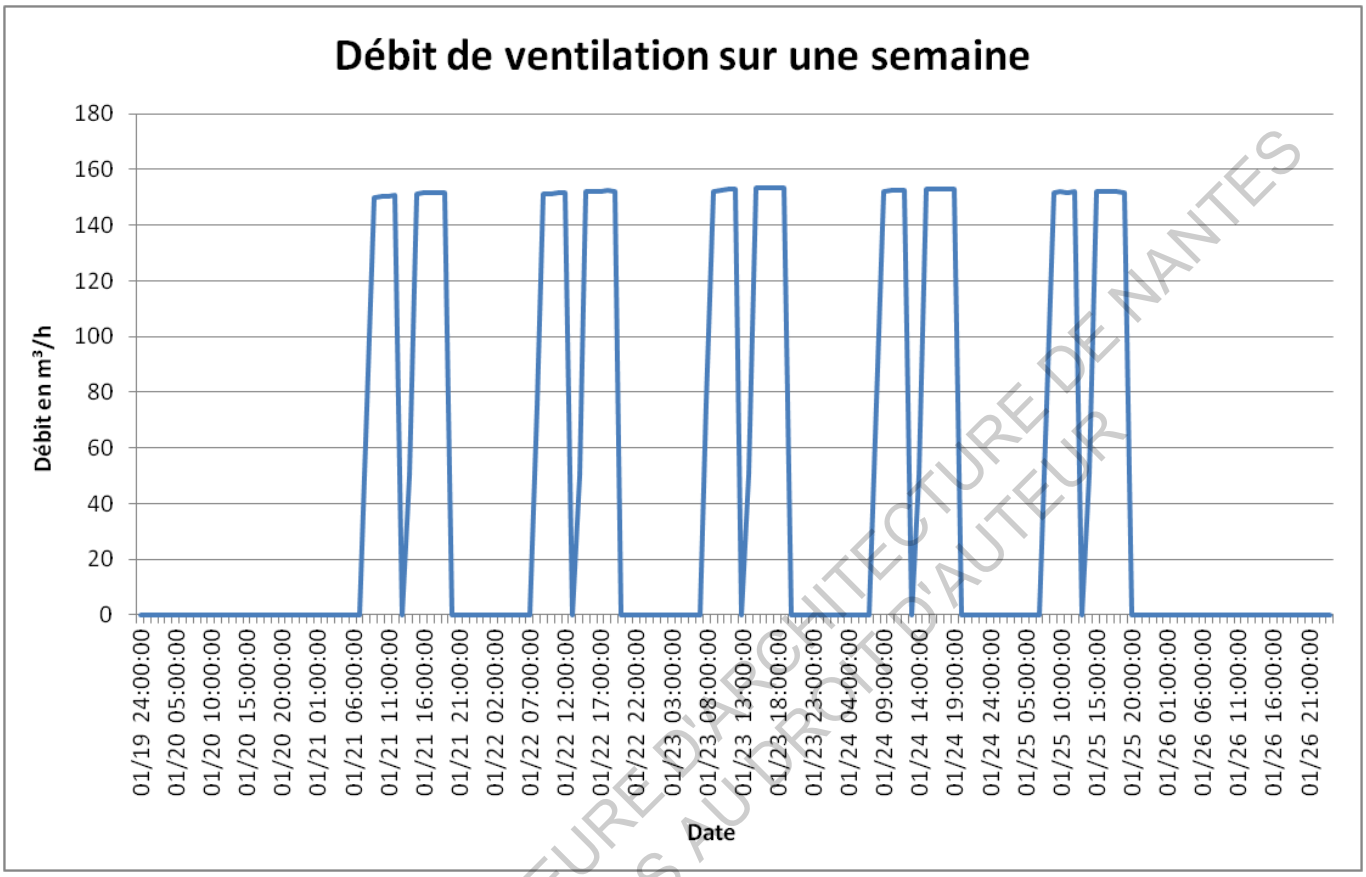


Figure 41 : Débit de ventilation sur une semaine

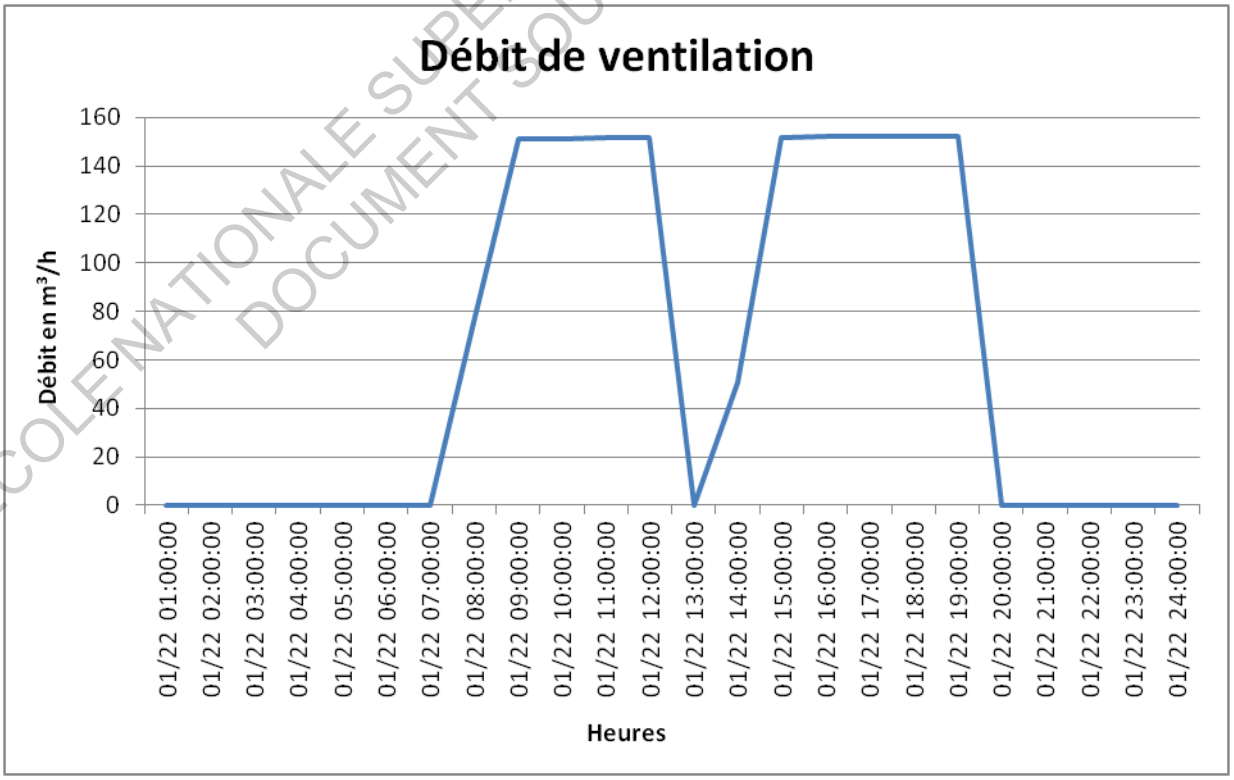


Figure 42 : Débit de ventilation sur une journée

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Les matériaux sont considérés classés A+ et le mobilier a été compté. Les émissions totales sont donc de 9.0 m^3/s.

Les résultats sur une semaine sont les suivants :

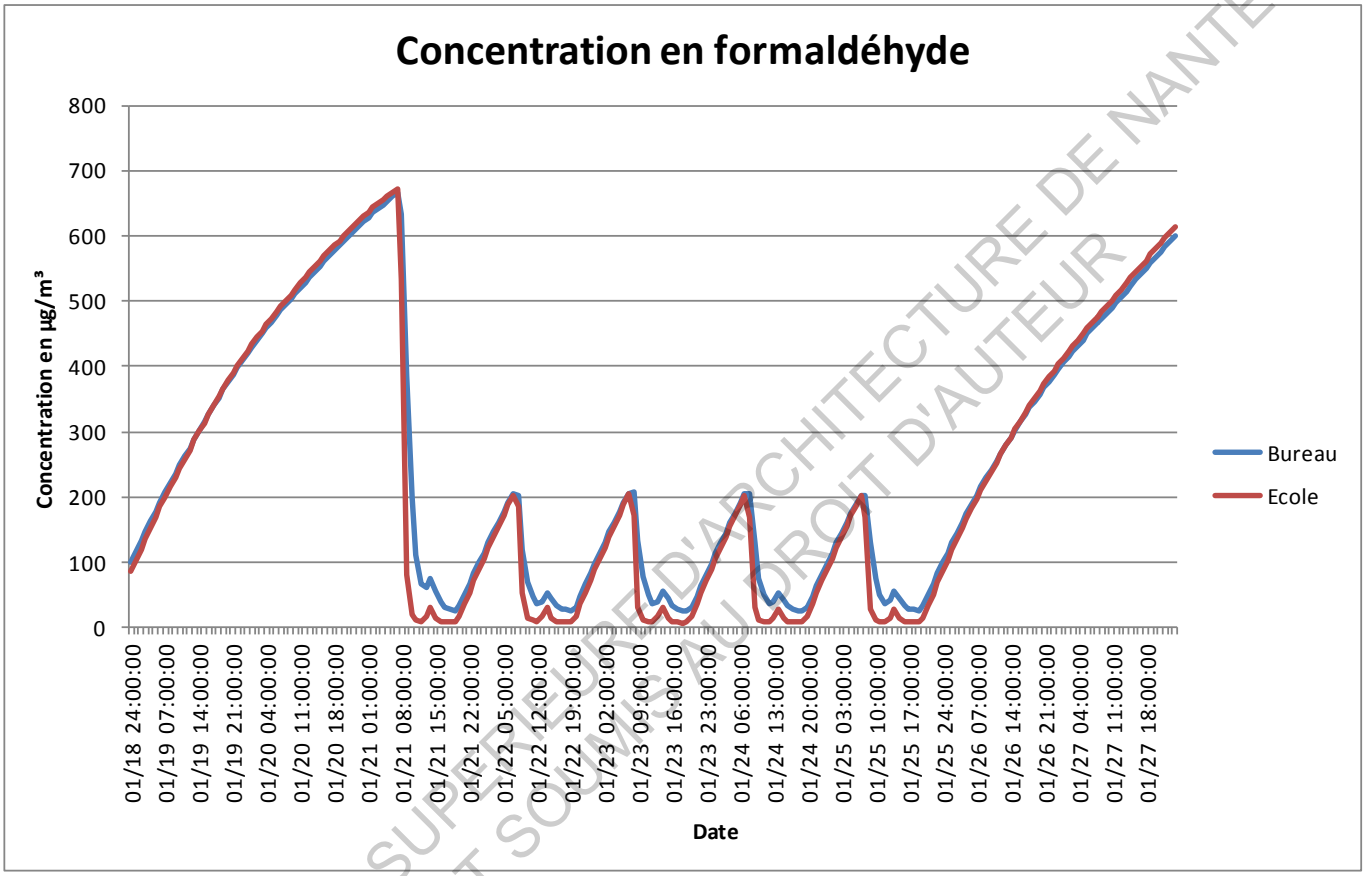


Figure 43 : Comparaison de la concentration en formaldéhyde dans un bureau et une salle de classe sur une semaine

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Nous avons ensuite étudié de plus près les résultats sur une journée :

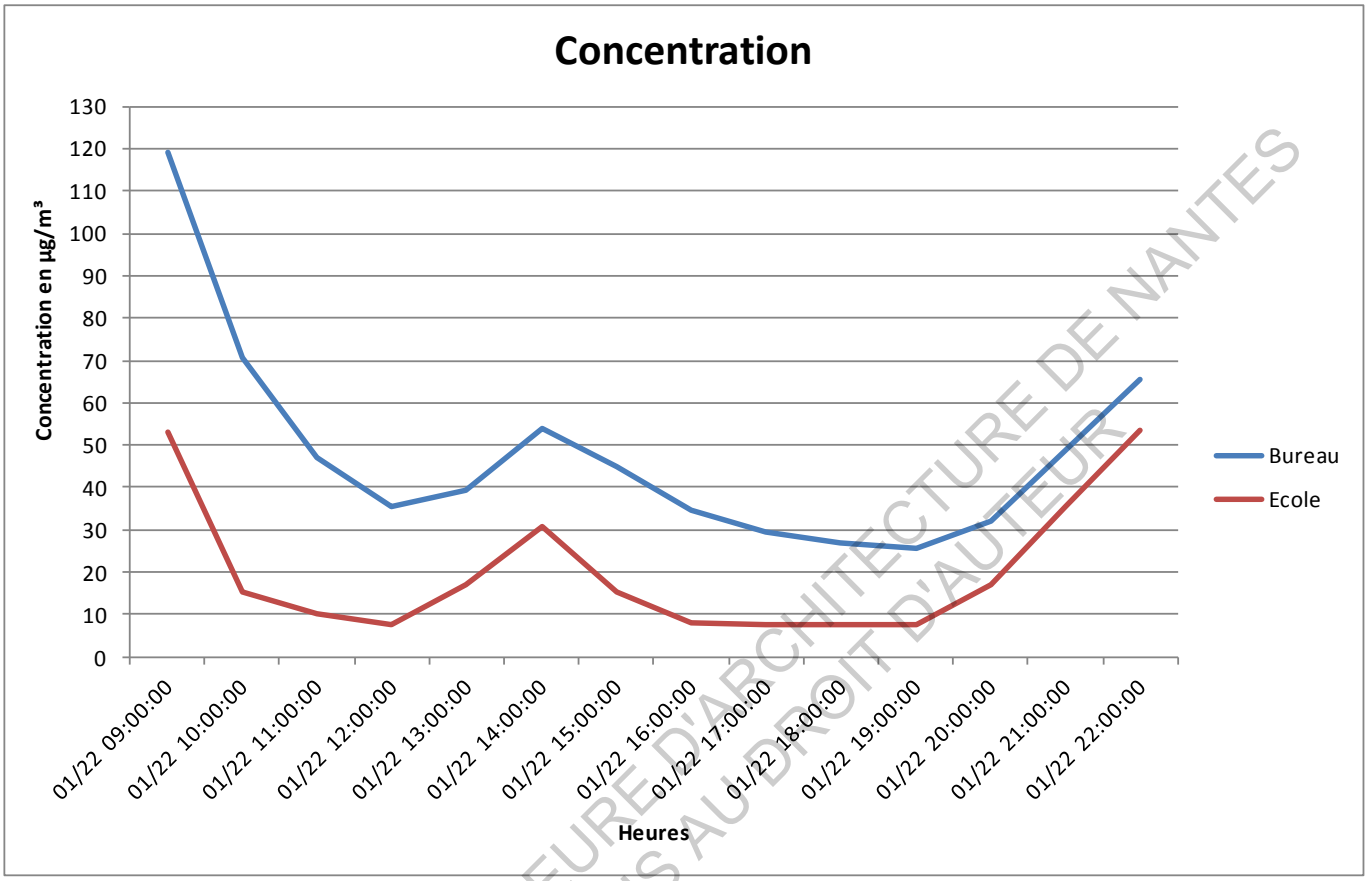


Figure 44 : Comparaison de la concentration en formaldéhyde dans un bureau et une salle de classe sur une journée

Le débit total mis en œuvre étant plus faible que pour une école, on remarque que la concentration est plus élevée dans le cas d'un bureau. Cette concentration ne respecte quasiment jamais l'exigence des 30 µg/m^3. De plus, on note que le régime permanent n'est jamais atteint le matin et durant un très court moment l'après-midi.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

La courbe suivante présente les résultats d'une journée juste après le week-end :

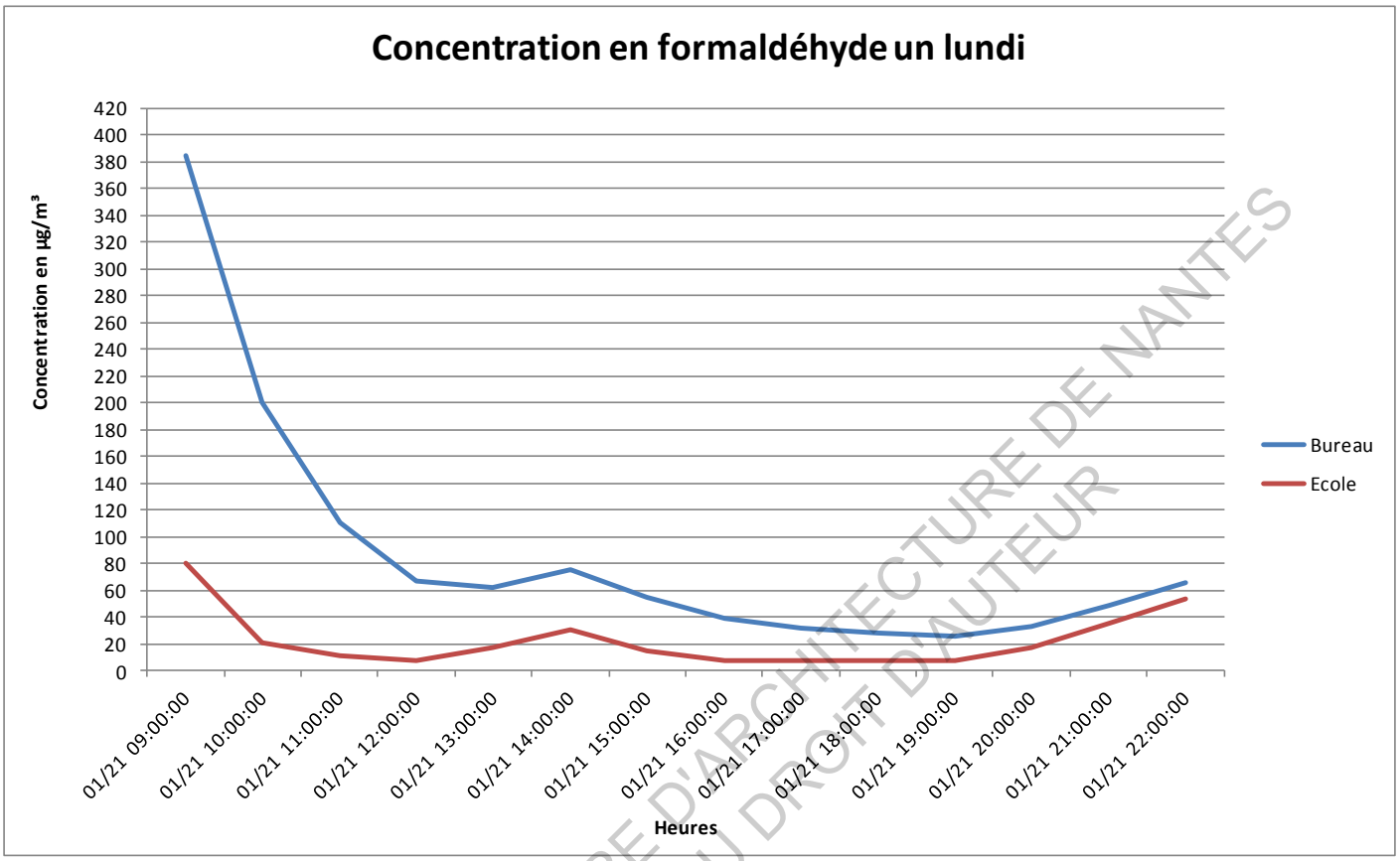


Figure 45 : Comparaison de la concentration en formaldéhyde dans un bureau et une salle de classe sur une journée après le week-end

On peut voir sur cette courbe, que les concentrations sont très élevées le lundi matin pendant l'occupation. Elles atteignent presque 400 µg/m^3.

Ce résultat prouve l'utilité d'une ventilation avant occupation, voire même de laisser la ventilation en route durant la pause déjeuner.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

9.4. Conclusions des simulations

Les simulations ont montré un certain nombre de choses.

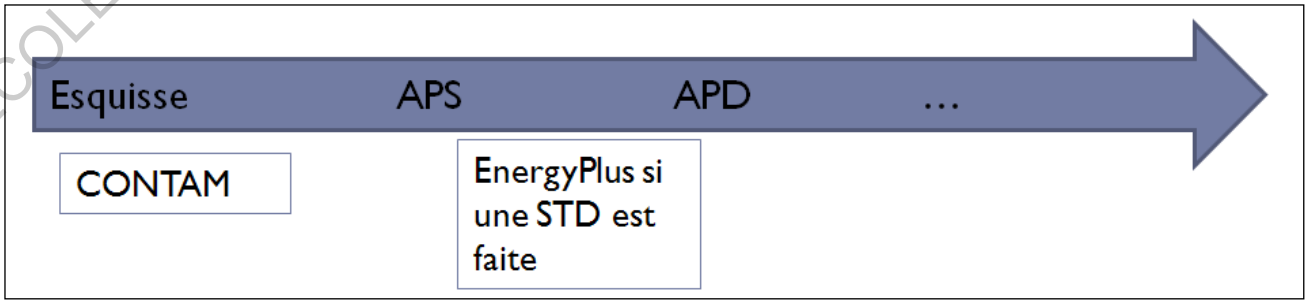
Tout d'abord, il est important de noter que les résultats obtenus en occupation semblent concorder avec les mesures faites dans la réalité. Cette première conclusion est très encourageante pour la suite, cela prouve que les outils sélectionnés ont été correctement choisis et peuvent se rapprocher de situation réelle.

On constate que les deux outils choisis montrent des résultats différents. Ceci s'explique par le fait qu'EnergyPlus prend en compte les équations de thermique du bâtiment qui permettent de modéliser au plus juste les mouvements d'air et donc les débits. Comme la ventilation joue un rôle extrêmement important dans l'évacuation des polluants d'une pièce, il est primordial de la modéliser avec la plus grande justesse. Il serait donc plus naturel d'utiliser l'outil EnergyPlus pour les futures études de la qualité de l'air intérieur.

Cependant, la modélisation sous EnergyPlus demande beaucoup plus de temps qu'une modélisation sous CONTAM. Il faut donc garder les deux outils et choisir l'un ou l'autre selon les phases du projet.

CONTAM permet une étude assez rapide en phases amont de projet. De plus, dans toutes les études de cas réalisées, nous avons remarqué que les résultats sous CONTAM étaient toujours très conservatifs. Ceci implique que si une première étude est faite sous CONTAM, les résultats seront toujours meilleurs en termes de qualité de l'air avec EnergyPlus.

CONTAM pourrait donc être utilisé durant la phase concours ou esquisse, puis si une STD est faite , il serait bénéfique d'envisager l'utilisation d'EnergyPlus durant les phases APS (Avant-projet sommaire) et APD (Avant-projet définitif).



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

De plus, il semblerait que la prochaine version de DesignBuilder (interface graphique du moteur de calcul EnergyPlus) intègre directement les paramètres des émissions de polluants. Du fait, il ne sera plus nécessaire de rentrer dans le moteur de calcul EnergyPlus (qui pourrait en dissuader certains…)

Les résultats des simulations nous amènent également à des préconisations à faire par les bureaux d'étude afin d'assurer la meilleure qualité de l'air possible. Il est important que les matériaux préconisés soient classés A+ en termes d'émissions, même si le classement A peut paraître correcte, en réalité les simulations montrent que les concentrations sont extrêmement élevées, en particulier durant les périodes de non ventilation.
De plus, dans l'exemple présenté, il est vivement conseillé de commencer à ventiler un bâtiment au moins une heure ou deux heures avant l'occupation afin d'évacuer un maximum de polluants pour limiter l'exposition des occupants. L'arrêt de la ventilation mécanique durant la pause déjeuner peut également être remis en cause. En effet, on voit que durant les 2h de la pause déjeuner la concentration en polluant montre une augmentation non négligeable.
Ces règles peuvent être respectées aussi bien dans les écoles que dans les autres bâtiments (à titre préventif).
En effet, nous avons vu dans la simulation d'un cas de bureau, que la concentration est plus élevée car le débit de ventilation est plus faible. Il est donc important de respecter ces règles également dans le cas d'autres bâtiments.

Aujourd'hui, la réglementation sur la surveillance de la qualité de l'air n'est appliquée que pour les écoles, on peut se demander si ceci a été décidé pour limiter l'exposition des plus sensibles ou si la raison est la crainte de mauvais résultats. Des mauvais résultats pourraient remettre en cause les progrès en matière d'économie d'énergie faits ces dernières années.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

10. PERSPECTIVES

Les résultats sont cohérents avec les résultats des mesures qui ont été faites durant les différentes campagnes.
Les outils utilisés pour modéliser la qualité de l'air intérieur semblent donc correspondre aux attentes du bureau d'étude.

Aujourd'hui, le travail sur la prédiction de la qualité de l'air n'est pas terminé. En effet, pour le moment, le mode d'émission utilisé est de type émissions constantes, or dans la réalité ce n'est sûrement pas le cas. Un certain nombre de paramètre tels que la température et l'humidité relative semblent avoir un impact même si aujourd'hui aucune loi n'existe.

De même, une autre question se pose, on sait que les émissions ne sont pas constantes au cours du temps, mais on ne sait pas comment. En effet, aucune loi n'a été trouvée pour décrire ce phénomène ?

Des réponses à ces questions pourront être trouvées lorsque plus de retours d'expérience seront disponibles. Il faudrait réaliser des tests sur un bâtiment sur plusieurs années, en occupation et hors occupation, etc…
Aujourd'hui, les données disponibles dans la presse scientifique sont souvent des données qui correspondent à des tests en chambres d'essai et non pas dans des conditions réelles.

Le sujet de la qualité de l'air intérieur ouvre un autre sujet de discussion : le dilemme entre les économies d'énergie et une bonne qualité de l'air intérieur. Aujourd'hui, les débits de ventilation sont souvent abaissés au minimum réglementaire pour limiter les déperditions. De même, les bâtiments sont de plus en plus étanches pour limiter les pertes. Ceci empêche l'évacuation des polluants intérieurs. Comme nous l'avons vu dans les courbes de simulation, certaines concentrations en formaldéhyde peuvent être réellement alarmantes pour la santé des occupants.
Il est donc primordial de limiter les sources de polluant intérieurs pour traiter cette problématique en amont. Aujourd'hui la réglementation mise en place en termes d'émission n'est peut-être pas assez stricte, car on remarque que les émissions avec les matériaux A+ sont les seules qui permettent de respecter la nouvelle réglementation en vigueur.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

11. ANNEXES

11.1. Annexes 1 : Les résultats de la campagne de mesures sur les logements

- COV

	Lieu	% de données pondérées inférieures à la limite de détection	Médiane [2] (µg/m³)	95ème percentile [3] (µg/m³)	% ratios C_{int}/C_{ext} [4] ≥ 1
Acétaldéhyde	intérieur	0,0	**11,6** [10,8-12,3]	30,0 [26,7-35,1]	99,6
	extérieur	1,1	**1,3** [1,2-1,3]	3,0 [2,6-3,1]	
Acroléine	intérieur	0,6	**1,1** [1,0-1,2]	3,4 [2,9-3,8]	98,1
	extérieur	18,1	< **LQ** (=0,3)	0,5 [0,4-0,6]	
Formaldéhyde	intérieur	0,0	**19,6** [18,4-21,0]	46,6 [40,8-55,1]	100,0
	extérieur	0,5	**1,9** [1,8-2,0]	3,6 [3,4-4,2]	
Hexaldéhyde	intérieur	0,0	**13,6** [12,6-14,7]	50,1 [37,6-55,4]	100,0
	extérieur	18,6	**0,5** [0,4-0,5]	1,4 [1,1-1,7]	
Benzène	intérieur	1,4	**2,1** [1,9-2,2]	7,2 [6,3-9,4]	90,9
	extérieur	6,5	< **LQ** (=1,1)	2,9 [2,5-3,4]	
	garage	0,8	**4,4** [3,5-6,4]	18,6 [12,6-21,6]	
1,4-dichlorobenzène	intérieur	1,9	**4,2** [3,7-4,8]	150,0 [96,5-341,0]	95,6
	extérieur	5,7	**1,8** [1,6-1,9]	4,3 [3,5-5,5]	
	garage	6,9	**2,2** [1,8-2,5]	18,1 [8,0-40,0]	
Ethylbenzène	intérieur	0,3	**2,3** [2,1-2,5]	15,0 [9,2-18,2]	95,5
	extérieur	6,2	**1,0** [1,0-1,1]	2,6 [2,3-3,0]	
	garage	1,2	**18,0** [13,9-26,4]	137,0 [109,0-155,0]	
n-Décane	intérieur	0,7	**5,3** [4,8-6,2]	53,0 [38,6-83,9]	94,4
	extérieur	4,1	**1,9** [1,8-2,1]	6,4 [5,3-9,8]	
	garage	0,0	**10,8** [7,3-14,0]	213,0 [88,3-257,0]	
n-Undécane	intérieur	0,6	**6,2** [5,6-7,1]	72,4 [45,2-93,2]	94,1
	extérieur	12,5	**1,8** [1,6-2,0]	7,0 [5,5-9,5]	
	garage	1,0	**8,6** [5,6-11,0]	106,0 [65,7-115,0]	
Styrène	intérieur	1,9	**1,0** [0,9-,10]	2,7 [2,2-3,1]	95,2
	extérieur	8,6	**0,4** [0,3-0,4]	0,7 [0,7-0,8]	
	garage	2,8	**1,2** [0,9-1,6]	9,3 [4,6-11,4]	
Tétrachloroéthylène	intérieur	15,7	**1,4** [1,2-1,6]	7,3 [6,0-11,5]	77,1
	extérieur	21,4	< **LQ** (=1,2)	3,9 [2,7-4,3]	
	garage	41,0	< **LQ** (=1,2)	2,5 [1,5-4,9]	
Toluène	intérieur	0,0	**12,2** [11,4-13,7]	82,9 [57,7-115,0]	96,2
	extérieur	0,5	**3,5** [3,3-3,8]	12,9 [10,8-14,8]	
	garage	0,0	**110,4** [67,6-157,0]	677,0 [426,0-789,0]	

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

- **Monoxyde de carbone**

	Lieu	Médiane [5] (ppm)	95ème percentile [6] (ppm)
moyenne glissante sur 15 minutes	Pièces principales	**2,9** [1,9-2,9]	15,3 [12,4-22,0]
	Autres pièces	**6,0** [4,8-7,0]	37,2 [22,3-54,4]
	Annexes	**3,8** [1,7-5,3]	53,1 [28,2-94,4]
moyenne glissante sur 30 minutes	Pièces principales	**2,7** [2,1-3,0]	14,3 [11,4-19,1]
	Autres pièces	**4,9** [3,9-5,9]	27,4 [18,3-49,2]
	Annexes	**3,3** [1,5-4,9]	36,2 [21,7-78,0]
[moyenne glissante sur 1 heure	Pièces principales	**2,0** [1,6-15,2]	13,1 [9,5-15,2]
	Autres pièces	**3,9** [3,0-4,7]	21,1 [14,4-36,3]
	Annexes	**3,0** [0,9-3,8]	30,2 [18,0-67,4]
moyenne glissante sur 8 heures	Pièces principales	**0,5** [0,4-0,9]	6,3 [4,8-8,1]
	Autres pièces	**1,3** [0,9-1,9]	9,5 [5,0-19,2]
	Annexes	**0,7** [0,1-1,3]	10,5 [5,2-13,9]

Composés biologiques :

	Limite de quantification (LQ)	Lieu	% données pondérées < LQ	Médiane [8]	95ème percentile [9]
allergènes de chats Fel d 1	0,18 ng/m^3	séjour	74,6	**< LQ**	2,7 ng/m^3 [1,3-5,8]
allergènes de chiens Can f 1	1,02 ng/m^3	séjour	90,7	**< LQ**	1,6 ng/m^3 [1,1-2,5]
allergènes d'acariens Der f 1	0,01 µg/g	matelas	3,1	**2,2 µg/g** [1,3-3,7]	83,6 µg/g [46,4-103,0]
allergènes d'acariens Der p 1	0,02 µg/g	matelas	7,9	**1,6 µg/g** [1,2-2,1]	36,2 µg/g [23,1-41,5]

Paramètres physique :

	Unité	Lieu	Médiane [8]	95ème percentile [9]
PM_{10}	µg/m^3	Séjour	**31,3** [28,2-34,4]	182,0 [119,0-214,0]
$PM_{2,5}$	µg/m^3	Séjour	**19,1** [17,2-20,7]	132,0 [88,3-174,0]
Radon	Bq/m^3	Pièces de sommeil	**31,0** (avec et sans correction des variations saisonnières)	220 avec correction des variations saisonnières (225 sans correction)
		Autres pièces	**33,0** (avec et sans correction des variations saisonnières)	194 avec correction des variations saisonnières (214 sans correction)
Gamma	µSv/h	Séjour	**0,062** [0,058-0,064]	0,122 [0,109-0,125]

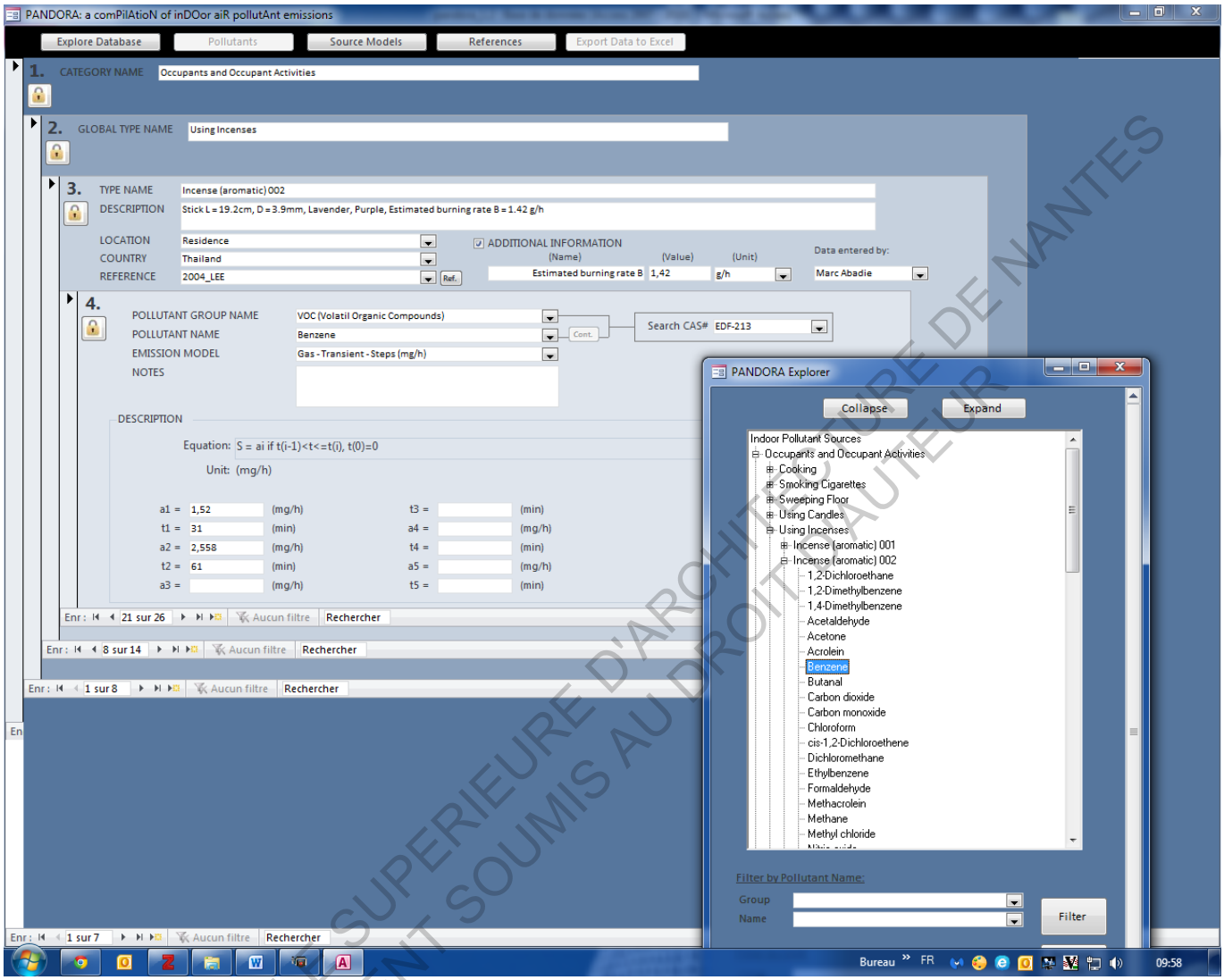
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Paramètres de confort :

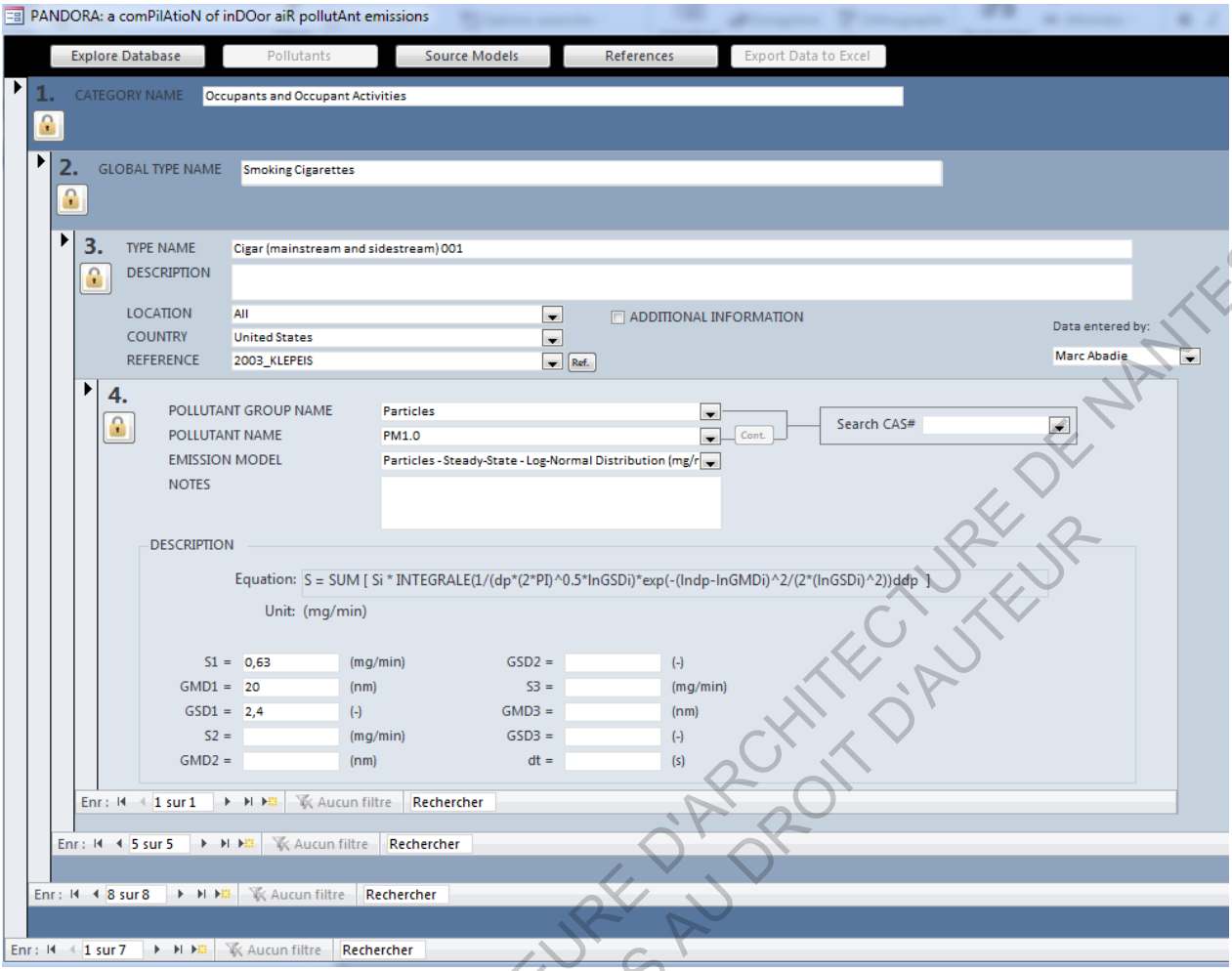
	Unité	Lieu	Médiane [8]	95ème percentile [9]
CO_2	ppm	Moyenne sur la semaine	**756** [715-794]	1 484 [1 353-1 621]
		Max des moyennes glissantes sur 1h	**1 689** [1 556-1 815]	4 449 [4 071-5 166]
		Moyenne des 60 plus fortes valeurs comprises entre 2h et 5h10	**1 161** [1 069-1 238]	3 175 [2 800-3 470]
Température	°C	Pièces de sommeil	**21,1**	25,5
		Autres pièces	**21,0**	24,8
Humidité relative	%	Pièces de sommeil	**48,7**	63,1
		Autres pièces	**49,5**	64,7

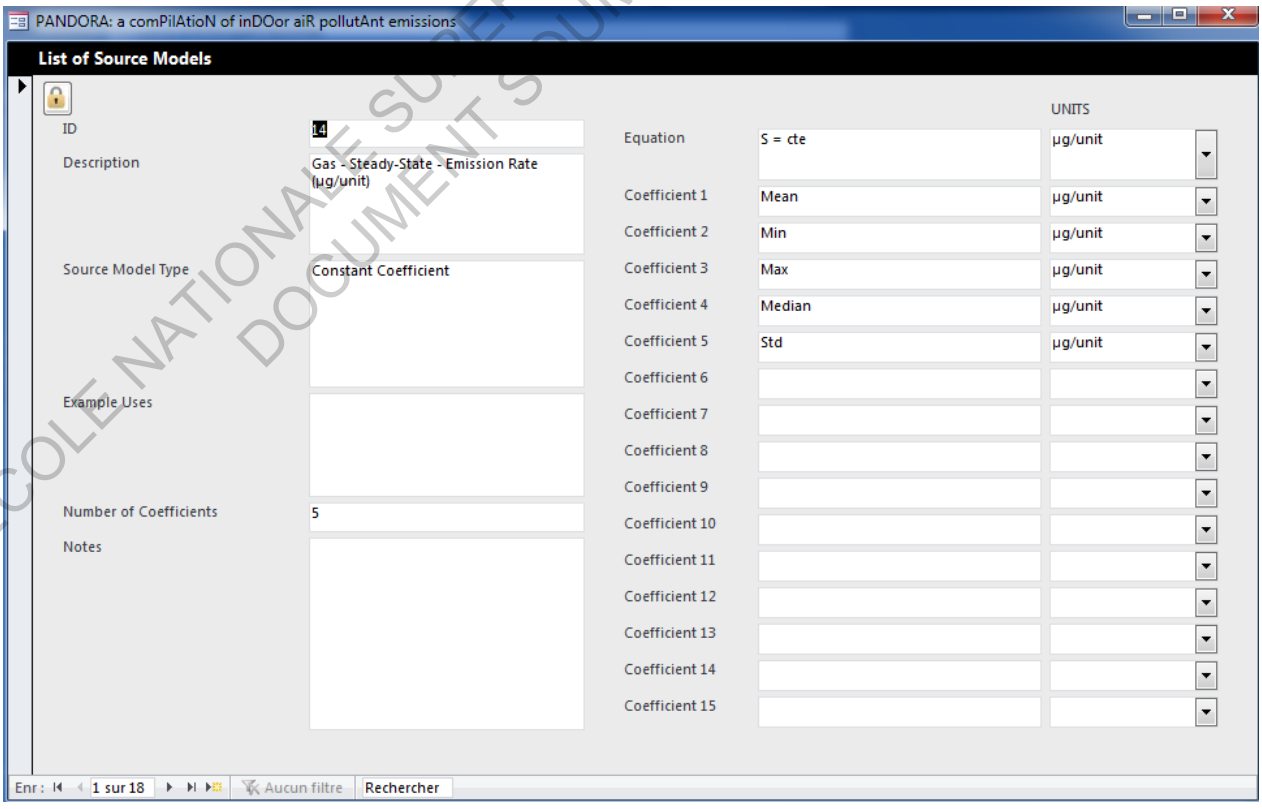
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

11.2. Annexes 2 – La base de donnée pandore



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR





ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

11.3. Annexe 3 – La base de donnée du CNRC

Liste des matériaux testés

Category	Phase I Materials (49)*	Phase II Materials (20)*
Solid and Engineered Wood Materials	• Oriented Strand Board (3) • Particleboard (3) • Plywood (3) • Solid Wood (Oak, Pine, Maple)	• Medium Density Fiberboard (MDF) • Oriented Strand Board (9 for variability tests and long-term tests)
Installation Materials	• Adhesives (3) • Caulking/Sealants (3)	
Flooring	• Carpet (6)** • Vinyl Flooring (2 Tile; 1 Sheet)** • Underpad (2)**	• Carpet & Carpet/Adhesive/Concrete • Laminate (Lam1), Laminate/Underlay (Lam2) & Laminate/Underlay/OSB (Lam3) • Linoleum (Lin1) & Linoleum/Adhesive/ Plywood (Lin2)
Walls	• Gypsum Panels (3)	• Vinyl-Faced Wall Panel (VWB)
Ceilings	• Acoustical Ceiling Tile (3)**	
Interior Finishing	• Floor Wax (2 oil; 1 water) • Polyurethane (3 oil) • Paint (2 water, 1 oil) • Woodstain (4 oil. 1 rep)	
Furnishings		• Countertop (2: upper laminate surface only, all surfaces)

Résultats de la base de données

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Group	VOC #	Solid & Engineered Wood Materials							Flooring								Installation Materials				% (Detection)
		OSB		Plywood		Solid wood		MDF	Carpet/ Assembly		Underpad		Laminate/ Assembly		Linoleum/ Vinyl Flooring		Adhesive		Caulking		
		Min	Max	Min	Max	Min	Max		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Aldehydes	1	41.8	265.5					89.9	1.67	20.85			3.68	11.49	2.0	28.5					46
	2																				0
	3	0.1	2.6			0.2	0.2	0.2	0.08	1.41	0.21	1.42	0.01	0.09	0.90	1.55			6057	6057	60
	4	2.7	59.8	2.1	6.0	0.3	1.7	6.0	0.19	0.48	0.21	0.93	2.33	2.33	0.15	0.15			361	361	52
	5	0.6	44.6	3.3	25.4	1.9	10.4	0.9	13.45	13.45	1.08	7.42	0.53	0.53	0.53	0.71			225	757	63
	6	11.1	53.7					441.6	6.17	40.46	6.70	76.57	1.32	37.66	1.2	19.0					54
	7	4.3	4.3			0.3	0.3														3
	8	0.3	6.5	0.9	3.6	0.7	0.7	1.4			0.15	0.15	0.03	1.62	0.9	1.3					46
	9	29.4	1256.7	12.3	33.0	0.4	5.7	135.7			0.25	0.25	12.67	12.67	21.7	26.2					56
	10	1.1	47.3	3.3	24.7	1.6	12.4	2.5	0.60	0.90	3.03	6.37	0.50	0.50	0.3	1.9	89	89	170	742	67
	11	0.6	6.7	1.0	12.8	0.4	3.6	2.6	0.46	2.43	0.60	0.60	0.30	0.30	1.3	1.6					52
	12	12.9	354.1	3.4	12.2	0.4	4.4	29.0					7.70	7.70	15.5	15.5			762	762	49
Ketones	13	0.7	1.9	2.6	2.6	0.4	0.4		0.04	0.77	3.04	4.58							1564	1564	27
	14	6.0	338.4	4.5	24.3	3.4	4.2	7.8	0.39	93.23	0.99	3.41	21.4	290.2	0.3	271.5	25	25	109	4986	79
	15	0.1	0.6			0.1	0.1		0.21	1.26					0.32	0.32			1106	1106	33
	16																				2
	17								0.24	0.24											6
Alcohols, Glycols, GlycoEthers	18												0.44	0.44							2
	19								3.72	3.98	3.11	3.11									8
	20	2.1	2.1			0.5	0.5				1.75	4.46			0.6	2.0					13
	21																				0
	22																				2
	23																				0
	24																				2
	25																				2
	26	0.5	5.3			0.5	0.5	1.5	0.28	0.28	3.73	3.73	0.01	2.00	0.4	2.3					37
	27																				0
	28																				0
	29								230.7	230.7											3
	30			2.5	2.5	0.4	0.4										2694	2694			5
	31					7.5	7.5								64.1	64.1					5
Esters	32					1.3	1.3								4.2	4.2					5
	33	1.8	1.8			3.1	3.1														6
	34										0.87	0.87									3
	35					1.8	1.8										2235	2235	13415	15146	8
	36										44.90	44.90			418.7	418.7					11
Halo-Carbons	37								0.10	1.4	0.32	0.32									11
	38	0.25	28.6	0.43	0.89	0.12	0.12	0.04	0.08	0.5	0.36	0.89	0.003	0.08	0.05	2.77	6	48	145	191	71
	39	0.05	0.3	2.68	2.68	0.02	0.02		0.16	0.8	0.46	0.46			0.16	0.34	604	604			24
	40	1.35	1.4	0.28	0.28	0.42	0.42		0.17	0.2											16
Aliphatic Hydrocarbons	41	0.48	6.1	0.17	0.17	0.05	26.45		0.04	1.3					0.09	0.09	13	67750	649	649	40
	42	0.25	1.8	0.26	0.26	0.03	0.03		0.03	0.3							60	40481	385	385	30
	43	1.13	11.4	0.28	1.07	0.31	7.99	0.31	0.26	78433	1.58	2.71	0.01	0.38	0.09	8.5	9	334	1213	456853	84
	44	0.14	4.1	0.14	0.49	0.09	4.86	0.09	0.12	398	6.95	9.58	0.19	0.19	0.04	181.5	42	42	40	39882	86
	45	0.51	8.2	0.34	1.45	0.02	1.03	1.04	0.13	207			0.45	11.80	0.02	61.5			322	322	51
	46	0.07	0.3	0.15	0.29	0.05	0.05		0.07	1066	3.22	3.22	0.22	0.22	0.11	4.0	2070	2070			49
	47	0.18	2.3	0.43	0.45	0.07	5.34		0.05	0.6	0.16	0.16	2.46	2.46	0.02	0.0	170	634	805	805	60
	48	1.08	7.8	0.26	0.39	0.08	0.08	0.52	0.19	26322			3.50	3.50	0.03	1.3	9	9	3843	115166	65
	49	1.06	7.1	0.57	2.89	0.03	1.00	0.79	0.05	156.1			29.78	29.78	0.44	0.7	56	56	167	355	63
	50	0.14	1.4	0.28	0.39	0.07	0.08		0.05	10.2	19.85	19.85	0.08	0.08	0.07	35.2	22676	22676			57
	51	0.18	3.5	0.60	0.79	0.15	1.79	0.26	0.14	32.5	5.54	87.97			1.17	443.5	37809	37809			70
	52	0.07	1.2	0.19	0.22	0.05	0.28		0.41	40.1	14.56	64.77			0.17	496.0	3363	3363	49	49	63
	53	0.31	3.6	0.33	0.79	0.29	2.03	0.23	0.85	19536	2.99	8.11	0.10	0.10	0.05	8.42	20	134	79	271976	90
Aromatic Hydrocarbons	54	0.00	0.0			0.01	0.01		0.31	493	1.22	3.23			0.08	0.08			149	149	33
	55	0.02	0.4			0.01	0.01	0.02	0.04	4787	0.14	1.95	0.06	0.06	0.01	0.73	2	2	527	5375	65
	56	0.02	0.9			0.02	0.02	0.03	0.25	1215	0.49	0.65	0.05	0.05	0.06	1.88	8	8	1462	72255	68
	57	0.09	0.1			0.01	0.01	0.14	0.19	9571	0.28	0.29			0.03	0.93	3	3	752	27175	52
	58								0.05	74.6	1.03	19.08			0.19	0.19					21
	59	0.53	3.5	0.26	0.73	0.09	1.29	1.11	0.31	0.4	0.12	0.34	0.05	1.68	0.08	3.95	11	252	146	905	89
	60	0.01	0.5						0.12	6561	0.69	2.38	0.01	0.01	0.05	2.72			892	1049	57
	61	0.05	1.7			0.05	0.05	0.06	0.07	14202	1.14	2.55	0.04	0.04	0.03	4.44			2571	24232	68
	62	0.15	2.7	0.12	0.17	0.02	0.26	0.08	0.09	1942	0.28	0.44	0.002	0.12	0.05	0.12	3	3	601	2151650	83
	63	0.01	0.2			0.01	0.01	0.03	0.04	5023	0.23	0.33	0.02	0.02	0.02	1.18	2	2	956	21762	70
	64	0.26	3.9	0.50	0.54	0.09	2.38	0.10	0.19	1548	0.96	1.46	0.01	0.28	0.10	0.28	14	79	833	3521988	89
	65	0.06	2.3	0.34	0.37	0.06	1.64	0.10	0.13	514	0.66	1.00	0.002	0.10	0.05	0.13	10	48	572	2421367	84
	66	0.03	0.1	0.09	0.09	0.01	0.01		0.06	6218	0.09	0.09			0.04	0.19			31103	31103	41
	67	0.06	0.5			0.01	0.01		0.20	4790	0.13	0.17	0.06	0.06	0.02	0.39	3	3	543	12697	62
	68	0.13	1.3	0.05	0.09	0.03	0.28	0.94	0.03	291	0.21	0.23	0.01	0.20	0.04	0.11	5	5	151	4457281	86
	69	0.02	0.2	0.07	0.07	0.19	0.19		0.04	164.8	2.12	9.87	0.001	0.001	0.09	0.57	1	1	310	310	59
	70	0.03	0.7	2.82	34.10	0.38	211.6	0.05	0.06	1091.1	0.21	0.21	0.003	0.01					365	365	49
	71	0.08	1.1			0.02	0.02		0.16	16.7	0.44	0.66	0.06	0.06			43	43			40
	72	0.40	6.8	0.60	2.92	0.15	3.45	2.10	0.22	7.3	1.43	1.73	0.08	1.06	0.2	2.4	16	127	32	45800	97
Cyclo-Alkanes	73	0.19	0.2			2.62	2.62		0.30	1.3			1.70	2.54	322.2	322.2	1	372	2739	5446	27
	74								0.11	8334					0.7	0.7			305	45975	21
	75								509.0	509							11	11	1636	1851	19
	76	0.17	0.4						0.09	9564									859	54261	29
	77								2947.3	2947									774	19813	19
Terpenes	78	0.56	14.2	30.9	172.4	2322.5	2322.5	0.10	0.11	0.43			1.08	7.94					712	712	51
	79			6.2	14.8	222.0	222.0														6
	80	0.16	9.1	32.5	75.0	1152.9	1152.9	0.18					0.27	1.92							37
	81			0.1	3.9	113.2	113.2						0.0012	0.0012							11
	82	0.85	2.5	8.4	114.4	14.5	14.5	0.09					0.09	1.09							24
	83	0.03	1.2	3.5	29.7	512.3	512.3						0.17	0.32					1533	1533	35
	84	0.26	1.6	7.1	63.8	0.1	699.7	0.29	0.28	2.69	1.75	1.77	0.02	0.29					16649	16649	56
Other	85	6.39	112.5	1.6	5.0	0.1	0.1	0.67					4.35	4.35	0.1	0.1					37
	86														2.0	3.7					3
	87	18.9	460.3	11.9	23.3	37.4	141.1	178.6	1.74	9.65	2.66	3.01	0.81	3.88	0.8	39.7	65	65	445693	445693	59
	88	13.9	155.7												10.6	10.6					16
	89																				3
	90	3.2	3.2																		2

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANCIES
DOCUMENT NUMERISE AVEC LE CONSENTEMENT DE L'AUTEUR